

На правах рукописи



КОЖУХИН ИГОРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**Методы и алгоритмы построения базы знаний
комплексной интеллектуальной информационной системы
защиты от антропогенных частиц**

Специальность 05.13.01 –
«Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель: Кемайкин Валерий Константинович,
кандидат технических наук, доцент, врио
заведующего кафедрой
«Радиотехнические информационные
системы», ФГБОУ ВО ТвГТУ

Официальные
Оппоненты: Еремеев Александр Павлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладной
математики» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Тарасов Валерий Борисович,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Компьютерные системы
автоматизации производства» ФГБОУ ВО
«МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Ведущая организация: ФГУ "Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт
системных исследований Российской
академии наук"

Защита состоится «20» сентября 2019г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.262.06 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан «__» июля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема автономного функционирования многих промышленных объектов связана с угрозой воздействия на них антропогенных частиц (АЧ) – неуправляемых объектов техногенной природы. В космической отрасли возросла доля антропогенных частиц с размерами до 10 см, двигающихся с космической скоростью. Результаты столкновения с ними варьируются от образования кратеров и аберраций на оптических приборах и поверхности космических аппаратов (КА) до повреждения радиоэлектронной аппаратуры и разрушения элементов конструкции, что требует реализации своевременных и обоснованных решений по их защите. Возможности существующей системы предупреждения об опасных ситуациях в космосе ограничены по размерам наблюдаемых АЧ (более 10 см). Предложения по размещению аппаратуры на КА средств и алгоритмов обнаружения, обоснованные в рамках научно-исследовательской работы по тематике исследования, позволили своевременно обнаруживать и идентифицировать антропогенные частицы, что потребовало дальнейшего развития методов и средств обеспечения безопасности при автономном функционировании КА. Внедрение в современные промышленные образцы интеллектуальных программно-аппаратных комплексов, решающих в автоматическом режиме задачи обеспечения безопасности при угрозе воздействия АЧ является важной научно-практической задачей.

Использование комплексной интеллектуальной системы защиты дает возможность автоматически решать задачи прогнозирования результатов воздействия АЧ, оперативной оценки и подключение эффективного барьера безопасности, возникающие в условиях автономного функционирования КА.

Под барьером безопасности понимается функция, изделие, материал, программное обеспечение, действие оператора, целью которого является предотвращение, остановка или замедление развития опасной ситуации.

В диссертации решается научная задача разработки методики построения базы знаний (БЗ) КИС защиты от антропогенных частиц, обеспечивающей решение указанных задач при автономном функционировании КА.

База знаний рассматривается как информационно-аналитическое и вычислительное средство с программной реализацией совокупности сведений, относящихся к предметной области и формально представленной в виде, позволяющем проводить рассуждения.

Обоснована модель представления знаний, разработан алгоритм прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц, алгоритм обучения БЗ по прогнозированию результатов такого воздействия и алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности КА, составляющие содержание разрабатываемой методики БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц.

Актуальность диссертационной работы подтверждается актом внедрения полученных результатов в научно-производственный процесс АО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической

обороны».

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение живучести автономного функционирования КА путем разработки и внедрения методики построения базы знаний КИИС защиты от антропогенных частиц.

Объектом исследования является безопасность КА при воздействии антропогенных частиц.

Предметом исследования являются методы прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц, оценки и выбора барьера безопасности КА при угрозе столкновения.

Для достижения поставленной цели в исследовании решены следующие частные задачи:

- проведен анализ существующих средств и способов обнаружения объектов АЧ и управления КА при возможных столкновениях и сформулирована прагматическая проблема обеспечения безопасности КА в полете;

- проведен анализ известных методов оценки прогнозирования результатов воздействия АЧ и обеспечения безопасности КА в различных условиях обстановки. Обоснованы направления их дальнейшего совершенствования.

- сформулирована научная задача исследования по разработке методики построения БЗ КИИС на основе формализации процесса построения барьера безопасности КА с использованием математических моделей и алгоритмов прогнозирования результатов воздействия АЧ и оценки эффективности барьера КА в конкретных условиях обстановки;

- разработана модель знаний по обеспечению безопасности КА при возможном воздействии АЧ;

- разработана математическая модель и алгоритм прогнозирования результатов воздействия АЧ;

- разработан алгоритм обучения БЗ КИИС по прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ;

- разработана математическая модель и алгоритм оценки эффективности барьера безопасности КА с учетом складывающейся обстановки при воздействии АЧ;

- разработана методика построения БЗ КИИС защиты от АЧ;

- разработана программная реализация разработанных моделей и алгоритмов построения БЗ КИИС защиты от АЧ;

- проведены экспериментальные исследования предложенных алгоритмов с целью оценки достоверности получаемых результатов.

Научная задача исследования: разработать методику построения базы знаний КИИС по защите от антропогенных частиц, которая в составе модуля интеллектуального прогнозирования обеспечит автоматическое решение задач прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц (K_d), определение вероятности не повреждения КА ($R(K_d)$), а также оценки и выбора барьера безопасности КА (s^*) на всем множестве реализованных на борту мер по

безопасности КА (S) при ограничениях на требуемую надежность защиты ($R(s)$), располагаемое время (T_p) и затраты топлива (N_p) на реализацию выбранного барьера, а также позволяет проводить автоматическую настройку по изменениям в предметной области, связанными с различиями условий взаимодействия и новыми данными по результатам испытаний и столкновений в космосе:

$$Mt : s^* = \arg \max_{s \in S} K_s(s)$$

$$\begin{cases} R(s) \geq R(K_d) \\ T(s) \leq T_p \\ N(s) \leq N_p \end{cases}$$

где $K_s(s)$ -целевая функция защищенности КА от воздействия АЧ, аргументом которой рассматривается каждый из реализованных на борту барьеров безопасности. Физический смысл коэффициента защищенности K_s связан с оценкой эффективности барьера безопасности, порядок его вычисления определяется принципом слияния нечетких целей и ограничений (Беллмана-Заде) и включает автоматическое вычисление оценок параметров барьера безопасности (c_i), важности этих параметров (f_i) с учетом потенциальных возможностей барьера ($R(s)$, $T(s)$, $N(s)$) и условий взаимодействия ($R(K_d)$, T_p , N_p).

На защиту выносятся следующие **научные результаты**:

1. Модель представления знаний по обеспечению безопасности КА при воздействии антропогенных частиц.
2. Алгоритм прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц.
3. Алгоритм обучения БЗ прогнозированию условий и результатов воздействия антропогенных частиц.
4. Алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности КА при воздействии антропогенных частиц.
5. Методика построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц.
6. Программный комплекс, реализующий информационную модель процесса обеспечения безопасности КА и перечисленные алгоритмы.

Научная новизна заключается в разработке методики построения БЗ КИИС, позволяющей, в отличие от известных проводить ее автоматическую настройку на изменения в предметной области воздействия антропогенных частиц на КА, прогнозировать условия и результаты такого воздействия, а также автоматически оценивать эффективность и проводить выбор барьера безопасности КА с учетом условий обстановки, определяющих важность параметров барьера.

При этом в диссертационной работе:

1. Предложен нечеткий нейро-сетевой формализм представления знаний по обеспечению безопасности КА при воздействии АЧ, реализованный в виде нейро-нечеткой сети (НН-сеть). Модель реализована в базе знаний по прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ на КА и обладает интеллектуальными свойствами: она семантически устойчива, что позволяет

интерпретировать полученный результат и её возможно обучать (настраивать) на примерах, повышая качество прогноза. Указанные свойства определяются содержанием нечеткого логического вывода, реализованным в виде нейронной сети.

2. Разработан алгоритм обучения базы знаний по прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ на КА, на основе двойственной сети, которая настраивается по методу обратного распространения ошибки. При обучении базы знаний решается задача настройки синаптической карты специальной нейронной сети для прогнозирования результатов воздействия антропогенных частиц и настройки значений параметров входного слоя - для прогнозирования условий воздействия антропогенных частиц, приводящих к заданному критерию повреждения.

3. Разработан алгоритм оценки эффективности и выбора барьера безопасности на основе базы знаний важности параметров. Алгоритм включает автоматическое построение нечетких логических уравнений и расчет важности параметров барьера безопасности КА без участия человека оператора. Исходная оценка эффективности барьера проведена по принципу гарантированного результата при условии равновесности параметров барьера. В реальных условиях автоматически проводится уточнение оценки эффективности с учетом важности параметров барьера безопасности.

Достоверность научных результатов подтверждаются наличием экспериментальных исследований характеристик современных материалов КА, корректной и логичной постановкой частных задач исследования, использованием апробированного аппарата теории искусственного интеллекта, теории машинного обучения, теории оптимизации, принятыми допущениями и ограничениями, сходимостью полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными и непротиворечивостью фундаментальным положениям известных научных работ, получением частных решений, являющихся результатом применения ранее известных методик, выполненных при известных допущениях и ограничениях.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании и разработке методики построения БЗ КИИС, основанной на применении нечеткого нейро-сетевого формализма представления знаний в виде нейро-нечеткой сети, которая в режиме прямого распространения позволяет прогнозировать результат воздействия АЧ на КА и оценивать эффективность барьера безопасности; алгоритма обучения базы знаний КИИС по прогнозированию результатов воздействия АЧ на КА, реализующего механизм машинного обучения ННС. Алгоритм включает построение двойственной сети для исходной ННС и проведение её градиентного обучения в режиме нагруженного прямого и обратного функционирования, что позволяет настраивать внутренние связи ННС и прогнозировать условия на ее входе, соответствующие заданному критерию повреждения.

В совокупности, разработанные алгоритмы позволяют повысить обоснованность формируемых барьеров безопасности КА при возможном

воздействии АЧ, путем прогнозирования результатов воздействия и уточнения эффективности барьеров безопасности с учетом складывающейся обстановки.

Практическая ценность работы

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что разработанная методика, реализованная в составе аппаратно-программных комплексов КА, позволит в автоматическом режиме решать задачи обеспечения безопасности КА при воздействии АЧ, что повысит живучесть КА при автономном функционировании в условия возможного воздействия АЧ.

Применение результатов работы на производстве

Результаты диссертационной работы были успешно внедрены в научно-производственный процесс АО «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны», что подтверждено актом о внедрении.

Апробация и публикации результатов исследований

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ (в том числе 2 работы в журналах, входящих в перечень ВАК для кандидатских и докторских диссертаций, а также 2 публикации в изданиях, индексируемых в БД Scopus). Основные результаты работы докладывались на 4 научно-технических конференциях. Получено свидетельство о регистрации программного продукта.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, 4-х приложений. Список литературы содержит 97 наименований. Общий объем работы составляет 184 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы прагматическая цель и частные задачи исследования, научная новизна, содержатся сведения о практическом использовании научных результатов и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ теории и практики обеспечения безопасности космических аппаратов от воздействия антропогенных частиц в современных условиях. Он содержит:

- анализ существующей системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве по организации предупреждения о возможных воздействиях антропогенных частиц, прогнозирование его результатов и обеспечение безопасности КА;

- анализ возможностей технологии искусственного интеллекта при построении бортовых аппаратно-программных комплексов обеспечения безопасности КА.

Основными недостатками существующих средств обеспечения наблюдения и защиты КА от воздействия АЧ являются:

1. Ограничения по размерам объектов сопровождаемых и включенных в каталог Системы контроля космического пространства. Каталогизированные объекты имеют размеры более 10-30 см, в перспективе, к 2025 года – до 7 см.

2. Ограничения по времени подготовки и выдаче на борт команд и (или) программ управления для подключения барьера безопасности. Реализованные на борту аварийные программы срабатывают по логическому выводу результатов обработки контролируемых параметров технического состояния КА и призваны повысить безотказность КА. Защита от антропогенных частиц подключается по сигналу с Земли, задержка в выдаче команд управления по обнаруженным опасным АЧ составляет до 28,5 часов.

3. Ограничения по перечню применяемых барьеров безопасности при воздействии АЧ. Эффективных средств защиты от АЧ размером более 1 см практически нет. Единственной действенной мерой является выполнение маневра уклонения, который выполняется каждый раз, когда расстояние сближения с КА, менее заданного Δ , км, либо сближение на большее расстояние, но вероятность столкновения p_c большей порога p_{min} .

4. Барьеры безопасности, реализованные на КА в виде функций, изделий, материалов, программного обеспечения и т. д., созданные с целью предотвращения, остановки или замедления развития опасной ситуации не имеют механизма уточнения эффективности в сложившихся условиях при угрозе воздействия АЧ.

Исследования направлены на устранение указанных недостатков при разработке информационно-управляющих средств перспективных КА длительного автономного функционирования.

Существующий подход к прогнозированию воздействия АЧ основан на вычислении вероятности не повреждения КА в течение срока эксплуатации. Эта вероятность рассчитывается на основе модели космической среды и баллистических предельных зависимостей, устанавливающих связь между размером, скоростью и углом соударения частицы, удар которой приведет к потере работоспособности элемента КА.

Показано, что автоматическое решение задачи с применением аналитических и статистических моделей затруднено необходимостью постоянного уточнения входящих коэффициентов, отражающих физику процесса соударения частицы со стенкой КА. Для их построения нужно большое количество статистической информации по многим взаимосвязанным факторам, которая не всегда имеется в наличии или статистически неустойчива. Это приводит к большим погрешностям вычислений. Известно, что погрешность при прогнозировании для различных материалов составляет до 25%.

Применение методов искусственного интеллекта и разработка комплексной интеллектуальной информационной системы рассматривается возможным решением задачи для автономного функционирования КА. Центральным вопросом является разработка базы знаний КИИС. Проведен анализ известных моделей представления знаний и способов построения БЗ КИИС. Выявлены недостатки существующих подходов, предложен подход, основанный на совместном применении методов интеллектуального анализа данных и лингвистической аппроксимации при построении БЗ. Сформулирована научная задача исследования.

Во второй главе изложено содержание полученных результатов

исследования. Представлено описание модели знаний и алгоритмы: прогнозирования результатов воздействия АЧ, обучения БЗ прогнозированию условий и результатов воздействия АЧ, оценки эффективности и выбора барьера безопасности КА от воздействия АЧ, которые составляют содержание разработанной методики построения базы знаний КИИС защиты от антропогенных частиц.

В качестве модели знаний предложен нечеткий нейро-сетевой формализм, представленный в виде нейро-нечеткой сети (НН-сети).

В НН-сети решается задача прогнозирования результата воздействия АЧ. Структура ННС представлена на рис. 2.

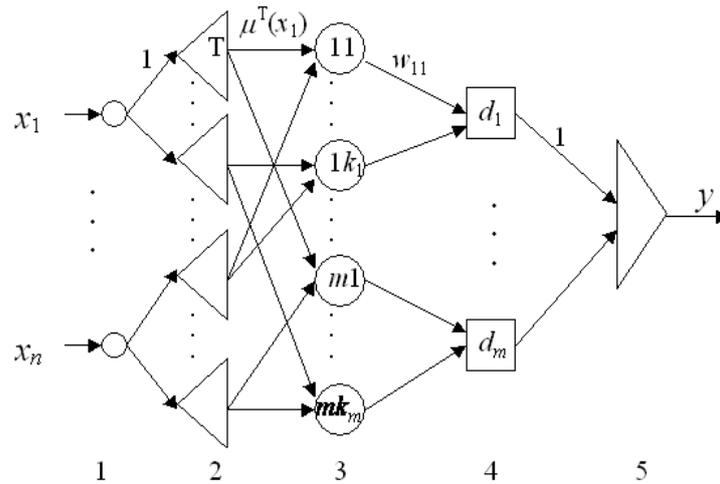


Рис.1- Структура НН-сети прогнозирования результатов воздействия антропогенный частиц

Число узлов в НН-сети определяется так:

- слой 1 - по количеству входных параметров;
- слой 2 - по количеству термов для параметров в базе знаний;
- слой 3 - по количеству правил в базе знаний;
- слой 4 - по количеству выделенных критериев повреждения;
- слой 5 – слой формирующий ошибку прогноза.

Дуги графа взвешиваются следующим образом:

- единицей - дуги между 1-м и 2-м слоями;
- функциями принадлежности входа к нечеткому терму - дуги между 2-м и 3-м слоями;
- весами правил - дуги между 3-м и 4-м слоями
- единицей - дуги между 4-м и 5-м слоями.

В качестве показателя прогноза воздействия АЧ выбран коэффициент истинности критерия повреждения d_j (K_d), вычисляемый в слое 4:

$$K_d = \max_{j=1,m} \left\{ \mu^{d_j} (x_1, x_2, \dots, x_n) \right\} = \max_{j=1,m} \left\{ \max_{p=1,k_j} \left\{ w^{jp} \min_{i=1,n} \left(\mu^{a_i^{jp}} (x_i) \right) \right\} \right\}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$$

Показатель рассчитывается на основе композиционного правила Заде - если известно нечеткое отношение между входной и выходной переменными, то при нечетком значении входной переменной, нечеткое значение выходной переменной определяется на основе максиминой композиции входной

переменной и известного отношения. При прогнозе результата воздействия используется идея определения лингвистического термина критерия повреждения по максимуму функции принадлежности, и обобщение этой идеи на всю базу знаний.

Для функции принадлежности параметров x выбрана двухпараметрическая форма, удобная для дальнейшей настройки:

$$\mu^j(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - b_j}{c_j}\right)^2}$$

где b_j и c_j – параметры функции принадлежности – координата максимума и коэффициент концентрации.

Обучение ННС проводится методом обратного распространения ошибки с использованием двойственной сети, которая представлена на рисунке 2.

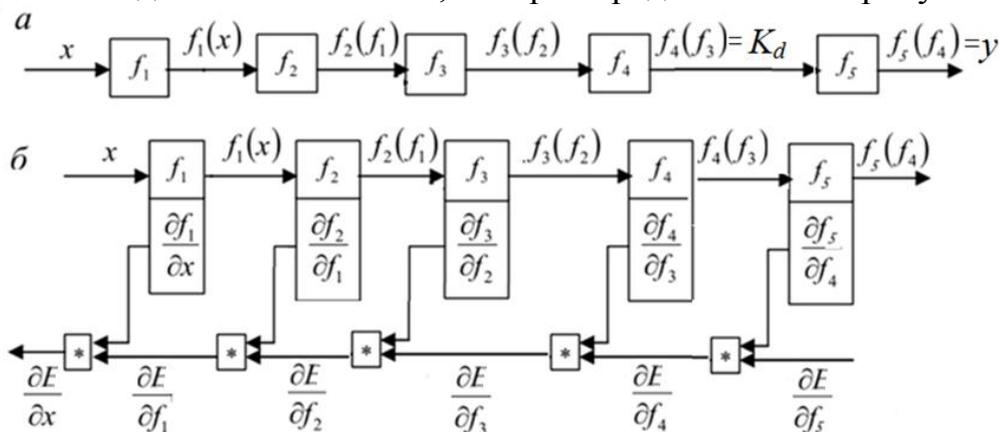


Рис.2- Структура и режимы функционирования двойственной сети:

а - прямое функционирование сети,

б - прямое нагруженное и обратное функционирование сети.

Для настройки использована функциональная зависимость на выходе ННС, которая определяет значение ошибки:

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m d_j \left[\sum_{p=1}^l \left(w_p \cdot \left(\prod_{i=1}^n \mu^T(x_i) \right) \right) \right]_p}{\sum_{j=1}^m \left[\sum_{p=1}^l \left(w_p \cdot \left(\prod_{i=1}^n \mu^T(x_i) \right) \right) \right]_p}$$

Отличительной особенностью алгоритма является то, что метод обратного распространения ошибки при обучении ННС последовательно применяется в два этапа:

1. Для подстройки параметров сети при модификации её синаптического пространства, что позволяет настроить БЗ по имеющимся примерам. Для настройки используется система рекуррентных соотношений:

$$w_{jp}(t+1) = w_{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial w_{jp}(t)}; \quad c_i^{jp}(t+1) = c_i^{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial c_i^{jp}(t)};$$

$$b_i^{jp}(t+1) = b_i^{jp}(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial b_i^{jp}(t)}.$$

2. Для подстройки входного вектора, через градиент функции ошибки по входным параметрам сети, что позволяет подбирать на входе сети новые сочетания значений параметров (примеры), для которых остается истинным выбранный критерий повреждения. Для настройки используется система рекуррентных соотношений:

$$x_i(t+1) = x_i(t) - h \frac{\partial E_t}{\partial x_i(t)},$$

при заданном критерии минимизации ошибки на выходе:

$$E_t = \frac{1}{2} (\hat{y}_t - y_t)^2,$$

где: \hat{y}_t и y_t - теоретический и экспериментальный выходы сети на t-м шаге обучения, $x_i, w_{jp}, c_i^{jp}, b_i^{jp}$ - значения входных параметров, весов правил и параметров функций принадлежности на t-м шаге обучения, h - параметр обучения.

Таким образом, обучение БЗ заключается в построении матрицы, которая, удовлетворяя ограничениям на диапазоны изменения входных параметров (X), параметров нейро-нечеткой сети (W,B,C) и количество строк-правил, обеспечивает по всем примерам из обучающей выборки последовательное выполнение критериев:

1. $\sum_{p=1}^M [\mu^{d_j}(X_p, W, B, C) - \mu^{d_j p}]^2 = \min_{W, B, C}$ - обучение синаптической карты НН-сети
2. $\sum_{p=1}^M [\mu^{d_j}(X, W_p, B_p, C_p) - \mu^{d_j p}]^2 = \min_X$ - обучение параметров на входе НН-сети

Другой задачей является оценка эффективности и выбор барьера безопасности содержание которой состоит в том, чтобы упорядочить барьеры из множества $S = \{s_v\}$ по параметрам оценки из множества $C = \{c_i\}$ учетом их важности $F = \{f_i\}$ при обнаружении опасного АЧ в автоматическом режиме.

Базируясь на принципе Беллмана-Заде, лучший барьер имеет наибольшую гарантированную оценку по выбранным показателям эффективности: $c1$ -оперативность, $c2$ -экономичность, $c3$ -надежность (результативность) барьера. Оценка эффективности определяется в виде их пересечения. Учитывая то, что в теории нечетких множеств операция пересечения соответствует \min , расчетное соотношение для коэффициента безопасности при заблаговременной оценке, т.е. равновесных критериях имеет вид:

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_1)}{s_1}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_2)}{s_2}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_v)}{s_v} \right\}$$

Для учета условий обстановки, определяемых временными, вещественными и вероятностными характеристиками возможного столкновения вводятся коэффициенты важности (ранги) параметров оценки. Расчет важности параметров $F=\{f_l\}$ в известных работах проводится с использованием экспертного оценивания, а в разработанном алгоритме она оценивается непосредственно на борту КА. Для этого с использованием разработанной БЗ важности параметров, рассчитываются значения важности параметров и с их помощью уточняется эффективность барьера. Расчет важности проводится без участия человека-оператора.

Полученные значения f_l являются показателями степени для значений оценок параметров способа и выступают коэффициентами концентрации нечетких множеств. С учетом важности параметров уточняется эффективность способов защиты КА и коэффициент безопасности примет вид:

$$K_s = \left\{ \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_1)^{f_l}}{s_1}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_2)^{f_l}}{s_2}, \frac{\min_{l=1..3} \mu^l(s_v)^{f_l}}{s_v} \right\}$$

Совокупность рассмотренных алгоритмов составляет содержание методики построения БЗ КИИС (рис.3), которая обеспечивает введение основных формализмов, для прогнозирования результатов воздействия объектов АЧ и оценки эффективности барьеров безопасности на всем множестве альтернативным барьеров безопасности, а также проведение в автоматическом режиме обучения базы знаний для учета изменений в предметной области (условий воздействия АЧ и важности параметров барьера безопасности КА).

В третьей главе для подтверждения теоретических положений работы проведено экспериментальное исследование, в котором можно выделить два этапа.

На первом этапе разработана программная реализация методики построения БЗ КИИС;

На втором этапе проведена оценка результатов, полученных с использованием прототипа КИИС.

Система состоит из двух основных частей: программной среды, позволяющей проводить построение базы знаний в выбранной предметной области, и собственно модуля интеллектуального прогнозирования, который является конечным продуктом. Структура системы изображена на рис. 4.

Блок модификации правил и дерева вывода содержит экранные формы, необходимые для модификации БЗ: внесение изменений в структуру дерева логического вывода, нечеткие правила и функции принадлежности. Это основной блок среды разработки нечеткой базы знаний.

Блок моделирования используется для получения графиков и поверхностей, отражающих выходную зависимость от одного или двух контролируемых параметров. Цель моделирования состоит в исследовании объекта в

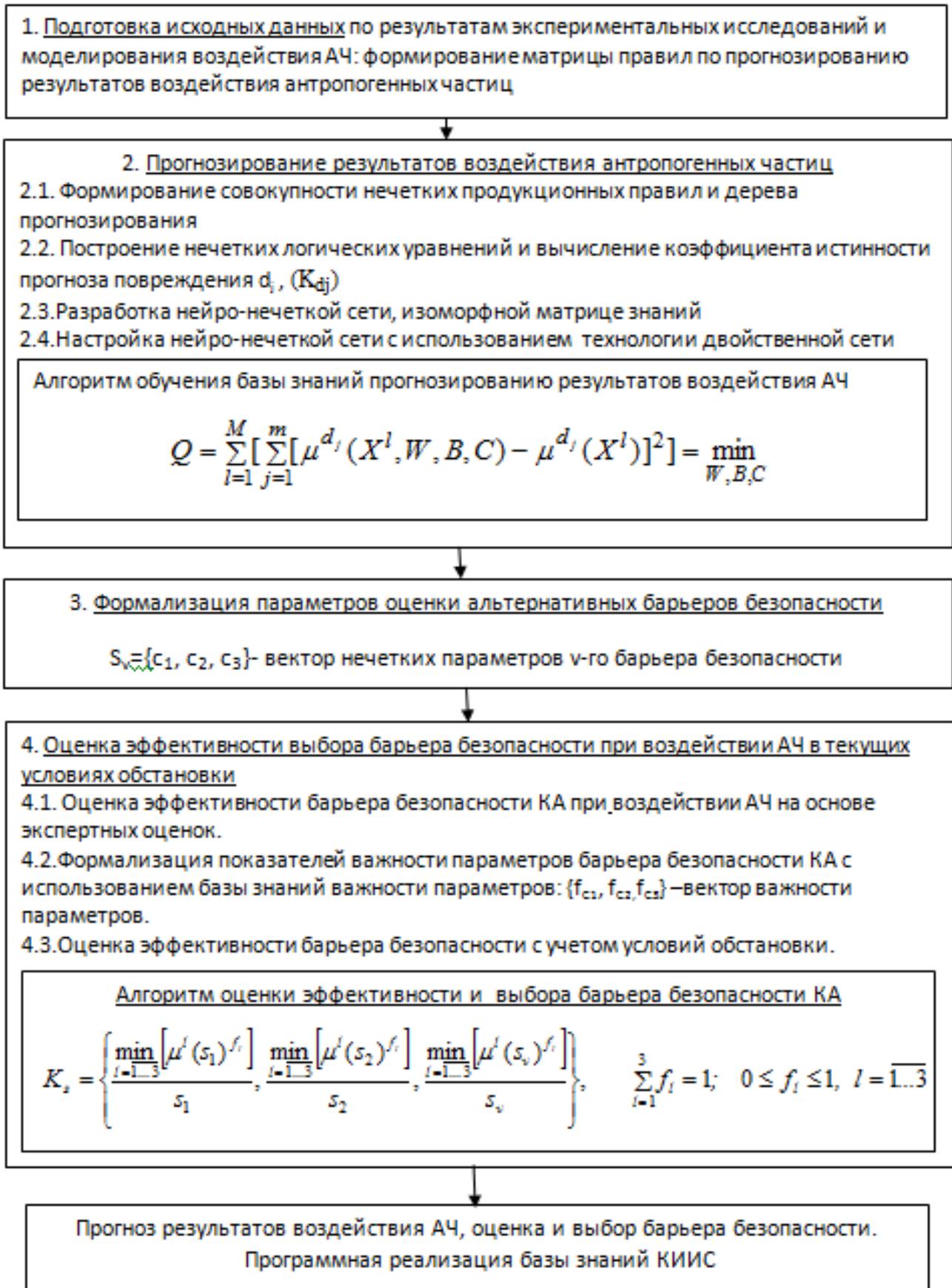


Рис.3. Структурная схема методики построения БЗ КИИС защиты от антропогенных частиц

различных областях факторного пространства.

Блок настройки предназначен для решения задач обучения модели знаний с целью повышения качества прогноза.

Блок тестирования БЗ КИИС предназначен формирования контрольной выборки и оценки качества результатов прогнозирования повреждений КА в точках тестирующей выборки.

Блок документирования осуществляет выдачу информации о построенной БЗ в виде, удобном для разработчика КИИС.

Библиотека БЗ КИИС используется для хранения построенных БЗ на различных этапах их разработки (до настройки и после обучения).

Библиотека функций принадлежности представлена колоколообразной (с параметрами b и c) моделью функции принадлежности. Имеется возможность расширить набор трапециевидными, треугольными и экспоненциальными формами.

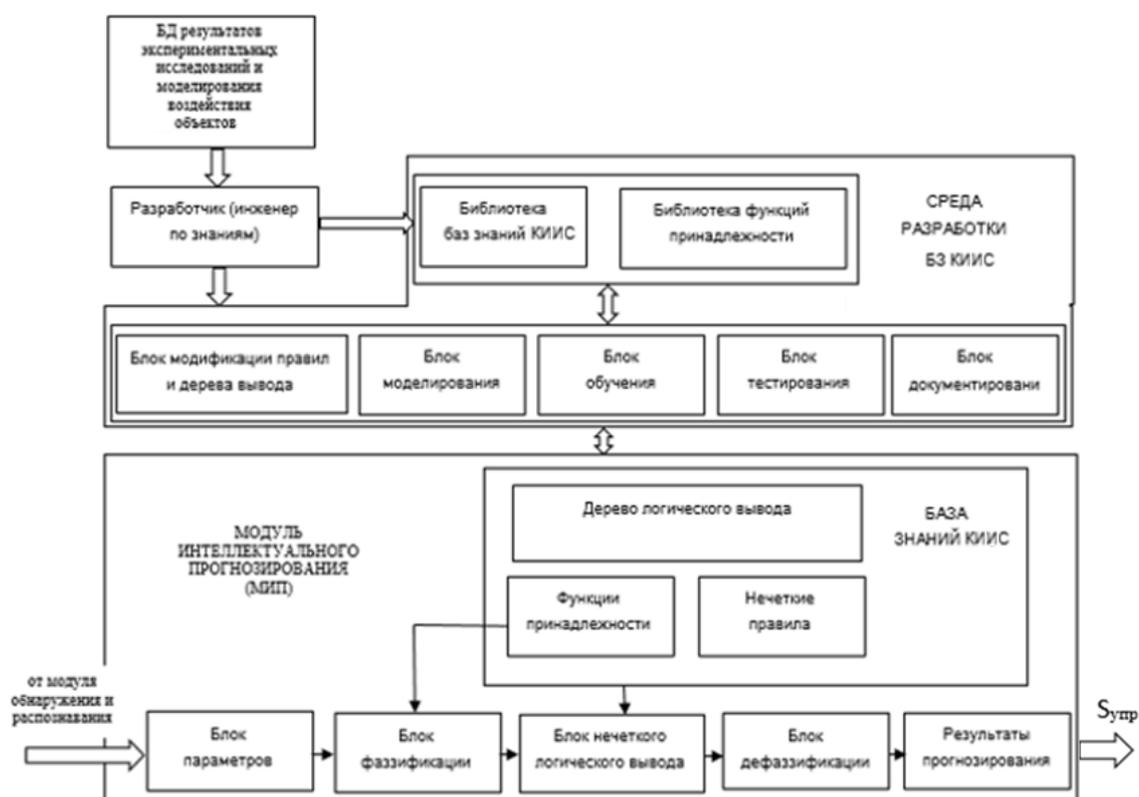


Рис. 4 - Структура системы «Блиц»

Проведение экспериментов и моделирования позволили сформировать 13 прагматически важных параметров, которые представлены в виде лингвистических переменных, определены диапазоны их изменения. Используя экспериментальные данные и результаты моделирования, были составлены матрицы знаний, а затем построена и решена система нечетких логических уравнений. Получены результаты по каждому критерию повреждения: $\mu^{d1}(d)=0,32$, $\mu^{d2}(d)=0,39$, $\mu^{d3}(d)=0,79$, $\mu^{d4}(d)=0,76$.

Поскольку наибольшее значение функции принадлежности соответствует критерию пробоя стенки, то наиболее возможным результатом воздействия АЧ на КА является пробитие стенки КА.

Для оценки эффективности и выбора барьера безопасности рассмотрено ограниченное множество альтернативных барьеров, сведенных в таблицу 1.

Таблица 1- Множество барьеров безопасности КА

Барьер	Содержание барьера
s1	Выполнение маневра по уклонению (аварийной программы по подъему высоты перигея орбиты на 40 км).
s2	Развертывание в направлении налетающего АЧ защитного экрана.
s3	Переход КА в дежурный режим (постоянной солнечной ориентации).

Показатель эффективности барьеров безопасности при равновесных критериях и с учетом их важности (неравновесных) составил соответственно,

$$K_{s \text{ рав.}} = \left\{ \frac{0,125}{s1}, \frac{0,16}{s2}, \frac{0,08}{s3} \right\}, \quad K_{s \text{ нерав.}} = \left\{ \frac{0,55}{s1}, \frac{0,41}{s2}, \frac{0,29}{s3} \right\},$$

что характеризует эффективность барьера с учетом условий обстановки, определяемых располагаемым и требуемым запасом топлива и временем, а также требованиями по результативности (надежности) защиты КА.

Для оценки качества прогнозирования сформирована выборка контрольных примеров в виде результатов стендовых испытаний, проведено моделирование по входным параметрам контрольной выборки и на основе полученных результатов получены оценки вероятности безошибочного прогнозирования, вероятности принятия ошибочного прогнозирования и средненную вероятность безошибочного прогнозирования.

Динамика и результаты обучения БЗ по 30 примерам представлены на рис. 5. Достоверность результатов прогноза определялась на основе оценки вероятности безошибочного прогнозирования по частоте: доверительный интервал [0,776;0,944] с вероятностью 0,95 определяет результат безошибочного прогнозирования результата воздействия АЧ в решаемой задаче.

Структурно-логическая схема выживаемости КА с использованием КИИС представлена на рисунке 6. На ней рассмотрены возможные пути выживаемости КА, которые включают события:

- обн.- обнаружение АЧ, с которым возможно столкновение;
- ув. – проведение маневра уклонения с АЧ (увод от столкновения);
- прог. – прогноз результата воздействия АЧ;
- бар. – применение активного барьера безопасности, обеспечивающего эффективную защиту с учетом складывающейся обстановки;
- ж.– использование пассивной защиты, обеспечивающей выживаемость КА при попадании АЧ.

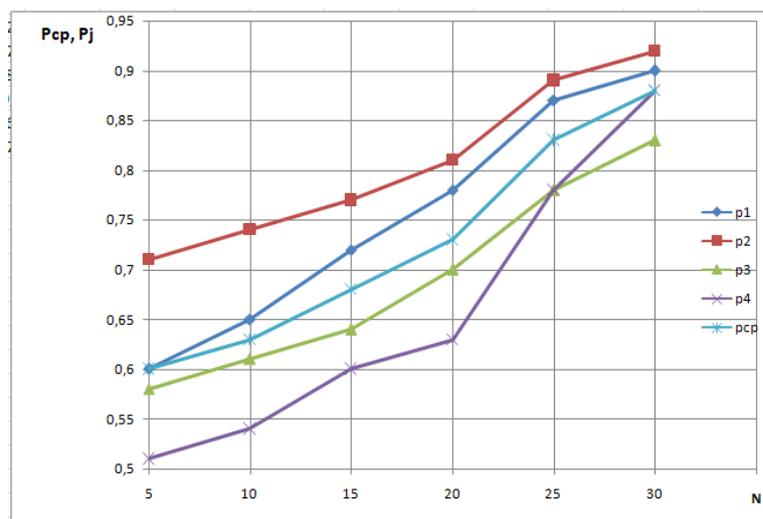


Рис. 5 – Результаты обучения БЗ КИИС

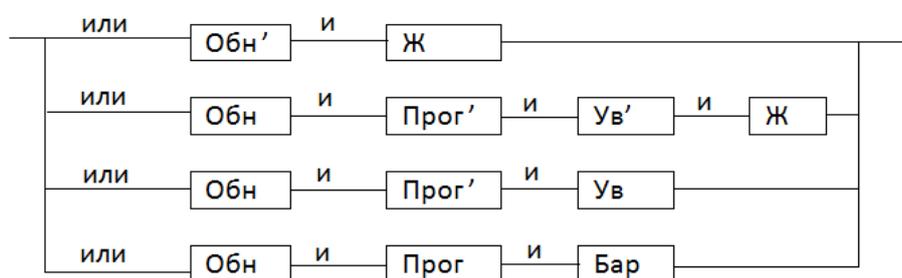


Рис.6- Структурно-логическая схема выживаемости КА

При исходной вероятности выживаемости КА, определяемой только пассивной защитой, которая составляет 0,1, с использованием КИИС указанная вероятность увеличивается до 0,557.

В **Заключение** диссертационной работы сформулированы основные научные результаты и выводы.

Основные результаты работы

В диссертации решена новая научная задача, связанная с развитием и совершенствованием методов построения интеллектуальных систем, обеспечивающих живучесть автономного функционирования космических средств в условиях возможного воздействия АЧ. Разработана методика построения БЗ системы защиты от АЧ, применяемой для прогнозирования результатов воздействия АЧ и автоматического формирования барьера безопасности, с учетом условий обстановки.

Получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана модель знаний по обеспечению безопасности КА от воздействия АЧ. Множество ситуаций (состояний, определяемых параметрами взаимного положения и движения КА и АЧ) при возможном столкновении структурировано на основе матрицы знаний с использованием нечетких параметров состояния и возможных барьеров безопасности. На основе анализа известных моделей знаний определено, что для построения модели знаний по обеспечению безопасности КА, целесообразно использовать гибридный нечеткий нейро-сетевой формализм представления знаний. Разработана

нейро-нечеткая сеть, сочетающая в себе достоинства нечетких множеств и нейронных сетей.

Отличительной особенностью модели знаний, является:

- использование лингвистических переменных с ограниченными терм множествами значений для описания параметров взаимного положения и движения КА и АЧ;

- разработанная ННС, изоморфна совокупности сформулированных правил прогнозирования, позволяет использовать экспериментальные данные, высказывания экспертов по прогнозированию результатов воздействия АЧ и проводить в автоматическом режиме обучение БЗ.

2. Методика построения БЗ КИИС защиты от АЧ, которая в отличие от известных имеет новый показатель, порядок его вычисления и новые элементы структуры: алгоритм обучения БЗ прогнозированию результатов воздействия АЧ на КА и алгоритм оценки эффективности барьера безопасности с автоматической оценкой и учетом важности параметров.

3. Алгоритм обучения БЗ прогнозированию результатов воздействия АЧ, который включает построение и градиентное обучение сети, двойственной для исходной НН-сети. Применение алгоритма позволило автоматически проводить обучение БЗ по примерам результатов воздействия АЧ и генерировать различные ситуации, определяемые сочетаниями входных параметров, отличных от известных примеров, применительно к рассматриваемым критериям повреждения.

4. Проведено описание барьера безопасности на основе задания параметров оценки оперативность, экономичность, реализуемость (надежность) и их важности. Параметры барьера и их важность представлены нечеткими множествами с использованием алгоритма построения функций принадлежности на основе модифицированного метода Саати, в котором нет процедуры решения характеристических уравнений матрицы парных сравнений.

5. В известных работах выбор барьера проводится на основе заблаговременной оценки эффективности известных способов. При этом возникает существенное ограничение «барьерного» (вариантного) подхода связанное с возможными отличиями прогнозируемых и текущих условий обстановки. Разработан алгоритм оценки эффективности барьера безопасности, который в отличие от известных позволяет учитывать условия обстановки и проводить оценку непосредственно при угрозе столкновения.

Учет текущих условий обстановки предлагается осуществлять посредством автоматического изменения важности параметров в зависимости от условий. Разработанная база знаний (БЗ) важности параметров позволяет проводить оценку эффективности барьера безопасности с учетом складывающейся обстановки по каждому потенциально опасному (по критерию опасного сближения) объекту в цикле автоматического функционирования бортовой вычислительной машины управления.

6. Разработана структура системы, реализующей предложенную методику построения базы знаний. Реализованы алгоритмы механизма логического вывода решений.

7. Для подтверждения правильности теоретических положений работы представлены результаты обработки информации по обнаруженному объекту АЧ. Полученные результаты показывают, что использование КИИС с разработанной БЗ позволяет строить барьер безопасности, исключая ошибочные решения, что повышает живучесть автономного функционирования КА.

8. Содержатся рекомендации по возможному применению полученных результатов для построения аппаратно-программных комплексов КА в контексте решения поставленной задачи.

Результаты диссертационной работы использованы в материалах НИР «Теория и адаптивные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов, и оценка их динамического взаимодействия с космическими аппаратами на основе интеллектуального анализа данных, шифр «2.1777.2017/4.6».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в список ВАК

1. Кемайкин В.К., **Кожухин И.В.** Формирование барьера безопасности на космическом аппарате при угрозе воздействия космического мусора методами нечеткой логики // Программные продукты и системы / Software&Systems 1 (32) 2019.

2. Катулев А.Н., Сотников А.Н., Кемайкин В.К., **Кожухин И.В.** Методика аттестации на устойчивость алгоритма распознавания типа динамического объекта, обнаруживаемого оптико-электронным прибором // «Математический журнал Лобачевского» (в печати).

Статьи в изданиях, включенных в базу данных Scopus

1. Paliukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Y.G., Kozhukhin I.V. (2019) Forecasting of Results of Dynamic Interaction Between Space Debris and Spacecrafts on the Basis of Soft Computing Methods. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Sukhanov A. (eds) Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18). ITI'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 874. Springer, Cham.

2. B.V. Paliukh, V.K. Kemaykin, Yu. G. Kozlova, **I.V. Kozhukhin.** The Manner of Spacecraft Protection from Potential Impact of Space Debris as the Problem of Selection with Fuzzy Logic//Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham, 2019.

Статьи в изданиях, не включенных в список ВАК

1. Палюх Б.В., Кемайкин В.К., Храмычев А.А., **Кожухин И.В.** Прогнозирование условий и результатов динамического взаимодействия космических аппаратов и объектов космического мусора методами мягких вычислений// Труды Всероссийской конференции «Искусственный интеллект: проблемы и пути решения», г. Москва, 14-15 марта 2018 года. С. 97-102.

2. Палюх Б.В., Кемайкин В.К., **Кожухин И.В.** Методика выбора способа обеспечения безопасности космического аппарата при возможном воздействии объектов космического мусора// Мягкие измерения и вычисления. 2018. №8(9).