

Bogniukov Alexander Alekseevich – Volgograd State Technical University; e-mail: bogniukovv@gmail.com; Volgograd, Russia; student.

Zorkin Dmitry Yuryevich – Volgograd State Technical University; e-mail: mosh285@gmail.com; Volgograd, Russia; teacher of PM department.

Tarasova Irina Alexandrovna – Volgograd State Technical University; e-mail: irina_a_tarasova@vk.com; Volgograd, Russia; head of the PM Department; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-153-164

С.Л. Беляков, Л.А. Израилев

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ОБОБЩЕНИЯМИ

Основной проблемой при принятии решений в аварийных ситуациях остается достоверность этих решений. Аварийные ситуации в силу своей непредсказуемой и динамичной природы протекания часто обладают неполной и неточной информацией. Использование накопленного опыта позволяет находить достоверные решения, опираясь на известные прецеденты аварийных ситуаций. В качестве инструмента накопления опыта и генерации на его основе решений могут выступать геоинформационные системы (ГИС). Картографическая основа ГИС позволяет анализировать аварийные ситуации, учитывая их пространственно-временные характеристики. Однако, картографическое представление прецедентов с принятыми решениями описывает их слишком узко. Нет понимания того, какие свойства ситуации являются значимыми и можно ли применить решение прецедента в других обстоятельствах. Использование известных образов и их допустимых преобразований, созданных на основе экспертных знаний, способно решить эту проблему. Образ обобщает множество схожих по смыслу прецедентов. Цель такого обобщения заключается в расширении области применения информации из частных наблюдений за счет определения границ допустимых преобразований. Однако необходимость привлечения экспертов для их создания является труднореализуемой задачей, так как каждая ситуация по своему уникальна. Не менее проблематичным остается перенос опыта из одной пространственно-временной области в другую. В данной работе рассматривается подход к автоматическому порождению образов. Предлагается способ создания геоинформационной модели аварийных ситуаций, который включает обобщение прецедентов по общему местоположению. Этот подход направлен на повышение достоверности прогнозирования аварийных ситуаций. Был проведен эксперимент по синтезу образов, основанных на прецедентах дорожно-транспортных происшествий, и оценена их эффективность по сравнению с отдельными прецедентами. Использование разработанного метода автоматической обработки данных для создания образов является актуальным, так как значительно снижает затраты на получение знаний. Применение пространственных обобщений также устраняет необходимость в экспертных знаниях, поскольку формирование наборов прецедентов осуществляется путем анализа их географического расположения.

Геоинформационные системы; прецедентный анализ; аварийные ситуации; опыт; информационная поддержка принятия решений.

S.L. Belyakov, L.A. Izrailev

GEOINFORMATION MODELS OF EMERGENCY SITUATIONS WITH SPATIAL GENERALIZATIONS

The main problem of decision making in emergency situations is the reliability of these decisions. Emergency situations by virtue of its unpredictable and dynamic nature often have incomplete and inaccurate information. The use of accumulated experience allows to find reliable solutions based on known precedents of emergency situations. Geographic information systems (GIS) can act as a tool for accumulating experience and generating solutions based on it. The cartographic basis of GIS allows analyzing emergency situations, taking into account their spatial and temporal characteristics. However, the cartographic representation of precedents with adopted solutions describes them too narrowly. There is no idea what properties of the situation are significant and whether the precedent solution can be applied in other circumstances. The use of known images and their admissible transformations, created on the basis of expert knowledge, can solve this problem. The image generalizes a set of similar precedents. The purpose of such generalization is to expand the area of application of information from private observations by determining the boundaries of permissible transformations. However, the need to attract experts for their creation is a difficult task, since each situation is unique in its own way.

No less problematic is the transfer of experience from one spatial and temporal domain to another. In this paper we consider an approach to automatic image generation. We propose a method of creating a geoinformation model of emergency situations, which includes the generalization of precedents on a common location. This approach is aimed at improving the reliability of prediction of emergency situations. An experiment was conducted to synthesize images based on precedents of road accidents and evaluate their effectiveness compared to individual precedents. The use of the developed method of automatic data processing to create images is relevant, as it significantly reduces the cost of knowledge acquisition. The use of spatial generalizations also eliminates the need for expert knowledge, since the formation of precedent sets is performed by analyzing their geographical location.

Geographic information systems; case-based reasoning; emergencies; experience; informational support of decision-making.

Введение. Аварийная ситуация (АС) – сочетание условий и обстоятельств, создающих аварийную обстановку, которая в случае дальнейшей эскалации может привести к происшествию с последующим возникновением ущерба. Прогнозирование АС способствует снижению риска (вероятности) происшествия [1]. Не все АС возможно достоверно прогнозировать, так как некоторые из них трудно поддаются формализации для построения математического прогноза. К таковым можно отнести транспортные АС, природа которых носит хаотичный и непредсказуемый характер по причине того, что набор факторов, приводящих к риску, и их влияние непрерывно меняется. Преобразуется дорожная инфраструктура и характеристики транспортных средств. В этих условиях предотвращение АС целесообразно строить как генерацию решений на основе накопленного опыта. Одним из источников опыта может выступать информация, получаемая из разбора соответствующих прецедентов АС [2–4]. Разбор выполняется квалифицированными специалистами и документируется. Эта информация может рассматриваться как экспертная оценка причин возникновения АС и решений, которые принимались участниками.

Прецедент АС включает схематическое или картографическое описание характеристик ситуации и его решения, а также необходимую по регламентам анализа текстовую информацию. На основе этой информации, справедливо можно предположить, что если в будущем возникнет ситуация с аналогичными характеристиками, то она приведет к такому же исходу, что в прецеденте, произошедшем ранее. Таким образом, можно заранее принять необходимые меры либо для предотвращения ситуации, либо для смягчения последствий. Из-за случайной природы аварий, характеристики каждой новой АС могут отличаться, из-за чего поиск похожего прецедента затруднен. Сложность также заключается в определении того, какие характеристики (факторы) ситуации являются значимыми. На рис. 1,а,б представлен пример транспортной АС. На рис. 1,а происшествие произошло на нерегулируемом перекрестке, на рис. 1,б на регулируемом перекрестке. Являются ли прецеденты идентичными и возможно ли применить решения одного прецедента к другому? Без применения соответствующих экспертных знаний достоверно ответить на этот вопрос невозможно.

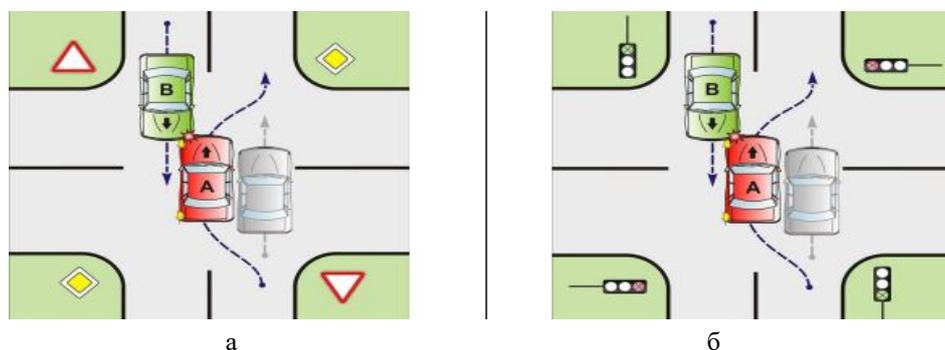


Рис. 1. Пример схожих АС на нерегулируемом перекрестке (а) и на регулируемом перекрестке (б)

Обобщение накопленного опыта на основе известных ситуаций, позволит эффективнее находить решения для новых ситуаций. Под обобщением подразумевается переход от анализа разрозненных частных случаев к анализу наборов ситуаций, образованных общим понятием. Общее понятие – это одна или группа характеристик, обладающие свойством значимости по отношению к ситуации. Цель подобного обобщения – расширение области применения информации из частных наблюдений за счет определения границ допустимых преобразований. Применение обобщений направлено на создание обобщенного образа ситуации.

Образ АС включает в себя совокупность факторов, которые повлияли на возникновение аварийной обстановке и определяют его изменчивость. Знание о возможных изменениях ситуаций, сохраняющих их смысловое наполнение, открывает путь к конструированию адекватных решений. Образ задает допустимые преобразования конкретного прецедента. Допустимые преобразования (ДП) – это картографические объекты, имеющие пространственные границы и атрибуты. Если текущая ситуация на основании выбранной метрики сходства является одним из возможных экземпляров образа – наступление АС практически неизбежно. Образ обобщает множество схожих по смыслу прецедентов. Один экземпляр прецедента и экспертные обобщения о возможных изменениях открывают возможность неявно оперировать большим числом объектов. Поскольку обобщения сделаны на основе наблюдения реального мира, частные выводы считаются достоверными. Одним из наиболее эффективных инструментов представления образов АС можно рассматривать геоинформационные системы (ГИС). Пространственное отображение позволяет накапливать пространственно-временную информацию не только о свойствах ситуации, но и особенностях местности их возникновения. ГИС обладают богатым инструментарием, с помощью которого могут быть получены знания о ситуациях. В первую очередь, это программные инструменты визуализации. Интуитивные представления, обобщения и заключения эксперт передает интеллектуальной системе с минимальными потерями. Манипулирование знаниями реализуется через операции с визуальными картографическими объектами.

Привлечение экспертов к созданию образов является дорогостоящим, поэтому в данной работе рассматривается подход к автоматическому порождению образов. Непосредственно применить к имеющемуся множеству данных разбора АС невозможно по двум причинам:

- 1) каждый разбор является разнородным набором данных пространственно-временного характера, которые наполнены логическими зависимостями. Для них числовые модели машинного обучения неприменимы;
- 2) предлагаемый механизм построения обобщений нацелен на получение знания особой двухкомпонентной структуры в среде ГИС.

Применение разработанного метода построения образов автоматической обработкой данных актуально тем, что значительно сокращает затраты на формирование знаний.

Обзор литературы. Существующие методы прогнозирования АС основываются на двух подходах: математическом и эвристическом. Математический подход основан на анализе доступных данных о ключевых характеристиках прогнозируемого объекта. Он включает в себя обработку данных с использованием математических методов, моделирование и, в конечном итоге, создание зависимости, которая связывает эти характеристики со временем [5]. По применяемым методам данный подход условно можно разделить на две группы: методы моделирования процессов и статистические методы. Методы моделирования процессов включает в себя методы, основанные на обработке имеющихся данных об отдельных характеристиках объекта прогнозирования и создания его модели. В результате получаются зависимости, связывающие некоторые характеристики прогнозируемого объекта во времени. Среди методов прогнозирования стоит отметить линейную регрессию [6], байесовские сети [7, 8], нейросетевые методы [9, 10], вероятностные методы [11] и теорию катастроф [12]. Однако данные модели основаны на определенных предположениях и приближениях, которые не всегда могут отражать реальный характер аварии. Статистические методы опираются на обобщение статистических данных о рас-

смаатриваемом объекте или процессе. Результатом этого обобщения является аналитическая модель. Для оценки неизвестных параметров модели чаще всего применяются метод максимального правдоподобия, его вариация – метод частичных наименьших квадратов [13], а также метод взвешенных наименьших квадратов [14]. Прогнозирование в данном случае заключается в вычислении значений модели для заданного момента времени или при указанном значении другой независимой переменной. Математические методы обеспечивают объективный прогноз, но их сложно применять к неформализованным задачам. В настоящее время нет методов, сопоставимых с человеческими возможностями в построении образов на основе чисто качественной информации.

Эвристический (экспертный) подход заключается в привлечении мнений экспертов-специалистов. Он особенно эффективен для прогнозирования многофакторных и сложных процессов, которые трудно формализовать, но по которым имеется достаточно данных, основанных на опыте. Эвристическая деятельность человека, которая лежит в основе прогнозирования, смещается в область абстрактного мышления для формирования приемлемых гипотез о природе прогнозируемых процессов. В случае подтверждения гипотез опытом можно переходить к управлению процессом или к учету и использованию выявленных свойств анализируемого объекта. Следующим этапом является выработка взглядов относительно первопричин, которые приводят к обобщению полученных корреляций до уровня общего понятия. Среди подходов экспертного анализа стоит выделить:

1. Метод «Мозгового штурма» [15] – генерация большого количества идей путем открытого обсуждения проблемы между группой экспертов, из которых выбирается наилучшая. Однако, нет гарантий, что среди них найдутся рациональные и продуктивные решения.

2. Метод Дельфи [16] – опрос группы экспертов для получения их мнений и прогнозов по обозначенной проблеме. Метод направлен на повышение объективности опросов экспертов за счет использования процедур обратной связи, ознакомление экспертов с результатами предшествующего тура опроса и т. д. Однако метод более трудоемкий и не полностью устраняет субъективность прогнозирования.

Преимущество эвристического подхода состоит в способности эксперта-специалиста оперировать нечетко очерченными понятиями. При таком подходе экспертные рассуждения нередко ведутся на интуитивном уровне, в обход строгих логических умозаключений, что с одной стороны позволяет эффективно находить решения в сложных неформализованных задачах. Основная проблема эвристических методов состоит в необходимости поиска соответствующих экспертов, что в условиях тенденции к узкой специализации экспертов становится нетривиальной задачей. Другой немаловажный фактор – субъективность при построении прогноза. Данный фактор порождает неопределенность и «инертность» в результатах, так как вывод эксперта напрямую зависит от накопленного им опыта относительно предмета прогноза. По мере накопления нового опыта взгляд на построение модели прогноза может значительно измениться.

Развитие возможностей вычислительной техники позволило передать ей часть функций по предварительной обработке данных [17]. Следующий этап использования информационных систем – обобщение опыта. Опыт представляет собой совокупность мыслительных процессов и инстинктов человека, проявляющуюся в ситуациях с повторяющимися событиями и состояниями, а также в условиях цикличности процессов. Применение опыта оценки ситуаций и выработки решений имеет особую значимость при построении геоинформационных моделей ситуаций. Количество параметров, описывающих «ситуацию» как концепт рассуждений неопределенно, многозначно и противоречиво. Только коллективный опыт наблюдения и анализа ситуаций позволяет находить решения проблемных ситуаций. Не менее проблематичным остается перенос опыта из одной пространственно-временной области в другую.

Одним из известных методов, работающих с опытом, является метод рассуждений на основе прецедентов [18]. Суть метода состоит в нахождении прецедента, который был бы наиболее близким к новой ситуации. В случае нахождения такого прецедента, его решение используется для нового прецедента. Прецедентный анализ используется в том

числе для задач предупреждения и ликвидации техногенных чрезвычайных ситуаций [19]. Ввиду того, что большинство аварий имеют ярко выраженные пространственные характеристики, неотъемлемым элементом системы прогнозирования с использованием прецедентов становится ее интеграция с системами ГИС для визуализации и пространственного анализа [20]. Цикл рассуждений реализуется следующим образом: определяется степень сходства между новым прецедентом и существующими. Затем извлекается прецедент с наибольшим сходством и его решение применяется к новой ситуации, которое при необходимости адаптируется к новым условиям. Решенный прецедент сохраняется для дальнейшего использования. Ограничением прецедентного анализа выступает необходимость определения адекватных метрик сходства для определения схожих прецедентов. При этом, для эффективного использования метода потребуются использование экспертных знаний, чтобы иметь возможность преобразовывать решение известного прецедента с учетом наличия расхождений между ситуациями или потери актуальности решения ввиду устаревания информации.

Предлагаемая модель опыта. Как было сказано выше, не имея возможности достоверно прогнозировать риски возникновения АС (прецедента АС), можно использовать ранее накопленный опыт, который включает описание прошлого взаимодействия с подобными прецедентами. Однако данный способ изучения окружающей среды имеет ряд ограничений:

1. Увеличение количества прецедентов приводит к росту сложности расчета сходства объектов и требует больше ресурсов для хранения информации.
2. Неопределенность степени детализации прецедента. Детали играют ключевую роль в определении характеристик прецедента и его решения. Однако, чем выше степень детализации, тем больше различий может возникать при поиске похожих прецедентов, что в условиях недостатка экспертных знаний грозит тем, что близкий прецедент не будет обнаружен.

Данные ограничения исходят из той общей проблемы, что без определения значимых факторов ситуации невозможно проводить достоверные рассуждения о сходстве или различии прецедентов. В то время как значимость фактора ситуации можно определить только с помощью экспертных знаний. Преимущество применения обобщения позволит не только избежать необходимости детализировать информацию о прецедентах, но и оптимизировать процесс накопления опыта. Также это позволяет определить ДП ситуации, на основании различий в характеристиках ситуаций. В контексте обобщения прецедентов можно выделить следующие подходы:

1. Обобщение отдельных признаков прецедентов в общее понятие. Например, обобщение «регулируемых» и «нерегулируемые перекрестков» в понятие перекрестки. При сравнении нескольких прецедентов это позволит считать близкими все прецеденты АС на пересечениях дорог независимо от их вида. Однако без предварительного использования экспертного знания данное обобщение нельзя считать достоверным, так как нет уверенности в том, что решение прецедентов останется прежним при таком обобщении.

2. Обобщение схожих прецедентов в образную модель. За счет объединения информации некоторого множества прецедентов в единый образ становится возможным определить ДП ситуации, которые не изменят результата. Для соответствия условию неизменности сути задачи, прецеденты должны иметь общие характеристики.

В качестве основного подхода выберем второй подход, так как первый требует обязательного использования экспертных знаний для обобщения, что является существенным ограничением при использовании в самообучающихся системах. Однако, чтобы применить обобщение схожих прецедентов, для начала необходимо определить общий признак, на основании которого будет проводиться обобщение.

Прецедент АС следует рассматривать как точечный объект, который лишь условно указывает на место его возникновения, в то время как зоны возникновения АС и зоны последствий АС, отражаются на соответствующих схемах. Участки, где произошло сразу несколько АС, относятся к «горячим точками» [21] или участкам повышенной опасности (УПО) [22]. Статистическая значимость ситуации расположенных в зоне УПО определя-

ется тем, что происходит повторение прецедентов, что говорит о неслучайном характере аварий. Следовательно, существует паттерн, который определяется совокупностью одних и тех же характеристик прецедента. По своему влиянию на АС характеристики можно разделить на: главные – характеристики, определяющие АС и второстепенные – характеристики, которые могут влиять на риск возникновения или степень последствий происшествия, но не являются его первопричиной. Выбрав характеристику местоположения как главную, можно создать образ путем обобщения группы прецедентов, расположенных в одном и том же месте.

Сформулируем алгоритм синтеза образов на основе общего местоположения (зона концентрации прецедентов) в виде геоинформационной модели:

1) Подготовка исходных данных о прецедентах. Информация о прецедентах АС обязательно должна содержать пространственно-временные характеристики, а также описание свойств окружающей среды на момент происшествия.

2) Формирование наборов прецедентов, подходящих для обобщения. Для определения мест концентрации прецедентов можно воспользоваться инструментами пространственного анализа (например, кластеризация на основе плотности, индекс Морана, анализ горячих точек (Статистика Getis-Ord G_i^*), ядерная оценка плотности (KDE)).

3) Объединение наборов прецедентов в образы. Концептуальную модель прецедента можно представить следующим образом:

$$P = \langle s, d \rangle,$$

где s – схема ситуации, d – схема решения.

Аналогично можно представить концептуальную модель образа [23]:

$$I_p = \langle I_s, I_d \rangle,$$

где I_s – набор ДП ситуации, I_d – набор преобразований решения.

Допустим у нас есть два прецедента, представленных следующим образом:

$$P_1 = (x_1, x_2, \dots, x_n, R), P_2 = (y_1, y_2, \dots, y_n, K),$$

где $x_1 \dots x_n$ и $y_1 \dots y_n$ – параметры ситуации, описывающий прецедент P_1 и P_2 соответственно (при этом: $x_1 \in S_1, x_2 \in S_2, \dots, x_n \in S_n, y_1 \in S_1, y_2 \in S_2, \dots, y_n \in S_n$), R – решение прецедента P_1 , K – решение прецедента P_2 , n – количество параметров у прецедентов P_1 и P_2 , S_1, \dots, S_n – области допустимых значений соответствующих параметров прецедента.

Таким образом, для сформированных наборов прецедентов можно установить логические правила обобщения характеристик в виде продукции:

$$\text{ЕСЛИ } x_n \neq y_n \text{ ТО } I_s = x_n \vee y_n \text{ ИНАЧЕ } I_s = x_n;$$

$$\text{ЕСЛИ } R \neq K \text{ ТО } I_d = R \vee K \text{ ИНАЧЕ } I_d = R;$$

Все различия в характеристиках внутри набора прецедентов рассматриваются как ДП нового образа. В ином случае, сохраняется только первая характеристика. Например, если прецеденты в одном и том же месте фиксировались в «светлое» и «темное» время суток, значит можно сказать, что ДП характеристики времени суток включают и «светлое» и «темное» время суток (напротив, состояние времени суток «Сумерки» по-прежнему не входит в ДП образа, до тех пор пока не будет найден прецедент в том же местоположение, но в период времени суток «Сумерки»).

4) Выдвижение гипотезы о причинах возникновения прецедентов. Когда образ сформирован, необходимо дать объяснение, почему именно данная совокупность характеристик прецедентов приводит к систематическим АС в данном месте. В качестве источника для формирования гипотезы могут быть использованы ранее синтезированные «проверенные образы» или «эталонные образы». Проверенные образы – это те образы, которые обладают наивысшим критерием качества. Эталонные образы – часть ограниченного множества образов, подготовленных экспертами.

5) Расчет критериев качества синтезированного образа. Полученный образ необходимо проверить на соответствие критериям качества. Первый критерий – значимость. Чем больше прецедентов составляют образ, тем больше статистическая значимость об-

раза. Вторым критерий – актуальность. Актуальность образа на основе прецедентов – это совокупность таких параметров, как: частота возникновения схожих с образом прецедентов и соответствие образа существующим условиям. Частота возникновения схожих с образом прецедентов, это количество прецедентов, удовлетворяющих ДП образа за единицу времени. Образы ранжируются исходя из общего критерия качества. Наиболее качественным будет считаться образ с наибольшим количеством актуальных прецедентов. Если количество прецедентов не увеличивается, данный образ постепенно будет отвергаться и при достижении критических отметок считаться не актуальным.

После завершения этапов формирования, начинается период жизненного цикла, на котором образ и связанная с ним гипотеза проходит проверку временем. Для этого необходимо оценить, насколько часто образ применяется при решении новых прецедентов и фиксируются ли новые прецеденты в том месте, где он был синтезирован.

Оценка эффекта использования предложенной модели. Рассмотрим пример прогнозирования АС на основе накопленной информации о прецедентах. Для анализа был выбран один из районов города Таганрога (рис. 2). На карту добавлены данные по дорожно-транспортным происшествиям с 2017 по 2023 гг. включительно. Общее количество прецедентов – 114. В качестве программного обеспечения использовался ArcGIS PRO.

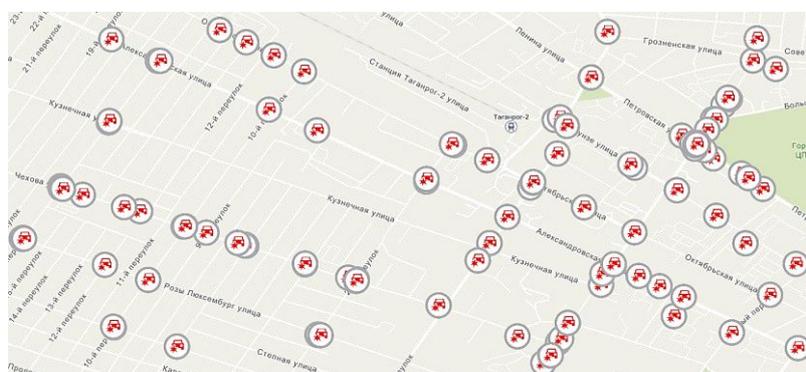


Рис. 2. Местоположения АС

Найдем места со схожим местоположением АС. Для этого воспользуемся инструментом «Кластеризация на основе плотности, алгоритм OPTICS (настройки: расстояние поиска – 50 м, минимальное количество объектов – 2)». В результате получим следующее распределение кластеров (рис. 3).

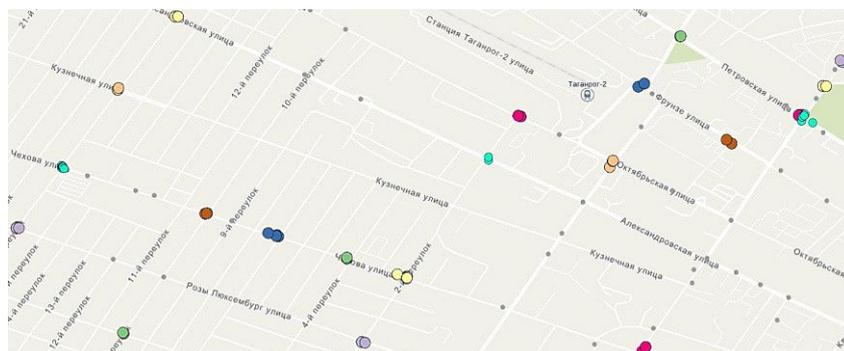


Рис. 3. Кластеры АС

Всего было построено 22 кластера, из них было синтезировано 16 образов. Прецеденты, которые не стали частью образа, составляют общую базу данных с образами. В результате формируется две базы данных. Первая содержит 114 прецедентов. Вторая

содержит 67 прецедентов и 16 синтезированных образов. Сравним эффективность прогнозирования с помощью первой и второй базы данных. В качестве метрики сходства прецедентов используем меру сходства по Хэммингу, т. е. близкими будем считать прецеденты или образы с наибольшим количеством общих характеристик.

$$S(C, T) = \frac{n_{ct}}{n},$$

где n_{ct} – число совпадающих признаков (параметров), n – общее количество параметров.

Описание прецедента АС представим в виде кортежа:

$$c = (TD, WD, RC, RD, RB, CR, PC, PI, RE, TA),$$

где TD – Время суток; WD – Погода; RC – Состояние дороги; RD – Недостатки УДС; RB – Жилые дома (ИЖС – Индивидуальная жилищная застройка, МКД – Многоквартирный дом); CR – Перекрестки; PC – Пешеходные переходы (ПП); PI – Точки интереса, RE – прочие элементы дорожной сети, TA – тип аварии.

Тестовая выборка формировалась из прецедентов АС из других районов города Таганрога. Если характеристика отсутствовала, то на ее место ставилось сообщение «N». Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ответов баз данных с тестовой выборкой

Описание прецедента из тестовой выборки	Ответы	
	Первая база данных	Вторая база данных
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Наезд на пешехода или Столкновение*
"Светлое", "Пасмурно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "N", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "N", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "Регулируемый перекрёсток", "Регулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "N", "N", "N", "N", "Наезд на препятствие"	Наезд на велосипедиста	Наезд на велосипедиста
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие вертикальной разметки", "ИЖС", "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных дорог", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Ясно", "Сухое", "N", "ИЖС", "Регулируемый перекресток", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "N", "МКД", "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных дорог", "N", "N", "N", "Столкновение"	Столкновение	Столкновение
"Темное", "Пасмурно", "Мокрое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "N", "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных дорог", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Наезд на пешехода	Наезд на пешехода

"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "N", "Нерегулируемый перекрёсток неравнозначных дорог", "Нерегулируемый ПП", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Наезд на пешехода	Наезд на пешехода
"Светлое", "Ясно", "Сухое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "МКД", "N", "N", "N", "N", "Наезд на пешехода"	Столкновение	Столкновения
"Светлое", "Пасмурно", "Мокрое", "Отсутствие горизонтальной разметки", "ИЖС", "Регулируемый перекресток", "Регулируемый ПП", "N", "N", "Столкновение"	Наезд на пешехода	Столкновение

* в данной ситуации характеристики прецедента с одинаковой степенью сходства соответствовали образам с разными видами АС.

Таким образом, внедрение обобщений в базу данных позволило улучшить основные показатели эффективности анализа: средняя степень сходства увеличилась на 3% (с 0,90 до 0,93), среднее количество верных ответов увеличилось на 22% (с 0,58 до 0,71). Внедрение обобщений также позволило сократить общее количество элементов таблицы примерно на 37% (с 114 до 83 элементов).

Заключение. Использование образов позволяет эффективнее проводить рассуждения на основе прецедентов, что позволяет расширить диапазон допустимых значений при поиске похожей ситуации за счет обобщения отдельных прецедентов. Геоинформационная модель представления АС включает в себя обобщенное описание нескольких прецедентов на основе их общего местоположения. Под общим местоположением рассматривается зона концентрации всех прецедентов, которая может быть рассчитана с помощью инструментов пространственного анализа. Проведенный эксперимент использования пространственных обобщений демонстрирует следующие преимущества:

Во-первых, оптимизация объема базы данных для хранения информации о прецедентах. Обобщение позволяет представить информацию, накопленную из нескольких прецедентов в виде отдельных образов, что позволяет сократить объем данных за счет сокращения повторяющейся информации.

Во-вторых, повышение достоверности вывода решения за счет расширения диапазона допустимых значений. Отдельно взятый прецедент в сравнения с новой ситуацией потенциально может содержать различия в характеристиках из-за чего отсутствует уверенность в возможности повторно использовать его решение. Обобщение информации на основе общего местоположения прецедентов позволяет создать образ из нескольких ситуаций. И как показал проведенный эксперимент, если рассматривать все различия в характеристиках прецедентов как ДП ситуации, то можно улучшить показатели степени сходства прецедентов и точности прогноза.

Наконец, применение пространственных обобщений позволяет избежать необходимости использования экспертных знаний, так как процесс формирования наборов прецедентов происходит через анализ их местоположения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00182, <https://rscf.ru/project/25-21-00182/>, реализовано Южным федеральным университетом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Термины МЧС России – МЧС России. – URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/omministerstve/terminy-mchs-rossii> (дата обращения: 02.02.2025).
2. Бублей С.Е., Мамутов Б.В. Экспертный анализ непредвиденных ситуаций // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 143-147.
3. Климова И.В., Сазанова Н.В., Махнёва А.Н. Опыт проведения технического расследования аварии на опасном производственном объекте нефтепродуктообеспечения // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 1 (46). – С. 93-102.

4. *Koo J., Kim S., Kim H., Kim Y. H., Yoon E.S.* A systematic approach towards accident analysis and prevention // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2009. – No. 26 (6). – P. 1476-1483.
5. *Грабельников А.С.* Сравнительный анализ существующих методик прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера // *Современные проблемы гражданской защиты*. – 2022. – № 1 (42). – С. 10-13.
6. *Yuqing W.* Research on the prediction of traffic accident by linear regression // *Theoretical and Natural Science*. – 2024. – Vol. 38 (1). – P. 39-44.
7. *Jiangnan X., Senzhang W., Xiang W., Min X., Kun X., Jiannong C.* Multi-view Bayesian spatio-temporal graph neural networks for reliable traffic flow prediction // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. – 2022. – Vol. 15. – P. 1-14.
8. *Chengjiang X.* Application of Bayes Theorem to Accident Analysis and Classification // *Highlights in Science Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 47. – P. 46-57.
9. *Ткалич С.А., Бурковский А.В., Котов Д.В.* Исследование нейросетевой модели прогнозирования аварийных ситуаций процесса вулканизации // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 15-19.
10. *Ogwueleka F., Misra S., Ogwueleka T.C., Fernandez-Sanz L.* An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2014. – Vol. 11 (5). – P. 177-197.
11. *Богомолов А.С.* Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человекомашинных системах // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика*. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 219-230. – DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>.
12. *Le Yu, Jianjun L.* Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory // *Petroleum*. – 2015. – No. 1. – P. 82-90.
13. *Xuanqiang W., Shuyan C., Wenchang Z.* Traffic Incident Duration Prediction Based On Partial Least Squares Regression // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – Vol. 96. – P. 425-432.
14. *Носков С.И., Вергасов А.С.* Реализация взвешенного метода наименьших квадратов с использованием мер сходства // *Вестник науки и образования*. – 2018. – № 18-1 (54). – С. 29-32.
15. *Измаилова Э.А., Кузнецова Ю.А.* Метод мозгового штурма // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2013. – № 2 (6). – С. 32-35.
16. *Ковальский Ф.С., Мосолов А.С., Прус Ю.В.* Применение методов Дельфи и анализа иерархий при выборе приоритетного сценария развития аварийной ситуации на объекте защиты // *Техносферная безопасность*. – 2020. – № 3 (28). – С. 12-20.
17. *Ильин В.Н., Лепехин А.В.* Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика // *Труды МАИ*. – 2011. – № 46. – С. 1-11.
18. *Richter M.M., Weber R.O.* Case-based reasoning: a textbook. – Heidelberg: Springer, 2013. – 546 p.
19. *Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю.* Система поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации техногенных ЧС на основе прецедентного подхода // *Технологии техносферной безопасности*. – 2013. – № 5 (51). – 13 с.
20. *Пальчевский Е.В., Антонов В.В., Родионова Л.Е., Кромнина Л.А., Фахруллина А.Р.* Моделирование зон затопления на основе прогнозирования временных рядов и ГИС-технологий // *Компьютерная оптика*. – 2024. – Т. 48, № 6. – С. 913-923. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1418.
21. *Khan A.A., Hussain J.* Utilizing GIS and Machine Learning for Traffic Accident Prediction in Urban Environment // *Civil Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 10 (6). – P. 1922-1935.
22. *Герштейн А.М.* Выявление участков повышенной опасности на дорогах Массачусетса в 2013–2018 годах // *Компьютерные инструменты в образовании*. – 2021. – № 1 (19). – С. 45-57.
23. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Савельева М.Н.* Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах // *Информационные технологии*. – 2013. – № 7. – С. 22-25.

REFERENCES

1. Термины МChS России – МChS России [Terms of the Ministry of Emergency Situations of Russia - Ministry of Emergency Situations of Russia]. Available at: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/oministerstve/terminy-mchs-rossii> (accessed 02 February 2025).
2. *Bubley S.E., Mamutov B.V.* Ekspertnyy analiz nepredvidennykh situatsiy [Expert unforeseen situations analysis], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 5 (94), pp. 143-147.
3. *Klimova I.V., Sazanova N.V., Makhneva A.N.* Opyt provedeniya tekhnicheskogo rassledovaniya avarii na opasnom proizvodstvennom ob"ekte nefteproduktoobespecheniya [The experience of accident investigation on hazardous production facility of oil products supply], *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity* [Modern Problems of Civil Protection], 2023, No. 1 (46), pp. 93-102.

4. Koo J., Kim S., Kim H., Kim Y. H., Yoon E.S. A systematic approach towards accident analysis and prevention, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2009, No. 26 (6), pp. 1476-1483.
5. Grabel'nikov A.S. Sravnitel'nyy analiz sushchestvuyushchikh metodik prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenogo kharaktera [Comparative analysis of existing techniques for forecasting man-made emergency situations], *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity* [Modern Problems of Civil Protection], 2022, No. 1 (42), pp. 10-13.
6. Yuqing W. Research on the prediction of traffic accident by linear regression, *Theoretical and Natural Science*, 2024, Vol. 38 (1), pp. 39-44.
7. Jiangnan X., Senzhang W., Xiang W., Min X., Kun X., Jiannong C. Multi-view Bayesian spatio-temporal graph neural networks for reliable traffic flow prediction, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2022, Vol. 15, pp. 1-14.
8. Chengjiang X. Application of Bayes Theorem to Accident Analysis and Classification, *Highlights in Science Engineering and Technology*, 2023, Vol. 47, pp. 46-57.
9. Tkalich S.A., Burkovskiy A.V., Kotov D.V. Issledovanie neyrosetvoy modeli prognozirovaniya avariynykh situatsiy protsessa vulkanizatsii [Research neuronet model of forecasting emergency situations of process vulcanization], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh state technical University], 2010, Vol. 6, No. 7, pp. 15-19.
10. Ogwueleka F., Misra S., Ogwueleka T.C., Fernandez-Sanz L. An Artificial Neural Network Model for Road Accident Prediction: A Case Study of a Developing Country, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2014, Vol. 11 (5), pp. 177-197.
11. Bogomolov A.S. Analiz putey vozniknoveniya i predotvrashcheniya kriticheskikh sochetaniy sobytii v chelovekomashinnykh sistemakh [Analysis of the ways of occurrence and prevention of critical combinations of events in man-machine systems], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics], 2017, Vol. 17, No. 2, pp. 219-230. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>.
12. Le Yu, Jianjun L. Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory, *Petroleum*, 2015, No. 1, pp. 82-90.
13. Xuanqiang W., Shuyan C., Wenchang Z. Traffic Incident Duration Prediction Based On Partial Least Squares Regression, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, Vol. 96, pp. 425-432.
14. Noskov S.I., Vergasov A.S. Realizatsiya vzveshennogo metoda naimen'shikh kvadratov s ispol'zovaniem mer skhodstva [Implementation of weighted least squares method using similarity measures], *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2018, No. 18-1 (54), pp. 29-32.
15. Izmailova E.A., Kuznetsova Yu.A. Metod mozgovogo shturma [The method of brainstorming], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2013, No. 2 (6), pp. 32-35.
16. Koval'skiy F.S., Mosolov A.S., Prus Yu.V. Primenenie metodov Del'fi i analiza ierarkhiy pri vybore prioritetnogo stseneriya razvitiya avariynoy situatsii na ob'ekte zashchity [Application of methods of Delphi and analysis of hierarchies at the choice of the priority scenario of development of emergency situation at the protected object], *Tekhnosfermaya bezopasnost'* [Technosphere Safety], 2020, No. 3 (28), pp. 12-20.
17. Il'in V.N., Lepekhin A.V. Tekhnologiya avtomatizatsii strukturno-parametricheskogo sinteza na osnove metoda morfologicheskogo yashchika [Technology of automation of structural-parametric synthesis based on the morphological box method], *Trudy MAI* [Trudy MAI], 2011, No. 46, pp. 1-11.
18. Richter M.M., Weber R.O. Case-based reasoning: a textbook. Heidelberg: Springer, 2013, 546 p.
19. Berman A.F., Nikolaychuk O.A., Pavlov A.I., Yurin A.Yu. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii tekhnogennykh ChS na osnove pretsedentnogo podkhoda [Decision support system for prevention and liquidation of technogenic emergency situations on basis of case-based approach], *Tekhnologii tekhnosfermay bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2013, No. 5 (51), 13 p.
20. Pal'chevskiy E.V., Antonov V.V., Rodionova L.E., Kromina L.A., Fakhruullina A.R. Modelirovaniye zon zatopeniya na osnove prognozirovaniya vremennykh ryadov i GIS-tekhnologii [Modeling flood zones on the basis of time series forecasting and GIS-technologies], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2024, Vol. 48, No. 6, pp. 913-923. DOI: [10.18287/2412-6179-CO-1418](https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1418).
21. Khan A.A., Hussain J. Utilizing GIS and Machine Learning for Traffic Accident Prediction in Urban Environment, *Civil Engineering Journal*, 2024, Vol. 10 (6), pp. 1922-1935.
22. Gershteyn A.M. Vyyavlenie uchastkov povyshennoy opasnosti na dorogakh Massachusetsa v 2013–2018 godakh [Hotspots of traffic accidents that cause injuries or death in Massachusetts from 2013 to 2018], *Komp'yuternyye instrumenty v obrazovanii* [Computer Tools in Education], 2021, No. 1 (19), pp. 45-57.
23. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Savel'eva M.N. Pretsedentnyy analiz obrazov v intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistemakh [Geoinformation service of the situational center], *Informatsionnyye tekhnologii* [Information technologies], 2013, No. 7, pp. 22-25.

Беляков Станислав Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: sbelyakov@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; д.т.н.; профессор.

Израилев Лев Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: izrailev@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185608305; кафедра информационных измерительных технологий и систем; магистрант.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: sbelyakov@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Information Analytical Systems of Safety; dr. of eng. sc.; professor.

Izrailev Lev Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: izrailev@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185608305; the Department of Information Measurement Technologies and Systems; master's student.

УДК 621.317.3

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-164-175

А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ**

Молниевый разряд (МР), проходящий в ракету-носитель (РН), сопровождается прямым ударом по корпусу и, возникающими внутри корпуса, электромагнитными полями. Последние воздействуют на протяженные кабельные линии (КЛ) и наводят в них токи и напряжения. Это может приводить к запуску цепей пиротехнических устройств РН, срабатывание которых носит критический характер для функционирования бортового оборудования и для ракеты в целом. Их нештатное иницирование может приводить к катастрофическим последствиям. Амплитудно-временные параметры наводимых электромагнитных полей (ЭМП) достигают значений сотен кВ/м по электрическому полю и сотен кА/м по магнитному полю. Создание моделирующего комплекса для получения ЭМП с такими характеристиками в объеме, сопоставимом с размерами РН, представляет собой чрезвычайно сложную техническую задачу. Целью исследований явилось обоснование приемлемого, практически реализуемого способа натурального моделирования наведенных токов. Задачами исследований стали оценка возможности генерации электромагнитного поля заданных параметров, расчетная оценка токов и напряжений, наводимых молниевыми разрядами в кабельных линиях РН, схемное решение для разрабатываемой установки. Электромагнитные процессы, протекающие в кабельных линиях при воздействии на них токов молниевых разрядов, рассчитывались на основе решений уравнений Максвелла. Кабельные линии моделировались эквивалентными схемами замещения. Проведенные исследования показали, что для оценки стойкости РН к воздействию ЭМП молниевых разрядов целесообразно использовать комбинированный, расчетно-экспериментальный метод, при котором на первом этапе расчетным способом определяются прогнозируемые реакции протяженных кабельных линий РН на воздействия молниевых разрядов, а на втором этапе оборудование и устройства, подключенные к КЛ, нагружаются рассчитанными импульсами тока (напряжения) с помощью высоковольтного стенда молниевых разрядов. Использование данного подхода позволяет существенно упростить требования к испытательному оборудованию генерации электромагнитных полей, что обеспечит, в конечном итоге, безопасное применение пиротехнических устройств на борту ракеты-носителя в условиях молниевой активности.

Наведенный ток; пиропатрон; высоковольтный стенд молниевых разрядов; генератор импульсных токов; кабельная линия; стол заземления высоковольтный.

A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy**SIMULATION OF LIGHTNING STRIKE INDUCED CURRENTS AT MISSILERY SAMPLES TESTING**

The lightning strike (LS) to launch vehicle (LV) is accompanied by direct impact on the airframe and electromagnetic (EM) fields occurring inside the airframe. The EM fields influence the extended power lines (PL) and induce currents and voltages in them. In this case, pyrotechnic circuits of LV might be actuated and thus damage critically the operation of airborne equipment and the vehicle itself. Their off-nominal ignition may lead to a catastrophe. The amplitude-time parameters of induced EM fields reach hundreds of kV/m and kA/m for electric and magnetic fields respectively. Constructing a simulation facility that is capable to produce EM fields with similar properties and size comparative to that of the LV becomes a tough technical challenge. The purpose of the research was to substantiate an acceptable, practi-