

Научная статья
УДК 004.822, 004.89
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.010

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ КАК ГЕОСЕМАНТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРАФА ЗНАНИЙ

Александр Владимирович Вицентий^{1, 2}

¹Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, alx_2003@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1331-4749>

²Филиал Мурманского арктического университета в г. Апатиты, Апатиты, Россия

Аннотация

Моделирование пространственных ситуаций является одним из эффективных средств информационной поддержки принятия решений, в том числе и для задач управления сложными динамическими системами с учетом региональной специфики. В настоящее время популярным инструментом для моделирования пространственных ситуаций являются географические информационные системы. Современные системы такого класса моделируют ситуации с помощью электронных карт, а также предоставляют пользователям набор инструментов для анализа пространственных данных. Одной из проблем данного подхода является сложность учета семантических свойств и связей отображаемых объектов, которые не могут быть напрямую записаны в базу данных географической информационной системы. Еще одна сложность, обусловленная подходом к моделированию ситуаций и способом организации данных, связана с добавлением новой семантической информации об уже визуализированных объектах. Данная работа посвящена решению проблемы автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций для решения задач информационной поддержки принятия решений с учетом географических и семантических свойств пространственных объектов. Предложен способ семантического обогащения геопространственных данных на основе графа знаний. Выполнен краткий обзор существующих подходов к использованию графов знаний для формирования картографических изображений. Описаны модель пространственной ситуации и основные компоненты технологии автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений. Представлены результаты моделирования пространственной ситуации как геосемантического изображения, построенного с использованием картографической основы и геопространственного графа знаний.

Ключевые слова:

геопространственный граф знаний, пространственная ситуация, геосемантическое изображение, ситуационное моделирование, пространственный анализ, системы информационной поддержки принятия решений

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема научно-исследовательской работы «Методы и технологии создания интеллектуальных информационных систем для поддержки развития сложных динамических систем с региональной спецификой в условиях неопределенности и риска» (регистрационный номер 1023032300374-0-2.2.1).

Для цитирования:

Вицентий А. В. Моделирование пространственных ситуаций как геосемантических изображений на основе геопространственного графа знаний // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 3. С. 140–153. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.010.

Original article

MODELING OF SPATIAL SITUATIONS AS GEOSEMANTIC IMAGES BASED ON THE GRAPH OF GEOSPATIAL KNOWLEDGE

Alexander V. Vicentiy^{1, 2}

¹Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, alx_2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1331-4749>

²Apatity branch of Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia

Abstract

Spatial situations modeling is an effective means of providing information support for decision-making, including for managing complex dynamic systems while taking into account regional specifics. Geographic information systems

are currently a popular tool for modeling spatial situations. Modern systems of this class model situations using electronic maps and also provide users with a set of tools for analyzing spatial data. One of the challenges of this approach is the difficulty of accounting for the semantic properties and relationships of displayed objects, which cannot be directly recorded in the geographic information system database. Another challenge, caused by the approach to modeling situations and the method of data organization, is associated with the addition of new semantic information about already visualized objects. This paper addresses the problem of automated construction of spatial situation models for solving information support problems for decision-making, taking into account the geographic and semantic properties of spatial objects. A method for semantic enrichment of geospatial data based on a knowledge graph is proposed. A brief overview of existing approaches to using knowledge graphs to generate cartographic images is provided. The spatial situation model and the main components of the technology for automated construction of spatial situation models in the form of geosemantic images are described. The results of modeling the spatial situation as a geosemantic image constructed using a cartographic framework and a geospatial knowledge graph are presented.

Keywords:

geospatial knowledge graph, spatial situation, geosemantic image, situational modeling, spatial analysis, decision support information systems

Acknowledgments:

the study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic “Methods and technologies for creating intelligent information systems to support the development of complex dynamic systems with regional specifics in conditions of uncertainty and risk” (registration number of the research topic 1023032300374-0-2.2.1).

For citation:

Vicentiy A. V. Modeling of spatial situations as geosemantic images based on the graph of geospatial knowledge. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2025, Vol. 16, No. 3, pp. 140–153. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.010.

Введение

В настоящее время ситуационное моделирование для информационной поддержки принятия решений в целях обеспечения развития сложных динамических региональных систем является одним из актуальных подходов, обеспечивающих оперативность и высокое качество принимаемых решений [1–3]. Современный этап цифровой трансформации характеризуется экспоненциальным ростом объемов геопространственных данных. Эти данные генерируются не только людьми, являющимися специалистами в области картографии и пространственного анализа, но и обычными пользователями различных информационных систем, а также в результате автоматической обработки спутниковых данных, устройствами интернета вещей, социальными медиа и геосервисами [4]. В условиях растущей сложности управляемых систем и динамичности происходящих в них процессов, требующих оперативного принятия решений, моделирование ситуаций играет ключевую роль в процессе обеспечения информацией лиц, принимающих решения (ЛПР) [5; 6].

В общем случае под моделированием ситуации понимают создание некоторого формализованного представления части реального мира, описываемого совокупностью взаимосвязанных объектов, их значимых характеристик и состояний, отношений между ними, а также, событий, происходящих в определенные интервалы времени, в случае необходимости учета динамики ситуации. Такое представление называется моделью ситуации и служит адекватной абстракцией, позволяющей проводить анализ, оценку и прогнозирование ее потенциального развития. Таким образом, моделирование ситуаций — это процесс представления реальных или гипотетических условий, объектов и обстоятельств в формализованном виде с целью анализа и понимания сложных явлений, которые невозможно или сложно изучать без использования моделей [7; 8]. Оно позволяет исследовать взаимодействия элементов системы, выявлять закономерности и прогнозировать возможные исходы развития событий.

Под ситуационным моделированием также понимают метод исследования, заключающийся не только в построении моделей ситуаций, но и в проведении экспериментов, отработке управленческих решений, прогнозировании, планировании и проверке гипотез без риска для реальных объектов [9; 10]. Ситуационное моделирование — это непрерывный динамический процесс, включающий в себя не только создание модели, но и ее постоянную актуализацию на основе

поступающих данных, идентификацию текущей ситуации, оценку ее соответствия целям управления, прогнозирование возможных сценариев развития и выработку управляющих воздействий [11].

Для создания моделей конкретных ситуаций, возникающих в определенных пространственно-временных условиях и характеризующихся множеством факторов и взаимосвязей, в ситуационном моделировании применяется широкий спектр методов и подходов. Среди наиболее распространенных можно выделить детерминированное и стохастическое моделирование, имитационное моделирование, логико-лингвистическое моделирование, сценарное моделирование, когнитивное моделирование, моделирование, основанное на знаниях, и геопространственное моделирование. В нашей работе мы предлагаем способ моделирования пространственных ситуаций как геосемантических изображений на основе комбинации геопространственного, когнитивного и основанного на знаниях подходов.

В настоящее время наиболее распространенными инструментами моделирования, обработки и анализа пространственных ситуаций являются географические информационные системы (ГИС). В большинстве современных ГИС, таких, например, как ArcGIS [12], MapInfo [13] и QGIS [14], модели пространственных ситуаций представляются в виде электронных карт и некоторого набора инструментов, позволяющего выполнять базовые манипуляции с ними. В общем виде под моделью пространственной ситуации понимается формализованное упрощенное и управляемое представление реальных или абстрактных объектов, явлений и процессов, которое явным образом учитывает их пространственное положение, форму, взаимное расположение и пространственные отношения. Наибольшее распространение получила реализация модели в виде многослойного картографического изображения. Пример представления ландшафта, содержащего как искусственные, так и природные объекты, с помощью такого типа модели представлен на рис. 1 [15].

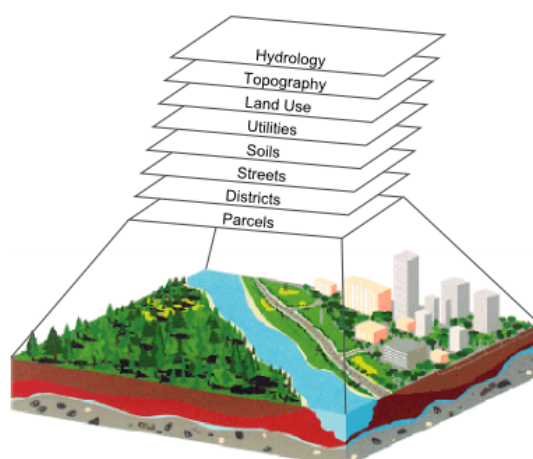


Рис. 1. Модель, состоящая из тематических слоев данных [15]

Такие модели создаются в ГИС с помощью набора тематических слоев, содержащих информацию о пространственных объектах (зданиях, дорогах, реках и т. д.), наложенных друг на друга в определенном порядке. Слои могут быть векторными либо растровыми, элементы слоя могут содержать различные атрибуты местоположения. Модели такого типа позволяют учитывать ряд пространственных отношений. Например, с помощью топологических отношений описываются смежность, пересечение, включение объектов, а метрические отношения позволяют задавать расстояния и направления. Семантическая информация задается преимущественно с помощью атрибутов (качественных характеристик) объектов, которые не должны дублировать их пространственные свойства. В модели атрибутивная информация может быть представлена с помощью текстовых или числовых значений.

Несмотря на широкое распространение, представление моделей пространственных ситуаций описанным выше способом имеет ряд недостатков, наиболее существенным из которых является невозможность добавления в модель семантической информации, которая не может быть описана

совокупностью атрибутов пространственных объектов. Примером такой семантической информации может быть информация, которая напрямую не относится к географической информации и обычно не сохраняется в базе данных ГИС, но необходима для задания контекста модели пространственной ситуации [16]. Кроме того, часто такая информация не может быть представлена с помощью комбинации текстовых или числовых значений атрибутов пространственных объектов, хранимых в базе данных ГИС [17]. Еще одной проблемой традиционного представления пространственной ситуации в виде электронной карты является невозможность адаптировать получаемые таким образом геоизображения под конкретные информационные потребности различных категорий пользователей без использования дополнительных средств [18; 19]. Также имеет место сложность, обусловленная классическим подходом к моделированию ситуаций, описанным выше, и способом организации данных в ГИС, связанная с добавлением новой семантической информации об уже визуализированных объектах. Как правило, оперативное внесение изменений в базу данных ГИС и визуализированное геоизображение не всегда возможно, кроме того, не все типы данных могут поддерживаться и корректно визуализироваться ГИС.

Перспективным подходом к решению указанных выше проблем представляется интеграция методов классического моделирования пространственных ситуаций с методами онтологического проектирования и построения графов знаний [20; 21], а также с когнитивными технологиями [22]. Совместное использование указанных методов и технологий позволяет решить проблему семантического обогащения геопространственных изображений, используемых для моделирования пространственных ситуаций без необходимости существенного изменения архитектуры ГИС. Такой подход также позволяет создавать на базе традиционных ГИС когнитивно-адаптированные системы, способные не только отражать структуру предметной области в виде семантических сетей (онтологий и графов знаний), но и учитывать контекст, извлекать скрытые зависимости и предоставлять персонализированные геоизображения для различных категорий пользователей на основе учета модели пользователя [23].

В нашей работе мы предлагаем способ построения моделей пространственных ситуаций как геосемантических изображений, представленных множеством описаний геообъектов и объектов, не хранящихся в базе данных ГИС, пространственных и семантических отношений, релевантных моделируемой ситуации. Общая схема построения такого изображения с использованием геопространственного графа знаний (ГГЗ) представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема построения геосемантического изображения

Геосемантическое изображение строится на основе интеграции геоданных, получаемых из ГИС, семантических данных, извлекаемых из ГГЗ, и формализованного запроса пользователя,

дополнительно обработанного с помощью методов расширения контекста таким образом, чтобы лучше отражать его информационную потребность [24]. Результатом является геосемантическое изображение, выдаваемое пользователю системы информационной поддержки принятия решений, описывающее исследуемую пользователем пространственную ситуацию на основе представления пертинентных запросу множеств геообъектов, пространственных и семантических отношений, а также дополнительной семантической информации.

Материалы и методы

Для того, чтобы представить модель пространственной ситуации в виде геосемантического изображения, необходимо обеспечить представление информации не только об объектах и отношениях, хранящихся в базе данных ГИС, но и об объектах и отношениях, информация о которых хранится во внешних по отношению к ГИС ресурсах. В качестве таких внешних ресурсов информации могут выступать, например, различные базы знаний, онтологии [25] и графы знаний (ГЗ) [26]. В последние годы применение именно ГЗ для семантического обогащения геоизображений вызывает наибольший интерес [27–29]. Таким образом, ГЗ, ассоциированный с ГИС и используемый для семантического обогащения формируемых геоизображений (цифровых карт) можно условно представить как дополнительный семантический слой цифровой карты. Причем для конечного пользователя, как правило, не имеет значения из какого источника, ГИС или ГЗ, была получена информация для синтеза геосемантического изображения. Для конечного пользователя важно только то, насколько хорошо сформированное геоизображение соответствует его информационной потребности [30; 31].

В этом контексте под ГЗ можно понимать структурированную модель данных, которая представляет информацию в виде семантической сети взаимосвязанных сущностей (узлов графа) и их отношений (рёбер графа). ГЗ — это вид ГЗ, позволяющий реализовать структурированное представление геопространственных данных. Узлами такого графа, как правило, являются сущности реального мира, пространственные объекты и события, а ребрами — связи между ними [32; 33]. За счет использования онтологических принципов для формального определения концептов, свойств и связей, ГЗ обеспечивает эффективную интеграцию разнородных данных, а также ускоряет их поиск и анализ по сравнению с традиционными базами данных. Кроме того, использование геопространственных ГЗ позволяет реализовывать принципы FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable), что существенно облегчает анализ и управление геоданными в информационных системах [34]. В последние годы технология графов знаний находит широкое применение в решении научных [35–37] и прикладных задач в таких областях, как прогнозирование стихийных бедствий [38; 39], сельское хозяйство [40; 41], строительство сложных инженерных сооружений [42; 43], обработка геоданных [44], прогнозирование погодных явлений [45] и многих других.

В нашей работе мы также используем геопространственный ГЗ для семантического обогащения моделируемой пространственной ситуации. Одной из главных проблем при создании ГЗ в настоящее время является проблема получения данных о релевантных сущностях и связях из разнородных источников, их очистка и приведение в необходимый формат для включения в граф [46]. Предлагаемая нами технология автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений предполагает использование средств больших языковых моделей (LLM — Large Language Model) для извлечения данных из текстов на естественном языке, необходимых для наполнения графа. Такой подход позволяет существенно снизить трудоемкость и повысить оперативность создания и пополнения геопространственного ГЗ [47–50]. В качестве большой языковой модели для извлечения данных мы выбрали DeepSeek-V3.2. Выбор данной LLM был основан на результатах предварительного тестирования нескольких моделей в задачах извлечения RDF-троек из текстов на естественном языке. Для предварительного тестирования были выбраны такие модели, как ChatGPT, DeepSeek, GigaChat и YandexGPT. Сопоставимые результаты показали модели ChatGPT и DeepSeek, GigaChat показал результат хуже, чем DeepSeek, но лучше, чем YandexGPT. Учитывая, что компания OpenAI, которой принадлежит ChatGPT, официально не работает в России, окончательный выбор большой языковой модели был сделан в пользу DeepSeek в последней доступной версии.

Для хранения и обработки сформированного геопространственного ГЗ была выбрана СУБД, поддерживающая графовые структуры данных. Как правило, подобные СУБД уже оптимизированы для хранения данных, представленных в виде сетей и графов, что обеспечивает лучшую производительность по сравнению с традиционными СУБД [51]. На основе сравнения нескольких графовых СУБД, представленного в работе [52], выбор был сделан в пользу Neo4j, которая показала наилучшие результаты как в области потребления ресурсов, так и в части скорости обработки и реализации специфичных функций обработки больших объемов данных.

Учитывая тот факт, что потенциальная семантика моделируемых пространственных ситуаций может очень сильно различаться, невозможно предложить такую модель пространственной ситуации и технологию автоматизированного построения ситуаций в виде геосемантических изображений, которые были бы адекватны для любой предметной области. В связи с этим на данном этапе исследования мы решили ограничить предметную область рассматриваемых пространственных ситуаций чрезвычайными ситуациями на железнодорожном транспорте. Этот класс ситуаций будет являться основным для рассмотрения, но предложенные в рамках работы модель и технология обладают некоторой универсальностью, а подходы и принципы, положенные в их основу, могут быть использованы при моделировании схожих классов пространственных ситуаций. Для демонстрации некоторых элементов разработанной модели и технологии используется описание конкретной чрезвычайной ситуации (кейса) столкновения поездов на станции Княжая в Мурманской области [53].

В качестве источников информации для наполнения геопространственного ГЗ использованы тексты и мультимедийные материалы (видео, фото, схемы, аудиозаписи) открытого доступа. Основными источниками данных являлись официальные сайты различных министерств, ведомств, органов исполнительной власти, надзорных органов, например, Министерства транспорта Российской Федерации, открытого акционерного общества «Российские железные дороги», губернатора Мурманской области, транспортной прокуратуры и других. Также отдельным источником информации являлись сообщения в релевантных сообществах виртуальных социальных сетей и в популярных мессенджерах. Собранные таким образом данные были разделены на текстовые данные и мультимедийные данные. Текстовые данные были обработаны посредством большой языковой модели с целью извлечения RDF-троек для последующего формирования геопространственного ГЗ. Мультимедиа-данные также прошли предварительную обработку и были добавлены в геопространственный ГЗ в виде отдельных узлов средствами Neo4j.

Результаты

Основными результатами данной работы являются модель пространственной ситуации, представленная множеством геообъектов, пространственных и семантических отношений в виде фрагмента геосемантического изображения, а также технология автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений. Предложенная модель основана на онтологии ситуации, используемой в качестве концептуального шаблона для создания геопространственного ГЗ, включающего как географическую информацию об объектах, пространственных и семантических отношениях между ними, так и дополнительную семантическую информацию. Под дополнительной информацией понимается информация из внешних источников, которая напрямую не относится к пространственной ситуации, но семантически связана с моделируемой пространственной ситуацией. Например, для чрезвычайной ситуации столкновения поездов такой информацией может быть количество пассажирских мест в железнодорожном вагоне, погодные условия в момент аварии, количество пострадавших, категории пассажиров, тип груза и т. д. Благодаря комбинированию разнородных данных (геоданные, текст, графика, видео) в структуре единого геопространственного ГЗ, модель полезна для различных категорий пользователей, привлекаемых к выработке решений в рамках моделируемой пространственной ситуации. Предложенная модель может быть использована для решения широкого круга прикладных задач поддержки развития сложных региональных систем, для которых пространственные данные имеют большое значение, таких, например, как реагирование на чрезвычайные ситуации, смягчение последствий чрезвычайных ситуаций, мониторинг заболеваний, анализ городских потоков и других.

Схема использования предложенной модели для моделирования пространственной ситуации столкновения поездов на станции Княжая как геосемантического изображения на основе геопространственного графа знаний представлена на рис. 3.

В левой части схемы изображены геоданные, используемые для классического представления модели пространственной ситуации в виде набора тематических слоев цифровой карты. В правой части схемы изображен геопространственный ГЗ, содержащий дополнительную информацию, семантически связанную с моделируемой ситуацией и сформированный на основе разнородных источников данных о столкновении поездов. В центре схемы находится модель пространственной ситуации, представленная множеством геообъектов, пространственных и семантических отношений в виде фрагмента геосемантического изображения.

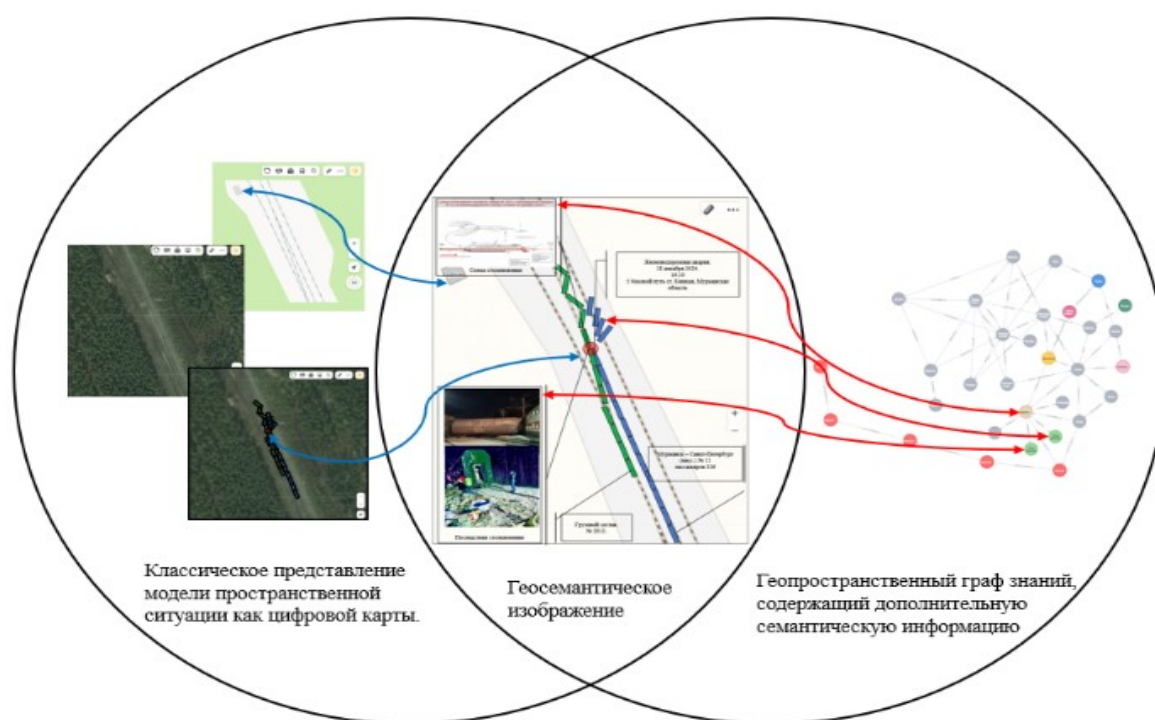


Рис. 3. Схема моделирования пространственной ситуации столкновения поездов на станции Княжая как геосемантического изображения на основе геопространственного графа знаний

Геосемантическое изображение изначально формируется как классическое геоизображение в виде цифровой карты, состоящей из нескольких слоев. На этом этапе визуализируются основные геопространственные объекты, релевантные рассматриваемой ситуации, составляющие основу геоизображения. В результате выполнения этого этапа формируется цифровая карта подобно тому, как это происходит в большинстве современных географических информационных систем. На втором этапе осуществляется обогащение сформированной цифровой карты дополнительной информацией, семантически связанной с моделируемой ситуацией. Для этой цели используется предварительно построенный геопространственный ГЗ. Из графа извлекаются текстовые описания, фото-, видео-, аудиоматериалы, ассоциированные с тем или иным геообъектом на цифровой карте. Например, при выборе на карте сошедшего с рельсов вагона пассажирского поезда геосемантическое изображение обогащается фотографиями последствий аварии, иллюстрирующими положение в пространстве сошедшего с рельсов вагона, его повреждения и взаимное расположение относительно других объектов на месте аварии. При визуальном анализе этих снимков можно сделать вывод о том, что вагон не просто сошел с рельс, но и заблокировал не менее двух рельсовых колеи, что может существенно затруднить подъезд к месту аварии и работу ремонтного поезда. Кроме того, ГЗ содержит также

семантическую информацию о типах вагонов обоих поездов, количестве пассажиров, перевозимом грузе, количестве пострадавших, машинистах и их помощниках и другую информацию, релевантную рассматриваемой ситуации. В этом контексте важно отметить, что именно сформированный с помощью предложенной в работе технологии автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений геопро пространственный ГЗ оказывает решающее влияние на эффективность семантического обогащения.

Разработанная технология автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений позволяет на основе заданной онтологией схемы сформировать геопро пространственный ГЗ, описывающий соответствующую ситуацию. Объекты, их географические и семантические свойства и отношения извлекаются из разнородных источников данных, содержащих описание моделируемой ситуации, с помощью выделения RDF-триплетов средствами больших языковых моделей. Затем полученные триплеты объединяются в RDF-граф и сохраняются в графовой СУБД, образуя единый геопро пространственный ГЗ. Результатом работы технологии является модель пространственной ситуации, представленная машиночитаемым геопро пространственным ГЗ, сохраненным в графовую СУБД, что допускает его многократное повторное использование различными пользователями и приложениями. Предложенная технология может быть использована для решения задач семантического обогащения геопро пространственных данных с целью повышения качества проведения пространственного анализа для информационной поддержки принятия решений. Обобщенная схема технологии представлена на рис. 4.

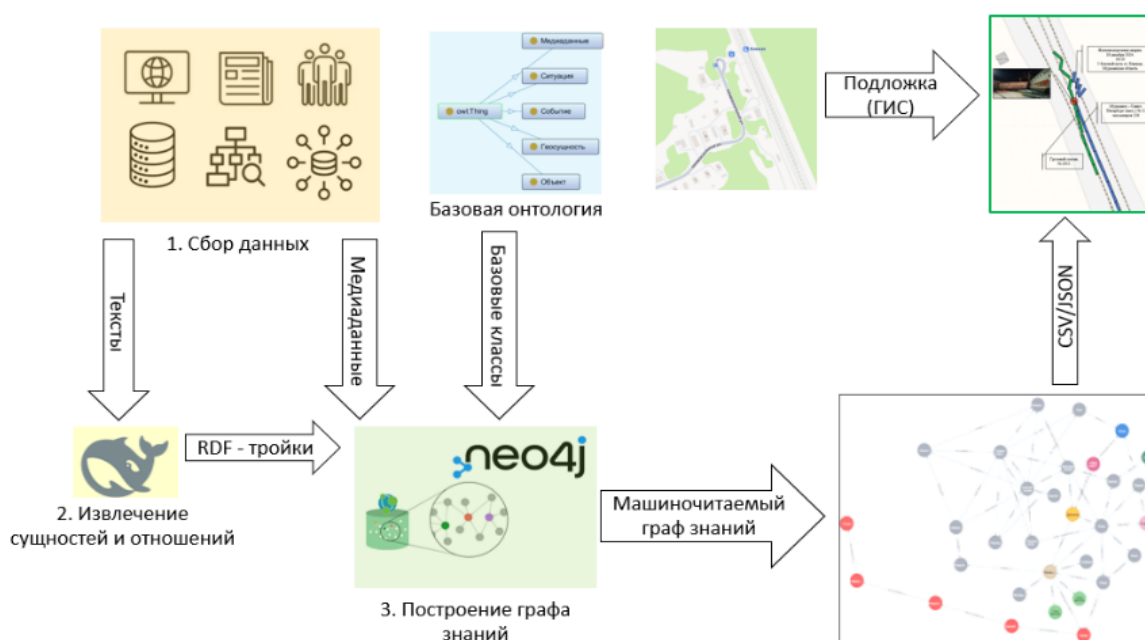


Рис. 4. Обобщенная схема технологии автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений

На первом этапе технологии осуществляется сбор разнородных данных для последующей обработки с целью формирования геопро пространственного ГЗ. В качестве источников используются как официальные сайты различных министерств, ведомств, органов исполнительной власти, надзорных органов, так и сообщения в сообществах виртуальных социальных сетей и в популярных мессенджерах. На этом этапе все собранные данные делятся на два основных вида — текстовые и мультимедийные. К текстовым данным относятся непосредственно тексты, а к мультимедийным — фотографии, видеоматериалы, аудиозаписи, схемы и другая релевантная информация, не являющаяся текстом. На втором этапе происходит обработка собранных текстовых материалов средствами большой языковой модели с целью извлечения из текстов основных сущностей и отношений в виде RDF-триплетов.

Для построения машиночитаемого геопространственного ГЗ на третьем этапе технологии используется графовая СУБД, позволяющая хранить и отображать данные в виде семантической сети или графа, а также обеспечивающая инструменты работы с такими структурами данных. Кроме того, выбранная СУБД Neo4j позволяет хранить в качестве узлов графа мультимедийные данные, что существенно облегчает доступ к ним и реализацию связывания этих данных с другими узлами графа. Результатом данного этап технологии автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений является геопространственный ГЗ, допускающий многократное повторное использование. Далее сформированный граф используется для семантического обогащения цифровой карты информацией, связанной с моделируемой ситуацией, но отсутствующей в базе данных ГИС и выполняет роль как бы дополнительного семантического слоя цифровой карты. Пример построенного таким образом графа для текста, описывающего ситуацию столкновения поездов на станции Княжая, представлен на рис. 5.

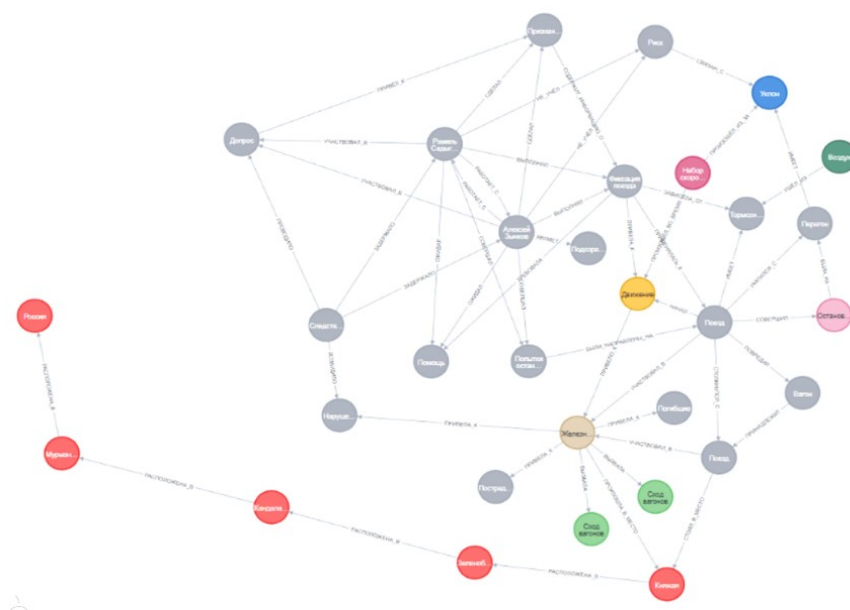


Рис. 5. Пример графа знаний для текстового описания ситуации столкновения поездов на станции Княжая

Заключение

В настоящее время для решения задач информационной поддержки принятия решений для управления сложными динамическими системами с региональной спецификой, наряду с прочими, активно используются подходы на основе ситуационного моделирования. Несмотря на значительное развитие программных средств, таких как географические информационные системы, позволяющие создавать модели пространственных ситуаций в виде цифровых карт, ряд проблем, связанных с семантическим наполнением таких изображений, решается недостаточно эффективно.

Данная работа посвящена решению проблемы моделирования пространственных ситуаций для задач информационной поддержки принятия решений с учетом географических и семантических свойств пространственных объектов. Для решения этой проблемы предложены модель пространственной ситуации, представленная множеством геообъектов, пространственных и семантических отношений в виде геосемантического изображения, а также технология автоматизированного построения моделей пространственных ситуаций в виде геосемантических изображений. В основе данного изображения лежит формируемый в автоматизированном режиме средствами большой языковой модели геопространственный граф знаний, используемый для семантического обогащения изображения. Для демонстрации некоторых элементов модели и технологии в качестве примера используется описание конкретной чрезвычайной ситуации столкновения поездов на станции Княжая в Мурманской области.

Полученные в данной работе результаты являются основой для следующих работ в области разработки метода управления геовизуализацией с целью синтеза геосемантических изображений, обладающих прагматическими свойствами для информационной поддержки развития сложных динамических систем.

Список источников

1. Suduc A. M., Bizoi M. A Quantitative Perspective on the Evolution of Decision Support Systems // Stud. Syst. Decis. Control. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 2024. Vol. 534. P. 93–108.
2. Fridman A. Y. Experience of Intellectualization of Situational Modeling Methods for Discrete Time-Varying Spatial Objects // Autom. Remote Control 2022 836. Springer. 2022. Vol. 83, No. 6. P. 946–959.
3. Vicentiy A. V. The Geomage Generation Method for Decision Support Systems Based on Natural Language Text Analysis // Lect. Notes Networks Syst. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. 2021. Vol. 230. P. 609–619.
4. Wu J. et al. Geospatial Big Data: Survey and Challenges // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2024. Vol. 17. P. 17007–17020.
5. Desku F. The Role of Information Systems in the Decision-making Processes of the Enterprises in Kosovo // Springer Proc. Bus. Econ. Springer Nature. 2023. P. 801–814.
6. Вицентий А. В. Разработка формальной модели конфликтной ситуации для мультипредметной системы поддержки управления пространственно-распределенными социально-экономическими системами // Информатизация и связь. 2019. Vol. 4. P. 64–69.
7. Wu C., Liu Y. Mathematical modeling in human-machine system design and evaluation // Handbook of human factors and ergonomics. Wiley, 2021. P. 685–703.
8. Paul G. E. Modeling and Simulation of Human Systems // Handb. Hum. Factors Ergon. Wiley, 2021. P. 704–735.
9. Nicheporchuk V. V., Nozhenkov A. I. Emergencies situational modeling technology for territorial management support // Procedia Struct. Integr. Elsevier, 2019. Vol. 20. P. 248–253.
10. Wang J. et al. Situation modeling and evaluation for complex systems: A case study of satellite attitude control system // Adv. Eng. Informatics. Elsevier, 2024. Vol. 61. P. 102505.
11. Ivanov V. V., Sarkisyants Y. K. Situation modeling for decision making in international contracts // Russ. Foreign Econ. Bull. 2019. No. 9. P. 80–94.
12. Desktop GIS Software | Mapping Analytics | ArcGIS Pro [Electronic resource]. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview> (accessed 05.11.2025).
13. MapInfo Pro: A complete, desktop mapping GIS software solution [Electronic resource]. URL: <https://www.precisely.com/product/precisely-mapinfo/mapinfo-pro/> (accessed 05.11.2025).
14. Spatial without Compromise QGIS Web Site [Electronic resource]. URL: <https://qgis.org/> (accessed 05.11.2025).
15. Solve spatial problems with representation and process models—ArcGIS Pro | Documentation [Electronic resource]. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/spatial-analyst/model-solve-spatial-problems/solving-spatial-problems-with-representation-and-process-models.htm> (accessed 05.11.2025).
16. Zhu J., Wu P. BIM/GIS data integration from the perspective of information flow // Autom. Constr. Elsevier, 2022. Vol. 136. P. 104166.
17. Zhou C. Exploring future GIS visions in the era of the scientific and technological revolution // Inf. Geogr. Elsevier, 2025. Vol. 1, No. 1. P. 100007.
18. Singh H. et al. Modelling human-centric aspects of end-users with iStar // J. Comput. Lang. 2022. Vol. 68. P. 101091.
19. Vicentiy A. V. Modelling the user's information needs based on the assessment of pragmatic informativeness of data // Informatiz. Commun. Informatization and Communication Journal Editorial Board. 2024. Vol. 1. P. 65–69.
20. Hogan A. et al. Knowledge Graphs // ACM Comput. Surv. Association for Computing Machinery. 2021. Vol. 54, No. 4.
21. Weikum G. et al. Machine Knowledge: Creation and Curation of Comprehensive Knowledge Bases // Found. Trends® Databases. Now Publishers, Inc., 2021. Vol. 10, No. 2–4. P. 108–490.
22. Vicentiy A. V. Development of methods and tools to support regional management in the Arctic zone of the Russian Federation based on cognitive interfaces // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. IOP Publishing. 2019. Vol. 302, No. 1. P. 012139.
23. Vicentiy A. Definition and Formalization of the User Mental Model for Creating Adaptive Geointerfaces of Decision Support Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024. Vol. 733. P. 1095–1105.
24. Vicentiy A. V. Methods for estimating the quantity of information in the context of satisfying the user's information need // Informatiz. Commun. Informatization and Communication Journal Editorial Board. 2024. Vol. 2.

25. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications // *Knowl. Acquis. Academic Press*, 1993. Vol. 5, No. 2. P. 199–220.
26. Wu J. et al. Geospatial Big Data: Survey and Challenges // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2024. Vol. 17. P. 17007–17020.
27. Lilis G. N. et al. BIM-based semantic enrichment and knowledge graph generation via geometric relation checking // *Autom. Constr. Elsevier*, 2025. Vol. 173. P. 106081.
28. Zhu R. Geospatial Knowledge Graphs // <https://arxiv.org/abs/2405.07664>. 2024.
29. Zhu R. et al. The KnowWhereGraph: A Large-Scale Geo-Knowledge Graph for Interdisciplinary Knowledge Discovery and Geo-Enrichment // *arXiv Prepr. arXiv2502.13874*. 2025.
30. Hogan A. et al. Large Language Models, Knowledge Graphs and Search Engines: A Crossroads for Answering Users' Questions // <http://arxiv.org/abs/2501.06699>. 2025.
31. Вицентий А. В. Моделирование информационной потребности пользователя на основе оценки прагматической информативности данных // *Информатизация и связь*. 2024. Т. 1. С. 65–69.
32. Li T. et al. HGeoKG: A Hierarchical Geographic Knowledge Graph for Geographic Knowledge Reasoning // *ISPRS Int. J. Geo-Information. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2025. Vol. 14, No. 1.
33. Xu H. et al. From Maps to Geospatial Knowledge Graph: Geospatial Knowledge Representation and Reasoning // *Abstr. ICA. Copernicus GmbH*, 2023. Vol. 6. P. 1–2.
34. Wang S. et al. Review, framework, and future perspectives of Geographic Knowledge Graph (GeoKG) quality assessment // *Geo-spatial Inf. Sci. Taylor & Francis*, 2025. Vol. 28, No. 4. P. 1701–1721.
35. Zou X. A Survey on Application of Knowledge Graph // *J. Phys. Conf. Ser. Institute of Physics Publishing*, 2020. Vol. 1487, No. 1.
36. Liu H. et al. Knowledge graph reasoning: Mainstream methods, applications and prospects // *Eng. Appl. Artif. Intell. Pergamon*, 2025. Vol. 159. P. 111625.
37. Zhao X. et al. A hierarchical spatio-temporal object knowledge graph model for dynamic scene representation // *Trans. GIS. John Wiley and Sons Inc*, 2023. Vol. 27, No. 7. P. 1992–2016.
38. Ge X. et al. Disaster Prediction Knowledge Graph Based on Multi-Source Spatio-Temporal Information // *Remote Sens. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 14, No. 5.
39. Du W. et al. OFPO & KGFPO: Ontology and knowledge graph for flood process observation // *Environ. Model. Softw. Elsevier*, 2025. Vol. 185. P. 106317.
40. Lin Y. et al. A reasoning method for rice fertilization strategy based on spatiotemporal knowledge graph // *Trans. GIS. John Wiley and Sons Inc*, 2024. Vol. 28, No. 4. P. 902–924.
41. Ge W. et al. A recommendation model of rice fertilization using knowledge graph and case-based reasoning // *Comput. Electron. Agric. Elsevier*, 2024. Vol. 219. P. 108751.
42. Wang L. et al. Multimodal knowledge graph construction for risk identification in water diversion projects // *J. Hydrol. Elsevier*, 2024. Vol. 635. P. 131155.
43. Lai J. et al. Dynamic data-driven railway bridge construction knowledge graph update method // *Trans. GIS. John Wiley and Sons Inc*, 2023. Vol. 27, No. 7. P. 2099–2117.
44. Cai K. et al. Construction of Earth Observation Knowledge Hub Based on Knowledge Graph // *Trans. GIS. John Wiley and Sons Inc*, 2024. Vol. 28, No. 7. P. 2445–2462.
45. Wang A. et al. The Construction of a Multimodal Knowledge Graph for WRF Simulation Knowledge // *Trans. GIS. John Wiley and Sons Inc*, 2025. Vol. 29, No. 7. P. e70134.
46. Mai G. et al. Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. Elsevier*, 2025. Vol. 136. P. 104368.
47. Liang J. et al. Design and application of a semantic-driven geospatial modeling knowledge graph based on large language models // *Geo-spatial Inf. Sci. Taylor and Francis Ltd.*, 2025. P. 1–20.
48. Meyer L. P. et al. LLM-assisted Knowledge Graph Engineering: Experiments with ChatGPT // *Inform. aktuell. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2024. P. 103–115.
49. Zhang B., Soh H. Extract, Define, Canonicalize: An LLM-based Framework for Knowledge Graph Construction // *EMNLP 2024 — 2024 Conf. Empir. Methods Nat. Lang. Process. Proc. Conf. Association for Computational Linguistics (ACL)*. 2024. P. 9820–9836.
50. Krishna Kommineni V. et al. From human experts to machines: An LLM supported approach to ontology and knowledge graph construction // *arXiv*. 2024. P. arXiv:2403.08345.
51. Liu Y. et al. Construction and Application of User Check-in Spatiotemporal Knowledge Graph Based on Neo4j // *Procedia Comput. Sci. Elsevier*, 2024. Vol. 242. P. 609–616.

52. Monteiro J. et al. Experimental Evaluation of Graph Databases: JanusGraph, Nebula Graph, Neo4j, and TigerGraph // Appl. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 13, No. 9. P. 5770
53. Столкновение поездов на станции Княжая // Википедия : сайт. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Столкновение_поездов_на_станции_Княжая (дата обращения: 11.11.2025).

References

1. Suduc A. M., Bizoi M. A Quantitative Perspective on the Evolution of Decision Support Systems. *Stud. Syst. Decis. Control*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, Vol. 534, pp. 93–108.
2. Fridman A. Y. Experience of Intellectualization of Situational Modeling Methods for Discrete Time-Varying Spatial Objects. *Autom. Remote Control* 2022 836. Springer, 2022, Vol. 83, no. 6, pp. 946–959.
3. Vicentiy A. V. The Geoimage Generation Method for Decision Support Systems Based on Natural Language Text Analysis. *Lect. Notes Networks Syst.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, Vol. 230, pp. 609–619.
4. Wu J. et al. Geospatial Big Data: Survey and Challenges. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, Vol. 17, pp. 17007–17020.
5. Desku F. The Role of Information Systems in the Decision-making Processes of the Enterprises in Kosovo. *Springer Proc. Bus. Econ.* Springer Nature, 2023, pp. 801–814.
6. Vicentiy A. V. Razrabotka formal'noj modeli konfliktnoj situacii dlya mul'tipredmetnoj sistemy podderzhki upravleniya prostranstvenno-raspredelemnymi social'no-ekonomicheskimi sistemami [Development of a Formal Model of a Conflict Situation for a Multidisciplinary Management Support System for Spatially Distributed Socioeconomic Systems]. *Informatizaciya i svyaz'* [Informatization and Communications], 2019, no. 4, pp. 64–69. (In Russ.).
7. Wu C., Liu Y. Mathematical modeling in human-machine system design and evaluation. *Handbook of human factors and ergonomics*. Wiley, 2021, pp. 685–703.
8. Paul G. E. Modeling and Simulation of Human Systems. *Handb. Hum. Factors Ergon.* Wiley, 2021, pp. 704–735.
9. Nicheporchuk V. V., Nozhenkov A. I. Emergencies situational modeling technology for territorial management support. *Procedia Struct. Integr.* Elsevier, 2019, Vol. 20, pp. 248–253.
10. Wang J. et al. Situation modeling and evaluation for complex systems: A case study of satellite attitude control system. *Adv. Eng. Informatics*. Elsevier, 2024, Vol. 61, pp. 102505.
11. Ivanov V. V., Sarkisyants Y. K. Situation modeling for decision making in international contracts. *Russ. Foreign Econ. Bull.*, 2019, Vol. 9, pp. 80–94.
12. Desktop GIS Software | Mapping Analytics | ArcGIS Pro [Electronic resource]. Available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview> (accessed 05.11.2025).
13. MapInfo Pro: A complete, desktop mapping GIS software solution. Available at: <https://www.precisely.com/product/precisely-mapinfo/mapinfo-pro/> (accessed 05.11.2025).
14. Spatial without Compromise QGIS Web Site. Available at: <https://qgis.org/> (accessed 05.11.2025).
15. Solve spatial problems with representation and process models—ArcGIS Pro | Documentation. Available at: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/spatial-analyst/model-solve-spatial-problems/solving-spatial-problems-with-representation-and-process-models.htm> (accessed 05.11.2025).
16. Zhu J., Wu P. BIM/GIS data integration from the perspective of information flow. *Autom. Constr.* Elsevier, 2022, Vol. 136, p. 104166.
17. Zhou C. Exploring future GIS visions in the era of the scientific and technological revolution. *Inf. Geogr.* Elsevier, 2025, Vol. 1, no. 1, p. 100007.
18. Singh H. et al. Modelling human-centric aspects of end-users with iStar. *J. Comput. Lang.*, 2022, Vol. 68, p. 101091.
19. Vicentiy A. V. Modelling the user's information needs based on the assessment of pragmatic informativeness of data. *Informatiz. Commun. Informatization and Communication Journal Editorial Board*, 2024, Vol. 1, pp. 65–69.
20. Hogan A. et al. Knowledge Graphs. *ACM Comput. Surv. Association for Computing Machinery*, 2021, Vol. 54, no. 4.
21. Weikum G. et al. Machine Knowledge: Creation and Curation of Comprehensive Knowledge Bases. *Found. Trends® Databases*. Now Publishers, Inc., 2021, Vol. 10, no. 2, pp. 108–490.
22. Vicentiy A. V. Development of methods and tools to support regional management in the Arctic zone of the Russian Federation based on cognitive interfaces. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* IOP Publishing, 2019, Vol. 302, no. 1, p. 012139.
23. Vicentiy A. Definition and Formalization of the User Mental Model for Creating Adaptive Geointerfaces of Decision Support Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, Vol. 733, pp. 1095–1105.

24. Vicentiy A. V. Methods for estimating the quantity of information in the context of satisfying the user's information need. *Informatiz. Commun. Informatization and Communication Journal Editorial Board*, 2024, Vol. 2.
25. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowl. Acquis.* Academic Press, 1993, Vol. 5, no. 2, pp. 199–220.
26. Wu J. et al. Geospatial Big Data: Survey and Challenges. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, Vol. 17, pp. 17007–17020.
27. Lilis G. N. et al. BIM-based semantic enrichment and knowledge graph generation via geometric relation checking. *Autom. Constr.* Elsevier, 2025, Vol. 173, p. 106081.
28. Zhu R. Geospatial Knowledge Graphs. Available at: <https://arxiv.org/abs/2405.07664> (accessed 05.11.2025).
29. Zhu R. et al. The KnowWhereGraph: A Large-Scale Geo-Knowledge Graph for Interdisciplinary Knowledge Discovery and Geo-Enrichment. Available at: <https://arXiv2502.13874> (accessed 05.11.2025).
30. Hogan A. et al. Large Language Models, Knowledge Graphs and Search Engines: A Crossroads for Answering Users' Questions. Available at: <http://arxiv.org/abs/2501.06699> (accessed 05.11.2025).
31. Vicentiy A. V. Modelirovanie informacionnoj potrebnosti pol'zovatelya na osnove ocenki pragmaticheskoy informativnosti dannyh [Modeling the user's information needs based on the assessment of the pragmatic informativeness of data]. *Informatizaciya i svyaz'* [Informatization and Communication], 2024. no. 1, pp. 65–69. (In Russ.).
32. Li T. et al. HGeoKG: A Hierarchical Geographic Knowledge Graph for Geographic Knowledge Reasoning. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, 2025, Vol. 14, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2025, Vol. 14, no. 1.
33. Xu H. et al. From Maps to Geospatial Knowledge Graph: Geospatial Knowledge Representation and Reasoning. *Abstr. ICA.* Copernicus GmbH, 2023, Vol. 6, pp. 1–2.
34. Wang S. et al. Review, framework, and future perspectives of Geographic Knowledge Graph (GeoKG) quality assessment. *Geo-spatial Inf. Sci.* Taylor & Francis, 2025, Vol. 28, no. 4, pp. 1701–1721.
35. Zou X. A Survey on Application of Knowledge Graph. *J. Phys. Conf. Ser.* Institute of Physics Publishing, 2020, Vol. 1487, no. 1.
36. Liu H. et al. Knowledge graph reasoning: Mainstream methods, applications and prospects. *Eng. Appl. Artif. Intell. Pergamon*, 2025, Vol. 159, p. 111625.
37. Zhao X. et al. A hierarchical spatio-temporal object knowledge graph model for dynamic scene representation. *Trans. GIS.* John Wiley and Sons Inc, 2023, Vol. 27, no. 7, pp. 1992–2016.
38. Ge X. et al. Disaster Prediction Knowledge Graph Based on Multi-Source Spatio-Temporal Information. *Remote Sens.*, 2022, Vol. 14, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, Vol. 14, no. 5.
39. Du W. et al. OFPO & KGFP: Ontology and knowledge graph for flood process observation. *Environ. Model. Softw.* Elsevier, 2025, Vol. 185, p. 106317.
40. Lin Y. et al. A reasoning method for rice fertilization strategy based on spatiotemporal knowledge graph. *Trans. GIS.* John Wiley and Sons Inc, 2024, Vol. 28, no. 4, pp. 902–924.
41. Ge W. et al. A recommendation model of rice fertilization using knowledge graph and case-based reasoning. *Comput. Electron. Agric.* Elsevier, 2024, Vol. 219, p. 108751.
42. Wang L. et al. Multimodal knowledge graph construction for risk identification in water diversion projects. *J. Hydrol.* Elsevier, 2024, Vol. 635, p. 131155.
43. Lai J. et al. Dynamic data-driven railway bridge construction knowledge graph update method. *Trans. GIS.* John Wiley and Sons Inc, 2023, Vol. 27, no. 7, pp. 2099–2117.
44. Cai K. et al. Construction of Earth Observation Knowledge Hub Based on Knowledge Graph. *Trans. GIS.* John Wiley and Sons Inc, 2024, Vol. 28, no. 7, pp. 2445–2462.
45. Wang A. et al. The Construction of a Multimodal Knowledge Graph for WRF Simulation Knowledge. *Trans. GIS.* John Wiley and Sons Inc, 2025, Vol. 29, no. 7, p. e70134.
46. Mai G. et al. Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* Elsevier, 2025, Vol. 136, p. 104368.
47. Liang J. et al. Design and application of a semantic-driven geospatial modeling knowledge graph based on large language models. *Geo-spatial Inf. Sci.* Taylor and Francis Ltd., 2025, pp. 1–20.
48. Meyer L. P. et al. LLM-assisted Knowledge Graph Engineering: Experiments with ChatGPT. *Inform. aktuell.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 103–115.
49. Zhang B., Soh H. Extract, Define, Canonicalize: An LLM-based Framework for Knowledge Graph Construction. *EMNLP 2024 — 2024 Conf. Empir. Methods Nat. Lang. Process. Proc. Conf. Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2024, pp. 9820–9836.
50. Krishna Kommineni V. et al. From human experts to machines: An LLM supported approach to ontology and knowledge graph construction. Available at: <https://arXiv:2403.08345> (accessed 11.11.2025).

51. Liu Y. et al. Construction and Application of User Check-in Spatiotemporal Knowledge Graph Based on Neo4j. *Procedia Comput. Sci.* Elsevier, 2024, Vol. 242, pp. 609–616.
52. Monteiro J. et al. Experimental Evaluation of Graph Databases: JanusGraph, Nebula Graph, Neo4j, and TigerGraph. *Appl. Sci.*, 2023, Vol. 13, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 13, no. 9, p. 5770.
53. Stolknovenie poezdov na stancii Knyazhaya—Vikipediya [Train collision at Knyazhaya station—Wikipedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Stolknovenie_poezdov_na_stancii_Knyazhaya (accessed 11.11.2025).

Информация об авторе

А. В. Вицентий — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

A. V. Vicentiy — Candidate of Science (Tech.), Senior Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 25.11.2025.
The article was submitted 21.11.2025; approved after reviewing 24.11.2025; accepted for publication 25.11.2025.