

На правах рукописи

Шабанов Данила Евгеньевич



Разработка методики верификации топологических изменений объектов
угледобывающей отрасли на основе геометрического анализа
пространственных параметров горных выработок

1.6.20. Геоинформатика, картография

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Степанов Юрий Александрович.

Официальные оппоненты:

Лалин Сергей Эдуардович, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», доцент кафедры автоматики и компьютерных технологий;

Загребин Глеб Игоревич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», декан картографического факультета.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 10 ноября 2026 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/shabanov-danila-evgenevich/>

Автореферат разослан 28 сентября 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета:

Дубровский Алексей Викторович

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 26.08.2026.

Формат 60 × 84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 148.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Угольные шахты и горные рудники являются опасными производственными объектами и обеспечение их противоаварийной устойчивости является обязательной составляющей в работе каждого предприятия. В рамках такого обеспечения решаются множество важных задач – расчет вентиляции и водоснабжения шахты, определение устойчивости проветривания, расчет взрывобезопасных расстояний при взрывах газа. От успешного решения перечисленных вопросов зависят не только аспекты организации подземных производственных процессов, но и жизнь и здоровье людей, находящихся в шахте, в случае аварии.

Многие производственные и противоаварийные задачи решаются с использованием информационных систем, основу которых составляют модели сетей горных выработок. Модель сети горных выработок – это пространственная математическая модель топологии сети, создаваемая в трёхмерной системе координат на базе математической пространственно-геометрической модели разрабатываемых недр. Таким образом, можно сказать, что она представляет из себя частный случай геометрического графа.

Другой сферой применения геометрических графов является картография. Использование геометрических графов позволяет моделировать пространственные объекты для решения задач анализа транспортных потоков, пешеходной, морской и авиационной навигации.

В процессе ведения горнодобывающих работ в модели вносят изменения. С целью верификации корректности внесённых изменений производится сравнение последовательно созданных моделей. Так, сравнивая последовательно созданные графы, можно осуществлять автоматическое обновление карт, обнаруживать изменения в дорожных сетях и моделях сетей горных выработок. Выяв-

ление внесённых изменений способствует повышению контроля качества составляемых моделей, так как позволяет наглядно отобразить новые или удалённые элементы топологий и проверить их на достоверность.

Существуют различные методы и метрики сравнения геометрических графов. Среди них расстояние редактирования графа, метрика Хаусдорфа и метрика Громова – Хаусдорфа. Однако они не применимы для задачи выявления изменений, вносимых в новую версию графа, так как они базируются на выявлении степени несоответствия графов друг другу, но не позволяют выделить конкретные изменения.

Таким образом, для обеспечения контроля качества моделей сети горных выработок, достигаемого за счёт проверки достоверности вносимых в модель изменений, целесообразно проводить сопоставление пространственных характеристик топологических объектов, направленное на выявление их геометрических расхождений.

Актуальность исследования заключается в создании методики верификации изменений пространственных параметров моделей сети горных выработок, которые возникают в ходе ведения угледобывающих работ.

Степень разработанности темы изучена по опубликованным работам в сфере теоретических и прикладных аспектов проектирования и разработки геоинформационных систем Алексеева В. В., Ивакина Я. А., Шека В. М., Потресова Д. К., Степанова Ю. А., Карпика А. П., Лапина С. Э., Лисицкого Д. В. Вережаки Т. В., Ступина В. П. и др., основ геоинформатики – Берлянта А. М., Бескида П. П., Биденко С. И., Тикунова В. С. и др., основ картографии – Загребина Г. И., Николаевой О. Н. и др.

Целью работы является разработка методических подходов к верификации топологических изменений объектов угледобывающей отрасли для обеспечения безопасности ведения угледобывающих работ и генерации картографического материала, отображающего выявленные изменения.

Идея работы состоит в использовании геометрического анализа топологий, который позволяет выявлять локализованные участки топологии, у которых изменились пространственные параметры.

Для достижения поставленной цели были выделены следующие задачи исследования.

1 Выполнить информационно-аналитический обзор научно-технических публикаций в области пространственного анализа параметров объектов соответствующих областей экономики Российской Федерации.

2 Разработать алгоритм геометрического анализа моделей сети горных выработок, нацеленный на верификацию изменений геопространственных данных объектов угледобывающей отрасли.

3 Разработать архитектуру специализированной ГИС для выявления достоверности топологических изменений моделей сети горных выработок, их визуализации и создания цифровых карт изменений.

4 Адаптировать разработанную методику верификации топологических изменений на производственных объектах угледобывающей отрасли Российской Федерации.

Объектом исследования являются картографические и геоинформационные методы и технологии анализа пространственных данных объектов угледобывающей отрасли и их картографическое и геоинформационное обеспечение.

Предметом исследования являются алгоритмы геометрического анализа моделей сети горных выработок, используемые для проверки достоверности пространственных изменений объектов угледобывающей промышленности.

Научная новизна диссертационных исследований состоит в следующем.

1 Предложен алгоритм верификации изменений пространственных параметров объектов угледобывающей отрасли, базирующийся на выявлении отличий положения в пространстве составляющих частей геометрических графов и добавлении или удалении новых узлов и ветвей.

2 Разработана структура ГИС, позволяющая выполнять верификацию топологических изменений геопространственных параметров различных видов выработок и визуализировать выявленные изменения, что позволяет принимать своевременные управленческие решения по обеспечению безопасности ведения горных работ.

3 На основании разработанного алгоритма и структуры ГИС предложено технологическое решение по построению тематических карт для отображения изменений, вносимых в пространственные параметры объектов угледобывающей отрасли.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии новых методов геометрического анализа моделей сети горных выработок для обеспечения их достоверности за счёт верификации изменений, вносимых в пространственные характеристики исследуемых объектов. Разработанная методика с прилагаемой реализацией в виде ГИС может использоваться в различных сферах, работающих с пространственными объектами, такими как картография и навигация, угольная промышленность, инженерия для выявления изменений инфраструктуры дорог, отслеживания расширения выработанного пространства шахты, определения деформаций в деталях.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- автоматизации контроля качества составляемых моделей пространственных объектов, что позволит уменьшить трудозатраты и снизить влияние человеческого фактора на составление моделей;
- повышении достоверности получаемого картографического материала для планирования работ по изменению конфигурации пространственных объектов за счёт наглядной визуализации изменений объектов с геопространственной привязкой.

Методология и методы исследований. В процессе выполнения работы использовались методы геоинформационного анализа, геометрического сопостав-

ления графов, проектирования геоинформационных систем, объектно-ориентированного проектирования и программирования; моделирования пространственных объектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм верификации топологических изменений пространственных параметров, построенный на основе геометрического графа, позволяет улучшить точность и достоверность получаемой модели объектов угледобывающей отрасли (пункт 7 научного паспорта специальности).

2 Применение разработанного алгоритма и предложенной структуры ГИС позволяет выполнить визуализацию выявленных изменений положения пространственных объектов в виде соответствующих тематических карт (пункт 11 научного паспорта специальности).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные положения диссертации соответствуют областям исследования: 7 – Картографические и геоинформационные методы и технологии анализа пространственных данных, моделирования пространственных явлений, объектов, процессов, отношений и систем; 11 – Геоинформационные системы (ГИС). Математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение ГИС и их приложений паспорта научной специальности 1.6.20. Геоинформатика, картография, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: XXXVI Международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии» (Бангалор, Индия, 2024), XX (LII) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 80-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне (Кемерово, Россия, 2025), Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии» (Кемерово, Россия, 2024).

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в 10 научных работах, 2 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, содержит 4 таблицы, 43 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, установлены цель и задачи исследований; сформулированы научные положения, выносимые на защиту; описывается структура диссертации.

В первом разделе содержатся описание исследуемой проблематики и обзор существующих решений в области анализа геометрических графов.

В рамках описания предметной области приводится описание геометрического графа, а также описывается широкая сфера его применений в областях, связанных с моделированием пространственных объектов. В рамках моделирования пространственных объектов проводятся исследовательские работы, позволяющие собрать данные о пространственных характеристиках описываемых объектов. По итогам проведения исследовательских работ происходит цифровизация полученных сведений, а также формирование графов: выделение опорных точек и ветвей, соединяющих выделенные точки.

Описываемый способ моделирования широко используется в картографии при описании дорожных сетей, а также мониторинге производственных объектов, например, сетей горных выработок. При работе с моделями пространствен-

ных объектов нередко возникает необходимость провести геометрическое сравнение моделей с целью выявления изменившихся участков пространства. Во-первых, подобное сравнение двух последовательно созданных моделей может стать обоснованием для проведения верификации данных, на основании которых была построена новая модель. Сигналом к проведению проверки могут стать изменения, выявленные на участках, для которых не планировалось внесение изменений; либо же выявление изменений, не соотносящихся с имеющимся планом. Во-вторых, геометрическое сравнение позволяет оперативно обновлять картографические данные, описывающие исследуемые объекты или проводить анализ темпов внесения изменений в исследуемый объект.

Проведен анализ имеющихся алгоритмов и метрик сравнения геометрических графов, таких как метод Ульмана, алгоритмы серии VF, расстояние Фреше, расстояние Хаусдорфа, а также методы конфликации графов. Дополнительно были рассмотрены программные решения, включающие в себя реализацию описанных алгоритмов, а также иные способы сравнения моделей пространственных объектов.

Выявлено, что имеющиеся методы сравнения не подходят в полной мере для осуществления геометрического сравнения моделей. Описанные алгоритмы и метрики используются для вычисления значения степени несоответствия сравниваемых графов, однако они не позволяют выявить конкретные участки с отличающейся геометрией.

Рассмотренные программные решения также не способны полностью удовлетворить запрос на геометрический анализ моделей пространственных объектов с выявлением изменившихся участков пространства, их визуализации и возможностью использования полученных данных для дальнейшего анализа. Как правило, имеющиеся программные комплексы дают общие характеристики изменившейся геометрии (например, количество или протяжённость изменившихся участков) без указания конкретных изменившихся областей. К тому же у части решений отсутствует графический интерфейс, а большинство программ

является коммерческими продуктами и не доступно для приобретения в Российской Федерации.

Таким образом, была обоснована целесообразность разработки методики проверки достоверности изменений, вносимых в модель сети горных выработок, базирующейся на алгоритме геометрического анализа пространственных характеристик горных выработок.

Также были сформулированы требования к проектируемому программному решению, включающие в себя необходимое наличие инструментов геометрического анализа моделей, визуализации и экспорта результатов сравнения.

Во втором разделе работы приводится разработанный алгоритм пространственного сравнения топологий.

Исходными данными, подготовленными в ходе описанных выше этапов, для произведения геометрического сравнения выступают две топологии. Одна из них принимается за исходную $T_{old} = \{b_1^{old}, b_2^{old}, \dots, b_m^{old}\}$, где b_i^{old} – ветвь с узлами $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_q^{(i)}$; одна за новую $T_{new} = \{b_1^{new}, b_2^{new}, \dots, b_n^{new}\}$, где b_j^{new} – ветвь с узлами $y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, \dots, y_w^{(i)}$. Для определения точности координатного сравнения задаётся значение $\varepsilon \geq 0$.

В рамках первого этапа для каждой пары ветвей (b_i^{old}, b_j^{new}) , где $i \in \{1, \dots, m\}, j \in \{1, \dots, n\}$, происходит проверка условия эквивалентности:

$$\max \|x_k^{(i)} - y_k^{(i)}\| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где $\|*\|$ – евклидова норма.

В случае выполнения условия (1) ветвям b_j^{new} и b_i^{old} присваивается категория «сохранившаяся», и они исключаются из списков ветвей соответствующих топологий.

В рамках второго этапа для каждой ветви $b_j^{new} \in T_{new}$ составляется массив ветвей, соответствующих следующему условию:

$$L_j = \{b_i^{old} \in T_{old} | \text{len}(b_i^{old}) \geq \text{len}(b_j^{new})\}. \quad (2)$$

Для каждой ветви $b_i^{old} \in L$ происходит проверка на то, не содержится ли ветвь b_j^{new} в b_i^{old} . Пусть x_1, x_2 – узлы b_i^{old} , y_1, y_2 – узлы b_j^{new} . Необходимо построить параметрическое уравнение прямой $r(t)$ по x_1, x_2 и проверить, что для y_s , где $s \in [1, 2]$ выполняются условия:

$$\text{dist}(y_s, r(t)) \leq \varepsilon, \quad (3)$$

$$\exists t_s \in [0, 1]: r(t_s) \approx y_s. \quad (4)$$

Условие (3) означает то, что узлы x_1, x_2 лежат на одной прямой с узлами y_1, y_2 . Условие (4) означает, что узлы x_1, x_2 лежат в пределах отрезка b_j^{new} . При выполнении условий (3), (4) ветвь b_j^{new} помечается «сохранившейся», удаляется из списка ветвей и добавляется в ассоциативный массив M , где $M[b_i^{old}] \leftarrow M[b_i^{old}] \cup \{b_j^{new}\}$. Массив M пополняется после каждой итерации, в рамках которой были найдены b_j^{new} , которые являются частью b_i^{old} . В ходе очередного прохода происходит уточнение

$$\exists \text{len}(b_i^{old}) = \sum_{b \in M[b_i^{old}]} \text{len}(b)_i t_s. \quad (5)$$

В случае выполнения условия (5) ветвь b_i^{old} помечается «сохранившейся» и удаляется из списка ветвей.

На третьем этапе для каждой ветви b_i^{old} составляется массив ветвей $L_i = \{b_j^{new} \in T_{new} | \text{len}(b_j^{new}) \geq \text{len}(b_i^{old})\}$ и для каждой b_j^{new} из L_i проверяются условия (3), (4) по отношению к b_i^{old} . Аналогичным образом, в случае выполнения условий (3), (4) b_i^{old} категоризируется как «сохранившаяся», удаляется из списка и добавляется в ассоциативный массив для b_j^{new} , частью которой она является.

В рамках четвёртого этапа каждая ветвь $b_j^{new} \in T_{new}$, не удалённая из списка после первых трёх этапов, сравнивается с ветвью $b_i^{old} \in T_{old}$. Пусть x_1, x_2 – узлы b_i^{old} , y_1, y_2 – узлы b_j^{new} . Если для b_j^{new} не находится такого b_i^{old} , для которого выполняется условие коллинеарности $b_j^{new} || b_i^{old}$, либо же $b_j^{new} || b_i^{old}$, но при этом $\forall i \in \{1,2\}$ если $y_i = \delta_i(x_2 - x_1)$, то $\delta_i \notin [0,1]$, тогда b_j^{new} помечается как «добавленная» и удаляется из списка.

Для тех случаев, когда b_j^{new} и b_i^{old} пересекаются, определяется зона их пересечения $intersect: \{id \leftrightarrow (p_1, p_2)\}$, где id – идентификатор ветви b_i^{old} , p_1, p_2 – относительные координаты точек пересечения. В ассоциативном массиве M , который заполнялся в ходе второго и третьего этапов, ищется $M[b_i^{old}]$, такой, что идентификатор $b_i^{old} = id$. В массив, который соответствует этому ключу, вносится объект $intersect$. Та часть ветви b_j^{new} , которая не входит в область пересечения, помечается как «добавленная», сама же b_i^{old} удаляется из списка.

Если для b_j^{new} был создан соответствующий объект ассоциативного массива и в ходе сравнения не нашлось b_i^{old} , которая бы пересекалась с ней, то производятся следующие действия. Создаются объекты $intersect: \{id \leftrightarrow (p_1, p_2)\}$, где id – идентификатор ветви b_j^{new} , p_1, p_2 – относительные координаты точек пересечения, которые помечаются как общие. Для остальной части также создаются аналогичные объекты и помечаются как «добавленные».

В рамках пятого этапа повторяются действия, описанные на предыдущем этапе, однако уже оставшиеся ветви b_i^{old} сравниваются с ветвями b_j^{new} . Зоны пересечения также помечаются «сохранившимися», а не пересекающиеся участки помечаются как «удалённые».

Таким образом, описанный алгоритм позволяет с заданной точностью выявить участки, на которых прошли пространственные изменения сравниваемых геометрических графов вне зависимости от произвольного разбиения пространства на графы.

В третьем разделе рассматривается архитектура проектируемой геоинформационной системы.

На основании требований к системе и структуры входных и выходных данных алгоритма сравнения топологий были выделены ключевые аспекты функционирования системы, которые позволяют добиться высокой производительности и надёжности при работе с пространственными данными. Была разработана концептуальная модель ГИС, представленная на рисунке 1, отображающая основные составляющие исследуемой предметной области.

Анализ предметной области позволил определить основные аспекты функциональности системы, для реализации которой систему было предложено разделить на следующие модули:

1 Модуль подготовки моделей к анализу, который отвечает за приведение моделей пространственных объектов к виду, удовлетворяющему требованиям к исходным данным алгоритма сравнения топологий.



Рисунок 1 – Концептуальная модель ГИС

2 Модуль геометрического анализа, который отвечает за выявление отличающихся участков сравниваемых топологий.

3 Модуль обработки данных, который отвечает за сохранение и структуризацию результатов геометрического анализа, а также за предоставление данных системы модулям системы и внешним системам.

4 Модуль визуализации, который отвечает за трёхмерное отображение результатов геометрического анализа.

5 Модуль генерации картографического анализа, который позволяет создавать тематические карты, использующие результаты проведения геометрического сравнения пространственных объектов.

Подобная модульная структура позволит добиться масштабируемости системы и улучшить процесс встраивания данной системы в другие. Таким образом, её можно адаптировать для различных задач в различных предметных областях.

Построение ER-диаграммы классов позволяет описать исследуемую область в виде конкретных сущностей и их связей. ER-диаграмма проектируемой ГИС представлена на рисунке 2. На ней показаны классы, отвечающие за информационное наполнение модели, такие как ветви, узлы и дополнительные объекты, в роли которых могут выступать шахтные вентиляторы или перемычки. Узел определяется координатами, ветвь определяется идентификаторами узлов, дополнительные объекты определяются идентификатором ветви и относительной позиции на ветви (от 0 до 1). Также у ветвей и дополнительных объектов могут быть дополнительные атрибутивные данные, зависящие от конкретной задачи. Класс анализа имеет ссылку на идентификаторы сравниваемых моделей. С ним связаны классы пользовательских настроек, параметров и результатов анализа. По итогам анализа генерируются экземпляры класса Фрагмент ветви, ссылающиеся на полученный результат. Из результата анализа генерируются отчёт и карта изменений.

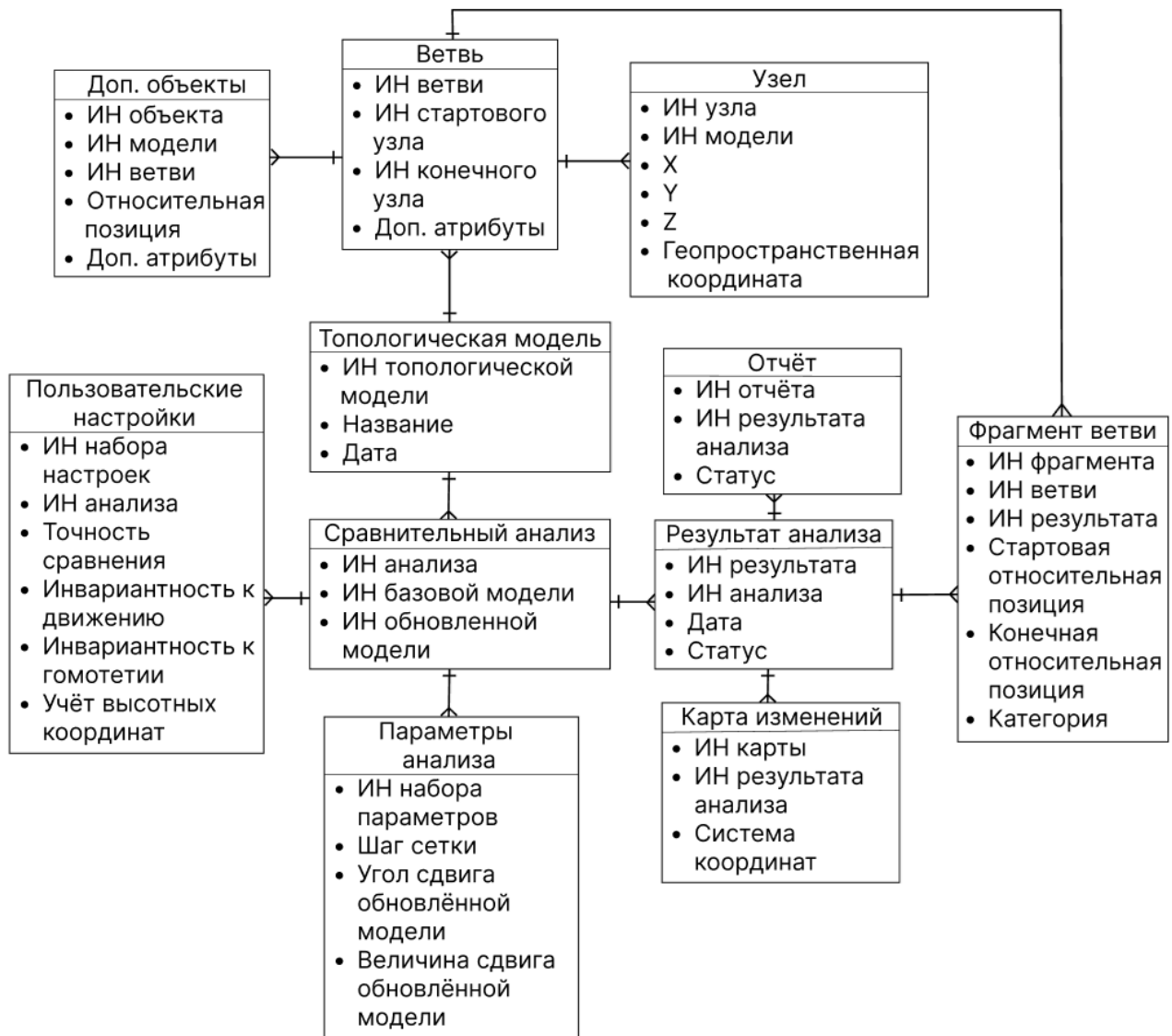


Рисунок 2 – ER-диаграмма классов

Важным элементом проектирования информационной системы является разработка информационной модели. Информационная модель ГИС, представленная на рисунке 3, позволяет структурированно описать данные, используемые системой.

На приведенной информационной модели выделены внешние по отношению к системе данные и показано их взаимодействие с данными системы. ГИС включает в себя базу данных моделей объектов, в которой хранятся модели в виде совокупности элементов топологий; базу данных геометрического анализа, которая включает аспекты работы алгоритма сравнения топологий, а также базу

данных для хранения результатов анализа, используемых при визуализации, составлении отчётов и картографических материалов.

Переход от локальной системы координат, присущей маркшейдерам при составлении моделей сети горных выработок, к геопространственной системе координат, используемой для составления картографического материала, происходит при помощи функции atan2 , которая является расширением функции арктангенса. Она используется для вычисления азимута – направления от опорной точки на объект. Если известны геопространственные координаты какой-либо точки моделируемого пространства, например это может быть точка выхода шахты на поверхность, то для всех остальных точек топологии могут быть рассчитаны геопространственные координаты при помощи формул:

$$\varphi_2 = \arcsin(\sin \varphi_1 * \cos \delta + \cos \varphi_1 * \sin \delta * \cos \theta), \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \text{atan2}(\sin \theta * \sin \delta * \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 * \sin \varphi_2), \quad (7)$$

где φ_1, φ_2 – широты заданной и искомой координаты соответственно;

λ_1, λ_2 – долготы заданной и искомой координаты соответственно;

θ – значение азимута (по часовой стрелке с севера);

$\delta = \frac{d}{R}$ – угловое расстояние;

d – заданное расстояние от объекта;

R – радиус Земли.

Разработанная модульная структура системы, а также распределённое хранение данных позволяют реализовать основные преимущества использования геоинформационной системы и добиться высокой производительности системы, а также удобной встраиваемости в более сложные системы.

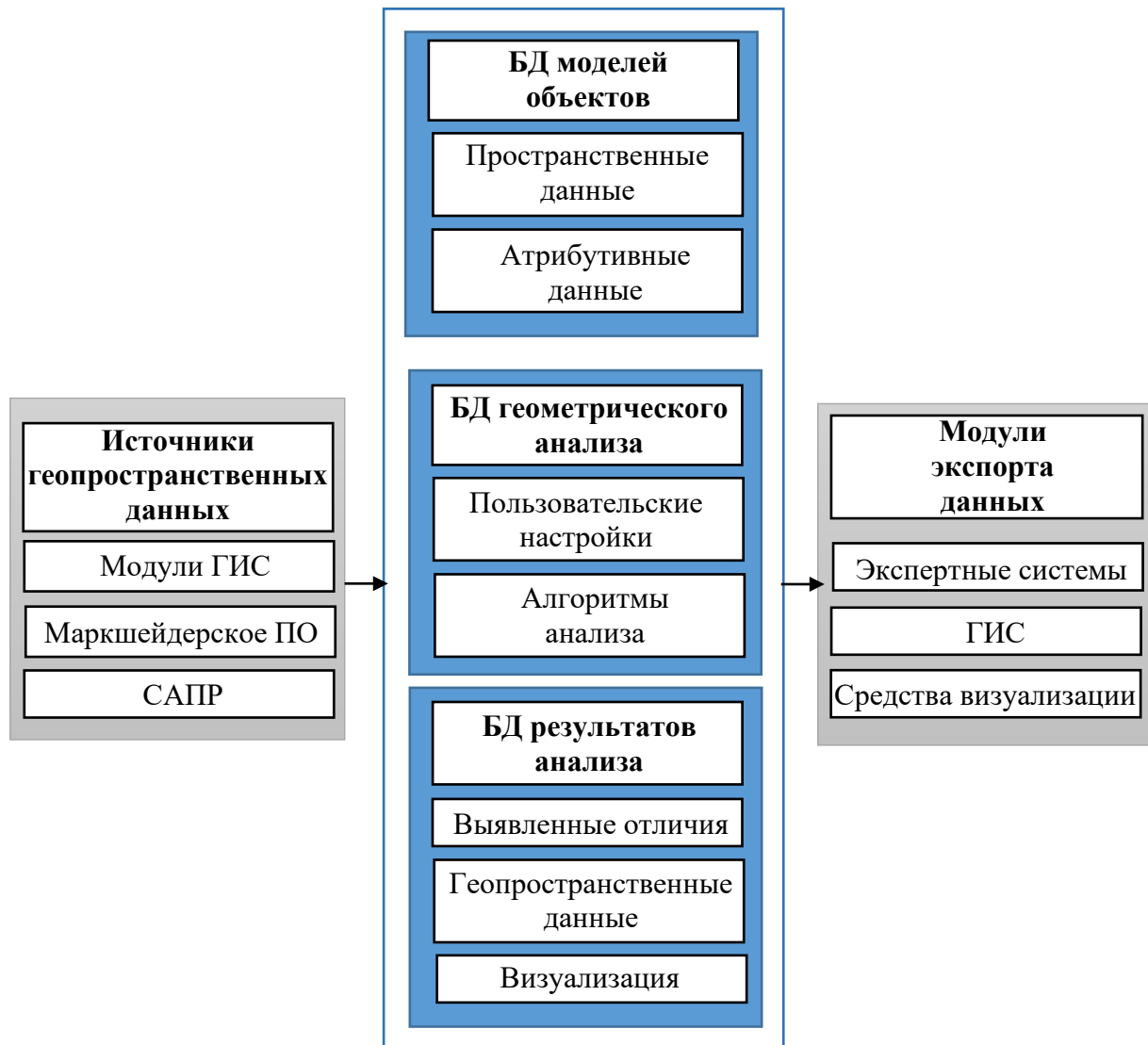


Рисунок 3 – Информационная модель ГИС

В четвертом разделе были сформулированы методические решения использования спроектированной ГИС. Был предложен порядок действий, включающий в себя загрузку данных, анализ, визуализацию и генерацию картографического материала.

В рамках апробации алгоритма геометрического анализа был проведен контрольный расчёт для моделей сети горных выработок и моделей дорожной сети. Результатом проведения анализа стало табличное представление выявленных изменений, трёхмерная визуализация и цифровая карта изменений. Наличие геометрических изменений модели сети горных выработок, несоответствующих планам ведения горных работ, является сигналом для необходимости проверить

на достоверность данные, которые использовались для построения новой версии модели. Если данные оказались достоверными, то выявленные изменения следует использовать для актуализации расчётов, проводимых для старой версии модели, и планов ликвидации аварии.

Вдобавок к геометрическому сравнению было также проведено атрибутивное сравнение ветвей, расположенных на аналогичных участках топологий. Визуализация результатов атрибутивного сравнения представлена на рисунке 4. Светло-жёлтым цветом на нём изображены ветви идентичные и по геометрии, и по атрибутам, оранжевым – ветви, идентичные по геометрии, но различающиеся по атрибутам.

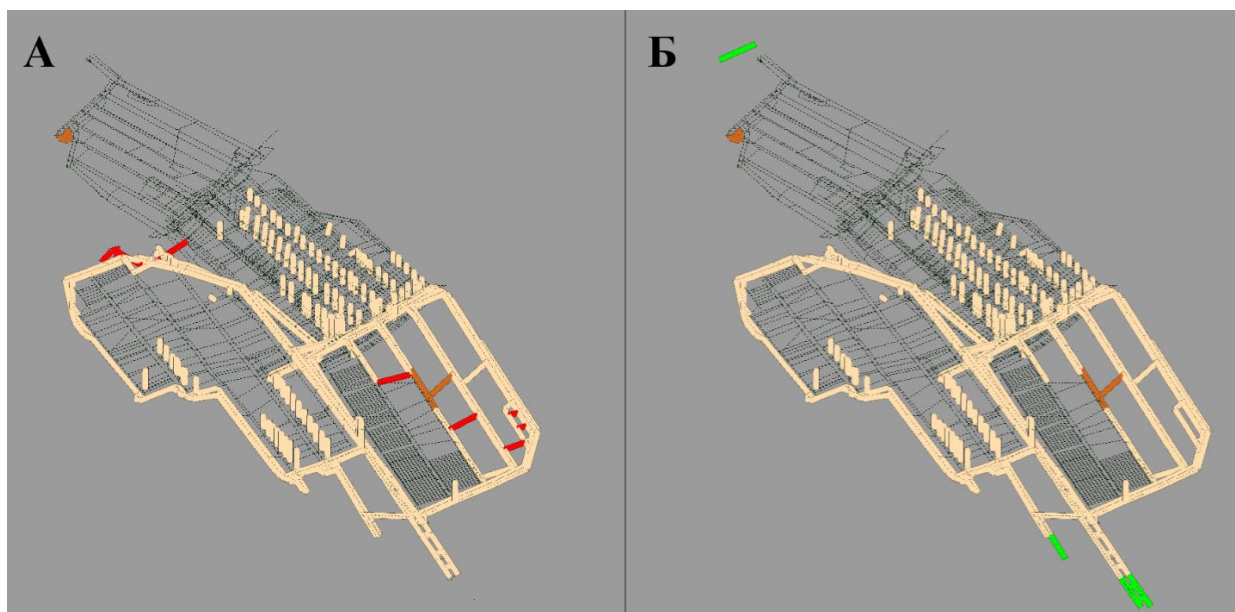


Рисунок 4 – Визуализация результатов атрибутивного сравнения моделей сети горных выработок:

а) старая версия модели; *б)* новая версия модели

Выявление изменения в атрибутах так же, как и в случае с геометрическими изменениями, является признаком того, что модель стоит проверить на достоверность. В случае достоверности, следует также актуализировать вентиляционные расчёты, используемые для работы с моделью.

Было проведено сравнение предложенного алгоритма геометрического анализа с алгоритмами, которые используются для сравнения моделей: сравнению по уникальным идентификаторам и сравнению без использования средств автоматизации. Сопоставление показало, что предлагаемый в рамках диссертационного исследования алгоритм минимум на 63 % быстрее и на 21 % точнее других алгоритмов, а также, в отличие от сравнения по идентификаторам, не зависит от произвольного заполнения атрибутивных данных модели.

Таким образом, было обосновано научное положение: разработанный алгоритм определения верификации топологических изменений пространственных параметров, построенный на основе геометрического графа, позволяет улучшить точность и достоверность получаемой модели объектов угледобывающей отрасли.

Сгенерированная цифровая карта изменений модели сети горных выработок была использована для проведения геопространственного анализа. На исследуемую область была наложена сетка, фрагменты которой были разделены на зоны влияния изменений, в зависимости от того, были ли в данной области выявлены удаления или добавления ветвей. Также была составлена сетка с аналогичными координатами секторов, отображающая величину оседания земной поверхности до ведения горнодобывающих работ, которые привели к выявленным изменениям и после. В результате сравнения, представленного на рисунке 5, удалось выявить, что участки наибольшего оседания приходились на области, в которых были добавлены новые ветви в результате ведения угледобывающих работ.

Таким образом, обосновано следующее научное положение: применение разработанного алгоритма и предложенной структуры ГИС позволяет выполнить визуализацию выявленных изменений положения пространственных объектов в виде соответствующих тематических карт.

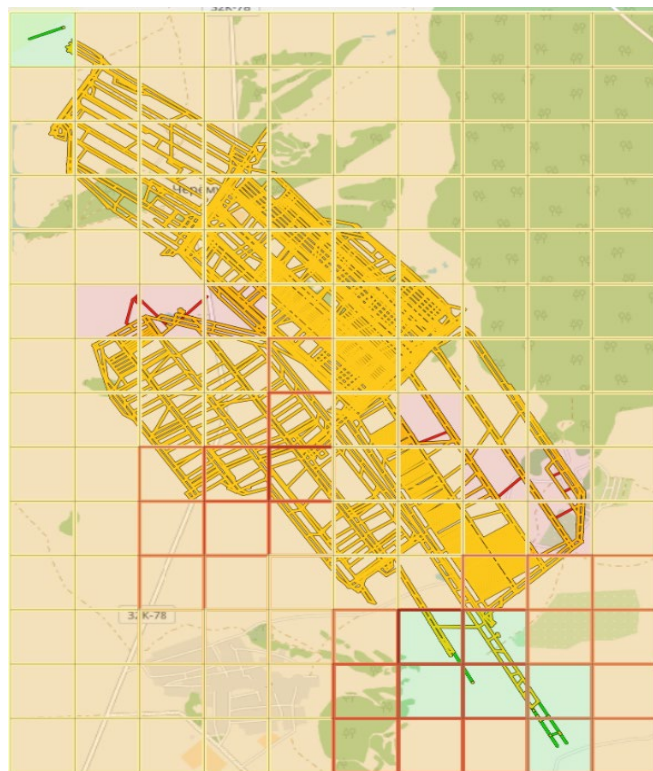


Рисунок 5 – Наложение слоя изменений проседания на слой изменений топологии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи создания информационно-аналитического обеспечения геоинформационной системы проведения геометрического анализа моделей пространственных объектов, позволяющего верифицировать топологические изменения сетей горных выработок, и генерации цифрового картографического материала, позволяющего проводить геопространственный анализ на основе информации о выявленных изменениях моделируемых объектов.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1 Разработана методика геометрического анализа объектов, моделируемых в виде геометрических графов, позволяющая сравнивать последовательно созданные топологии и детально выявлять возникшие геометрические изменения

и их пространственное положение вне зависимости от способа разбиения сравниваемых топологий на участки.

2 Предложена архитектура геоинформационной системы, позволяющей использовать геопространственные данные в совокупности с геометрическим анализом объектов для верификации топологических изменений и генерации цифрового картографического материала.

3 Установлено, что использование предложенного автоматизированного средства геометрического анализа позволяет сократить время его проведения с десятков минут до менее чем одной секунды по сравнению с неавтоматизированными методами, а также на 63 % по сравнению с другими автоматизированными средствами.

4 Установлено, что применение разработанного алгоритма геометрического сравнения позволяет увеличить точность выявления изменений на 21 % по сравнению с другими автоматизированными средствами. При этом предложенный алгоритм позволяет выявлять изменения топологий в ситуациях, когда одна из сравниваемых топологий была подвергнута движению или гомотетии.

5 Приведена методика визуализации выявленных изменений моделей пространственных объектов, повышающая наглядность геометрического анализа и, как следствие, повышающего эффективность верификации данных, на основании которых создавались сравниваемые модели.

6 Показано, что цифровые карты изменений, генерируемые специализированной ГИС, позволяют проводить геоинформационный анализ, способствующий выявлению закономерностей производственных процессов, проводимых в исследуемых сетях горных выработок, которые могут позволяют оценить эффективность или повысить безопасность ведения горнодобывающих работ.

Полученные результаты могут быть использованы для верификации топологических изменений на основе геометрического анализа моделей пространственных объектов угледобывающей промышленности, а также других сфер,

связанных с моделированием пространственных объектов, в роли которых могут выступать дорожные сети или сети горных выработок.

В дальнейшем разработанная геоинформационная система может стать частью более сложной системы принятия решений. Функциональность подобной комплексной системы может включать себя автоматизированный мониторинг производственных работ на изучаемых пространственных объектах, а также планирование новых этапов внесения изменений в эти объекты и корректировку имеющихся планов. Это позволит ещё более повысить эффективность производственных и строительных процессов, повысив степень автоматизации их управления.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Шабанов, Д. Е. Проектирование геоинформационной системы для сравнения сетей горных выработок / Д. Е. Шабанов – Текст : непосредственный // Геоинформатика. – 2025. – № 4. – С. 4–11. – DOI 10.47148/1609-364X-2025-4-4-11. (К 2)

2 Шабанов, Д. Е. Алгоритм геометрического сравнения моделей сетей горных выработок для автоматизации обеспечения их достоверности / Д. Е. Шабанов – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 6. – С. 110–119. – DOI: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-110-119>. (К 1)

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663501 Российская Федерация. Программный модуль обработки исходных данных, полученных в результате сейсмической разведки : № 2023662730 : заявл. 16.06.2023 : опубл. 23.06.2023 / И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн и др. – Текст : непосредственный.

4 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664242 Российская Федерация. Программный модуль визуализации

данных, полученных в результате сейсмической разведки : № 2023662744 : заявл. 16.06.2023 : опубл. 03.07.2023 / И. Ю. Степанов, Д. Е. Шабанов, Е. В. Дорн и др. – Текст : непосредственный.

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616050 Российская Федерация. МИАС «Горный офис». Автономный модуль пространственного сравнения сетевых структур: № 2026614869 : заявл. 25.02.2026 : опубл. 04.03.2026 / Д. Е. Шабанов, О. Ю. Лукашов, И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный.

6 Степанов, Ю. А. Информационная модель расчета параметров мульды для прогноза опасных участков оседания почвы / Ю. А. Степанов, Д. Е. Шабанов, И. Ю. Степанов. – Текст : непосредственный // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – № 29. – С. 54–59.

7 Шабанов, Д. Е. Обеспечение противоаварийной устойчивости угольных предприятий при помощи автоматизации пространственного сравнения сетей горных выработок / Д. Е. Шабанов, Ю. А. Степанов – Текст : непосредственный // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 октября 2024 года. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2024. – С. 114–116.

8 Шабанов, Д. Е. О методах пространственного сравнения горных выработок / Д. Е. Шабанов, Ю. А. Степанов – Текст : непосредственный // 21 век: фундаментальная наука и технологии : материалы XXXVI международной научно-практической конференции, Bengaluru, 19 ноября 2024 года. – Bengaluru, Karnataka, India: Pothi.com, 2024. – С. 117–120.

9 Шабанов, Д. Е. Использование геометрического анализа топологий сети горных выработок для оптимизации воздухообмена в шахте / Д. Е. Шабанов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные исследования в информатике и цифровизации : материалы симпозиума XX (LII) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной

80-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне, Кемерово, 24 апреля 2025 го-да. – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2025. – С. 136–138.

10 Shabanov, D. E. Using geometric comparison of topologies in geoinformation analysis / D. E. Shabanov, Yu. A. Stepanov – Текст : непосредственный // Modern science: theory and practice : International Academic Conference. Proceedings of the Scientific Forum, Belgrade, 25 февраля 2026 года. – Belgrade: Scientific publishing house Infinity, 2026. – P. 53–57. – DOI 10.34660/INF.2026.83.14.042.