Б

Проблемы искусственного интеллекта. 2026. N 3 (42). С. 214-226
Problems of Artificial Intelligence. 2026;3(42):214-226.
Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
Научная статья

УДК 519.688 **DOI** 10.24412/2413-7383-2026-3-42-214-226

С. Л. Беляков[1], А. В. Исаев[1], О. Н. Покусаев[2]
[1] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный Федеральный Университет», г. Ростов-на-Дону
344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42.
beliacov@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9939-8789;
alis@sfedu.ru; ORCID: 0009-0009-4759-9448.
[2] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ), г. Москва
127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9
o.pokusaev@rut.digital; ORCID 0000-0001-6916-8897.

ЛОКАЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОБОБЩЕНИЯ В АНАЛИЗЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

S.L. Belyakov[1], A.V. Isaev[1], O.N. Pokusaev[2]
[1] Federal State Autonomous Educational Institution of higher education «Southern Federal University»
344006, Rostov Oblast, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Street, 105/42.
beliacov@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9939-8789;
alis@sfedu.ru; ORCID: 0009-0009-4759-9448.
[2] Federal State Autonomous Educational Institution of higher education «Russian University of Transport» (MIIT)
127994, GSP-4, Moscow, Obraztsova Street, 9, building 9.
o.pokusaev@rut.digital; ORCID 0000-0001-6916-8897

LOCAL SPATIAL GENERALIZATIONS IN THE ANALYSIS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

В работе рассматривается двухкомпонентная модель образа пространственной ситуации для оценки ситуации и формирования наилучшего решения. Её компонентами являются ранее наблюдавшийся прецедент и локальные преобразования элементов прецедента, сохраняющие контекст. Образ позволяет генерировать экземпляры того же уровня достоверности, что и наблюдавшийся прецедент. Рассматривается пример анализа и трансформирования образа ситуации. Представлен эксперимент выработки рекомендаций по обновлению инфраструктуры городских перекрестков.
Ключевые слова: интеллектуальные ГИС, искусственный геопространственный анализ, пространственные решения, принятие решений
Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00182, https://rscf.ru/project/25-21-00182/, реализовано Южным федеральным университетом.

The paper examines a two-component model of the spatial situation image for assessing the situation and generating the best solution. Its components are a previously observed precedent and local transformations of the precedent's elements that preserve the context. The image makes it possible to generate instances of the same level of reliability as the observed precedent. An example of analyzing and transforming the situation image is considered. An experiment on developing recommendations for updating the infrastructure of urban intersections is presented.
Key words: intelligent GIS, GeoAI, Spatial Situation, Decision Making.
Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-21-00182, https://rscf.ru/project/25-21-00182/, and was carried out by Southern Federal University.

Введение

Анализ ситуаций и принятие решений в условиях реального мира – ключевое направление применения геопространственного интеллекта (GeoAI), в том числе при исследовании и управлении транспортной инфраструктурой [1]. Объекты, процессы и события, с которыми приходится работать, отличаются высокой динамичностью и неоднозначностью. Особую сложность создаёт выработка решений в уникальных проблемных ситуациях. Даже внешне схожие прецеденты обладают неочевидными деталями, из-за чего глобальные обобщения свойств и поведения объектов могут приводить к ошибочным выводам и небезопасным решениям [2]. Попытки использовать чрезмерно широкие обобщения без учёта контекста чреваты снижением достоверности результатов. Одним из перспективных инструментов здесь выступает метод рассуждений на основе прецедентов (CBR), опирающийся на поиск аналогии с ранее наблюдавшимися ситуациями [3]. Качество итогового решения во многом зависит от корректной оценки «близости» ситуаций и разумной адаптации уже известного решения под новые условия. В контексте GeoAI особую ценность приобретает описание прецедентов через набор допустимых, недопустимых и возможных преобразований в ограниченных пространственных зонах – такую информацию могут предоставить эксперты по итогам ретроспективного анализа пространственных ситуаций [4]. При этом критически важно анализировать эффекты такого переноса и оценивать уровень доверия к получаемым результатам [5].

Цель настоящей статьи – проанализировать концепцию использования опыта принятия решений на базе локальных обобщений и показать её значимость для ситуационного анализа в GeoAI.

Обзор литературы

Интерактивный картографический анализ пространственных ситуаций является традиционным способом изучения проблем и построения решений [6]. Аналитик и интеллектуальная ГИС образуют гибридную интеллектуальную систему, главным достоинством которой является включение в принятие решений интуиции и опыта аналитика. Недостатком такого подхода являются ограниченные возможности геоаналитика по картографическому анализу ранее произошедших ситуаций. Несмотря на совершенствование диалоговых средств геоинформационных систем (ГИС) [7], [8], без использования интеллектуальных обобщений опыта в ходе диалога выработки решений добиться высокой достоверности результата не удается. Готовых механизмов интеллектуального обобщения в современных ГИС нет. При существенном разнообразии пространственных ситуаций критически важно подбирать метрики сходства, адекватные конкретной решаемой задаче. Несмотря на широкий спектр существующих формальных метрик [9], остаётся актуальной проблема выделения их параметров, значимых с точки зрения содержательного смысла [10]. Необходимо обеспечить баланс между уровнем абстрактности метрики и содержательностью её параметров. Метрика выступает одним из ключевых компонентов формализации знаний, поскольку позволяет количественно оценивать близость ситуаций и тем самым поддерживать процессы поиска и адаптации решений [11]. В связи с этим задача разработки адекватных способов представления ситуационных знаний и накопленного опыта остается одним из приоритетных направлений исследований в области анализа пространственных ситуаций [12], [13]. При генерации решений интеллектуальными ГИС остро стоит вопрос реализуемости этих решений. Предварительная

оценка реализуемости выработанного решения приобретает важное значение [14]. Эту задачу можно рассматривать как отображение карты или схемы решения в заданную локацию. Перенос ранее реализованных решений в новую локацию по сути своей неоднозначен. Необходимо исследование формы картографического представления решений, которое позволит обосновать достоверность оценки реализуемости [15], [16].

Постановка задачи анализа пространственной ситуации

Процесс анализа пространственной ситуации и выработки решения неформально заключается в том, чтобы осмыслить пространственные данные об объекте, событии или явлении, выбрать аспект рассмотрения, а затем создать картографическую схему решения соответственно сформировавшемуся представлению о ситуации. Считая описанную последовательность действий разумной, рассмотрим их с целью реализации средствами GeoAI [17].

Пространственные ситуации описываются геоинформационными моделями, которые включают в себя подмножество описанных с ГИС картографических объектов X, каждый из которых обладает геометрическим представлением (g) и набором атрибутивных данных (a):

$$x_i =< g_i, a_i >, x_i \in X.$$

Пространственные ситуации описываются картографическими объектами:

$$S \to X^m, 1 < m \leq |X|.$$

Задача принятия решения в пространственной ситуации $s_k \in S$ заключается в построении картографической схемы решения:

$$d_k \in D \to X^m, 1 < m \leq |X|,$$

которая обеспечит наилучшее значение критерия качества $W(s_k, d_k)$. Трудность достижения результата заключается в отсутствии достаточной информации о структуре пар $< s_k, d_k >$. Во-первых, многовариантна и неоднозначна задача конструирования множества s_k, описывающего проблемную ситуации реального мира. Обычно это субъективно делает аналитик в диалоге с ГИС. Во-вторых, построение d_k затруднено неполнотой сведений о влиянии деталей схемы решения на качество конечного результата. Наиболее эффективным в этом случае представляется использование опыта решения аналогичных задач. Предположим, что в ГИС имеется множество прецедентов опыта анализа ситуаций, относящихся к различным контекстам $c_k \in C$. Контекст представляет собой информационный объект, необходимый для использования относящихся к нему прецедентов $< s_k, d_k >$. Свойств и методы контекста позволяют специальным образом обрабатывать геометрию и атрибуты картографических объектов прецедента. Тем самым контекст представляет смысловое содержание прецедента. Одним из объектов контекста является объект метрики сходства, вычисляющий расстояние между заданной парой прецедентов. Заметим, что реализация метрики несет скрытую угрозу смысловой целостности решений. Она использует неявные аналогии типов свойств, которые реально могут оказаться неправдоподобными. Чем проще метрика, тем менее достоверен результат. Выработка решений в интеллектуальной ГИС строится по методу CBR. Пусть задана проблемная ситуация s_{probl} в контексте $c_s \in C$. Смысл проблемы отражен в контексте. Требуется найти схожий прецедент этого же контекста и затем адаптировать его решение. В общем виде

$$\begin{cases} W(s_k, d_k) \to extr \\ R(s_a, s_b) < R^*, c_s \in C. \end{cases} \quad (1)$$

здесь W – критерий качества принятого в ситуации решения, $R(s_a, s_b)$ метрика расстояния, R^*– ограничение. Традиционно CBR предполагает, что решение d_k подвергается апробированию и в зависимости от результата принимается или отвергается. Анализ задачи приводит к необходимости решения следующих подзадач:

1. Необходимо расширить структуру прецедента знаниями (опытом), отражающими детали последующего использования прецедента;
2. Необходимо ввести разумную оценку сходства прецедентов, учитывающую наличие локальных обобщений;
3. Необходимо разработать механизм оценки реализуемости заданной ситуации в другой локации.

Для решения перечисленных подзадач предлагается использовать особую двухкомпонентную модель образов пространственных ситуаций [18].

Двухкомпонентная модель образа пространственной ситуации

Двухкомпонентная модель ситуации s, называемая образом $I(s)$, имеет вид:

$$I(s) = < s, H(s) >, \quad H(s) = H_a(s) \cup H_i(s) \cup H_c(s), \tag{2}$$

где $H_a(s)$ – множество допустимых, $H_i(s)$ – множество недопустимых, $H_c(s)$ – множество возможный преобразований ситуации в одном и том же контексте.

Каждое множество состоит из картографических объектов, которые создаются при описании образа. Допустимые преобразования $H_a(s)$ отражают границы изменения геометрии и семантики, сохраняющие смысл. Например, место парковки автомобилей может иметь некоторую особую форму, показанную на карте. Недопустимые преобразования $H_i(s)$ описывают границы размещения объектов и отношений, принципиально искажающих смысл ситуации. Возможные преобразования $H_c(s)$ задают границы изменения и семантики, которые реально наблюдались, но их влияние вызывает сомнение в момент создания образа. Предложенная структура преобразований ориентирована на их дальнейший анализ с применением интуиционистских нечетких множеств и интуиционистской логики [6], [19]. Интуиционизм обладает выразительностью, необходимой для классификации сложных пространственных объектов и отношений.

Каждое из $H(s)$ является локальным обобщением знаний о поведении конкретной ситуации в области ее локализации. Это обобщение как картографический объект располагается на отдельном слое с привязкой к определенному контексту.

Метрика сходства ситуаций определяется через элементы их образов [7]. Для оценки расстояния между ситуациями в заданном контексте используют данные прецедента и его преобразований:

$$R(s_a, s_b) = F_R\big(I(s_a), I(s_b)\big).$$

Функция F_R учитывает объекты прецедента и его преобразований. Обязательное присутствие такой функции гарантирует разумность восприятия образов: интеллектуальный агент способен оценить сходство в установленном контексте.

Создание образа ситуации выполняется экспертами в процессе анализа наблюдавшихся событий и их отображения на карте ГИС. Целостное восприятие ситуации невозможно без использования окрестности объектов ситуации. Под окрестностью понимаются пространственные и семантические отношения, важные для принятия

решений в ситуации. Знание о связях объектов прецедента с элементами топологии местности представляет собой дополнительное измерение пространства образов. Его использование повышает достоверность оценки ситуации.

Расширим модель и представим образ в виде двух элементов:

$$I(s) = < s, H(s) > \cup < e, H(e) >= I_B(s) \cup I_E(s),$$

где $I_B(s)$ является базовым образом ситуации, а $I_E(s)$ представляет образ пространственной окрестности ситуации. Формально это набор картографических объектов и отношений. Содержательно это два набора объектов, событий и явлений реального мира, которые по-разному повлияли и будут влиять на реализацию исходной ситуации и принятые решения. Образ окрестности также создается в процессе ретроспективного анализа ситуации экспертами.

Метрика сходства между ситуациями для новой модели приобретает вид:

$$R(s_a, s_b) = F_R\big(I_B(s_a), I_B(s_b), I_E\ (s_a), I_E\ (s_b)\big).$$

Существует много вариантов выражений для метрик [9]. Выбор конкретного варианта в данном случае принципиальной роли не играет, важна зависимость от большего числа параметров.

Трансформирование ситуаций

Разумность представления о ситуации заключается в возможности воспроизвести ее в заданной области пространства и семантики. Это главная цель ситуационного анализа в случае принятия решений: ситуация может оказаться нереализуемой или реализуемой после определенной адаптации. При сопоставлении и адаптации ситуаций важнейшим фактором качества результата является сохранение смысла. Рассмотренное выше представление смысла преобразованиями должно быть дополнено операцией трансформирования образов [19], [20]. Под трансформированием понимается отображение образа ситуации $I(s)$ в заданную ранее не известную локацию w_R. При сопоставлении образов геоаналитиком интуитивно оценивается, реализуема ли сравниваемая ситуация в проблемной области. Реализуемость означает, что может быть сконструирован, по крайней мере, один экземпляр анализируемого образа. Обращает на себя внимание то, что реализуемость не учитывается в метрике расстояния. Для пространственных ситуаций подобное предположение может быть ошибочным. Причина – в особенностях целевой топологии, которая влияет на преобразования образа и проявляется через изменения этих преобразований. Формально образ трансформированной ситуации $I_R(s)$ формируется:

$$I_R(s) = F_{TR}(I(s), w_R),$$

где F_{TR} – функция (алгоритм) трансформирования, w_R – целевая пространственная область трансформирования. Для обоснованного использования трансформирования должна использоваться функция доверия к трансформированию $F_{tw}(I_R(s)$, которая задает степень уверенности в том, что отображенные картографические объекты преобразований соответствуют смыслу ситуации. Функция $F_C\ (I_R(s))$ (алгоритм) конструирования экземпляра ситуации из образа в заданной локации с заданным уровнем доверия α использует трансформированные преобразования. Из множества возмож-

ных экземпляров должен быть выбран наиболее простой. Обозначив через W_p функцию оценки сложности картографического изображения, получим формулировку оптимизационной задачи, которая должна быть решена при трансформировании образа:

$$\begin{cases} W_p\ (F_C(\ I_R(s))) \to min, \\ \quad F_{tw}(\ I_R(s) \le \alpha, \\ I_R(s) = F_{TR}(I(s), w_R). \end{cases} \quad (3)$$

Задача решается перебором вариантов отображения ситуации. Поскольку число вариантов может оказаться огромным, решение ограничивается либо числом сгенерированных вариантов, либо временем поиска. Ситуация считается нереализуемой в указанной локации, если (3) не имеет решения. Первым шагом адаптации следует считать отображение образа известного решения с заданным уровнем доверия в заданную локацию. Следующий шаг – это использование функции конструирования адаптированного решения $F_{AC}(I_R(s))$ с заданным уровнем доверия β дает картографическое представление результата или сообщение о невозможности его получения. Формально следует решить задачу:

$$\begin{cases} W_p\ (F_{\mathrm{AC}}(I_R(s))) \to min, \\ \quad F_{tw}(I_R(s) \le \beta, \\ I_R(s) = F_{TR}(I(s), w_R). \end{cases} \quad (4)$$

Так же, как и для задачи (3), применяется переборный способ поиска решения. Если решение не будет найдено за ограниченное время или после рассмотрения заданного числа вариантов, удовлетворительного варианта адаптации не существует.

Построение интеллектуальных алгоритмов трансформирования, конструирования и адаптации представляет собой самостоятельную задачу. Как возможный вариант, может применяться генерация на основе имеющихся экспертных вариантов с использованием нейросетей. Функции F_{TR}, F_C, F_{AC} строятся путем обучения на образах известных ситуаций. Обучающим материалом служит множество кортежей для трансформированных ситуаций $< I(s), w_R, I_R(s)\ , F_C(\ I_R(s))\ >$и множество кортежей для адаптированных решений $< I(s), w_R, I_R(s)\ , F_{\mathrm{AC}}(I_R(s))\ >$.

На основе датасета с кортежами соответствующей структуры может быть настроена генеративная нейросеть. На ее выходах воспроизводятся трансформированные ситуации либо адаптированные решения. В качестве примера трансформирования и оценки реализуемости рассмотрим две ситуации. В соответствии с рисунками 1-4 каждая схема задет размещение элементов транспортной инфраструктуры, которые именуются основными объектами.

Рассмотрим ситуацию с образом $I_1 =< d_1,\ H_a(\mathrm{d}_1) >$ в соответствии с рисунком 1. Прецедент d_1 представлен тремя полигонами, допустимое преобразования положения которых задается полигоном $H_a(\mathrm{d}_1)$. Данный полигон задает область, внутри которой произвольным образом может располагаться от 3 до 5 объектов определенных классов. Это ограничение задается свойством класса «Положение элементов», экземпляром которого является $H_a(\mathrm{d}_1)$. Границы полигона заданы экспертом. В соответствии с рисунком 2 показан образ трансформированной ситуации $I_{1TR} =< d_{1TR},\ H_a(\mathrm{d}_{1TR}) >$. Алгоритм трансформирования заключается в геометрическом отображении исходной ситуации в заданную пространственную область. Форма полигона $H_a(\mathrm{d}_{1TR})$ изменилась из-за не показанных в соответствии с рисунком 2 деталей целевой топологии. При трансформировании изменилось число основных объектов,

что стало следствием специфики топологии заданной локации. Предположим, что функция доверия оценивает число основных объектов и это ограничение выполнено. Тогда трансформация оказалась допустимой и ситуацию можно признать реализуемой в целевой области. Все допустимые преобразования сохранены. Следовательно, исходная ситуация реализуема в указанной локации

Если в ситуационном анализе учитывается окружение, в образ добавляются новые объекты. В соответствии с рисунком 3 показаны 3 круга, моделирующих объекты окружения. Образ окружения $I_{1E} = < d_{1E}, H_a(\mathrm{d}_{1E}) >$ дополняет смысл основного образа I_1. Полигон $H_a(\mathrm{d}_{1E})$ задает область допустимых преобразований окружения. В соответствии с рисунком 4 показаны все трансформированные объекты и полигон $H_a(\mathrm{d}_{1ETR})$. Предполагается, что в результате трансформирования принципиально изменились топологические отношения областей $H_a(\mathrm{d}_{1TR})$ и $H_a(\mathrm{d}_{1ETR})$. В соответствии с рисунками 1 и 3 $H_a(\mathrm{d}_{1TR})$ и $H_a(\mathrm{d}_{1ETR})$ пересекаются, тогда как В соответствии с рисунками 2 и 4 область окружения полностью охватывает область основных объектов ситуации.

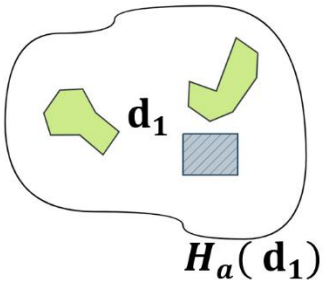


Рисунок 1 – Образ ситуации I_1

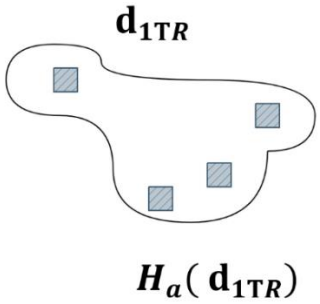


Рисунок 2 – Образ ситуации I_{1TR}

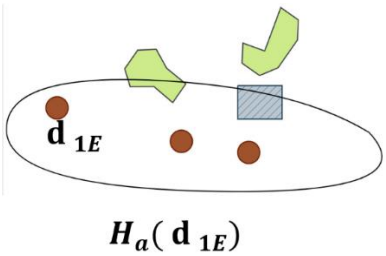


Рисунок 3 – Образ ситуации с объектами окружения I_{1E}

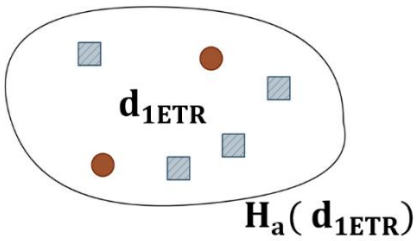


Рисунок 4 – Образ трансформированной ситуации с окружением

Экспериментальное исследование

Эксперимент с реальными данными проводился с целью оценки эффекта применения локальных обобщений. Гипотеза исследования состояла в том, что использование модели интеллектуальной геоинформационной модели (ИГИМ) дает более точную рекомендацию применения инфраструктурных обновлений городских перекрестков, чем модель CBR. Эксперимент состоял в том, чтобы подготовить базу знаний для каждой модели и провести статистические испытания, в каждом из которых выработанные моделями рекомендации сравниваются с экспертной. Если рекомендация модели совпала с экспертной, она считается достоверным результатом.

На этапе подготовки эксперимента было сделано следующее:

– сформирован набор картографических изображений перекрестков разной пространственной конфигурации. Перекрестки были представлены как прецеденты реализованных рекомендаций по обновлению перекрестков в двух контекстах: воздействия на природный ландшафт и совершенствование технического оснащения;

– подготовлены образы описанных выше прецедентов;

– разработаны программные средства оценки сходства и реализуемости ситуаций на основе моделей CBR и ИГИМ;

– установлена методика проведения эксперимента: случайно выбранный перекресток оценивается по степени близости к известным прецедентам соответственно модели CBR и в случае достижения заданного уровня близости рекомендация принимается. Методом ИГИМ анализируется сходство образов и в случае реализуемости близкого образа рекомендация принимается. Эксперт формулирует собственные рекомендации в каждом контексте. В результате формируется массив статистических результатов испытаний;

– подготовлено представление территории города в виде двух областей с отличающимся характером застройки и дорожной сети – центральной и периферийной. Для каждой области сделан независимый статистический эксперимент для оценки адаптируемости рекомендаций.

Данные для эксперимента взяты с сервера OpenStreetMap для города Таганрога. Выбрано 16 перекрестков, 8 из которых представлены прецедентами. Остальные 8 описаны образами в двух контекстах. Для каждого из этих перекрестков эксперт указал наиболее эффективный вариант обновления.

Установлена Евклидова метрика оценки сходства. Для CBR она имеет вид:

$$d(\mathrm{A}, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i^A - x_i^B)^2},$$

где в контексте воздействия на природный ландшафт использованы следующие нормированные признаки:x_1 – количество рукавов перекрёстка; x_2 – площадь перекрестка; x_3 – среднее число аварий в год по вине водителей, не справившихся с управлением транспортным средством; x_4 – среднее число аварий по вине пешеходов x_5 – пропускная способность перекрестка.

Для контекста совершенствования технического оснащения использованы следующие нормированные признаки: x_1 – количество светофоров на перекрестке; x_2 – число нерегулируемых пешеходных переходов; x_3 – среднее число аварий в год по вине водителей, не справившихся с управлением транспортным средством; x_4 – среднее число аварий по вине пешеходов; x_5 – пропускная способность перекрестка.

Для сравнения образов ситуаций использовались следующие преобразования: x_1 – ДП числа и относительного расположения рукавов перекрестка; x_2 – ДП расположения перекрестка как площадного объекта относительно прилегающих зданий и сооружений в буферной зоне 150 метров; x_3 – ДП положения светофоров на рукавах перекрестков с привязкой пропускной способности и рядности движения; x_4 – ДП расположения нерегулируемых пешеходных переходов; x_5 – ДП местонахождения растительности, затрудняющей обзор при поворотах; x_6 – расположенные в буферной зоне 200 метров источники интенсивного пассажиропотока; x_7 – ДП числа аварий по вине водителей и пешеходов.

Для каждого из перечисленных объектов введен объект недопустимого преобразования, указывающий на наличие объектов и отношений, изменяющих смысл ситуации. Для x_1, например, это ремонт одного или нескольких рукавов, x_2 – ограничение площади многоуровневых развязок, и т.д.

ИГИМ дает большую долю совпадений, чем применение CBR. Более высокая достоверность объясняется анализом пространственных особенностей, допускающих отклонения от значений, указанных прецедентами. Метрики сходства и варианты рекомендаций устанавливаются разными экспертами. Расхождения могут быть обусловлены субъективностью. В этом отношении ИГИМ имеет преимущество, так как учитывает уровень доверия к формируемой рекомендации.

В соответствии с рисунком 5 показано пространственное распределение рекомендаций для двух зон территории города, отличающихся характером застройки.

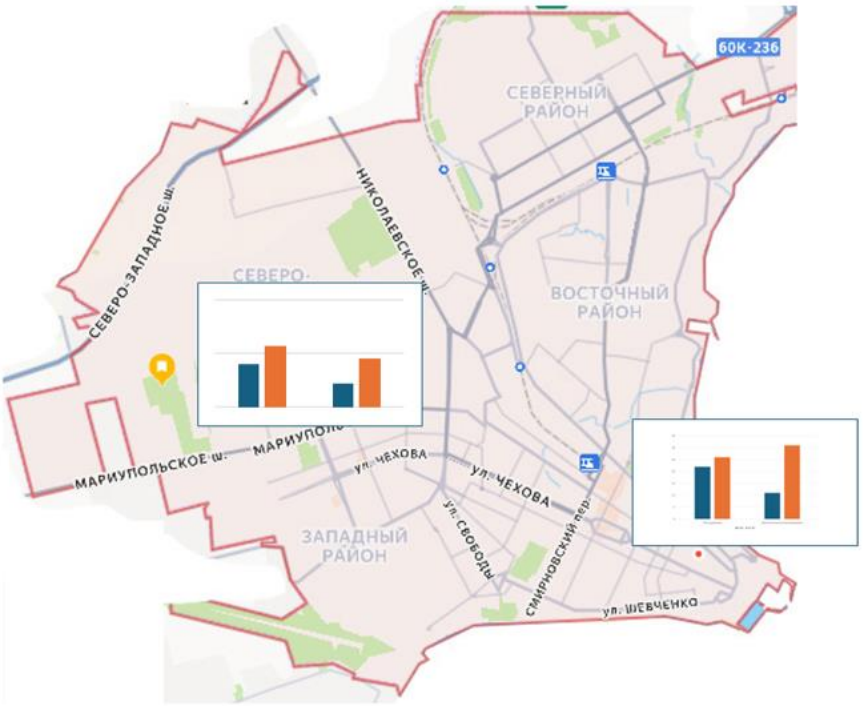


Рисунок 5 – Пространственное распределение рекомендаций

В соответствии с рисунком 5 проиллюстрировано расхождение в рекомендациях для областей различной топологии. Для экспериментальных данных наблюдалось существенное различие рекомендаций, сформированных двумя моделями. В среднем значения модели ИГИМ оказались ближе к экспертной рекомендации. Достоверность рекомендации модели сопоставления образов выше, чем модели CBR, что объясняется учетом пространственных деталей и областей преобразований. Метод CBR дает гораздо больше неопределенных результатов, когда степень сходства оказывается недостаточной. Модель образов ситуаций дает больше результатов несходства из-за нереализуемости ситуации в указанном месте. Пространственное распределение достоверности более однородно для модели образов. CBR не позволяет учесть пространственные особенности территории. Это подтверждается ростом числа ошибок рекомендации в зонах различной застройки.

Заключение

Использование локальных обобщений повышает достоверность результатов, полученных в результате использования экспертных данных. В пространственном анализе обобщения представлены геометрическими объектами, определяя специфику

их использования. Допустимые, недопустимые и возможные преобразования отражают глубоко интуитивные образы реальности, сложившиеся у геоаналитиков. Манипуляции геометрического характера с поисковыми переборными процедурами (3) и (4) образуют особую концепцию использования локальных обобщений для GeoAI. Дальнейшее развитие данного направления исследований – в поиске путей реализации ИГИМ в условиях ресурсных ограничений.

Список источников

1. Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence / Mai G., Xie Y., Jia X., Lao N., Rao J., Zhu Q., Liu Z. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. Vol. 136.
2. Zheng C. Emergency decision-making in public health emergencies: Integrating intuitionistic fuzzy preferences with knowledge-unit case-based reasoning / C. Zheng, Z. Zhong // Applied Soft Computing. 2025. Vol. 180.
3. Yeh A. G. O. Case-based reasoning (CBR) in development control / G. O. Yeh, A. Shi X. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2001. Vol. 3, Iss. 3, P. 238–251.
4. Violos J. Cognition and context-aware decision-making systems for a sustainable planet: a survey on recent advancements, applications and open challenges / J. Violos, G. Mamanis // Discover Sustainability. 2025.
5. Huck J., Decision making under uncertainty: increasing the impact of public Participatory GIS / J. Huck, T. Denwood, J.E. Taylor // International Journal of Geographical Information Science. 2026. P. 237–257.
6. Atanassov K. T. Intuitionistic fuzzy sets / K. T. Atanassov // Fuzzy Sets and Systems. 1986. Vol. 20, Iss. 1, P. 87–96.
7. XR-based visual enhancing cues for human spatial navigation: A systematic literature review / Zhou X., Zhang Y., Yu H., Du Q., Yu X. // International Journal of Industrial Ergonomics. 2025. Vol. 110.
8. Petry F. Intuitionistic Fuzzy Sets for Spatial and Temporal Data Intervals / F. Petry // Information. Vol. 15, Iss. 4.
9. Kulis B. Metric Learning: A Survey / B. Kulis // Foundations and Trends in Machine Learning. 2013. P. 287–364.
10. Asadollahi H. Bridging building information systems: A parameter-efficient semantic approach to construction data interoperability / H. Asadollahi, El Meouche R. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025.
11. Zhao Z. An improved spatial case-based reasoning considering multiple spatial drivers of geographic events and its application in landslide susceptibility mapping / Z. Zhao, Chen J. // CATENA. 2023. Vol. 23.
12. Elomiya A. A hybrid suitability mapping model integrating GIS, machine learning, and multi-criteria decision analytics for optimizing service quality of electric vehicle charging stations / A. Elomiya, J. Křupka // Sustainable Cities and Society. 2024. Vol. 106.
13. Deng S. A Spatial Case-Based Reasoning Method for Healthy City Assessment: A Case Study of Middle Layer Super Output Areas in Birmingham, England / S. Deng // International Journal of Geo-Information. 2024.
14. Yoosuf S. Improving perceptual quality in spatiotemporal timeseries forecasting / S. Yoosuf, H. Baali, A. Bouzerdoum // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 156, Part B.
15. Quiroga C. A. Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology / C. A. Quiroga // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 1998. P. 101–127.
16. Galkin A. Navigating the future of urban logistics: Conceptual framework for Dynamic Freight Management / A. Galkin, L. Švadlenka, R. Vrba // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2025.
17. Xing J. The challenges of integrating explainable artificial intelligence into GeoAI / J. Xing, R. Sieber // Transactions in GIS. 2023. Vol. 27, Iss. 3, P. 626–645.
18. Belyakov S. Generation of Solutions in Spatial Situational Analysis of Logistic Projects / S. Belyakov, A. Isaev, D. Grigoriev // IEEE Xplore. 2025.
19. Belyakov S. Intuitive figurative representation in decision-making by map data / S. Belyakov, A. Bozhenyuk, I. Rozenberg // Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing. 2018. Vol. 30, Iss. 2–3, P. 165–175.
20. Transformation of elements of geoinformation models in the synthesis of solutions / Belyakov S., Belyakova M., Bozhenyuk A., Rozenberg I. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. P. 526–535.

References

1. Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence / Mai G., Xie Y., Jia X., Lao N., Rao J., Zhu Q., Liu Z. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2025. – Vol. 136.
2. Zheng C. Emergency decision-making in public health emergencies: Integrating intuitionistic fuzzy preferences with knowledge-unit case-based reasoning / C. Zheng, Z. Zhong // Applied Soft Computing. – 2025. – Vol. 180.
3. Yeh A. G. O. Case-based reasoning (CBR) in development control / A. G. Yeh, O. X. Shi // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2001. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 238–251.
4. Violos J. Cognition and context-aware decision-making systems for a sustainable planet: a survey on recent advancements, applications and open challenges / J. Violos, G. Mamanis // Discover Sustainability. – 2025.
5. Huck J. Decision making under uncertainty: increasing the impact of public Participatory GIS / J. Huck, T. Denwood, J.E. Taylor // International Journal of Geographical Information Science. – 2026. – P. 237–257.
6. Atanassov K. T. Intuitionistic fuzzy sets / K. T. Atanassov // Fuzzy Sets and Systems. – 1986. – Vol. 20, Iss. 1. – P. 87–96.
7. XR-based visual enhancing cues for human spatial navigation: A systematic literature review / Zhou X., Zhang Y., Yu H., Du Q., Yu X. // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2025. – Vol. 110.
8. Petry F. Intuitionistic Fuzzy Sets for Spatial and Temporal Data Intervals / F. Petry // Information. – Vol. 15, Iss. 4.
9. Kulis, B. Metric Learning: A Survey / B. Kulis // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2013. – P. 287–364.
10. Asadollahi H. Bridging building information systems: A parameter-efficient semantic approach to construction data interoperability / H. Asadollahi, El Meouche R. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2025.
11. Zhao Z. An improved spatial case-based reasoning considering multiple spatial drivers of geographic events and its application in landslide susceptibility mapping / Z. Zhao, J. Chen // CATENA. – 2023. – Vol. 23.
12. Elomiya A. A hybrid suitability mapping model integrating GIS, machine learning, and multi-criteria decision analytics for optimizing service quality of electric vehicle charging stations / A. Elomiya, J. Křupka // Sustainable Cities and Society. – 2024. – Vol. 106.
13. Deng S. A Spatial Case-Based Reasoning Method for Healthy City Assessment: A Case Study of Middle Layer Super Output Areas in Birmingham, England / S. Deng // International Journal of Geo-Information. – 2024.
14. Yoosuf S. Improving perceptual quality in spatiotemporal timeseries forecasting / S. Yoosuf, H. Baali, A. Bouzerdoum // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 156, Part B.
15. Quiroga C. A. Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology / C. A. Quiroga // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 1998. – P. 101–127.
16. Galkin A. Navigating the future of urban logistics: Conceptual framework for Dynamic Freight Management / A. Galkin, L. Švadlenka, R. Vrba // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2025.
17. Xing J. The challenges of integrating explainable artificial intelligence into GeoAI / J. Xing, R. Sieber // Transactions in GIS. – 2023. – Vol. 27, Iss. 3. – P. 626–645.
18. Belyakov S. Generation of Solutions in Spatial Situational Analysis of Logistic Projects / S. Belyakov, A. Isaev, D. Grigoriev // IEEE Xplore. – 2025.
19. Belyakov S. Intuitive figurative representation in decision-making by map data / S. Belyakov, A. Bozhenyuk, I. Rozenberg // Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing. – 2018. – Vol. 30, Iss. 2–3. – P. 165–175.
20. Transformation of elements of geoinformation models in the synthesis of solutions / Belyakov S., Belyakova M., Bozhenyuk A., Rozenberg I. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – P. 526–535.

RESUME

S. L. Belyakov, A. V. Isaev, O. N. Pokusaev

Local spatial generalizations in the analysis of transport infrastructure

The article is devoted to the problem of increasing the reliability of decision-making using geospatial intelligence (GeoAI). The case-based reasoning (CBR) method relies on global generalizations, which lead to erroneous conclusions under conditions of spatial heterogeneity, while a complete rejection of generalizations rules out the reuse of expert experience.

A two-component model of the spatial situation image is proposed, including a basic image and an image of the spatial neighborhood. The image contains a set of permissible, impermissible, and possible transformations that preserve the context of the situation. The functions of trust in transformation, the tasks of assessing the feasibility of a situation and adapting a solution, as well as an expanded similarity metric that takes into account local generalizations are introduced.

The Intelligent Geographic Information Model (IGIM) model provides a greater proportion of overlap between recommendations and expert assessment compared to case analysis in both contexts. The spatial distribution of the reliability of IGIM recommendations turned out to be more homogeneous for zones with different building patterns, whereas CBR shows an increase in the number of errors when switching between zones. The CBR method yields significantly more uncertain results due to an insufficient degree of similarity.

Local spatial generalizations significantly increase the reliability of decisions made based on expert data. Permissible, impermissible, and possible transformations reflect the deeply intuitive images of reality held by geoscientists, and the exhaustive procedures for transformation and adaptation form the conceptual basis for applying local generalizations in GeoAI.

РЕЗЮМЕ

С.Л. Беляков, А.В. Исаев, О.Н. Покусаев

Локальные пространственные обобщения в анализе транспортной инфраструктуры

Статья посвящена проблеме повышения достоверности выработки решений средствами геопространственного интеллекта (GeoAI). Метод рассуждений на основе прецедентов (CBR) опирается на глобальные обобщения, которые в условиях пространственной неоднородности приводят к ошибочным выводам, тогда как полный отказ от обобщений исключает повторное использование экспертного опыта.

Предложена двухкомпонентная модель образа пространственной ситуации, включающая базовый образ и образ пространственной окрестности. Образ содержит множество допустимых, недопустимых и возможных преобразований, сохраняющих контекст ситуации. Введены функции доверия к трансформированию, задачи оценки реализуемости ситуации и адаптации решения, а также расширенная метрика сходства, учитывающая локальные обобщения.

Модель интеллектуальной геоинформационной модели (ИГИМ) обеспечивает большую долю совпадений рекомендаций с экспертной оценкой по сравнению с прецедентным анализом в обоих контекстах. Пространственное распределение достоверности рекомендаций ИГИМ оказалось более однородным для зон с различным характером застройки, тогда как CBR демонстрирует рост числа ошибок при переходе между зонами. Метод CBR даёт значительно больше неопределённых результатов из-за недостаточной степени сходства.

Локальные пространственные обобщения существенно повышают достоверность решений, получаемых на основе экспертных данных. Допустимые, недопустимые и возможные преобразования отражают глубоко интуитивные образы реальности геоаналитиков, а переборные процедуры трансформирования и адаптации образуют концептуальную основу применения локальных обобщений в GeoAI.

Беляков Станислав Леонидович – д.т.н., профессор кафедры информационно-аналитических систем безопасности, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 89185109607, beliacov@yandex.ru, *Область научных интересов:* ГИС, экспертные системы, пространственный анализ, искусственный интеллект. ORCID: 0000-0002-9939-8789.
Исаев Александр Викторович – м.н.с. НИИ МВС им. А.В. Каляева, аспирант кафедры информационно-аналитических систем безопасности, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 89518352784, alis@sfedu.ru, *Область научных интересов:* ГИС, пространственный анализ, искусственный интеллект. ORCID: 0009-0009-4759-9448.
Покусаев Олег Николаевич – к.э.н., доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), директор Передовой инженерной школы «Академия ВСМ» МИИТ, 89166652310, o.pokusaev@rut.digital, *Область научных интересов:* геоинформационные системы, теория графов, теория принятия решений. ORCID 0000-0001-6916-8897.

Belyakov Stanislav Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Information and Analytical Security Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», 89185109607, beliacov@yandex.ru, *Area of scientific interest*: GIS, expert systems, spatial analysis, artificial intelligence. ORCID: 0000-0002-9939-8789.
Isaev Alexander Viktorovich – Junior Researcher at the Research Institute of Multiprocessor Computing Systems named after A.V. Kalyaev, postgraduate student at the Department of Information and Analytical Security Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», 89518352784, alis@sfedu.ru, *Area of scientific interest*: GIS, spatial analysis, artificial intelligence. ORCID: 0009-0009-4759-9448.
Pokusaev Oleg Nikolaevich – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (MIIT), Director of the Advanced Engineering School «Academy VSM» MIIT, 89166652310, o.pokusaev@rut.digital, *Area of scientific interest*: geoinformation systems, graph theory, decision theory. ORCID 0000-0001-6916-8897.

Статья поступила в редакцию: 22.08.2026
одобрена после рецензирования 30.08.2026; принята к публикации 02.09.2026
The article was submitted 22.08.2026; approved after reviewing 30.08.2026;
accepted for publication 02.09.2026.