

**На правах рукописи**

**ИВАНОВ Игорь Викторович**

**КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА  
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ  
В СОСТАВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА**

**Специальность 05.13.01 –  
«Системный анализ, управление и обработка информации»**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа 2007**

Работа выполнена  
в Уфимском государственном авиационном техническом университете

Научный руководитель: д-р техн. наук, проф.  
**КРЫМСКИЙ Виктор Григорьевич**

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.  
**СУЛТАНОВ Альберт Ханович**

канд. техн. наук  
**ВАХАПОВА Гульнара Мунировна**

Ведущая организация: Институт экологии  
Волжского бассейна РАН (г. Тольятти)

Защита состоится 26 октября 2007 г. в 10<sup>00</sup> часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 19 сентября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

В.В. Миронов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Наметившаяся в последние десятилетия неблагоприятная тенденция роста количества и масштабов последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера в Российской Федерации существенно сказывается как на экологической обстановке в различных регионах страны, так и на степени безопасности населения и территорий.

Отмеченный факт заставляет акцентировать внимание на проблемах управления безопасностью населения и территорий, что не представляется возможным без систем поддержки принятия решений на основе достоверной информации об уровне техногенного риска. Актуальность данной проблемы также отражена в Федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года».

Созданию методов оценивания риска и, в частности, алгоритмов ранжирования территорий по соответствующему признаку посвящены исследования и публикации многих отечественных ученых и специалистов – В.А. Акимова, Р.Н. Бахтизина, Г.М. Вахаповой, Ю.Л. Воробьева, В.Е. Гвоздева, А.И. Гражданкина, А.Н. Елохина, А.В. Измалкова, А.Ю. Кудрина, И.Р. Кузеева, В.В. Кульбы, В.И. Ларионова, Н.А. Махутова, Г.М. Нигметова, В.С. Сафонова, С.В. Павлова, А.С. Печеркина, Б.Е. Прусенко, М.И. Фалеева, Р.З. Хамитова, А.Н. Черноплекова, М.А. Шахраманьяна, А.А. Швыряева, И.У. Ямалова и других. Указанные задачи рассматриваются также в работах ряда зарубежных ученых, среди которых следует назвать Дж. Апостолакиса, Л. Госсенса, С. Гуаро, Р. Кука, Х. Кумамото, Ф. Лисса, В. Маршалла, Э. Пате-Корнель, О. Ренна, Э. Хенли, Ф. Юбера.

Тем не менее, круг нерешенных в этой области проблем еще достаточно широк. В частности, остается открытым вопрос о формировании универсальной модели, с помощью которой оказалось бы возможным оценивать риски для различных участков территорий с учетом полной совокупности воздействующих на обстановку объектов и связанных с ними опасных факторов.

Другая группа вопросов обусловлена тем, что оценивание уровня риска для территорий осуществляется в условиях неопределенности, которая в том числе носит характер неизвестности, неполноты и недостоверности исходных данных. Поиск решений при наличии неопределенности может быть реализован в рамках подходов, предложенных такими отечественными учеными и специалистами, как В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, В.Н. Ефанов, Г.Н. Зверев, Б.Г. Ильясов, О.И. Ларичев, И.А. Рябинин, Е.Д. Соложенцев, А.Х. Султанов, Р.И. Трухаев, а также зарубежными – Дж.А. Вильсоном, К. Генестом, Е.Т. Джейнсом, М. Джоини, Р.Т. Клеменом, Р. Куком, Дж.Р. Маккензи, Т. Рейли.

В то же время, в существующей практике отсутствуют методики определения результирующих показателей опасности (риска) с комплексным привлечением располагаемой информации, представленной и накопленными статистическими сведениями, и экспертными оценками.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность сформулированной темы исследования, направленного на разработку подхода к комплексному оцениванию уровней техногенного риска для территорий с целью их ранжирования по степеням опасности и организации поддержки принимаемых управленческих решений.

**Цель работы** – разработка методов и реализующих их алгоритмов, обеспечивающих комплексное оценивание уровней техногенного риска для территорий промышленного региона и осуществление их последующего ранжирования по этому признаку.

#### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Формирование обобщенной математической модели, позволяющей на основе комплексного использования имеющихся статистических данных и результатов экспертного оценивания производить определение уровней техногенного риска для участков территории промышленного региона с учетом совокупности воздействующих опасных факторов, которые, в свою очередь, обусловлены функционированием ряда объектов, а также взаимосвязи указанных факторов.

2. Разработка метода определения вероятности возникновения нештатной ситуации (первой компоненты риска) применительно к заданным участкам территории с использованием сформированной математической модели, которая дает возможность принимать во внимание статистические характеристики всех воздействующих опасных факторов и состояний объектов, влияющих на их возникновение.

3. Разработка метода определения меры тяжести потенциальных потерь от реализации различных сценариев нештатной ситуации (второй компоненты риска) применительно к заданным участкам территории на базе предложенного подхода к построению статистической модели оценивания последствий в условиях влияния совокупности взаимосвязанных факторов и неопределенности, относящейся к развитию ситуации.

4. Разработка методики ранжирования территорий по уровню техногенного риска с учетом его обеих компонент (вероятности неблагоприятных событий и тяжести ожидаемых последствий). Создание программных продуктов, реализующих компоненты подсистемы оценивания риска в составе системы стратегического управления безопасностью населения и территорий, а также исследование эффективности разработанных методов в процессе решения задач ранжирования территорий промышленного региона по степени техногенной опасности.

#### **Научная новизна**

1. На основе анализа влияния опасных факторов на участки территории сформирована математическая модель, позволяющая определить вероятность возникновения неблагоприятных событий (аварий, катастроф техногенного характера) на данном участке. Модель отличается тем, что ее построение базируется на применении вероятностных распределений особого типа – так называемых функций связки, или копул. При этом:

– свойства каждого опасного фактора описываются его частной функцией рас-

пределения вероятностей (маргиналом);

- взаимосвязь опасных факторов учитывается по результатам экспертного оценивания, представленным величинами парных ранговых корреляций Спирмена;

- при помощи аппарата вайнов предлагается восстанавливать неизвестные значения элементов полной корреляционной матрицы, что позволяет устранить противоречия, которые могут возникать при несогласованном задании корреляций различного порядка;

- получение плотности копулы производится с использованием принципа максимизации энтропии системы рассматриваемых случайных переменных, что уменьшает объем субъективной информации в итоговом решении.

2. Предложен метод определения вероятностей неблагоприятных событий в заданной точке территории. Метод предполагает использование отмеченной выше модели, сформированной с помощью аппаратов копул и вайнов. Новизна метода обуславливается применением нового подхода к алгоритмизированному построению многомерных функций распределения величин, характеризующих уровни опасных факторов.

3. Разработана процедура восстановления многомерной функции распределения показателей частных видов потенциальных последствий, а также алгоритм расчета осредненной категории тяжести указанных последствий. Новизна подхода определяется тем, что:

- в пространстве значений показателей тяжести последствий выделяются гиперпараллелепипеды, стороны которых задаются выбранными интервалами указанных значений по каждому показателю;

- вероятности попадания величин показателей в тот или иной гиперпараллелепипед находятся исходя из результатов восстановления многомерного распределения этих величин с помощью аппаратов копул и вайнов;

- после экспертного присвоения каждому из отмеченных гиперпараллелепипедов определенной категории тяжести последствий для всего диапазона варьирования значений показателей вычисляется осредненная категория, которая выступает далее в качестве обобщенной оценки второй компоненты риска.

4. На основе предложенных подходов к определению обеих компонент оценочной функции риска (вероятности неблагоприятных событий и меры тяжести потенциальных последствий) разработана методика двухкритериального ранжирования территорий по уровню техногенного риска.

Содержание методики отличается тем, что при ранжировании территорий применяется «принцип предосторожности» (приоритета значимости последствий по отношению к вероятности событий).

Следует подчеркнуть, что новизна всех основных результатов работы связана также с рациональным комплексным использованием как накопленных статистических данных, так и экспертных суждений.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

По результатам выполненных работ внедрены в Научно-исследовательском

институте безопасности и жизнедеятельности Республики Башкортостан:

– методика формирования показателей для оценивания риска применительно к территории, на которой расположен ряд потенциально опасных промышленных объектов;

– методика комплексного оценивания техногенного риска для указанных территорий;

– программы моделирования последствий техногенных аварий, а также систематизированного учета потенциально опасных объектов на заданной территории.

Отмеченные результаты используются при оценке риска, связанного с эксплуатацией объектов различного назначения (прежде всего, предприятий нефтехимического профиля) применительно к территориям в составе Республики Башкортостан. Использование отмеченных результатов позволяет на 20% сократить время, требуемое для выполнения расчетных работ.

#### **На защиту выносятся:**

1. Статистическая модель, характеризующая влияние потенциально опасных объектов (ПОО) и связанных с ними взаимосвязанных опасных факторов на показатели техногенного риска для территорий.

2. Метод и реализующие его алгоритмы определения вероятности неблагоприятных событий на заданном участке территории промышленного региона, учитывающие функции распределения вероятностей опасных факторов и их корреляции.

3. Метод и реализующие его алгоритмы определения меры тяжести последствий неблагоприятных событий, учитывающие функции распределения и корреляции частных видов потенциального ущерба, исходная информация о которых получена на основе экспертного оценивания и анализа статистических данных.

4. Методика ранжирования территорий промышленного региона по уровням техногенного риска на основе применения предложенных подходов к определению вероятностей неблагоприятных событий и оцениванию их последствий, а также с использованием «принципа предосторожности».

#### **Апробация работы и публикации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Технология и оборудование современного машиностроения», УГАТУ, г. Уфа, 1998; Международной молодежной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», УГАТУ, г. Уфа, 1999; Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Взаимоотношение общества и природы: история, современность и проблемы безопасности», ИрГТУ, г. Иркутск, 1999; Международной научно-технической конференции «Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и искусственного интеллекта», ВоГТУ, г. Вологда, 2001; II и III Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций», МЧС РФ, НИИБЖД, г. Уфа, 2001, 2002; Международной молодежной научно-

технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», УГАТУ, г.Уфа, 2001; Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», УГАТУ, г.Уфа, 2003.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 12 источниках, включая 1 статью в издании из перечня, утвержденного ВАК России («Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций»), 8 материалов докладов научных конференций и 3 программных продукта, зарегистрированных в РосАПО (Роспатенте).

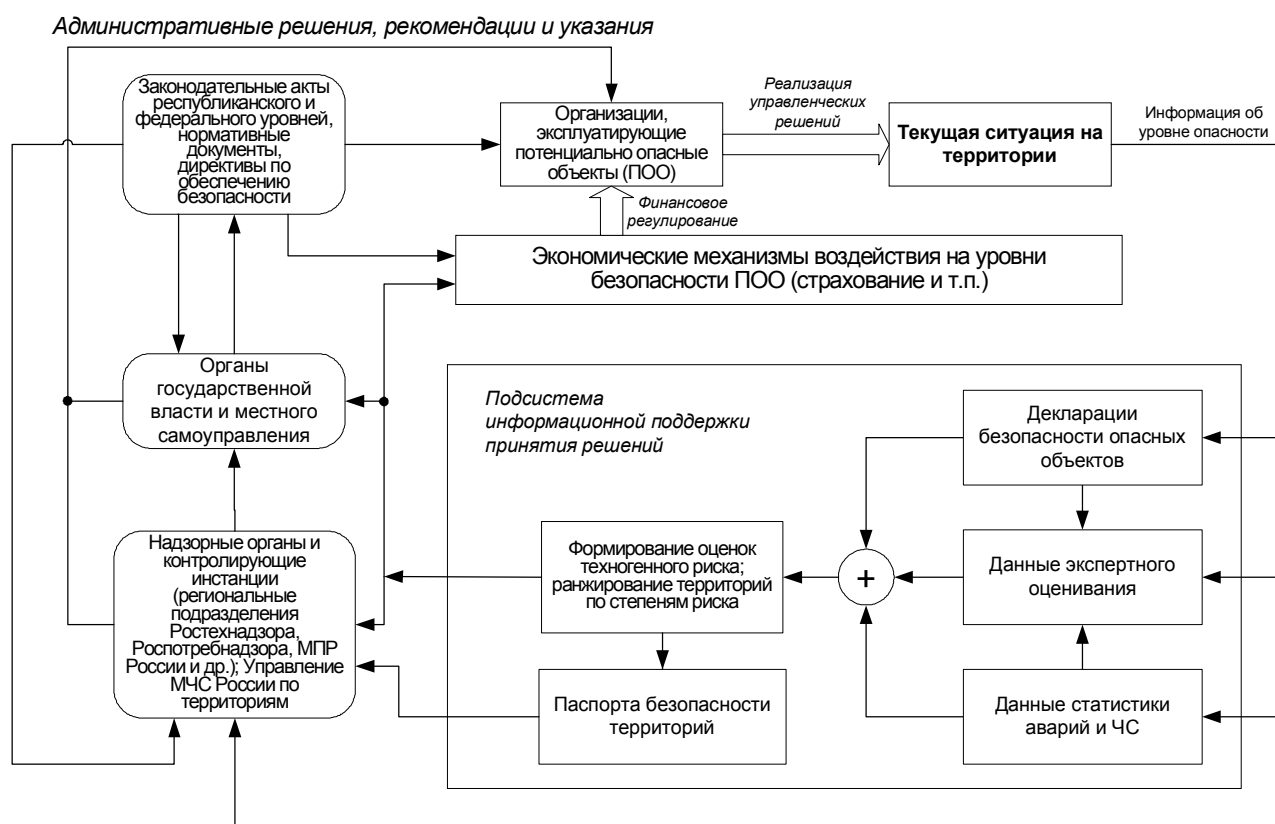
### Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из 162 страниц машинописного текста, включающего в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 102 наименований и одного приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее задачи, отмечаются новизна и практическая ценность результатов.

В **первой главе** выполнен сравнительный анализ существующих подходов к построению систем управления техногенной безопасностью в регионах. Рассмотрены показатели различных видов опасности, а также процедуры ранжирования территорий по уровню техногенного риска.



**Рисунок 1.** Организация стратегического управления уровнем техногенной безопасности для территорий промышленного региона

Проанализирована типовая структура системы стратегического управления уровнем техногенной безопасности территорий в составе промышленного региона (рис. 1). Принципы построения данной структуры основываются на методах системного анализа, показавших эффективность при проектировании сложных технических систем. Одним из основных компонентов рассматриваемой структуры является подсистема информационной поддержки принятия решений, алгоритмическое обеспечение которой должно предусматривать определение показателей риска для территорий и их ранжирование по степени потенциальной опасности.

Оценочная функция  $R$  риска для участка территории промышленного региона может быть представлена в виде

$$R = \{R_1, R_2\}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – компонента, учитывающая вероятности наступления неблагоприятных событий;  $R_2$  – характеристика тяжести соответствующих последствий.

Таким образом, для организации управления техногенной безопасностью необходимо сформировать процесс получения достоверных сведений о  $R_1, R_2$  в условиях неопределенности. С целью снижения ее влияния следует объединить всю располагаемую информацию, представленную как накопленной статистикой, так и экспертными оценками.

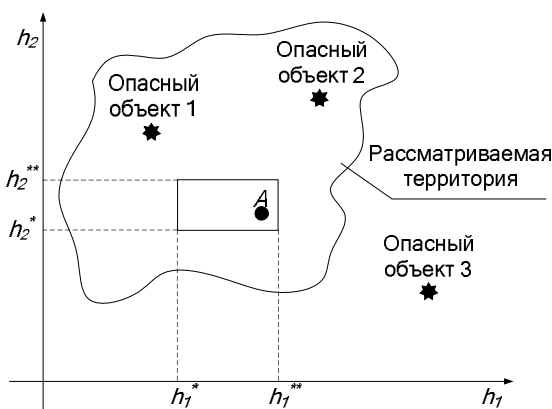
В заключительной части главы приведены основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена вопросам оценивания вероятности возникновения нештатной ситуации на рассматриваемом участке территории промышленного региона. Разработана модель, используемая для указанной цели и ориентированная на применение специализированных аппаратов копул и вайнов. Модель позволяет также комплексировать накопленные статистические данные и результаты экспертного оценивания.

Рассмотрим участок территории, который имеет прямоугольную форму со сторонами, заданными интервалами значений географических координат:

$$h_1^* \leq h_1 \leq h_1^{**}; \quad h_2^* \leq h_2 \leq h_2^{**}. \quad (2)$$

На произвольную точку  $A$  с координатами  $(h_1, h_2)$  в пределах этого участка могут воздействовать факторы, связанные с происшествиями на ряде опасных объектов. С целью определения значения вероятности создания неблагоприятной обстановки в точке  $A$  (рис. 2) осуществим следующую многоэтапную процедуру.



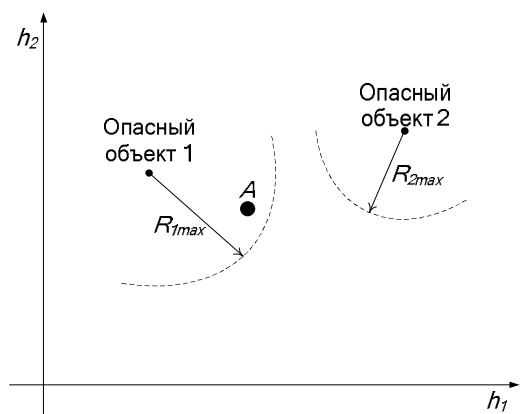
**Рисунок 2.** Задание участка территории

**Этап 1.** Составление предварительного перечня опасных объектов, которые могут оказать влияние на обстановку в выбранной точке территории.

**Этап 2.** Формирование полного списка видов опасных факторов, относящихся



к объектам из перечня, который был составлен на этапе 1.



**Рисунок 3.** Определение опасных объектов и связанных с ними факторов, влияющих на обстановку в точке  $A$

менной  $Z(i, j_r^i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $r = 1, 2, \dots, K_i$ ,  $j_r^i \in \{1, 2, \dots, K\}$ , где  $K = \max_i K_i$ .

Этап 4. Собственно формирование статистической модели, на основе которой оценивается вероятность возникновения той или иной ситуации в точке  $A$ .

Запишем транспонированный вектор случайных переменных  $X = \|X_1, X_2, \dots, X_\alpha\|^T$ , где  $X_1 = Z(1, j_1^1)$ ;  $X_2 = Z(1, j_2^1)$ ; ... ;  $X_{K_1} = Z(1, j_{K_1}^1)$ ;  $X_{K_1+1} = Z(2, j_1^2)$ ; ...  $X_{K_1+K_2} = Z(2, j_{K_2}^2)$ ; ... ;  $X_\alpha = Z(N, j_{K_N}^N)$ ;  $\alpha = \sum_{i=1}^N K_i$ .

В такой интерпретации искомую статистическую модель целесообразно представить функцией совместного распределения

$$F(x_1, x_2, \dots, x_\alpha) = \Pr(X_1 < x_1, X_2 < x_2, \dots, X_\alpha < x_\alpha). \quad (3)$$

В частности, если  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_\alpha^*$  представляют собой предельно допустимые значения рассматриваемых факторов, относящихся к выделенным объектам, то  $1 - F(x_1^*, x_2^*, \dots, x_\alpha^*)$  есть вероятность возникновения неблагоприятной обстановки в точке  $A$ . Таким образом, величина вероятностной компоненты риска составляет.

$$R_1 = 1 - \int_0^{x_1^*} \int_0^{x_2^*} \dots \int_0^{x_\alpha^*} \int_{h_1}^{h_1''} \int_{h_2}^{h_2''} f(x_1, \dots, x_\alpha, h_1, h_2) dx_1 dx_2 \dots dx_\alpha dh_1 dh_2. \quad (4)$$

Здесь  $f(x_1, \dots, x_\alpha, h_1, h_2)$  – плотность вероятности рассматриваемых переменных (факторов), которая в общем случае зависит от координат точки  $A$ .

Остановимся на задаче восстановления функций  $F(x_1, \dots, x_\alpha)$  или  $f(x_1, \dots, x_\alpha)$  применительно к фиксированному сочетанию  $h_1, h_2$  по исходной информации. Трудности, связанные с ее решением, обусловлены двумя особенностями:

- а) недостаточным объемом статистических данных;
- б) наличием взаимозависимости ряда переменных из общего набо-

ра  $X_1, X_2, \dots, X_\alpha$ .

Недостаточный объем располагаемой статистики может быть восполнен результатами экспертного оценивания частоты исходов при реализации опасных факторов. В итоге, основываясь на субъективных вероятностях и имеющихся статистических данных, можно получить частные функции распределения факторов (маргиналы)  $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_\alpha(x_\alpha)$ .

Зависимость опасных факторов друг от друга наиболее явно выражена применительно к одному и тому же объекту. Между тем, нередко взаимосвязанными оказываются и факторы, относящиеся к разным объектам (известный «эффект домино»). Для характеристики подобной взаимосвязи целесообразно применять коэффициенты ранговой корреляции Спирмена или Кендалла, при вычислении которых можно эффективно использовать минимальный объем исходной информации (в том числе, экспертные оценки).

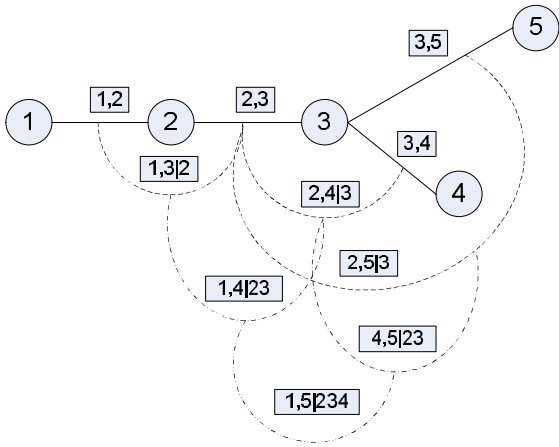
Если коэффициенты парной ранговой корреляции уровней факторов опасности найдены, а частные функции распределения этих величин (маргиналы) известны, то итоговая вероятностная модель может быть сформирована путем восстановления совместной функции распределения, которая, в свою очередь, должна соответствовать исходным данным о маргиналах и корреляциях. Для решения возникающей таким образом задачи оказывается чрезвычайно полезным аппарат функций связки взаимозависимых случайных переменных (копул).

Копула  $C(u_1, \dots, u_\alpha)$  представляет собой функцию маргиналов  $u_1 = F_1(x_1), \dots, u_\alpha = F_\alpha(x_\alpha)$ , которая определена в пространстве гиперкуба  $[0,1]^\alpha$ . В работах А. Склара показано, что многомерное распределение совокупности непрерывных переменных допускает единственное представление в виде копулы:

$$F(x_1, \dots, x_\alpha) = C(F_1(x_1), \dots, F_\alpha(x_\alpha)). \quad (5)$$

В диссертации предложена процедура построения копулы с целью оценивания вероятности превышения опасными факторами предельно допустимых значений, которая включает два этапа. На первом этапе решается задача получения маргинальных распределений для отдельных опасных факторов с привлечением накопленной статистики и результатов экспертного оценивания. На втором этапе рассчитывается плотность распределения для копулы на основе располагаемой информации о найденных маргиналах и зависимости случайных переменных. Ввиду сложности процедур обработки сведений о ранговых корреляциях при большом числе переменных (факторов) данный этап предлагается систематизировать за счет применения перспективного подхода – построения так называемых «вайнов». Понятие вайна, введенное в работах Р. Кука и Т. Бедфорда, является обобщением используемого в теории графов понятия дерева. Вайн для  $M$  переменных представляет собой вложенное множество деревьев, где ребра дерева  $j$  являются узлами дерева  $j+1$ , при этом  $j=1, \dots, M-2$ , и каждое дерево имеет максимальное количество ребер. Регулярный вайн для  $M$  переменных – это вайн, у которого каждая пара ребер дерева  $j$  соединяется ребром дерева  $j+1$  только в том случае, если эти исходные ребра соединяются с од-

ним и тем же узлом дерева  $j$ , где  $j=1, \dots, M-2$ . Таким образом, регулярный вайн для  $M$  переменных содержит следующее количество ребер:  $(M-1) + (M-2) + \dots + 1 = M(M-1)/2$ .



**Рисунок 4.** Регулярный вайн для 5 переменных

На рис. 4 изображен регулярный вайн для пяти переменных. Четыре вложенных дерева выделены различными способами изображения ребер. Так, дерево 1 обозначено сплошными линиями, дерево 2 – прерывистыми и т.д. При этом ребра представленного вложенного множества деревьев характеризуются значениями частных ранговых корреляций.

В диссертации показано, каким образом должно производиться построение вайнов для исследуемого набора опасных факторов исходя из ряда известных значений коэффициентов ранговой корреляции, полученных в процессе анализа накопленных статистических данных и результатов экспертного оценивания. С использованием построенного вайна восстанавливается полная корреляционная матрица, при определении элементов которой применяется, в частности, правило:

$$\rho_{12|3,\dots,\alpha} = \frac{\rho_{12|4,\dots,\alpha} - \rho_{13|4,\dots,\alpha} \cdot \rho_{23|4,\dots,\alpha}}{\sqrt{1 - \rho_{13|4,\dots,\alpha}^2} \sqrt{1 - \rho_{23|4,\dots,\alpha}^2}}, \quad (6)$$

где  $\rho_{12|3,\dots,\alpha}$  – частная корреляция  $X_1$  и  $X_2$  при условии задания  $X_3, \dots, X_\alpha$ , и т.д.

Формализация процедур получения ряда неизвестных элементов полной корреляционной матрицы по информации о заданных корреляциях позволяет избежать противоречий при описании зависимости переменных. Далее указанная матрица играет существенную роль в формировании ограничений, учитываемых при нахождении копулы.

Последующее определение копулы предлагается осуществлять следующим образом. Для плотности распределения, задаваемой указанной копулой (далее – плотности копулы), используется представление на основе кусочно-равномерной аппроксимации. При этом производится разбиение всей области определения копулы (гиперкуба  $[0,1]^\alpha$ ) на подобласти (гиперкубы со сторонами, соответствующими подинтервалам  $i_1, \dots, i_\alpha$  на отрезках  $[0,1]$ ) с последующей фиксацией постоянного значения  $P_{i_1 \dots i_\alpha}$  плотности копулы в пределах каждой подобласти  $I_{i_1, \dots, i_\alpha}$ :

$$I_{i_1 \dots i_\alpha} = \left\{ (u_1, \dots, u_j, \dots, u_\alpha) \mid u_j \in \left( \frac{i_j - 1}{m}, \frac{i_j}{m} \right] \forall j = (1, \dots, m) \right\} \forall i_1, \dots, i_\alpha = 1, \dots, m. \quad (7)$$

Здесь  $m$  – количество подинтервалов разбиения на каждом из отрезков  $[0,1]$  для переменных  $u_1, \dots, u_\alpha$ .

Кроме требования  $p_{i_1, \dots, i_\alpha} \geq 0$  при поиске постоянных значений плотности копулы в пределах выделенных гиперкубов должно выполняться ограничение

$$\sum_{i_2=1}^m \dots \sum_{i_\alpha=1}^m P_{j i_2 \dots i_\alpha} = \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_\alpha=1}^m P_{i_1 \dots j \dots i_\alpha} = \dots = \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_{\alpha-1}=1}^m P_{i_1 \dots i_{\alpha-1} j} = m^{\alpha-1}, \text{ где } j = 1, \dots, m, \quad (8)$$

которое необходимо для того, чтобы  $p_{i_1, \dots, i_\alpha}$  представляли собой значения плотности копулы с равномерными маргиналами.

Наконец, искомые значения плотностей должны соответствовать заданным величинам коэффициентов  $\rho_{jl}$  ранговой корреляции Спирмена для каждой из пар  $X_j, X_l$  случайных переменных, что с учетом кусочно-равномерной аппроксимации копулы сводится к соотношению

$$\rho_{jl} = \frac{3}{m^{\alpha+2}} \left\{ \sum_{i_j=1}^m \sum_{i_l=1}^m \left[ \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_\alpha=1}^m p_{i_1, \dots, i_j, \dots, i_l, \dots, i_\alpha} \right] (2i_j - 1)(2i_l - 1) \right\} - 3. \quad (9)$$

Задачу определения значений  $p_{i_1, \dots, i_\alpha}$ , удовлетворяющих совокупности указанных ограничений, в диссертации предлагается решать в рамках реализации принципа Гиббса – Джейнса максимизации энтропии. Последняя также выражается через величины плотностей копулы для выделенных гиперкубов. Данный подход позволяет повысить степень объективности получаемой формы математического описания свойств системы случайных переменных, что создает условия для более адекватной оценки ситуации и обеспечивает последующее принятие обоснованных управленческих решений.

В работе также выполнена ориентировочная оценка погрешности от использования кусочно-равномерной аппроксимации в случае восстановления двумерных нормальных распределений. Как показывают результаты моделирования, при определении вероятности отсутствия неблагоприятного события и количестве интервалов  $4 \leq m \leq 9$  эта ошибка составляет от 1 до 6%. Указанные значения можно признать приемлемыми.

Как отмечалось выше, найденная копула однозначно определяет многомерное распределение опасных факторов и, тем самым, обеспечивает вычисление вероятностной компоненты риска применительно к рассматриваемой точке территории.

**В третьей главе** работы исследована проблема оценки тяжести потенциальных последствий. Изложен метод восстановления многомерной функции распределения показателей тяжести последствий с использованием аппаратов копул и вайнов.

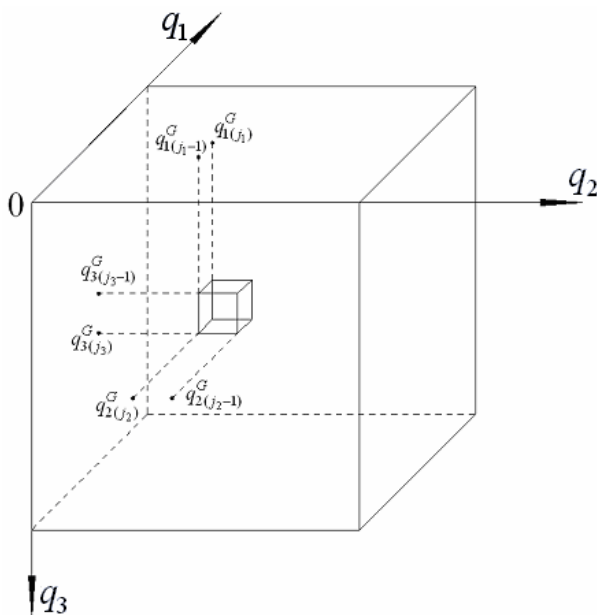
Известно, что тяжесть последствий от неблагоприятных событий (аварий, возникновения ЧС) может характеризоваться рядом показателей: количеством погибших, количеством пострадавших, величиной материального ущерба. В общем случае правомерно рассматривать  $n$  таких показателей  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ . Если  $G$  – событие, заключающееся в том, что в данной точке территории с координатами  $(h_1, h_2)$  (рис. 2)

возникает недопустимое сочетание опасных факторов, то набор  $\{P(G), Q_1|_G, Q_2|_G, \dots, Q_n|_G\}$  полностью характеризует риск в этой точке. Здесь  $P(G)$  – вероятность события  $G$  (первая компонента риска);  $Q_i|_G$  – потери (последствия)  $i$ -го вида при условии появления события  $G$ . Фактически  $Q_i|_G = q_i^G$  представляют собой случайные величины, которые при наступлении события  $G$  могут принимать те или иные значения в зависимости от непредсказуемых заранее обстоятельств: времени суток, относящегося к наступлению  $G$ , метеорологических условий, наличия либо отсутствия людей в зоне поражения и т.д. Кроме того,  $q_i^G$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , как правило, связаны между собой. На основании изложенного можно ввести в рассмотрение совместную функцию распределения  $F(q_1^G, q_2^G, \dots, q_n^G)$ , учет которой позволяет найти вероятность любого сочетания значений показателей тяжести последствий.

Данную функцию распределения аналогично тому, как это делалось в главе 2 при поиске значений вероятности события  $G$ , целесообразно представлять с помощью копулы:

$$F(q_1^G, q_2^G, \dots, q_n^G) = C(F_1(q_1^G), F_2(q_2^G), \dots, F_n(q_n^G)). \quad (10)$$

Если копула (10) как функция частных распределений величин  $q_i^G$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , восстановлена, то с ее помощью можно найти вероятности попадания значений показателей тяжести последствий в заданные интервалы.



**Рисунок 5. Выделение гиперпараллелепипедов в пространстве значений показателей тяжести последствий (случай трех показателей)**

В диссертации предлагается разбивать  $n$ -мерное пространство значений показателей на гиперпараллелепипеды (рис. 5), стороны которых заданы соотношениями:

$$q_{i(j_i-1)}^G \leq q_i^G \leq q_{i(j_i)}^G, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j_i = 1, 2, \dots, r. \quad (11)$$

Здесь  $q_{i(0)}^G$  – минимально возможное значение показателя тяжести последствий  $i$ -го вида;  $q_{i(m)}^G$  – максимально возможное значение этого показателя.

Учитывая, что плотность копулы позволяет формализовать представление информации о зависимости переменных  $q_i^G$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , вероятность попадания

значений совокупности показателей тяжести последствий в некоторый фиксированный гиперпараллелепипед из числа заданных соотношением (11) может быть представлена в следующем виде:

$$P(q_{1(j_1^*-1)}^G \leq q_1^G \leq q_{1(j_1^*)}^G, \dots, q_{n(j_n^*-1)}^G \leq q_n^G \leq q_{n(j_n^*)}^G) =$$

$$= \int_{q_{n,n}^{G*}}^{q_{n,n}^G} \cdots \int_{q_{1,j_1}^{G*}}^{q_{1,j_1}^G} c(F_1(q_1^G), \dots, F_n(q_n^G)) \cdot f_1(q_1^G) \cdot \dots \cdot f_n(q_n^G) dq_1^G \dots dq_n^G, \quad (12)$$

где  $j_i^*$  – выбранный номер интервала значений показателя  $i$ -го вида последствий, относящегося к рассматриваемому гиперпараллелепипеду.

Здесь  $f_i(q_i^G)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – плотности маргинальных распределений величин  $q_i^G$ , а  $c(F_1(q_1^G), \dots, F_n(q_n^G))$  – плотность соответствующей копулы. Ее вид можно задать, если определить семейство, к которому принадлежит восстанавливаемая копула. В рассматриваемом случае в качестве исходных данных выступают маргинальные распределения каждого из показателей тяжести потенциальных последствий, а также характеристики их взаимосвязи (например, в форме коэффициентов ранговой корреляции и элементов корреляционных матриц, полученных путем построения и анализа вайнов). Если сведения, позволяющие заранее произвести выбор семейства копул, отсутствуют, то необходимо использовать методику приближенного построения функции плотности копулы на основе ее кусочно-равномерной аппроксимации и поиска максимума энтропии.

Между тем, непосредственное ранжирование участков территории по степеням тяжести ожидаемых последствий затруднено многокритериальностью решаемой задачи (наличием совокупности соответствующих показателей, каждый из которых может возрастать или убывать в зависимости от характера события  $G$  при изменении географических координат  $h_1, h_2$ ). В диссертации предлагается производить присвоение каждому из выделенных гиперпараллелепипедов в пространстве величин показателей одной из десяти возможных категорий тяжести последствий. При этом десятая категория соответствует максимальным по тяжести последствиям, а первая – минимальным. Отмеченное присвоение категорий осуществляется экспертами. Задаваемые им вопросы строятся по принципу: «Если в случае реализации опасных факторов значения показателей тяжести последствий будут находиться в заданных фиксированных интервалах (11), то к какой категории тяжести последствий Вы отнесете данную ситуацию?»

Затем находится осредненное значение категории тяжести последствий при реализации опасных факторов, влияние которых распространяется на данную точку территории и может вызвать появление события  $G$ :

$$H^G(h_1, h_2) = \sum_{j=1}^{n \cdot r} P_j^G \cdot H_j^G. \quad (13)$$

Здесь  $P_j^G$  – вероятность попадания показателей потенциальных потерь в гиперпараллелепипед с номером  $j$ ,  $H_j^G$  – категория тяжести последствий, присвоенная гиперпараллелепипеду  $j$ ,  $j = 1, 2, \dots, nr$ .

В свою очередь, для участка территории  $h_1^* \leq h_1 \leq h_1^{**}$ ;  $h_2^* \leq h_2 \leq h_2^{**}$  опреде-

ление результирующей осредненной категории тяжести потенциальных последствий может быть представлено в следующем виде:

$$H_{yc} = \frac{1}{(h_1^{**} - h_1^*)(h_2^{**} - h_2^*)} \int_{h_1^*}^{h_1^{**}} \int_{h_2^*}^{h_2^{**}} H^G(h_1, h_2) dh_1 dh_2. \quad (14)$$

Это значение характеризует вторую компоненту риска.

В заключительной части главы рассматривается процедура получения частных функций распределения отдельных видов последствий на основе экспертного оценивания с применением квантильного подхода. Указанный подход предполагает формулирование экспертом заключений о величине выбранного показателя тяжести последствий применительно к заданной степени уверенности. После обработки полученных таким образом заключений экспертов формируется групповая оценка, учитывающая близость субъективных суждений к реальным данным.

**Четвертая глава** работы посвящена вопросам ранжирования территорий по уровню техногенного риска. Приведены расчеты показателей риска с использованием реальных данных для ряда участков территории Республики Башкортостан и последнее ранжирование этих участков с учетом выполненного анализа.

Реализация методов, изложенных в главах 2 и 3 диссертации, позволяет охарактеризовать уровень риска для каждого  $i$ -го участка территории ( $i=1, 2, \dots, L$ ) вектором  $R_i = (R_1^i, R_2^i)^T$ , где  $R_1^i$  – вероятность неблагоприятного события;  $R_2^i$  – осредненная категория тяжести последствий.

Для выявления участков территории с наибольшим уровнем риска необходимо применение процедуры двухкритериального ранжирования, реализовать которую предлагается на основе «принципа предосторожности». В соответствии с этим принципом считается, что вторая компонента векторной оценочной функции риска имеет приоритет по отношению к первой. Иными словами, участок территории, характеризующийся большим значением показателя (осредненной категории) тяжести последствий, рассматривается как потенциально более опасный даже при меньшей величине вероятности возникновения нештатной ситуации.

Предлагаемая процедура двухкритериального ранжирования участков территории и территорий в целом по степени потенциальной опасности позволяет детально проанализировать ситуацию и подготовить решения для двух основных задач:

- разработки и сопровождения оптимальной стратегии воздействия на потенциально опасные объекты, способные оказать влияние на данные участки территории, с целью уменьшения вероятности возникновения нештатной ситуации;
- определения требуемых сил и средств, которыми должны располагать службы ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с учетом их распределения по опасным объектам.

В заключительной части главы излагается материал о программных реализациях компонентов подсистемы информационной поддержки принятия решений для стратегического управления уровнем техногенной безопасности в Республике Баш-

кортостан. Данные программные продукты позволяют моделировать последствия в случае разливов нефти и нефтепродуктов на поверхности водоемов, а также оценивать потенциальную опасность техногенных объектов с учетом комплекса возможных сценариев развития нештатной ситуации на указанных объектах

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В **приложении** приводится пример визуализации результатов ранжирования шести участков территории промышленного региона по уровню техногенного риска.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. В работе предложена математическая модель, позволяющая определять уровни техногенного риска для участков территории промышленного региона с целью поддержки принятия решений при управлении безопасностью в указанном регионе. Модель предполагает построение многомерного совместного распределения величин, характеризующих влияние опасных факторов на те или иные точки территории. При этом предусматривается возможность учета взаимосвязей факторов. Реализующие представленную модель методы ориентированы на использование субъективных (экспертных) вероятностей и накопленных статистических данных, а также их комплексирование.

2. Разработан метод определения вероятности возникновения нештатной ситуации (первой компоненты риска) применительно к заданным участкам территории. Данный метод предполагает восстановление совместных функций распределения опасных факторов, оказывающих влияние на территории, на основе аппарата копул (связок) случайных переменных. При этом взаимосвязь факторов учитывается с помощью коэффициентов парных ранговых корреляций Спирмена, а полная матрица корреляций формируется на базе анализа специализированных структур – вайнов, что позволяет находить некоторые неизвестные значения элементов этой матрицы. Результирующий вид плотности вероятностей для копулы находится в процессе максимизации энтропии совокупности рассматриваемых величин (уровней опасных факторов), что обеспечивает уменьшение степени дополнительно вносимой в модель субъективной информации. Метод дает возможность принимать во внимание как накопленные статистические данные, так и результаты экспертного оценивания. Его применение повышает достоверность оценивания вероятностей возникновения нештатной ситуации на участках территории промышленного региона.

3. Разработан метод определения меры (осредненной категории) тяжести потенциальных последствий нештатных ситуаций на участках территории (второй компоненты риска), характеризующей возможность возникновения потерь нескольких видов (наличие погибших, пострадавших, материальный ущерб и т.д.). Данная мера формируется как математическое ожидание категории тяжести последствий с учетом того факта, что показатели отдельных (частных) видов потерь представляют собой зависимые случайные величины. В свою очередь, совместное распределение отмеченных показателей определяется путем построения соответствующей функции связ-



ки (копулы). Применение осредненной категории тяжести последствий обеспечивает возможность перехода от многокритериального ранжирования участков территории по масштабу ожидаемых последствий к их сопоставлению по скалярному критерию, что существенно облегчает принятие управленческих решений.

4. Разработан алгоритм двухкритериального ранжирования участков территории промышленного региона по уровню техногенного риска. Алгоритм ориентирован на применении «принципа предосторожности» и учитывает двумерную оценочную функцию риска, формируемую из ранее найденных компонент (вероятности возникновения нештатной ситуации на участке территории и осредненной категории тяжести последствий). На основе результатов ранжирования могут быть приняты управленческие решения по предотвращению возникновения нештатных ситуаций на участках территории промышленного региона, а также по подготовке к ликвидации ожидаемых последствий. Также предложены алгоритмы и разработаны программные средства, предназначенные для использования в подсистеме информационной поддержки принятия решений при стратегическом управлении безопасностью в промышленном регионе. Одно из указанных средств реализует модель распространения зон загрязнения в результате разлива нефти и нефтепродуктов на поверхности водоемов. Другой программный продукт представляет собой средство оценки уровня опасности техногенных объектов, учитывающее различные сценарии реализации ЧС на указанных объектах. Эти программные средства в совокупности с предложенными методами позволяют систематизировать ряд операций, связанных с анализом техногенного риска для участков территории промышленного региона.

Разработанные методики, алгоритмы и программы используются в Научно-исследовательском институте безопасности жизнедеятельности Республики Башкортостан. Они входят в комплекс средств, с помощью которых обеспечивается функционирование подсистемы информационной поддержки управленческих решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций на территории Республики Башкортостан.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ**

### ***В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Оценка вероятности реализации опасных факторов по отношению к определенным участкам территории: модель на основе связей (копул) / К.В. Балаба, И.В. Иванов, В.Г. Крымский // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М. : ВИНТИ, 2007, №1. С. 81–88.

### ***В других изданиях***

2. Система информационной поддержки управления уровнем безопасности технологического объекта / И.В. Иванов, А.С. Кузнецов // Технология и оборудование современного машиностроения : матер. докл. Всеросс. молодежн. науч.-техн. конф. - Уфа: УГАТУ, 1998. — С. 24.

3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №980413. Программа расчета потенциальной опасности промышленных объектов / И.В. Иванов, В.Г. Крымский, А.Р. Юнусов / М. : РосАПО, 1998.

4. Разделение участков территории промышленного региона по уровням потенциальной опасности / В.Ю. Брылин, И.В. Иванов, А.С. Кузнецов // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: матер. докл. междунар. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 1999. С.214.

5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №990439. Программа расчета показателей риска промышленных аварий / В.Ю. Брылин, И.В. Иванов, А.С. Кузнецов, В.Г. Крымский / М. : РосАПО, 1999.

6. Программные средства оценки уровня опасности промышленного объекта / И.В. Иванов, А.С. Кузнецов // Взаимоотношение общества и природы: история, современность и проблемы безопасности: матер. докл. Всеросс. студенч. науч.-практ. конф. Иркутск : ИрГТУ, 1999. С.32.

7. Информатизация поддержки принятия решений при управлении уровнем риска техногенных чрезвычайных ситуаций. / И.В. Иванов, А.С. Кузнецов // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и искусственного интеллекта: матер. междунар. науч.-техн. конф. Вологда : ВоГТУ, 2001. С.9–13.

8. Способ разделения участков территории промышленного региона по уровням потенциальной опасности. / И.В. Иванов, А.С. Кузнецов // Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: матер. II Всеросс. научн.-практ. конф. Уфа : НИИБЖД РБ, 2001. С.25–27.

9. Разработка программного обеспечения реестра опасных объектов на территории Республики Башкортостан / И.В. Иванов // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: матер. докл. междунар. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2001. С.257.

10. Реализация сводного реестра потенциально опасных объектов на территории Республики Башкортостан / И.В. Иванов, В.Г. Крымский, М.Ш. Магадеев // Проблемы прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: матер. III Всеросс. научн.-практ. конф. Уфа : НИИ БЖД РБ, 2002. С.13–15.

11. Реестр потенциально опасных объектов как средство поддержки принятия решений при управлении техногенной безопасностью. / И.В. Иванов // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: матер. Всеросс. молодеж. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Уфа : УГАТУ, 2003. С.208.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004610474. Программа моделирования распространения зон загрязнения водных объектов. / К.В. Балаба, И.В. Иванов, В.Г. Крымский, С.А. Митакович, С.В. Павлов, А.Ф. Тангатаров / М. : РосПатент, 2004.

ИВАНОВ Игорь Викторович

КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ В СОСТАВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО  
РЕГИОНА

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 18.09.2007      Формат 60x84 1/16  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.  
Усл.печ.л. 1,0. Усл.кр-отт. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 100 экз.

Заказ № 457

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа-центр, ул.К.Маркса, 12