

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Кемеровский государственный университет»
(КемГУ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Степанов Юрий Александрович

Кемерово – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	9
1.1 Описание проблематики предметной области.....	9
1.2 Проблематика сравнения геометрических графов	16
1.3 Обзор существующих алгоритмов сравнения геометрических графов.....	19
1.4 Выводы по первому разделу	30
2. МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	34
2.1 Требования к геометрическому анализу	34
2.2 Алгоритм геометрического сравнения топологий	37
2.3 Использование расчётных сеток для оптимизации алгоритма	47
2.4 Метрика оценивания эффективности алгоритма.....	50
2.5 Выводы по второму разделу	53
3 АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	55
3.1 Концептуальная модель ГИС.....	55
3.2 Описание структуры информационной системы	61
3.3 Описание информационной модели ГИС	67
3.4 Визуализация и интерпретация полученных результатов.....	72
3.5 Выводы по третьему разделу	78
4 МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СРАВНЕНИЯ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА.....	80
4.1 Процедура выполнения геометрического сравнения.....	80
4.2 Апробация алгоритма геометрического сравнения.....	84
4.3 Интерпретация результатов анализа	93
4.4 Выводы по четвертому разделу.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	102

ВВЕДЕНИЕ

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. Выявление вне-

сённых 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. Верещаки 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 сопоставления 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 объём диссертации составляет 116 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, содержит 4 таблицы, 43 рисунка.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Описание проблематики предметной области

Геометрические графы – это графы, вершины которых располагаются в геометрическом пространстве [30]. Они позволяют отразить не только связи между вершинами, но и их пространственное положение, за счёт чего широко используются в различных сферах, связанных с обработкой пространственной информации [41, 16].

Особенность геометрического графа состоит в том, что он может использоваться для моделирования сложных пространственных структур, которые состоят из множества объектов, имеющих координаты в заданном пространстве. Зачастую роль узлов в таких моделях играют опорные точки, а в качестве ребер графа выступают связи между ними, которые, как правило, имеют конкретное физическое воплощение (например, трассы между городами). Важность хранения пространственных данных объектов таких моделей может быть обусловлена необходимостью рассчитывать расстояния между ними, необходимостью учитывать геометрические особенности связей между объектами, например, угла прохождения траектории между ними, или другими факторами, зависящими от конкретной области применения. Среди областей, в которых применяются геометрические графы для моделирования объектов, можно выделить картографию, навигацию, угольную промышленность и другие сферы [43, 107].

Моделирование на основе геометрических графов активно используется в картографии, что обусловлено необходимостью отобразить в заданном пространстве нужные объекты, которые зачастую связаны друг с другом при помощи соединений, в качестве которых могут выступать, например дороги или трубопроводы [52]. Подобное моделирование позволяет решать различные задачи, связанные с планированием новой инфраструктуры и оцениванием уже имеющейся. Например, оце-

нить уличную сеть на предмет доступности важных услуг, проанализировать загруженность дорожного движения с целью планирования маршрутов городского транспорта, спроектировать расположение вышек сотовой связи с учётом радиуса покрытия. При помощи моделирования можно анализировать карты и классифицировать виды городской застройки и принципы распределения зданий [72]. Графы используются в гидрологии, позволяя анализировать речные сети: классифицировать притоки и выявлять главные реки [65]. Моделированию также подвергаются GPS-треки, например, диких животных. Расчёты на основе этих моделей позволяют выявить ключевые коридоры переселения различных популяций. Графы могут накладываться друг на друга при помощи операции векторного наложения, реализованного в ГИС. Наложение позволяет определить точки пересечения объектов, заданных графами. Это может использоваться для определения пересечений межевых линий земельных участков, нахождений слияний рек или выявления пересечений инженерных коммуникаций. Наложение также может использоваться для определения того, как ареалы обитания животных оказываются разорванными из-за антропогенных объектов (дорог или коммуникационных сетей) Пример наложения моделей, заданных геометрическими графами, представлен на рисунке 1.

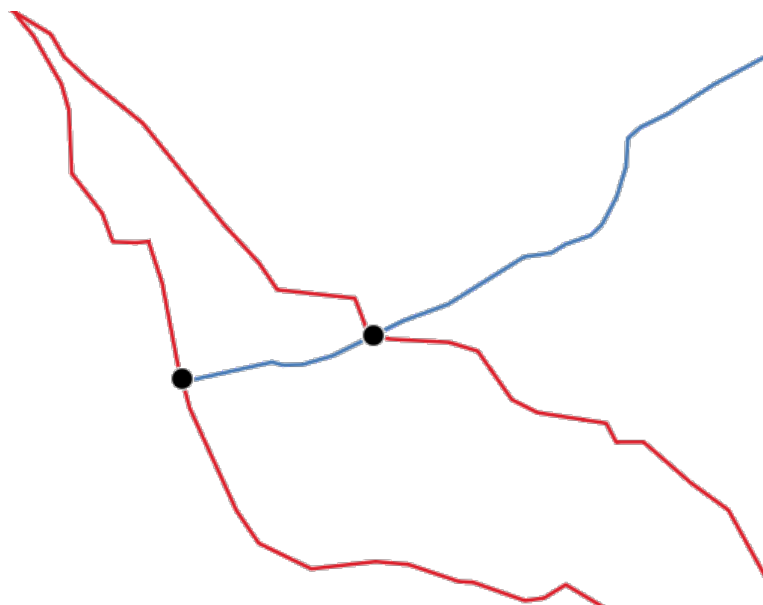


Рисунок 1 – Определение точек пересечения объектов при помощи наложения

В навигации, подразумевающей построение маршрутов и выделение опорных точек (перекрёстков, остановок, портов), также активно используются геометрические графы. С их помощью решается задача поиска кратчайшего пути, необходимая для построения навигационных маршрутов между выбранными точками. Существуют различные алгоритмы нахождения кратчайшего пути, среди них самыми распространёнными являются алгоритм Дейкстры, а также его модификации, например А (A-star)*, алгоритм Левита, алгоритм Беллмана — Форда. Поиск кратчайшего пути в геометрическом графе позволяет строить маршрут для движения транспорта по городской улично-дорожной сети, исходя из актуальной загруженности маршрутного потока; планировать передвижение беспилотных транспортных средств [25]. Для управления беспилотными средствами или производственными роботами используются, например такие методы, базирующиеся на использовании графов, как построение вероятностных дорожных карт (PRM) или построение быстро исследуемых случайных деревьев (rapidly-exploring random trees). Пример использования построения вероятностных дорожных карт представлен на рисунке 2.

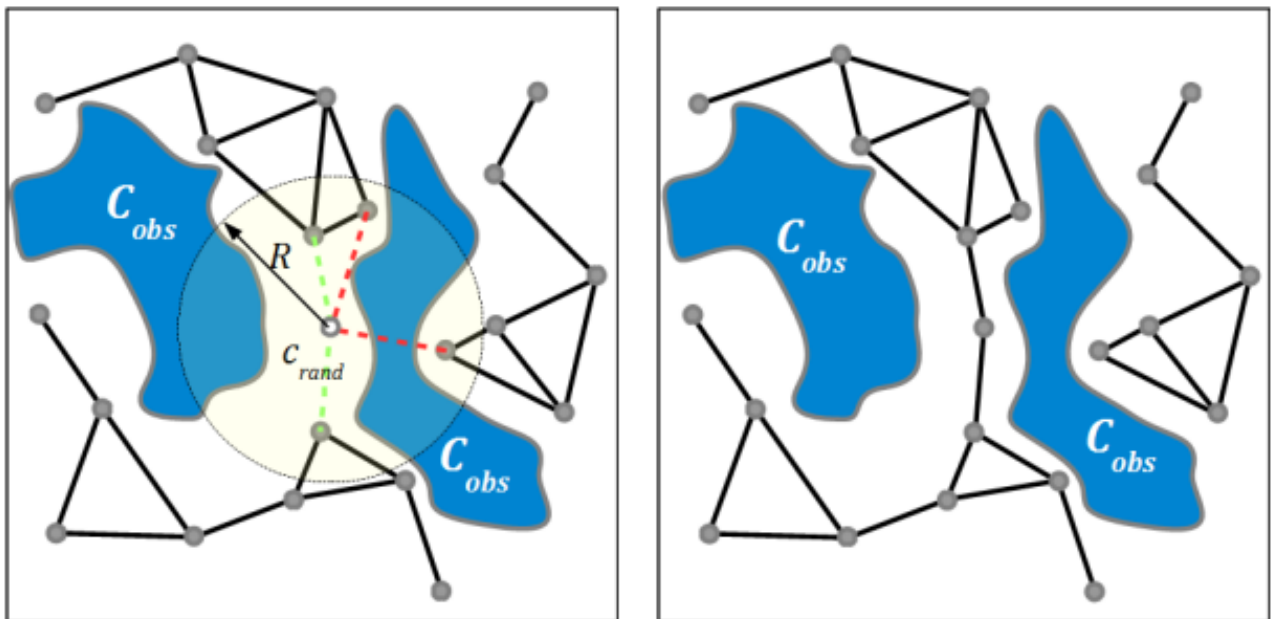


Рисунок 2 – Построение участка дорожной сети методом PRM [9]

Геометрические графы также используются в морской и авиационной навигации, позволяя создавать навигационные модели с учётом глубин и фарватеров (для морской навигации) или авиамаршрутов с ограничениями по скорости и высоте полёта (для авиации) [6]. В целом, моделирование при помощи геометрических графов является неотъемлемой частью анализа дорожных и дорожных сетей и позволяет подробным способом охарактеризовать изучаемые пространственные объекты для решения поставленных задач.

При составлении моделей на основе геометрических графов в картографии и навигации могут использоваться данные, полученные со спутниковых снимков, материалов аэрофотосъёмки, лазерной локации (LIDAR) или GPS-треков. Подробные геометрические характеристики объектов исследуемой области фиксируются при помощи цифровых моделей рельефа (DEM) и цифровых моделей местности (DTM) [98]. Собранная картографическая информация анализируется на предмет выделения узлов и рёбер. В качестве узлов, как правило, выделяются опорные точки, которые представляют интерес в контексте поставленной задачи (например, это могут быть муниципальные здания), а также места пересечения дорог или места резких изгибов дорог. В качестве рёбер выбираются объекты, соединяющие узлы, в качестве которых зачастую выступают дороги. При работе с разными источниками данных возникает необходимость проведения дедупликации. Дедупликация заключается в удалении избыточных вершин путём соединения вершин, близко лежащих друг к другу [50]. Также производится проверка планарности, обуславливаемая тем, что линии, которые пересекаются на плоскости, могут не иметь пересечения в реальности (например, в случае подземного расположения туннеля под дорогами) и, таким образом, могут быть ошибочно объединены в единое ребро. Следующим этапом создания модели является придание направленности и добавление дополнительных весовых значений рёбрам, например учёт загруженности дороги автомобилями. Пример визуализации подобной модели представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Визуализация картографической модели [84]

Ещё одной сферой использования геометрических графов является угольная промышленность. Основная причина возникновения аварий в подземных шахтах – это взрыв метана. Метан содержится в угле, и в ходе разрушения угольных пластов или возникновения в них трещин он начинает активно выделяться. Как только концентрация метана в воздухе превышает норму, подобная метановоздушная смесь становится взрывоопасной. Возникновение в выработанном пространстве искры, например, из-за повреждения провода, в таком случае достаточно для образования взрыва. Помимо этого, повышение концентрации метана в атмосфере приводит к уменьшению концентрации в ней кислорода, что может привести к удушью шахтёров [17].

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций в подземных шахтах предпринимаются меры по вентиляции и дегазации выработанного пространства. Они достигаются при помощи установки специальных устройств, вакуум-насосов, которые помогают удалять загрязненный воздух и заменять его чистым. Таким образом, концентрация вредных веществ в воздухе уменьшается, снижая риск возникновения аварии [48].

При этом, важной задачей становится правильный выбор вентиляционного оборудования, которое позволит обеспечить достаточную вентиляцию шахты, исходя из её топологических особенностей. В рамках подбора подобного оборудования специалистами решается ряд вентиляционных задач. К ним относят: расчет нормального воздухораспределения, расчёт баланса воздуха, расчет воздухораспределения в горных выработках, расчет устойчивости при пожаре [78, 8].

Для случаев, когда аварию не удалось предотвратить, специалистами составляются планы ликвидации аварий (ПЛА). Они представляют из себя документ, в котором определены меры и действия, необходимые для спасения людей и ликвидации аварий в начальный период их возникновения. В рамках составления ПЛА решаются задачи движения горноспасателей при разведке, ликвидации аварии и транспортировке пострадавших, движения горнорабочих при эвакуации из шахты и расчета распространения дыма в горных выработках шахты [2, 47].

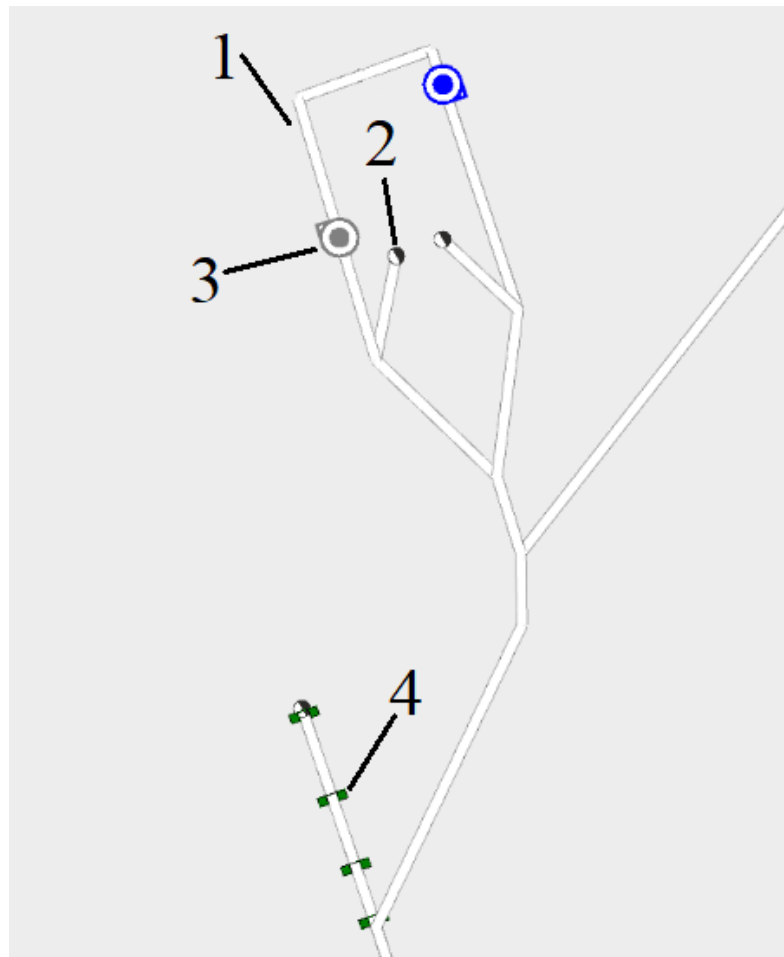
Эти задачи должны базироваться на информации о структуре сети горных выработок, а также расположении в них различных объектов, таких как горнодобывающее оборудование, вентиляторы, конвейерный транспорт и прочее. В связи с этим специалистами создаются модели пространственных сетей горных выработок. Именно использование этих моделей позволяет проводить различные расчёты, моделирующие, например, процесс воздухораспределения в шахте [27].

Построение модели сети горных выработок начинается с проведения маркшейдерских работ. Маркшейдеры спускаются в выработанное пространство и фиксируют его топологию, измеряя длины участков выработки, углы, а также глубины

залегания при помощи специального оборудования, среди которого можно выделить теодолиты и нивелиры [4].

Следующий этап формирования модели заключается в переводе данных, собранных в ходе маркшейдерских работ, в цифровой вид. Для этого используется специальное программное обеспечение, в качестве которого может выступать программный комплекс «Вентиляция 2» [32]. Выработанное пространство представляется в виде сети, состоящей из ветвей и узлов. Ветвь – это прямолинейный участок горной выработки с неизменным сечением. Узел – это место сопряжения нескольких ветвей или изменения конфигурации выработки. «Вентиляция 2» предоставляет пользователю специальные формы ввода, используя которые он создаёт узлы и задаёт их координаты. Затем происходит создание ветвей путём выбора из созданных узлов стартовой и конечной точки, а также ввода дополнительной информации (например, сечения) [71]. После того, как топология выработанного пространства сформирована за счёт создания узлов и ветвей, на ней расставляются другие объекты, которые могут располагаться в шахте. Среди них можно выделить вентиляторы и перемычки. Вентиляторы – устройства, обеспечивающие воздухообмен и используемые для расчёта задач вентиляции. Перемычки – это перегородки, которые перекрывают сечение выработки. Их присутствие влияет на воздухораспределение в шахте [54].

После ввода всех необходимых данных формируется файл модели сети горных выработок. В дальнейшем он загружается в специально разработанные системы для проведения расчётов вентиляции, планов ликвидации аварии или аналитических работ. Визуализация модели сети горных выработок представлена на рисунке 4.



1 – ветвь; 2 – выход на поверхность; 3 – вентилятор; 4 – перемычка

Рисунок 4 – Фрагмент модели сети горных выработок

1.2 Проблематика сравнения геометрических графов

Среди задач, связанных с работой с моделями пространственных объектов, выделяют их сравнение. Как правило, сравнение моделей проводится с целью актуализации и валидации данных, проверки их достоверности, а также анализа изменений в ходе проведения исследований в рамках предметной области.

В связи с тем, что существуют различные источники пространственных данных (лазерное сканирование, GPS-трекеры и пр.), геометрические модели, строящиеся на основе различных источников, могут различаться. Обнаружение подобных изменений позволяет выявить неточности, допущенные при создании моделей, и привести их в достоверный вид.

Также важно учитывать, что подвергаемый моделированию объект, например, городская среда, может претерпевать изменения с течением времени. В нем могут появляться новые маршруты, строиться новые, важные для модели, элементы среды. Либо же наоборот доступ к некоторым участкам дорожной сети может блокироваться, например из-за проведения ремонтных дорог. Все эти изменения, выявленные в результате сравнения моделей, построенных в разные временные интервалы, могут быть проанализированы, например для сопоставления кратчайших маршрутов между исследуемыми объектами. Оценивается влияние произошедших изменений на загруженность транспортных потоков, возможность равномерного доступа к ключевым объектам инфраструктуры. В конечном итоге, результаты этого анализа применяются в сферах, решающих задачи инфраструктурного и транспортного планирования, а также навигационных приложениях [94, 108].

В свою очередь, с течением времени выработанное пространство шахты также изменяется: добавляются новые участки, конфигурация старых участков может измениться. Вследствие этого возникает необходимость регулярно проводить новые маркшейдерские работы и на основе их результатов создавать новые модели сетей горных выработок. За этим следует перерасчёт задач вентиляции и ПЛА, произведённый исходя из изменений, которые произошли в структуре сети [51]. Однако перед тем, как начать использовать новую модель, важно принимать во внимание, что при её составлении большую роль играет человеческий фактор. Составитель модели может непреднамеренно ввести неправильную координату объекта, например узла, из-за чего структура сети не будет соответствовать реальной. Это приведёт к тому, что результаты всех проведенных для этой модели расчётов нельзя будет использовать на практике. Также может иметь место специальный ввод данных, не соответствующих действительности, с целью скрыть имеющиеся на шахте недоучёты в установке вентиляционных устройств, пренебрегая правилами безопасности. Сравнивая друг с другом две последовательно созданные модели, можно выявить произведенные изменения в топологиях выработанного пространства.

Оценка этих изменений позволит проконтролировать корректность составления модели, а также провести необходимые правки в план ликвидации аварии, составленный для исследуемого участка. Помимо топологии выработанного участка, то есть положения узлов и, соответственно, ветвей в пространстве, дополнительному сравнению можно подвергнуть атрибутивные характеристики объектов, которые в результате геометрического сравнения были обозначены как одинаковые. Это также позволит проконтролировать, что в новую модель не были введены данные, искажающие реальное положение дел. На рисунке 5 представлена визуализация возможного результата сравнения моделей изображения. Разными цветами выделены разные участки моделей в зависимости от их присутствия на сравниваемой модели (зеленые и красные ветви) или наличия атрибутивных изменений (оранжевые ветви).

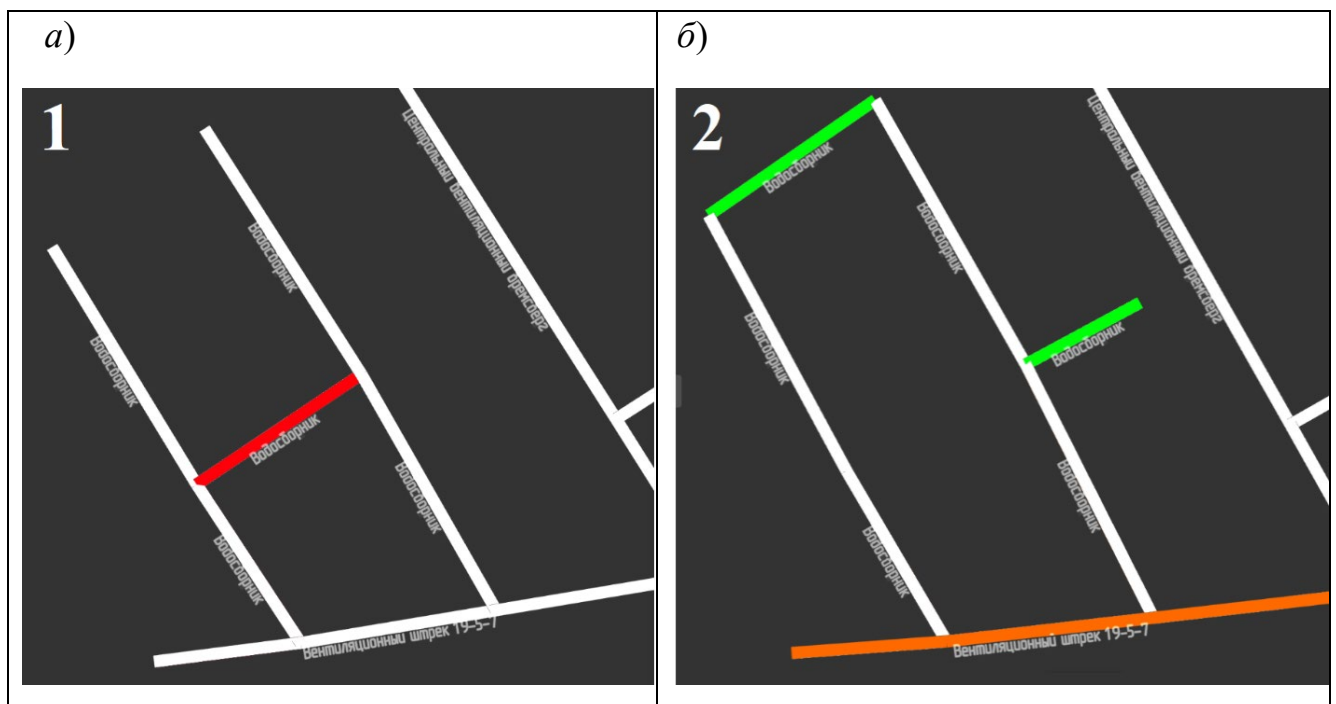


Рисунок 5 – Визуализация результатов сравнения моделей:

а) модель до внесения изменений; б) модель после внесения изменений

1.3 Обзор существующих алгоритмов сравнения геометрических графов

Существуют различные методы сопоставления геометрических графов, зависящие от требований, возникающих в ходе выполнения конкретных задач. Одна из групп методов основана на выявлении изоморфизма графов. Под изоморфизмом графов $G = \langle V_G, E_G \rangle$ и $H = \langle V_H, E_H \rangle$ подразумевается биекция между множествами вершин графов $f: V_G \rightarrow V_H$, такая что любые две вершины u и v графа G смежны тогда и только тогда, когда вершины $f(u)$ и $f(v)$ смежны в графе H [22]. Таким образом, проверка графов на изоморфизм становится актуальной в случае, если возникает необходимость сопоставить структуру графов и понять, остались ли идентичными связи между исследуемыми объектами.

Классическим методом для выявления изоморфизма является метод Ульмана. Метод Ульмана базируется на поиске в глубину с использованием матриц смежности и матрицы соответствия. Пусть даны два графа G с n вершинами и H с m вершинами. Строятся матрицы смежности $A(G)$ и $A(H)$, а также матрица соответствия M размером m на n , где $M_{i,j} = 1$, если вершина i из H может быть сопоставлена вершине j из G . Затем происходит поиск, в ходе которого алгоритм пытается построить биекцию между вершинами H и подмножеством вершин G . Если удалось найти вершину из H , которой соответствует вершина из G , в матрице M исключаются невозможные соответствия для других вершин. Затем проверяется условие: если вершины $i, k \in H$ соединены, то их предполагаемые образы $j, l \in G$ тоже должны быть соединены. Таким образом, если удалось построить полную подстановку, то графы изоморфны [104]. Алгоритм Ульмана получил развитие в виде алгоритмов серии VF. В отличие от алгоритма Ульмана, в методах VF2/VF3 используется представление графа не в виде матрицы смежности, а в виде наборов пар смежных вершин (i, j) . При этом при добавлении новой пары к списку проверяется не весь граф, а только локальная согласованность, то есть идёт проверка, исходя из уже сопоставленных связей соседних вершин. Это позволяет расходовать меньше

памяти при реализации алгоритма и делает его более эффективным на разреженных графах [82].

Методы, анализирующие изоморфизм графов, оказываются полезными, в случае необходимости сопоставить характер связей между объектами моделей, основанных на геометрических графах. Их активно применяют в химии для поиска идентичных молекулярных структур, электротехнике для сравнения электрических схем или сетевом анализе, например для сопоставления графов взаимодействий объектов. Таким образом, подобные методы актуальны для случаев, когда структура связей между анализируемыми объектами (вершинами графа) характеризует модель в большей степени, чем расположение этих объектов в пространстве. Однако это делает их малоприменимыми для решения описанной в предыдущем пункте задачи геометрического сравнения моделей, для которого расположение узлов в пространстве имеет первоочерёдное значение.

Для учёта же пространственных характеристик объектов могут использоваться другие методики. Одна из них – расстояние Фреше. Расстояние Фреше представляет из себя меру сходства кривых, учитывающую число и порядок точек вдоль них. Иными словами, эту метрику можно описать как степень несоответствия кривых. Формально расстояние Фреше определяется следующим образом. Пусть S – метрическое пространство. Кривая A в пространстве S – это непрерывное отображение единичного отрезка в S , т. е. $A : [0, 1] \rightarrow S$. Репараметризация α отрезка $[0, 1]$ – это непрерывная неубывающая сюръекция $\alpha : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$. Пусть A и B – две кривые в S , тогда расстояние Фреше между ними – это точная нижняя граница по всем репараметризациям α и β отрезка $[0, 1]$ по всем максимумам $t \in [0, 1]$ расстояний в S между $A(\alpha(t))$ и $B(\beta(t))$. Таким образом:

$$F(A, B) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d(A(\alpha(t)), B(\beta(t)))\}, \quad (1)$$

где d – функция расстояния пространства S .

Если для маршрутов, заданных геометрическими графами, расстояние Фреше велико, можно сделать вывод о том, что один маршрут существенно отклоняется от другого [85]. Вариант иллюстрации расстояния Фреше представлен на рисунке 6. Зелеными и красными ломаными показаны сравниваемые траектории, черными линиями – расстояния между опорными точками, линией синего цвета – максимальное расстояние.

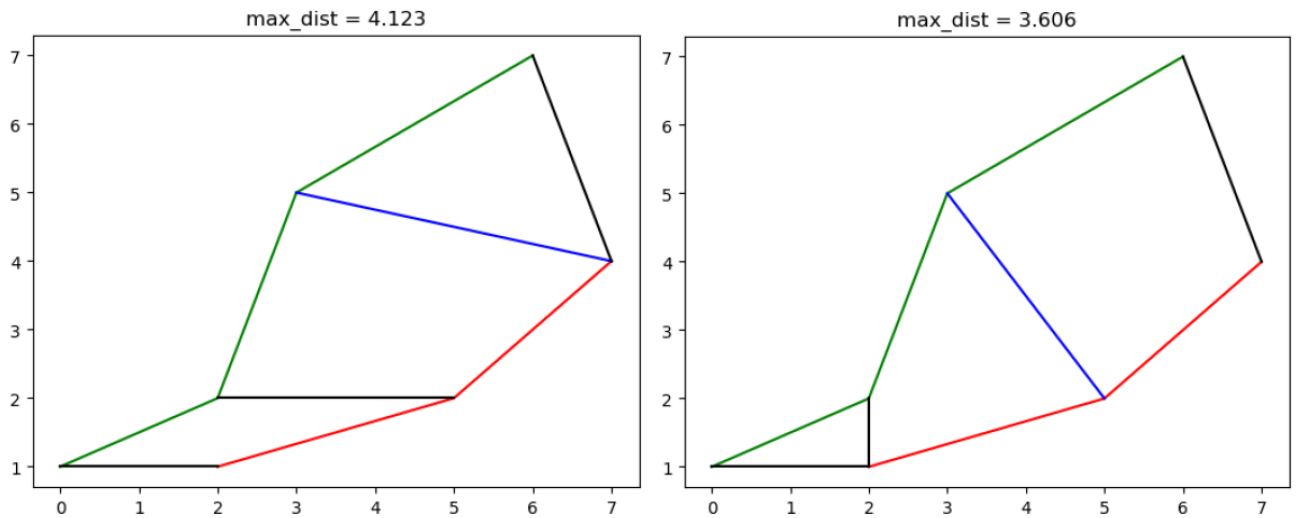


Рисунок 6 – Визуализация расстояния Фреше

Ещё одной метрикой несовпадения множеств является расстояние Хаусдорфа. В отличие от расстояния Фреше, расстояние Хаусдорфа измеряет максимальную степень несовпадения двух множеств. Формально это определяется следующим образом.

Пусть X и Y – два непустых компактных подмножества метрического пространства M . Тогда расстояние Хаусдорфа $d_H(X, Y)$ между X и Y – это минимальное число r такое, что замкнутая r -окрестность X содержит Y и также замкнутая r -окрестность Y содержит X , то есть:

$$d_H(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} |xy|, \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} |xy| \right\}. \quad (2)$$

Для двух геометрических графов, представленных в виде множества точек, большое значение величины расстояния Хаусдорфа будет свидетельствовать о наличии серьёзных расхождений между графами [23]. Иллюстрация расстояния Хаусдорфа представлена на рисунке 7. Ломаными красного и синего цветов показаны сравниваемые маршруты, зеленой пунктирной линией обозначено расстояние Хаусдорфа.

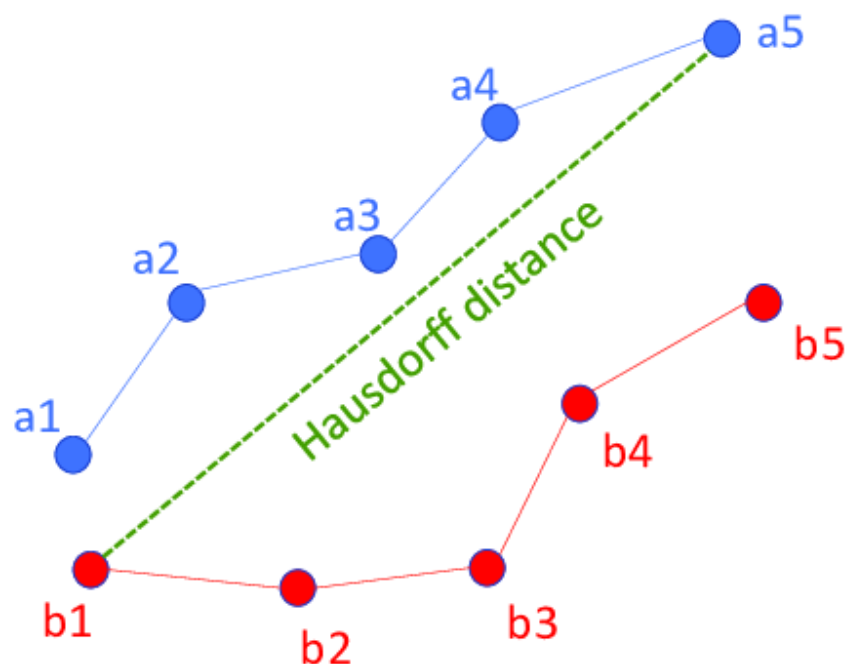


Рисунок 7 – Визуализация расстояния Хаусдорфа

И расстояние Фреше, и расстояние Хаусдорфа позволяют численно оценить степень схожести моделей пространственных объектов. При этом расстояние Фреше учитывает последовательность обхода рёбер в графе, поэтому его уместнее использовать при оценке траекторий движения, в то время как расстояние Хаусдорфа позволяет оценить геометрическое сходство сетей. Однако существенным недостатком этих методов в рамках решения задачи геометрического сравнения является отсутствие возможности выявить конкретные отличия сравниваемых про-

странственных моделей. Расстояния Фреше и Хаусдорфа позволяют провести первичную оценку того, являются ли графы идентичными, и в случае выявления расхождений могут поспособствовать принятию решения о проведении дальнейшего более детального геометрического анализа. Однако они не дадут возможности понять, какие именно участки графов были подвергнуты изменениям. Более того, могут иметь место случаи, при которых геометрии графов, описывающих структуры выработанного пространства шахты, будут отличаться таким образом, что метрики их геометрической схожести будут показывать небольшие значения, однако их структуры будут отличаться таким образом, что это будет оказывать большое влияние на вентиляционные расчёты.

В связи с этим, для проведения геометрического анализа стоит отказаться от способов определения степени схожести геометрических графов и моделей, созданных на их основе, в пользу способов выявления конкретных отличий между графами. Сопоставление графов является частью процесса конфляции. Конфляция (от англ. conflation — слияние, объединение) – это процесс слияния нескольких отличающихся наборов картографических данных с целью создать единый согласованный набор [99]. Конфляция позволяет обновлять имеющиеся наборы данных, а также верифицировать и дополнять исследуемые источники картографических данных, сопоставляя их с данными из других источников [93, 88]. Пример конфляции представлен на рисунке 8. Черными и оранжевыми сплошными линиями показаны модели дорожных сетей, составленные при помощи данных из различных картографических наборов. Пунктирными линиями – объекты одного из картографических наборов, для которых не нашлось совпадающих объектов из другого набора, зелеными стрелками – объекты, определенные как совпадающие.

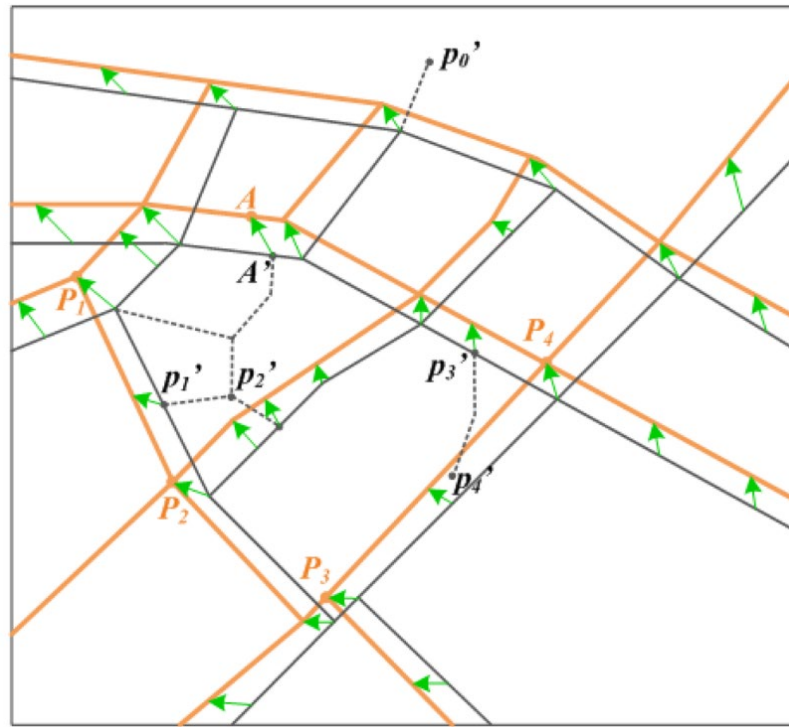


Рисунок 8 – Пример конфляции [108]

Как правило, процесс сопоставления наборов данных, зачастую представляемых в виде геометрических графов, достигается при помощи геометрических либо же атрибутивных способов. В число геометрических способов входят уже описанные ранее расстояние Фреше и расстояние Хаусдорфа. Для точечных объектов (вершин графов) может вычисляться евклидово расстояние, низкое значение которого будет позволит определить сопоставляемые объекты как совпадающие. Также используется метод буферизации. Вокруг каждого объекта одной из моделей строится буферная зона, окружающая объект на заданную величину. Среди объектов другой модели ищутся те, которые попали в эту зону. В случае, если таких объектов несколько, выбирается тот, который находится в этой зоне наибольшей своей частью, а затем он помечается, как совпадающий с элементом из первой модели.

Атрибутивные методы подразумевают сопоставление объектов по значениям заданных атрибутов. Например, в моделях угольных шахт каждому добавляемому объекту сопоставляется уникальный идентификационный номер. Существующие

решения по сравнению моделей сетей горных выработок, как правило, опираются на сравнение их наборов идентификационных номеров объектов. Это позволяет выявить объекты, которые были удалены или добавлены в новую версию модели. Однако такой подход имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, идентификационные номера объектов могут произвольно изменяться. Если в новой модели номера объектов будут присвоены по новому принципу, то подобное сравнение не даст корректных результатов

Во-вторых, подобный метод, даже в случае, если уникальные номера объектов не изменились, позволяет лишь выявить удалённые и добавленные объекты, но не позволяет обнаружить возможные изменения в координатах сохранившихся на модели объектов.

Стоит отдельно уделить внимание существующим программным решениям, с помощью которых осуществляется конфляция и сравнение геометрических графов. Популярным решением в сфере картографии является инструмент ConfleX, предоставляемый как в виде отдельной программы, так и в виде расширения для ГИС ArcGIS [101]. Интерфейс ConfleX представлен на рисунке 9.

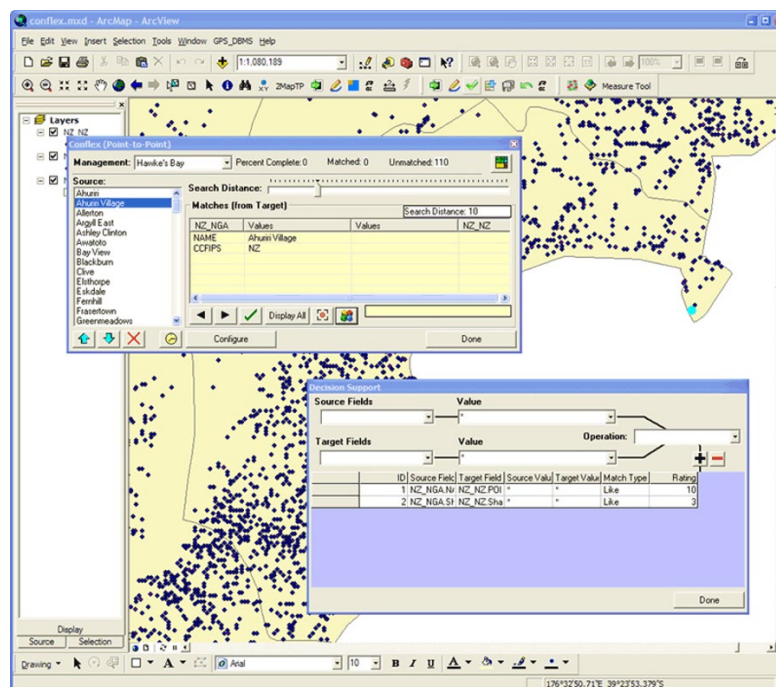


Рисунок 9 – Графический интерфейс ConfleX

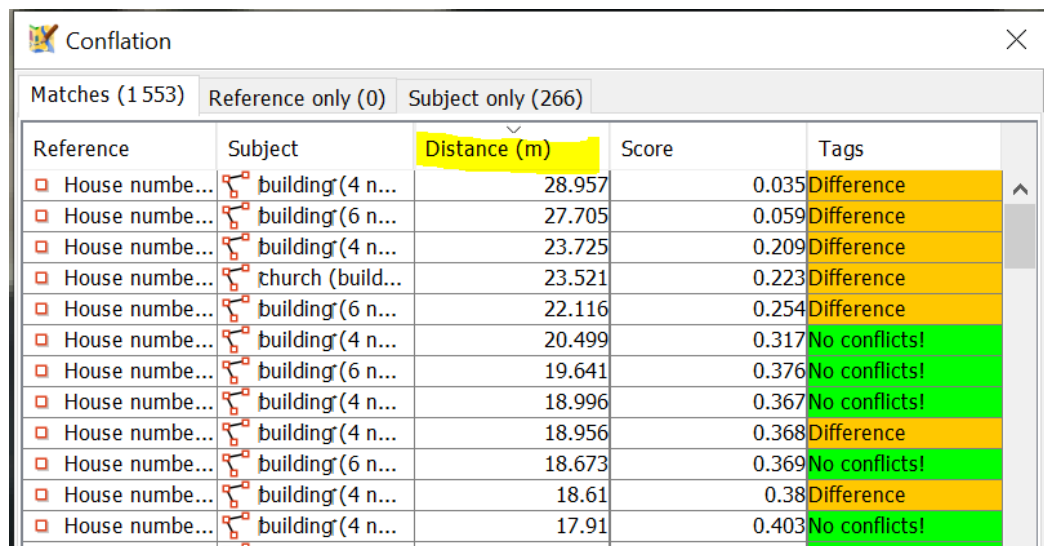
ConfleX предоставляет возможности по сравнению пространственных данных из различных источников с целью последующего их слияния. Его особенностью является использование алгоритмов искусственного интеллекта для объединения наборов пространственных данных вместо итеративных алгоритмов, что позволяет ускорить данный процесс [89].

Однако в данном инструменте отсутствует возможность получить детализированный отчёт о результатах сравнения моделей пространственных объектов, так как основной упор в функциональности данного продукта делается на процессе совмещения данных. Также ConfleX является коммерческим продуктом, приобретение которого затруднительно в России.

В отличие от ConfleX, инструмент OSM Conflator относится к свободно распространяемому программному обеспечению, а также позволяет хранить результат сравнения двух наборов пространственных данных в файле формата OsmChange. Проблема работы с данным форматом заключается в том, что он позволяет лишь идентифицировать объекты как удаленные, добавленные или изменившиеся, но не даёт точной информации о характере произведенных изменений. Более того, OSM Conflator является консольной командой, у которой нет ни графического интерфейса для предпросмотра моделей, ни инструмента визуализации результатов сравнения. Это существенным образом ухудшает опыт использования данного инструмента, делая работу с ним менее удобной, а результаты – неочевидными [100].

Ещё одним бесплатным решением для конфляции является программное расширение Conflation, устанавливаемое для программного обеспечения Java OpenStreetMap Editor, предназначенного для редактирования карт проекта OpenStreetMap. Данное расширение опирается на сопоставлении координат пространственных объектов при помощи расстояния Хаусдорфа, а также сопоставлении атрибутов объектов при проведении сравнения наборов данных. Одно из главных способов его применения – это обновление адресов промышленных объектов.

Однако данное расширение не предоставляет детализированного отчёта об изменении в геометрии сравниваемых моделей, который бы позволил наглядно увидеть изменившиеся фрагменты. Conflation ограничивается перечислением сравниваемых объектов моделей с указанием расстояния между сопоставляемыми объектами, из которого делается вывод об их идентичности и дальнейшей необходимости слияния [96]. Подобный подход не позволяет использовать данное программное расширение для подробного геометрического сравнения и визуализации его результатов. Пример подобного отчёта представлен на рисунке 10.



The screenshot shows the 'Conflation' window with a table of matches. The table has five columns: Reference, Subject, Distance (m), Score, and Tags. The 'Distance (m)' column is highlighted in yellow. The 'Tags' column contains values like 'Difference' (highlighted in orange) and 'No conflicts!' (highlighted in green). The table lists 12 matches, each with a small icon in the Reference column and a red 'X' in the Subject column.

Reference	Subject	Distance (m)	Score	Tags
House numbe...	building (4 n...	28.957	0.035	Difference
House numbe...	building (6 n...	27.705	0.059	Difference
House numbe...	building (4 n...	23.725	0.209	Difference
House numbe...	church (build...	23.521	0.223	Difference
House numbe...	building (6 n...	22.116	0.254	Difference
House numbe...	building (4 n...	20.499	0.317	No conflicts!
House numbe...	building (6 n...	19.641	0.376	No conflicts!
House numbe...	building (4 n...	18.996	0.367	No conflicts!
House numbe...	building (4 n...	18.956	0.368	Difference
House numbe...	building (6 n...	18.673	0.369	No conflicts!
House numbe...	building (4 n...	18.61	0.38	Difference
House numbe...	building (4 n...	17.91	0.403	No conflicts!

Рисунок 10 – Отчёт о проведении сравнения в расширении Conflation для JOSM

Если обратиться к другим программным решениям, позволяющим работать с моделями пространственных объектов, основной функциональностью которых не является конфляция, то можно выделить следующие решения. Компанией Aspose была разработана программная библиотека Aspose.GIS для модульной платформы .NET. Она позволяет работать с файлами различных форматов, используемых в ГИС, например GeoJSON, Shapefile и пр. С её помощью можно проводить сравнение геометрий на предмет того, являются ли они пространственно равными (то есть, совпадают ли координаты точек, из которых они состоят), пересекаются ли

они, содержит ли одна из них другую. Помимо этого, Aspose.GIS позволяет находить объединение и разность двух геометрических графов [53]. Но, представляя из себя лишь программную библиотеку, Aspose.GIS не обладает графическим интерфейсом и не способен к визуализации результатов сравнения. Кроме того, этот продукт является коммерческим и его приобретение в России является невозможным.

Ещё одним программным решением для работы с геометриями является инструмент Feature Compare, реализованный в ГИС ArcGIS Pro. Он также принимает на вход два набора данных, представляющих из себя совокупности пространственных объектов, сравнивает их, исходя из выбранных пользователем критериев, таких как пространственная форма объектов, атрибуты или их местоположение, и затем генерирует отчёт о выявленных изменениях [91]. Работа с ArcGIS Pro является более удобной для пользователя по сравнению с использованием Aspose.GIS, поскольку ArcGIS Pro предоставляет пользовательский интерфейс, позволяет отображать пространственные наборы загружаемых данных и затем наглядно выделить объекты, подвергшиеся изменению. Графический интерфейс ArcGIS Pro представлен на рисунке 11.

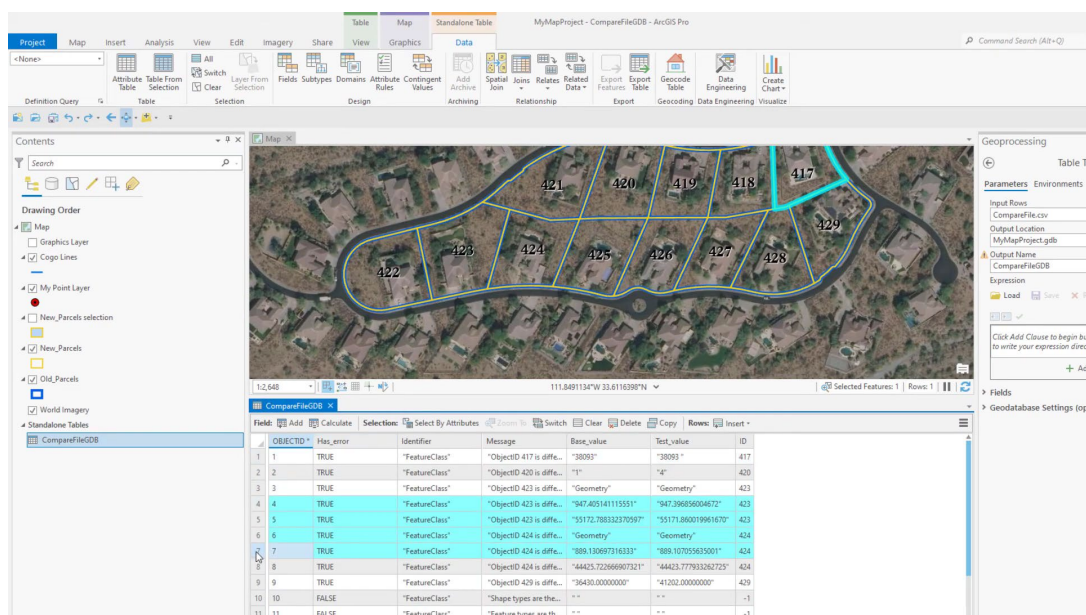


Рисунок 11 – Графический интерфейс ArcGIS Pro при использовании инструмента Feature Compare

Ключевая проблема с использованием Feature Compare в ArcGIS Pro заключается в том, что ArcGIS Pro является проприетарным программным обеспечением, приобретение которого запрещено для жителей Российской Федерации компанией-разработчиком. Помимо этого, при сравнении пространственных моделей инструмент Feature Compare проводит пообъектное сравнение, что может привести к некорректным результатам, вызванным произвольным характером моделирования. Например, при составлении модели выработанного пространства шахты пользователь может разбить длинную выработку на совокупность более коротких линейных объектов. По сути, длинная выработка в одной модели и совокупность коротких в сравниваемой модели занимают одинаковое геометрическое пространство, однако инструмент Feature Compare при проведении сравнения будет сигнализировать о том, что данные участки являются отличающимися друг от друга.

Таким образом, для подведения итогового анализа существующих программных решений работы с моделями пространственных объектов можно выделить следующие критерии:

- 1) наличие геометрического анализа – возможность сравнивать объекты, исходя из положения, занимаемого ими в пространстве;
- 2) возможность загружать данные в формате JSON – данный формат позволяет достигнуть универсальности в сравнении пространственных объектов, не привязываясь к конкретной предметной области;
- 3) возможность получить детализированный отчёт о результате геометрического анализа, в том числе с визуализацией;
- 4) наличие графического интерфейса – отсутствие графического интерфейса существенно усложняет работы с программным обеспечением и увеличивает затраты на обучение пользователей продукта;
- 5) условия пользования – возможность легально приобрести доступ к продукту и возможность пользования им в Российской Федерации.

Исходя из выделенных критериев было проведен сравнительный анализ обозреваемых решений, приведенный в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ программных решений для работы с пространственными моделями

Критерий	ConfleX	OSM Conflator	Conflation (JOSM)	Aspose.GIS	Feature Compare (ArcGIS Pro)
Наличие геометрического анализа	Присутствует	Присутствует	Оценивается степень идентичности объектов, исходя из расстояния Хаусдорфа	Присутствует	Присутствует
Входные форматы данных	Работает с форматом Shapefiles и векторными форматами	Работает с GeoJSON, XML, векторными форматами	Работает с GeoJSON, файлами данных OSM	Работает с форматом Shapefiles, GeoJSON и векторными форматами	Работает с форматом Shapefiles и векторными форматами
Возможность получить детализированный отчет о результатах сравнения	Отсутствует	Отчёт генерируется в табличном виде, без подробного описания выявленных изменений	Отчёт генерируется в табличном виде, без подробного описания выявленных изменений	Отчёт генерируется в табличном виде	Генерируется отчет с возможностью просмотра участков с выявленными изменениями
Наличие графического интерфейса	Присутствует	Отсутствует	Присутствует	Отсутствует	Присутствует
Лицензия	Коммерческая	Бесплатно распространяемая библиотека	Бесплатно распространяемое расширение	Коммерческая	Коммерческая

Исходя из этой таблицы, можно сделать вывод, что на данный момент на рынке отсутствуют решения, которые могли бы в полной мере удовлетворять выбранным критериям для решения поставленной задачи.

1.4 Выводы по первому разделу

Моделирование пространственных объектов, базирующееся на использовании геометрических графов, отражающих не только структуру связей между

объектами, но и их пространственное расположение, является широко распространенным в сферах, связанных с картографией, навигацией, а также угледобывающей промышленностью. Без использования геометрических графов невозможно представить современные геоинформационные системы, картографические сервисы и навигационные системы, которые предоставляют пользователям возможность обрабатывать и анализировать геопространственную информацию, объединять данные из различных картографических источников с целью получения подробной картины исследуемой области, строить навигационные маршруты [92]. В частности, подобные модели используются для регуляризации воздушных или наземных транспортных потоков для избегания аварийных ситуаций [15].

В угольной промышленности геометрические графы используются для моделирования выработанного пространства шахт. Трёхмерные пространственные модели подземной части шахты нужны для проведения расчётов, необходимых для обеспечения безопасности проведения угледобывающих работ. К подобным расчётам относятся расчёты параметров вентиляционных сетей, а также расчёты зон поражения при взрывах газа, необходимые для построения планов ликвидации аварии [12, 46].

Таким образом, высокая важность достоверности и корректности моделей пространственных объектов обуславливается тем, что они используются, в том числе, для задач, связанных с жизнью и безопасностью людей. Одним из методов валидации пространственных моделей, базирующихся на использовании геометрических графов, является сравнение последовательно созданных моделей исследуемого объекта либо же сравнение моделей, созданных на основе разных источников информации. Выявление несовпадений в моделях позволит сделать предположение о неточности и необходимости дальнейшей верификации данных, заложенных в модель. Помимо этого, сравнение последовательно созданных моделей позволяет проследить развитие исследуемого объекта, выявив его

закономерности, которые, например, могут быть использованы для прогнозирования будущих изменений или выбора наиболее предпочтительного варианта развития.

Анализ существующих способов сравнения геометрических графов показал, что значительная часть из них базируется на выявлении степени несоответствия графов друг другу либо же изменений в структуре графов. Это обуславливает то, что на рынке программных решений для сравнения моделей на основе геометрических графов отсутствуют программные комплексы, которые бы позволили осуществить подробный геометрический анализ, в результате которого пользователь мог бы наглядно увидеть все локализованные различия сравниваемых моделей.

Таким образом, обоснована актуальность и целесообразность создания геоинформационной системы, позволяющей проводить геометрический анализ моделей пространственных объектов. Результатом подобного анализа должна стать наглядная визуализация итогов сравнения геометрических графов, положенных в основу анализируемых моделей. В рамках визуализации пользователю должна предоставляться возможность изучить все участки с изменившейся геометрией. Помимо этого, положенный в основу ГИС алгоритм сравнения геометрических графов должен быть независим от разбиения моделируемого пространства на объекты. То есть результат сравнения двух пространственных объектов должен быть одинаковым вне зависимости от того, как именно эти объекты были разделены на составляющие.

Разработка алгоритма сравнения геометрических графов позволит повысить эффективность процессов обеспечения качества моделей пространственных объектов. Возникнет возможность минимизировать влияние человеческого фактора на валидацию моделей, что особенно важно с учётом того, что многие модели могут быть очень объёмными и включать десятки тысяч объектов. Появится воз-

возможность сократить человеческие трудозатраты и ускорить процессы согласования изменений с контролирующими государственными органами и аварийно-спасательными службами. Вдобавок к этому, развитие алгоритмов анализа моделей пространственных объектов открывает возможности для дальнейшего появления новых достижений в этой области, связанных с прогнозированием и планированием изменений исследуемых объектов.

2. МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

2.1 Требования к геометрическому анализу

В основе геометрического анализа моделей пространственных объектов лежит алгоритм геометрического сравнения топологий. Его суть сводится к сопоставлению участков пространства, занимаемого моделируемыми объектами, и выявлению тех фрагментов моделей, которые располагаются в пространстве отличным друг от друга образом.

Исходя из анализа имеющихся решений, приведённого в первом разделе, к алгоритму выдвигаются следующие требования:

1 Алгоритм должен выявить статус каждой ветви для сравниваемых моделей, категоризировав ветвь как «добавленную», «удалённую» или «сохранившуюся». Ветвь, расположенная в одной из топологий, определяется как «сохранившаяся», если то пространство, которое она занимает, также является занятым в сравниваемой топологии, то есть на заданном участке трёхмерного пространства расположена минимум одна ветвь. Если для ветви или её участка, расположенной в топологии, которая принимается за более раннюю версию, нет аналогичных ветвей, то она определяется как «удалённая». Для аналогичной ситуации с ветвью, расположенной в топологии, принимаемой за более новую, ветви будет присвоена категория «добавленные». Вдобавок к этому, аналогичной категоризации могут подвергнуться не только ветви целиком, но и их отдельные участки.

Подобная категоризация позволяет в дальнейшем более эффективно использовать результаты проведения сравнения для визуализации и более наглядного представления изменений, вносимых в рассматриваемый объект.

2 Алгоритм должен производить одинаковые результаты вне зависимости от произвольного разбиения пространства на ветви. На рисунке 12 показан пример того, как одинаковый участок пространства может быть разбит на разное количество ветвей.

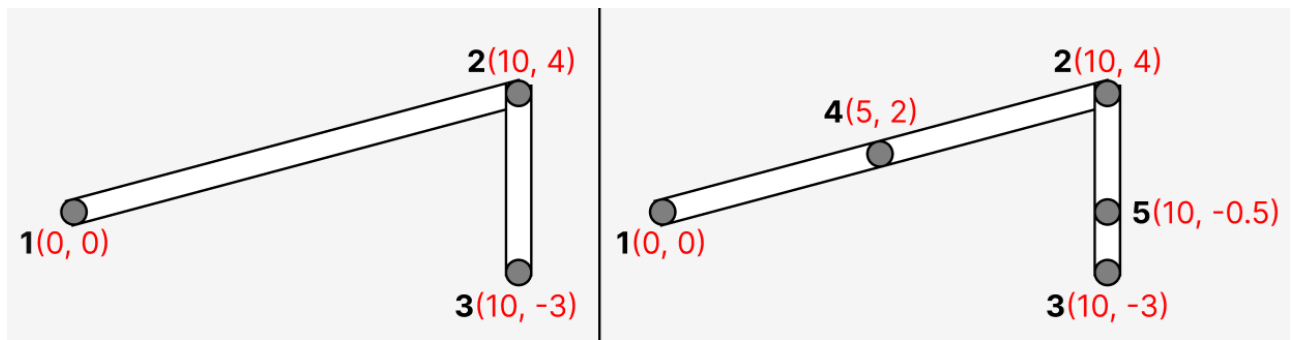


Рисунок 12 – Пример участков топологий с различным разбиением на ветви

Точки под номерами 1, 2 и 3 для обеих топологий, приведённых на изображении, располагаются в одинаковых координатах. Как следствие, топологии занимают одинаковое пространство, однако одна из них разбита на две ветви, а другая на четыре из-за добавления дополнительных узлов под номерами 4 и 5. Подходы, которые сравнивают топологии пообъектно, не принимая во внимание их геометрические характеристики, например, выявляя ветви, с совпадающими номерами стартового и конечного узлов, воспримут приведённые в примере модели как различные. Поэтому разрабатываемый алгоритм должен учитывать данный аспект при проведении сравнения.

3 Алгоритм должен предусматривать возможность задания величины точности сравниваемых координат. Сравниваемые пространственные объекты могут располагаться на больших площадях, измеряемых десятками квадратных километров [10]. В подобных случаях отклонение координат узла на несколько сантиметров не является существенным и не внесёт заметных изменений в возможные расчёты, проводимые для имеющейся модели.

Визуальная интерпретация показателя точности проводимого сравнения приведена на рисунке 13.

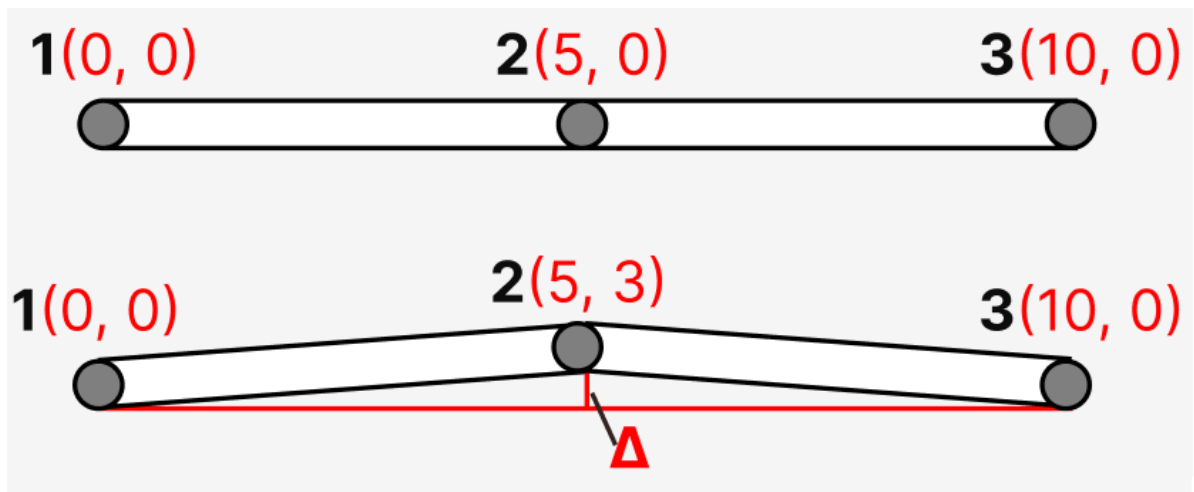


Рисунок 13 – Визуализация параметра точности сравнения

На приведенном выше рисунке видно, что аналогичные для обеих топологий точки под номерами 1 и 3 соединены точками под номером 2. При этом для одной из приводимых топологий точка 2 смещена на величину, обозначенную буквой Δ . Если полученная Δ превышает заданную пользователем величину допустимой точности сравнения, то точки под номером 2 будут определены как различные, тогда ветви 1-2 и 2-3 также будут определены как отличающиеся. В противном случае, точки и, как следствие, ветви будут определены как одинаковые. Настройка параметра точности позволит адаптировать алгоритм под конкретные условия, продиктованные имеющейся задачей, исходя из того, насколько большую роль в дальнейшем использовании модели будут играть смещения на заданную величину.

4 Алгоритм должен быть опционально инвариантен к движению или гомотетии топологии. Инвариантность к движению топологии подразумевает то, что алгоритм сможет правильно классифицировать одинаковые наборы ветвей в случае, если одна из моделей окажется повернутой на заданную величину угла. Инвариантность к гомотетии топологии подразумевает, что одна из моделей может быть масштабирована, то есть длины её ветвей изменятся на заданную величину, сохранив при этом свои направления, но алгоритм сможет правильно классифици-

ровать наборы ветвей как идентичные [39, 80]. Опциональность в учёте приведённых факторов обуславливается тем, что различные задачи могут обладать различными критериями того, что именно подразумевается под идентичными моделями. Если в рамках рассматриваемой задачи подразумевается, что наличие таких геометрических преобразований, как движение или гомотетия, не влияет на корректность составленной модели, то этот аспект должен учитываться при проведении сравнения.

Таким образом, основной задачей алгоритма является классификация участков топологии в зависимости от их наличия или отсутствия на сравниваемой топологии. При этом алгоритм должен быть инвариантен к представлению и устойчив к шуму.

2.2 Алгоритм геометрического сравнения топологий

Процессу геометрического сравнения топологий предшествуют подготовительные этапы. В ходе первого этапа происходит объединение коллинеарных ветвей, из узлов которых не исходят иные, неколлинеарные ветви. Это нужно для того, чтобы нормализовать представление модели и сделать алгоритм сравнения более устойчивым к разным разбиениям одного и того же пространства.

Для того, чтобы осуществить объединение ветвей топологии $M(P, B)$, где $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ – это множество узлов, $B = \{b_1, \dots, b_m\}$ – это множество ветвей, создаётся очередь Q всех узлов $p \in P$, которые имеют степень свободы, $\deg(p) = 2$, то есть

$$\deg(p) = |\{b \in B : p \in b\}|. \quad (3)$$

Затем осуществляется последовательный перебор элементов очереди Q , в рамках которого для каждого извлечённого из очереди узла p находятся инцидентные

ветви b_1 с узлами (p, x) , b_2 с узлами (p, y) и проверяется их коллинеарность по формуле:

$$\text{cross}(b_1, b_2) < \varepsilon, \quad (4)$$

где $\text{cross}(b_1, b_2)$ – длина векторного произведения b_1, b_2 ;

ε – заданное значение погрешности.

Если условие, заданное формулой (4), выполняется, ветви b_1, b_2 удаляются из B , узел p удаляется из P , в B добавляется новая ветвь b' с узлами (x, y) . Для узлов x, y происходит перерасчёт количества инцидентных ветвей, в случае если их количество достигает двух, узел добавляется в Q . Это выполняется до тех пор, пока очередь Q не окажется пустой. Для каждой добавленной таким образом ветви b' хранится список ветвей изначального списка B , из которых она была сформирована. Это нужно для того, чтобы после проведения сравнения интерполировать размеченные участки ветви b' на каждую из изначальных ветвей.

Следующим подготовительным этапом является построение гистограмм расстояний и узлов для сравниваемых топологий. В рамках построения гистограммы эвклидовых расстояний $H_{D1}(M_1)$ топологии $M_1(P_1, B_1)$, где $P_1 = \{p_1, \dots, p_n\}$ – это множество узлов, $B_1 = \{b_1, \dots, b_m\}$ – это множество ветвей, вычисляются расстояния $d(p_i, p_j)$ между всеми возможными парами узлов $p_i, p_j \in P_1$. Диапазон между значением минимального рассчитанного расстояния $d_{\min}$ и значением минимального рассчитанного расстояния $d_{\max}$ разбивается на N равных интервалов, для каждого из которых подсчитывается количество значений расстояний, попавших в него. Аналогичные действия по построению гистограммы расстояний $H_{D2}(M_2)$ выполняются для второй участвующей в сравнении топологии $M_2(P_2, B_2)$. Таким образом, оказываются получены гистограммы $H_{D1}(M_1), H_{D2}(M_2)$ как

$$H_{D1}(M_1) = \{(x_i, p_i)\}, \quad (5)$$

$$H_{D2}(M2) = \{(y_i, q_i)\}, \quad (6)$$

где x_i, y_j – центры бинов гистограммы;

p_i, q_j – вероятность попадания значения в i -й/ j -й бин;

$\sum_i p_i = 1, \sum_j q_j = 1$ – то есть гистограммы нормированы по массе.

Метрика EMD (The Earth Mover's Distance) применительно к одномерному распределению определяется как:

$$\text{EMD}(P, Q) = \int_{-\infty}^{\infty} |F_{H_{D1}}(t) - F_{H_{D2}}(t)| dt, \quad (7)$$

где $F_{H_{D1}}, F_{H_{D2}}$ – функции распределения гистограммы.

Полученное значение EMD в данном случае будет означать среднее отличие распределений расстояний [105]. Для того, чтобы выдвинуть предположение о том, что сравниваемые топологии имеют одинаковую форму, но представлены в разном масштабе, должно выполняться условие

$$\text{EMD} < \varepsilon_d, \quad (8)$$

где ε_d – заданное значение показателя схожести расстояний.

Значение ε высчитывается как

$$\varepsilon_d = a * d_{\text{ср}}, \quad (9)$$

где a – заданное значение точности, которое может варьироваться от 0,01 до 0,05;

$d_{\text{ср}}$ – среднее значение расстояний между узлами топологий.

В случае выполнения условия (8) выдвигается предположение о том, что топологии схожи по геометрии, но отличны по масштабу. Масштаб в таком случае рассчитывается как

$$s = \frac{\sum_j y_j q_j}{\sum_i x_i p_i}. \quad (10)$$

Значение $s > 1$ будет означать, что M_2 увеличена по сравнению с M_1 в s раз, $s < 1$ будет означать, что M_2 уменьшена по сравнению с M_1 в s раз.

Для того, чтобы оценить топологии на предмет того, может ли одна из них являться копией другой, но повернутой на некоторую величину угла, также строятся гистограммы углов между ветвями

$$HA1(M1) = \{(\theta_i, p_i)\}, \quad (11)$$

$$HA2(M2) = \{(\phi_j, q_j)\}, \quad (12)$$

где x_i, y_j – центры бинов гистограммы, $x_i \in [0, 2\pi)$, $y_j \in [0, 2\pi)$;

p_i, q_j – вероятность попадания значения в i -й/ j -й бин;

$i \in [1, N]$;

$\sum_i p_i = 1, \sum_j q_j = 1$ – то есть гистограммы нормированы по массе.

Для того, чтобы компенсировать применение к одной из топологий возможного поворота, производится её сдвиг, который сохранит структуру распределения значений в гистограмме, но позволит минимизировать значение EMD:

$$p_i^{(k)} = p_{(i-k) \bmod N}. \quad (13)$$

Затем вычисляется значение длины интервала по углу как

$$\Delta = \frac{2\pi}{N}. \quad (14)$$

Значение EMD для полученных гистограмм определяется как

$$\text{EMD}(P, Q)_k = \sum_{i=1}^N |F_{HA1}^{(k)}(\theta_i) - F_{HA2}(\theta_i)| * \Delta, \quad (15)$$

где $F_{HA1}^{(k)}, F_{HA2}$ – функции распределения гистограммы.

Для дальнейшей оценки возможного сдвига одной из топологий находится минимальное значение EMD на возможных заданных значениях дискретных поворотов k :

$$EMD_{min} = \min_k EMD(P, Q)_k, \quad (16)$$

$$k' = \arg \min_k EMD(P, Q)_k, \quad (17)$$

Для того, чтобы выдвинуть предположение о том, что топологии имеют близкие к идентичным геометрии, но одна из них сдвинута на некоторое значение угла, необходимо выполнение следующего условия:

$$EMD_{min} < \varepsilon_a, \quad (18)$$

где ε_a – заданное значение показателя схожести углов.

Значение ε_a определяется минимальной угловой точностью, допускаемой гистограммой:

$$\varepsilon_a = c * \Delta, \quad (19)$$

где $c \in [0,5, 2]$.

В случае если выполняется условие (18), значение угла сдвига φ можно определить как

$$\varphi = k' * \Delta. \quad (20)$$

Таким образом, проводится оценка сравниваемых топологий на предмет возможной инвариантности по масштабу или углу. В случае, если параметры сравнения предусматривают необходимость учёта инвариантности, в ходе анализа были

выдвинуты основания о наличии масштабирования или сдвига по углу, к измененной топологии применяются вычисленные значения вероятного масштабирования или сдвига. В дальнейшем геометрическом сравнении участвует изменённая топология. Поскольку при приведённых деформациях геометрия топологии не изменяется, выявленные отличия будут релевантными и для изначальной версии топологии.

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:

$$\max ||x_k^{(i)} - y_k^{(i)}|| \leq \varepsilon, \quad (21)$$

где $||*||$ – евклидова норма.

В случае выполнения условия (21) ветвям b_j^{new} и b_i^{old} присваивается категория «сохранившаяся», и они исключаются из списков ветвей соответствующих топологий. В этом и всех последующих случаях при присвоении категории «сохранившаяся» для ветви необходимо сохранить дополнительный атрибут, который содержит идентификатор идентичной ветви из сравниваемой топологии. Если рассматриваемой ветви идентична не целая ветвь, а лишь её часть, то сохраняется также информация о том, какой именно фрагмент ветви является идентичным. В обратном случае, если искомой ветви идентичны несколько ветвей или совокупность фрагментов нескольких ветвей сравниваемой топологии, то информация о них также сохраняется в ассоциативный массив. Ключом такого массива является идентификатор

ветви, а значением ключа – промежуток указанной ветви, заданный её относительными координатами.

На рисунке 14 показана визуальная демонстрация шага 1 для топологий $G_1 = \{V_1, E_1\}$ и $G_2 = \{V_2, E_2\}$, где $V_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $E_1 = \{(1, 2), (2, 6), (6, 4), (3, 2), (3, 5)\}$, $V_2 = \{1, 2, 3, 4, 7, 8\}$, $E_2 = \{(1, 7), (7, 8), (7, 2), (2, 4), (3, 2)\}$. Ветви (3, 2) обеих топологий помечены желтым цветом, как «сохранившиеся».

Старая топология Новая топология

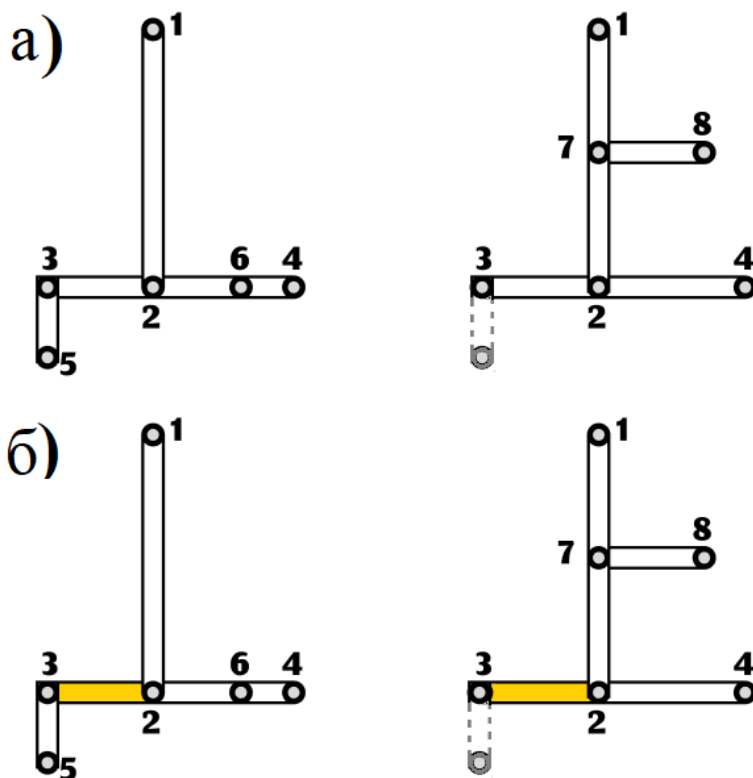


Рисунок 14 – Визуализация первого этапа алгоритма:

а) исходные данные; б) данные после первого шага

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

$$L_j = \{b_i^{old} \in T_{old} | \text{len}(b_i^{old}) \geq \text{len}(b_j^{new})\}. \quad (22)$$

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:

$$\text{dist}(y_s, r(t)) \leq \varepsilon, \quad (23)$$

$$\exists t_s \in [0, 1]: r(t_s) \approx y_s. \quad (24)$$

Условие (21) означает то, что узлы x_1, x_2 лежат на одной прямой с узлами y_1, y_2 . Условие (22) означает, что узлы x_1, x_2 лежат в пределах отрезка b_j^{new} . При выполнении условий (21), (22) 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 обновления проверяется

$$\exists \text{len}(b_i^{old}) = \sum_{b \in M[b_i^{old}]} \text{len}(b)_i t_s. \quad (25)$$

В случае выполнения условия (25) ветвь b_i^{old} помечается «сохранившейся» и удаляется из списка ветвей.

На рисунке 15 показана визуализация второго шага сравнения. Желтым цветом обозначены ветви (1, 2), (1, 7), (7, 2), помеченные как «сохранившиеся». Дугами фиолетового цвета помечены участки ветви (1, 2), которые хранились в массиве соответствующего объекта структуры.

Старая топология Новая топология

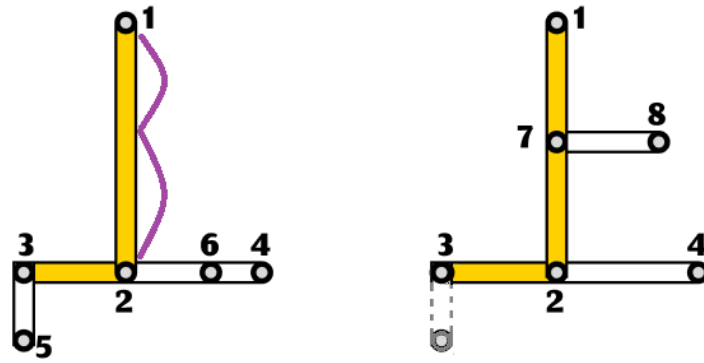


Рисунок 15 – Визуализация второго этапа алгоритма

Третий этап включает в себя выполнение действий, аналогичных действиям из второго этапа, но с топологиями, поменянными местами. Таким образом, 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 (20), (21) по отношению к b_i^{old} . Аналогичным образом, в случае выполнения условий (20), (21) b_i^{old} категоризируется как «сохранившаяся», удаляется из списка и добавляется в ассоциативный массив для b_j^{new} , частью которой она является. Визуализация третьего этапа представлена на рисунке 16. Желтым цветом обозначены ветви (2, 6), (6, 4), (2, 4), помеченные как «сохранившиеся». Дугами фиолетового цвета помечены участки ветви (2, 4), которые хранились в массиве соответствующего объекта структуры.

Старая топология Новая топология

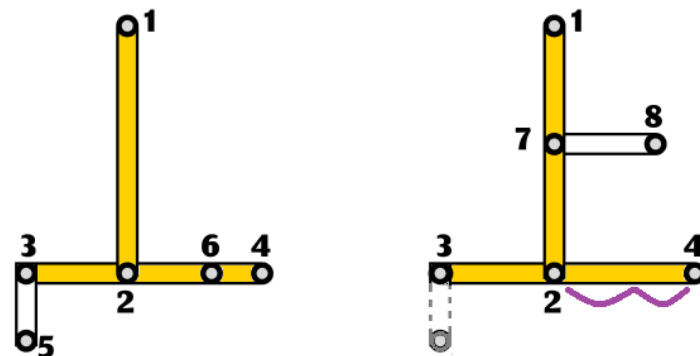


Рисунок 16 – Визуализация третьего этапа алгоритма

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 $intersect$ и проверяется условие (20). 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».

Визуализация шагов 4 и 5 изображена на рисунке 17. Зеленым цветом помечена ветвь (7, 8), категоризированная как «добавленная». Красным цветом помечена ветвь (3, 5), категоризированная как «удалённая».

Старая топология Новая топология

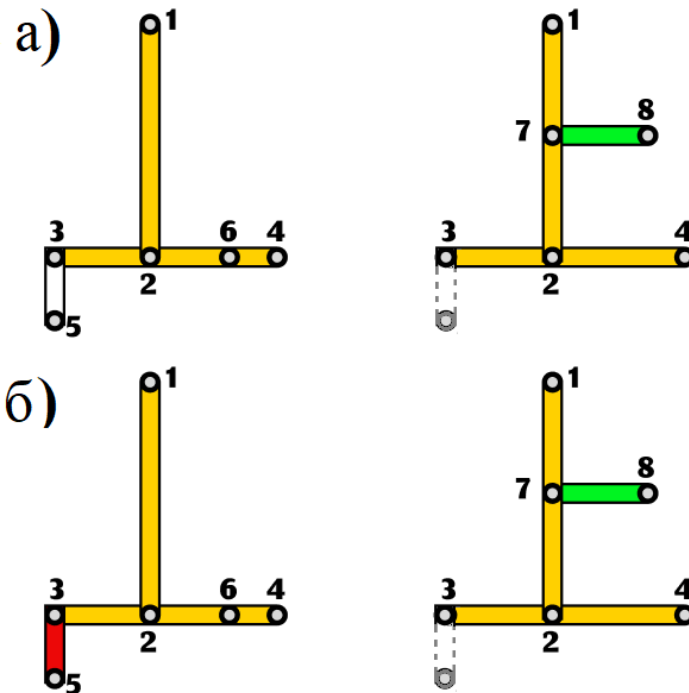


Рисунок 17 – Визуализация последних шагов алгоритма:

а) визуализация четвертого шага; б) визуализация пятого шага

Таким образом, в результате сравнения каждая ветвь обеих сравниваемых топологий либо целиком, либо будучи размеченной на участки, оказалась определена как «удалённая», «сохранившаяся» или «добавленная», что являлось конечной целью геометрического сравнения. При этом используемый подход позволяет выделять различающиеся фрагменты независимо от разбиения топологии на ветви.

2.3 Использование расчётных сеток для оптимизации алгоритма

Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на скорость выполнения алгоритма сравнения, является размер сравниваемых топологий, выражающийся в количестве ветвей. Так как алгоритм сравнения подразумевает выполнение циклического прохода по спискам ветвей топологий, скорость его выполнения напрямую зависит от количества перебираемых элементов. Размеры сравниваемых

топологий могут достигать нескольких десятков тысяч ветвей. При таком количестве время автоматизированного выполнения алгоритма может достигать значений, которые окажутся неприемлемыми, исходя из запросов пользователей к современным программным решениям. В связи с этим возникает потребность в оптимизации алгоритма, конечной целью которой является увеличение скорости его выполнения.

Первое решение, которое оптимизирует циклическую обработку списка ветвей топологии, заключается в замене итерационного подхода бинарным поиском. Для того, чтобы подготовить массив ветвей к осуществлению бинарного поиска, необходимо отсортировать его по возрастанию координат узлов. Сравнение выполняется в первую очередь по координате X , при их равенстве координате Y , затем по координате Z . Сортировка ветвей проводится единообразно на стадии подготовки данных к сравнению. Время, затраченное на её проведение, компенсируется использованием более эффективного бинарного поиска [87].

Вторым решением, способствующим повышению эффективности алгоритма, является разбиение исследуемого топологического пространства на фрагменты путём построения трёхмерной расчётной сетки. Для обеих сравниваемых топологий расчётная сетка должна быть построена аналогичным образом и иметь одинаковые характеристики. В таком случае друг с другом будут сравниваться уже отдельные аналогичные друг другу фрагменты, образовавшиеся после построения сеток, а не топологии целиком. Это позволит сократить количество элементов, исследуемых в ходе поиска идентичных ветвей, так как массив сравниваемых ветвей будет формироваться не для целой топологии, а лишь для её части.

Наиболее оптимальным вариантом построения сети является структурированная трёхмерная сетка с ячейками в виде кубов. Подобный выбор обусловлен необходимостью простой, не занимающей много времени и памяти структуры сетки, так как в рамках данной задачи идёт речь об оптимизации уже имеющегося процесса [61, 40].

Для построения расчётной сети определяются границы исследуемой области, исходя из минимальных и максимальных значений координат узлов обеих топологий. Пространство, определённое заданными границами, разбивается на кубические подпространства, исходя из величины шага сетки. От размера фрагмента сети зависит скорость выполнения алгоритма. Так, при слишком большом размере разбиения может не оказать эффекта, а при маленьком размере слишком большие ресурсы будут тратиться на построение сети. Для выявления оптимального шага сетки был произведён расчёт, его результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели времени проведения сравнения двух топологий в зависимости от размера топологий и шага разбиения сетки

Размер топологии	Шаг разбиения сетки					
	Без разбиения	1/4 топологии	1/5 топологии	1/8 топологии	1/10 топологии	1/12 топологии
5 000 ветвей	0,925 с	0,871 с	0,858 с	0,901 с	0,906 с	0,909 с
10 000 ветвей	1,204 с	0,945 с	0,899 с	0,919 с	0,950 с	0,979 с
20 000 ветвей	1,633 с	1,078 с	1,022 с	1,018 с	1,093 с	1,137 с
40 000 ветвей	3,263 с	2,387 с	2,335 с	1,991 с	1,931 с	2,101 с

Данные, полученные в результате измерений, показали следующее. Во-первых, разбиение действительно позволяет ускорить процесс сравнения топологий. Во-вторых, оптимальный размер шага разбиения расчётной сетки зависит от размера топологии, выражающегося в количестве её элементов. Так, на топологиях, размеры которых не превышают 10 000 ветвей, наибольшую эффективность показали расчётные сети, разбивающие исследуемое пространство на небольшое количество крупных элементов. На топологиях, вмещающих большее количество элементов, более эффективными стали сети, разбивающие исследуемое пространство на большее количество менее крупных элементов. Таким образом, ещё одним под-

готовительным этапом алгоритма сравнения топологий является определение величины шага разбиения исследуемого пространства, исходя из количества элементов топологии.

2.4 Метрика оценивания эффективности алгоритма

Основной целью автоматизации процесса геометрического сравнения моделей пространственных объектов является повышение точности проводимого сопоставления, а также сокращение времени, затрачиваемого на этот процесс. Для того, чтобы принять решение о целесообразности внедрения алгоритма автоматизации в производственный процесс, необходимо сформулировать метод, который бы позволил оценить точность геометрического анализа в численных величинах, и сравнить показатели предлагаемого алгоритма с решениями, которые уже используются в производстве.

Так как конечной целью алгоритма сравнения является присвоения участкам топологии одной из категорий, описывающих статус присутствия фрагмента в сравниваемых моделях, то его следует отнести к алгоритмам классификации. В рамках задач классификации существует сформулированный набор понятий, используемых для оценки качества:

- True positive (TP) – случай, при котором алгоритм верно соотнёс объект и класс, к которому он принадлежит;
- True negative (TN) – случай, при котором алгоритм верно определил, что объект не относится к рассматриваемому классу;
- False positive (FP) – случай, при котором алгоритм ошибочно определил принадлежность объекта к классу;
- False negative (FN) – случай, при котором алгоритм ошибочно определил, что объект не принадлежит к рассматриваемому классу [45].

Предлагаемый алгоритм геометрического сравнения опирается на пространственные характеристики топологий, не сосредотачиваясь на конкретном разбиении пространства на ветви. В связи с этим, оценка точности алгоритма не может опираться на оценку точности классификации конкретных ветвей. Для того, чтобы корректно сформировать набор случаев классификации, необходимо разбить сравниваемые топологии на участки таким образом, чтобы идентичные фрагменты обеих топологий были разбиты идентичным образом.

Суть разбиения заключается в следующем. В качестве отдельных сегментов сохраняются все участки топологии, которые были помечены как «добавленные» или «удалённые». При этом с целью избавления от привязки к разбиению, информация о сегментах хранится в виде координат начала и конца сегмента. Для тех фрагментов топологий, которые были категоризованы как «сохранившиеся», осуществляется выделение ключевых точек. К ключевым точкам относятся узлы ветвей, а также точки, образованные границами фрагментов, выделенных на ветвях в ходе сравнения. Информация о границах этих фрагментов хранится среди атрибутивных данных ветвей в виде начальной и конечной координаты относительно начального узла ветви. Точки, выделенные на сравниваемых топологиях, объединяются в единый набор, накладываемый на идентичное пространство топологий. Затем из соседних пар выделенных точек формируются сегменты, добавляемые к общему списку.

При этом важно учитывать, что в рамках задачи сравнения топологий анализу подвергаются пространственные данные. Поэтому учёт исключительно количества сегментов топологии без учёта их длины не позволит адекватно оценить качество работы алгоритма. Для того, чтобы принять во внимание пространственный характер анализируемых данных, предлагается использовать для оценки качества не количество сегментов, а сумму их длин. Таким образом, показатель ТР для класса C – это не количество правильно классифицированных сегментов, принадлежащих классу C , а их суммарная длина. Другие показатели рассчитываются аналогично.

Оценку точности определения принадлежности сегмента к классу C можно произвести при помощи следующих метрик:

1 Точность (Precision), определяемая как доля случаев, которые алгоритм правильно отнёс к классу C . Рассчитывается как:

$$\text{Precision } C = \frac{TPC}{(TPC + FPC)}. \quad (26)$$

2 Полнота (Recall), определяемая как доля объектов, которые были правильно определены среди всех, которые реально принадлежат этому классу C . Рассчитывается как

$$\text{Recall } C = \frac{TPC}{(TPC + FNC)}. \quad (27)$$

3 Гармоническое среднее, или F-мера (F1-score), – метрика, которая характеризует баланс между точностью и полнотой следующим образом:

$$F1_c = \frac{2 * \text{Precision } C * \text{Recall } C}{(\text{Precision } C + \text{Recall } C)}. \quad (28)$$

F-мера близка к максимальному значению, если полнота и точность стремятся к максимальным значениям. Если же одна из метрик равна нулю, то и значение F-меры стремится к нулю. Это позволяет продуктивно оценивать качество классификации выбранного класса, используя гармоническое среднее [103]. Для того, чтобы оценить алгоритм на предмет качества классификации для всех имеющихся классов, следует использовать метрику «макро-усреднённое значение F-меры» (Macro-average F1), рассчитываемую следующим образом:

$$F1_{\text{macro}} = \frac{\sum_{c=1}^N F1_c}{N}, \quad (29)$$

где N – количество классов, используемых в задаче классификации.

Задача сравнения последовательно создаваемых моделей пространственных объектов подразумевает сопоставление базовой топологии и топологии с внесёнными изменениями. На практике количество внесённых изменений может быть небольшим, относительно общего размера топологии. Однако крайне важно их обнаружить, несмотря на возможное небольшое влияние на общее строение топологии, ведь суть поставленной задачи сводится к выявлению изменений. Макро-усреднённое значение F-меры является наиболее показательным в ситуации, когда набор данных является несбалансированным, но влияние каждого класса на конечный результат должно быть значительным [95].

Таким образом, разбиение топологий на аналогичные сегменты, учёт их длин и использование метрики «макро-усреднённое значение F-меры» позволяет оценить точность работы алгоритма по сравнению с проведением сравнения без его использования или для сравнения точности разных версий алгоритма

2.5 Выводы по второму разделу

В основе методики геометрического сравнения пространственных объектов находится алгоритм, позволяющий осуществлять необходимое сравнение. В рамках второго раздела были сформулированы требования к подобному алгоритму. Алгоритм должен осуществлять классификацию участков сопоставляемых топологий, присваивая им категорию, которая указывает на их присутствие либо отсутствие в сравниваемой модели. Так как базовой составной частью топологии является ветвь, то результатом работы алгоритма должен стать набор ветвей сравниваемых моделей, каждая из которых классифицирована как «добавленная», «удалённая» или «сохранившаяся». Также ветви могут быть разбиты на отрезки, каждому из которых присвоена отдельная категория.

Действия, необходимые для проведения геометрического сравнения, сводятся к последовательному сопоставлению фрагментов топологий, проводимому таким образом, чтобы выявлять аналогичные участки, независимо от его разбиения на

ветви. Так как разбиение на ветви может носить произвольный характер, алгоритм не сводится к нахождению ветвей с аналогичными координатами в сравниваемых топологиях, а вместо этого позволяет сопоставлять их пространственные характеристики. Комплекс подготовительных мер, проводимый перед сравнением, также позволяет выявить случаи, когда одна из сравниваемых топологий является полной или частичной копией другой, но подвергнутой таким трансформациям, как движение или гомотетия.

Так как сравниваемые модели могут содержать десятки тысяч объектов, которые необходимо подвергнуть сопоставлению, был предложен способ оптимизации сравнения. Он базируется на разбиении исследуемого пространства на аналогичные фрагменты путём построения расчётной сетки и их попарном сопоставлении. Это позволяет уменьшить количество пар сравниваемых ветвей и ускоряет работу алгоритма. Однако эффективность данного метода зависит от выбора шага сетки. Путём проведения расчётов было продемонстрировано, что оптимальный размер шага сетки зависит от размера топологии, выражающемся в количестве ветвей.

Для того, чтобы оценить, насколько использование разработанного алгоритма соответствует аспектам практической значимости работы, был предложен метод оценки точности сравнения. Он опирается на имеющиеся метрики оценки алгоритмов классификации, однако адаптирован под пространственный характер исследуемых данных. Это позволяет более точно говорить о том, какая часть топологии была подвергнута корректному пространственному анализу.

3 АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

3.1 Концептуальная модель ГИС

Современные процессы в отраслях, связанных с обработкой пространственных данных, подразумевают анализ больших объёмов сложных данных. С ростом количества источников картографической информации, возможностями по её детализации, возможностями подробного изучения объектов возрастает важность хранения, обработки и анализа получаемых данных. Актуальным решением в области работы с геопространственными данными являются геоинформационные системы [2]. Они специально предназначены для работы с пространственными данными на различных этапах: от сбора и обработки до хранения и анализа. Благодаря своей направленности, ГИС наиболее эффективным образом подходят к взаимодействию именно с геопространственными данными [19]. Это выражается в необходимости сопоставлять различные системы координат, возможности перевода из одних систем координат в другие, а также корректной визуализации пространственных данных. Как следствие, геоинформационные системы активно применяются в сферах, где необходим анализ пространственных данных, таких как навигация или сфера добычи полезных ископаемых [56, 11]. ГИС позволяют заниматься планированием расширения городской или производственной инфраструктуры, оптимизировать процессы, принятие решений в которых опирается на анализ геопространственных данных (например, построение маршрутов) [63].

Для организации эффективного взаимодействия с большими объёмами геопространственных данных, включающего в себя как наименьшие затраты занимаемой памяти, так и быстрый доступ к искомой информации, необходимо правильно спроектировать геоинформационную систему [31, 38]. При проектировании важно выделить основные этапы работы с информацией, а также то, каким образом этапы связываются между собой.

Первичным этапом любого процесса обработки данных является сбор данных об исследуемом объекте. Для геопространственных данных существуют различные

картографические технологии, позволяющие выделить наиболее значимые аспекты анализируемых пространственных объектов.

Сохраненные геопространственные данные подвергаются обработке. Обработка данных включает в себя избавление от искажений и приведение к виду, подходящему для дальнейшего анализа и визуализации [35]. На данном шаге важно планирование того, в каком именно формате будут храниться собранные данные. Важно, чтобы выбранный формат позволял хранить данные ёмко, так как их объём может быть довольно большим, и вместе с тем формат должен быть оптимизирован для выполнения запросов к нему и получения требуемых данных.

Подготовленный набор данных может быть подвергнут анализу с целью решения поставленных задач. Методы анализа должны быть подобраны таким образом, чтобы оперативно предоставлять пользователю корректные результаты, справляясь с обработкой большого количества данных. При этом важен не только результат анализа, но и его корректная интерпретация. Интерпретации способствует наглядное и подробное визуальное представление данных, которое должна обеспечивать геоинформационная система. Таким образом, ГИС позволяет справляться с прикладными задачами в области планирования и принятия решений.

На рисунке 18 представлена концептуальная модель ГИС.



Рисунок 18 – Концептуальная модель ГИС

Важной составляющей ГИС для геометрического анализа пространственных данных является компонент сбора данных. Он предназначен для формирования материала, подвергаемого дальнейшему анализу. Исследованию, как правило, подвергаются сложные объекты, элементы которых имеют геопространственную привязку, информация о которой играет ключевую роль в последующей работе системы. В качестве таких объектов может выступать городская инфраструктура или производственные объекты, в частности, шахтное пространство.

Для объектов, находящихся на поверхности земли, применим сбор данных при помощи спутниковой фотосъемки или топографической съёмки. В ходе топографической съёмки геодезистами проводятся полевые работы, включающие в себя фиксацию высот исследуемых объектов, измерение расстояний между ними при помощи специальных устройств. Результатом топосъёмки является чертёж с отображенными элементами инфраструктуры, расположенными на исследуемой территории [64]. Спутниковая съёмка фиксирует объекты на поверхности земли при помощи космических спутников, способных сканировать отражаемое от Земли солнечное излучение или собственное тепловое излучение объектов, либо же способных самостоятельно излучать волны и собирать их отражения. Массивы чисел, содержащие информацию об отражённых лучах, впоследствии преобразуются в космические снимки [3].

Маркшейдерские работы по своему принципу схожи с топографической съёмкой, однако проводятся под поверхностью земли. Во время этих работ специалисты-маркшейдеры также осуществляют измерения расстояний между объектами выработанного пространства, их глубину и углы залегания [28]. Эти данные фиксируются в виде массива цифровых данных, в дальнейшем используемых для составления планов горных работ и цифровых моделей выработанного пространства [62].

Сбор данных не предполагает получение наборов данных, сразу готовых для моделирования. Перед моделированием они должны подвергнуться преобразованию, включающему в себя выделение составных частей исследуемых объектов

и присваивание этим составляющим геопространственных координат [34]. Для этих целей зачастую используют геоинформационную систему QGIS, в случае если анализу подвергались поверхностные объекты, либо же программный комплекс «Вентиляция», когда анализу подвергались подземные объекты. Данное программное обеспечение предоставляет пользовательские интерфейсы, обеспечивающие создание пространственных объектов, ввод геопространственных данных и атрибутивных данных, а также инструменты для визуального представления. Также данные программные комплексы могут экспортировать полученные модели в различных форматах, подходящих как для дальнейшего геопространственного анализа, так и для визуализации [68].

После выполнения сбора данных и их преобразования в вид, пригодный для формирования моделей, необходимо решить вопрос об их хранении. Компонент хранения геопространственных данных должен предоставлять пользователям системы возможность хранить геопространственные данные и оперативно предоставлять к ним доступ. Также данный компонент ответственен за возможность обновления данных в ходе работы с ними и резервного копирования. Так как некоторые из исследуемых объектов могут являться объектами государственной экономической безопасности, например шахтные комплексы, компонент хранения данных должен иметь возможность разграничивать уровень доступа к различным видам своих данных, в частности к геопространственным координатам [70].

Также важным является вопрос возможности обмена данными между различными модулями системы или различными системами для работы с пространственными объектами. Достаточно универсальным решением, позволяющим сериализовать сложные структуры исследуемых объектов, является использование формата JSON. JSON хранит данные в виде набора пар «ключ – значение». Данный формат является простым для создания и чтения, в связи с чем активно используется для хранения сложных данных и может использоваться системами или модулями, использующим практически любые языки программирования [66].

Прежде чем приступить к проведению геометрического анализа, необходимо провести действия по настройке алгоритма, которые реализованы в компоненте подготовки к анализу. Подготовка к анализу включает в себя применение пользовательских настроек алгоритма. В качестве настроек может выступать выбор различных версий или модификаций алгоритма, а также выбор параметров алгоритма, например, показателя точности. Возможность выбора параметров алгоритма обеспечивает гибкость в работе с информационной системой. Достоинством гибкого подхода является возможность пользователя адаптировать работу алгоритма под требования, продиктованные широким спектром задач. Ещё одной составляющей подготовки к анализу является выбор методов оптимизации. Методы оптимизации позволяют увеличить скорость работы алгоритма, что является актуальным при работе с большим объёмом данных, которые могут предоставлять задачи геометрического анализа. Однако различные оптимизационные методы могут быть адаптированы под различные наборы данных. Вдобавок к этому, некоторые оптимизационные методы могут быть требовательны к аппаратному обеспечению. Поэтому, для пользователя ГИС важно иметь возможность подбора оптимизационных параметров с опорой на поставленную задачу и имеющиеся аппаратные ресурсы.

Функция геометрического анализа данных, которая является ключевым аспектом функциональности ГИС, представлена в соответствующем компоненте. Данный компонент включает в себя программную реализацию алгоритмов, позволяющих выявить различия в геометрии сложных пространственных объектов, выделить изменившиеся фрагменты и провести дополнительный анализ атрибутов объектов. Алгоритмы, заложенные в компонент анализа, должны быть оптимизированы под работу с большими объёмами данных, что обусловлено возможными большими размерами и сложностью исследуемых объектов, например шахт, которые могут простираются на тысячи километров и включать в себя десятки тысяч объектов. Данные, получаемые в результате проведения геометрического анализа,

должны быть организованы таким образом, чтобы иметь возможность предоставления пользователю наглядных отличий между сравниваемыми моделями, а также проведения дальнейшего анализа.

Способом наглядного представления результатов проведения геометрического анализа является визуализация с цветовым или иным выделением изменившихся объектов. Таким образом, система должна включать в себя инструмент визуализации, предусматривающий экспорт изображения в различные растровые и векторные форматы.

Проведение геометрического анализа на основе геопространственных данных позволяет создавать тематические карты изменений пространственных характеристик. Набор данных, полученных в результате сравнения моделей пространственных объектов, может стать основой для создания тематических слоёв отображения изменений на общегеографической карте. Подобные тематические слои способствуют актуализации картографической информации, а также анализу процессов, производимых над исследуемым объектом. Для генерации картографического материала в проектируемой системе предусмотрен соответствующий компонент.

Таким образом, проектируемая система обладает структурой, состоящей из совокупности взаимодействующих компонентов. Каждый компонент отвечает за выполнение отдельной функциональности, не завязанной на алгоритмах других модулей, что делает компоненты заменяемыми [81]. Это, в свою очередь, позволяет использовать разные подходы для тех или иных задач, возникающих в ходе работы системы, применять различные подходы, например для визуализации. В то же время, связь, налаженная между компонентами, должна быть организована таким образом, чтобы её не затрагивало изменение алгоритмов модулей, и обмен данных между компонентами мог происходить бесперебойно. Это достигается разработкой интерфейсов, учитывающих требования модулей для выполнения заложенной в них функциональности [5].

3.2 Описание структуры информационной системы

Концептуальная модель, представленная в предыдущем разделе, позволяет обозначить основные компоненты проектируемой системы, выделив её главные составляющие с точки зрения её основных свойств и связи между составляющими. На основании выделенных компонентов была построена диаграмма, изображающая структуру проектируемой системы, на которой выделены её основные программные модули, реализующие различные составляющие её функциональности. Структура информационной системы представлена на рисунке 19.

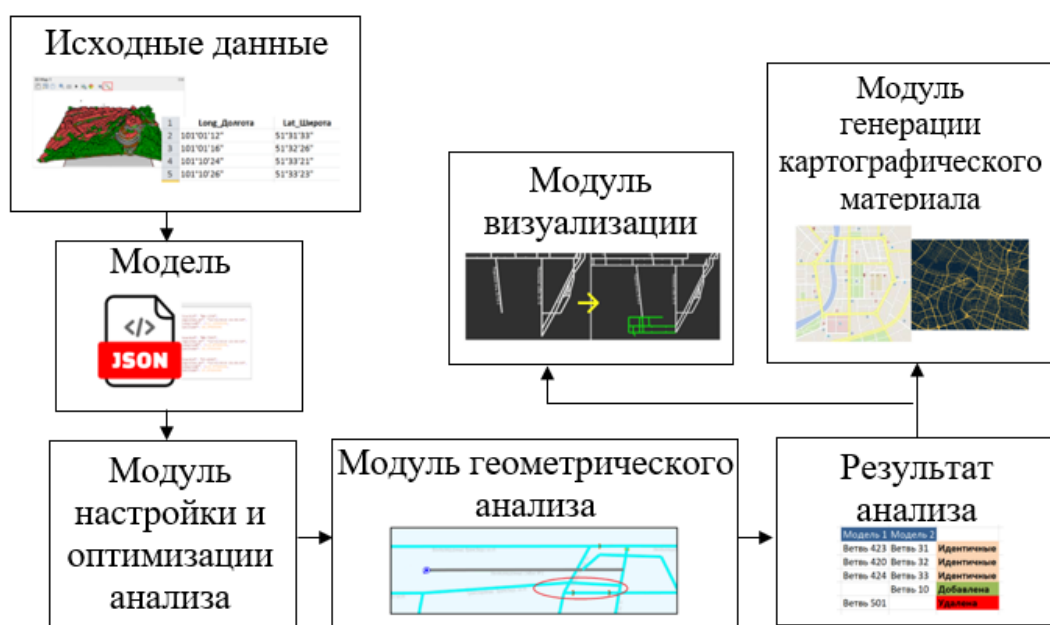


Рисунок 19 – Структура информационной системы

В результате проведения геодезических, маркшейдерских или иных исследовательских работ получают базы данных, содержащих совокупную информацию о геопространственных характеристиках исследуемых объектов. Как правило, подобные базы данных содержат массивы точек, ассоциированных с объектами, для которых указаны геопространственные координаты [13]. Для геопространственных данных о производственных предприятиях существует важная особенность, которая заключается в том, что регламент разведывательных мероприятий некоторых

предприятий может предусматривать сокрытие геопространственных координат из-за вопросов экономической безопасности страны. В таком случае пользователи без необходимого уровня доступа вынуждены работать с измененными координатами, из которых невозможно выявить действительное местоположение производственного объекта, в частности угольной шахты.

Для проведения геометрического анализа набор собранных данных следует структурировать. В пространстве исследуемой области необходимо выделить основные объекты, которые её характеризуют и выделить связи между ними таким образом, чтобы составить модель, базирующуюся на геометрическом графе. Модель сохраняется в структуре формата JSON, которая позволит обеспечить универсальность, выражающуюся в возможности интеграции в различные системы, например, для визуализации или дальнейшего проектирования.

Для того чтобы провести корректный анализ, необходимо подготовить модели, подобрать оптимальные оптимизационные параметры и синхронизировать параметры алгоритма сравнения с пользовательскими настройками. Подготовка моделей подразумевает приведение их к общему виду, избавленному от искажений, которые могут быть обусловлены произвольным характером составления модели. Например, несколько моделей одного и того же объекта могут быть построены под разными углами относительно выбранной точки. Как следствие, у двух моделей, описывающих идентичные объекты, будут различные координаты точек объектов. Схожая ситуация может возникнуть при масштабировании одной из сравниваемых моделей. Показатели длин всех ветвей одной из моделей могут быть изменены на фиксированную величину. В таком случае координаты точек двух моделей также не будут совпадать, хотя они при этом будут описывать одинаковые объекты. Так как в рамках поставленной задачи первоочерёдная важность заключается в сравнении пространства, занимаемого исследуемыми объектами, важно иметь возможность не учитывать описанные искажения в процессе геометриче-

ского анализа. Для того, чтобы алгоритм мог провести корректное сравнение, модели должны быть приведены к одинаковому масштабу и углу поворота. Вдобавок к этому, важной составляющей эффективного использования алгоритма является подбор оптимизационных параметров, зависящих от загруженных наборов данных и аппаратных характеристик устройства, на котором производится анализ. Таким образом, в рамках структуры проектируемой системы был выделен модуль настройки и оптимизации геометрического анализа. Он получает на вход исходный набор сравниваемых данных и пользовательские настройки системы. В результате работы модуля генерируются обновлённые, в случае необходимости, топологии, а также набор пользовательских и оптимизационных настроек. Эти данные передаются модулю геометрического анализа.

В рамках геометрического анализа сравниваются пространственные характеристики узлов и ветвей, из которых состоят модели. Основным критерием сравнения является занимаемое геометрическое пространство, не зависящее от конкретного разбиения на объекты. Это позволит в точности определить, каким изменениям был подвергнут пространственный объект, выявить участки изменения. После геометрического сравнения для некоторых задач имеет смысл провести атрибутивную проверку для тех объектов, у которых не было выявлено изменений в пространственных характеристиках. Это способствует более подробному анализу изменений, помогая получить более точную картину процессов, происходящих с исследуемым объектом. Таким образом, модуль должен предоставлять возможности как геометрического, так и атрибутивного анализа.

Практическая польза алгоритмов, реализованных в модуле анализа, определяется возможностью практического использования результатов их применения. Результат выполнения геометрического анализа должен иметь структуру, которая позволит совершать быстро обрабатываемые запросы к полученным данным и получать выборки объектов различных типов, в зависимости от выбранного критерия. В связи с этим, результатом сравнения является список всех ветвей обеих моделей,

для каждой из которых предусмотрен атрибут – «Результат сравнения», который может принимать одно из следующих значений: «Удалена», «Добавлена», «Осталась» для удалённых, добавленных и неизмененных ветвей соответственно. Для атрибутивного сравнения идентичных ветвей также формируется список, элементом которого является сравниваемая пара и набор атрибутов, которые являются различными. Благодаря подобной структуре можно быстро получать доступ к группам изменившихся объектов, что позволяет эффективно пользоваться результатами сравнения.

Для наглядного представления результатов анализа используется модуль визуализации. Он предусматривает функциональность по одновременному отображению сравниваемых моделей. Наглядность представления достигается выделением изменившихся участков на обеих отображаемых моделях, что позволит пользователю сравнить состояния изучаемого объекта. Благодаря структуре результатов сравнения модуль визуализации имеет возможность совершить запрос к данным, сгруппировать ветви по значению атрибута «Результат сравнения» и выделить их различными цветами.

Модуль генерации картографического материала позволяет создавать тематические карты. Получая в качестве исходных данных результаты сравнения, а также исходные геопространственные данные, он способен создавать материалы, отражающие выявленные изменения применимо к исследуемой области. Это даёт возможности для проведения анализа осуществлённых над исследуемым объектом изменений в контексте его нахождения в конкретной среде и оказания потенциального влияния на другие объекты исследуемой территории [69].

Построение ER-диаграммы классов позволяет описать исследуемую область в виде конкретных сущностей и их связей. ER-диаграмма проектируемой ГИС представлена на рисунке 20.

На диаграмме 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.

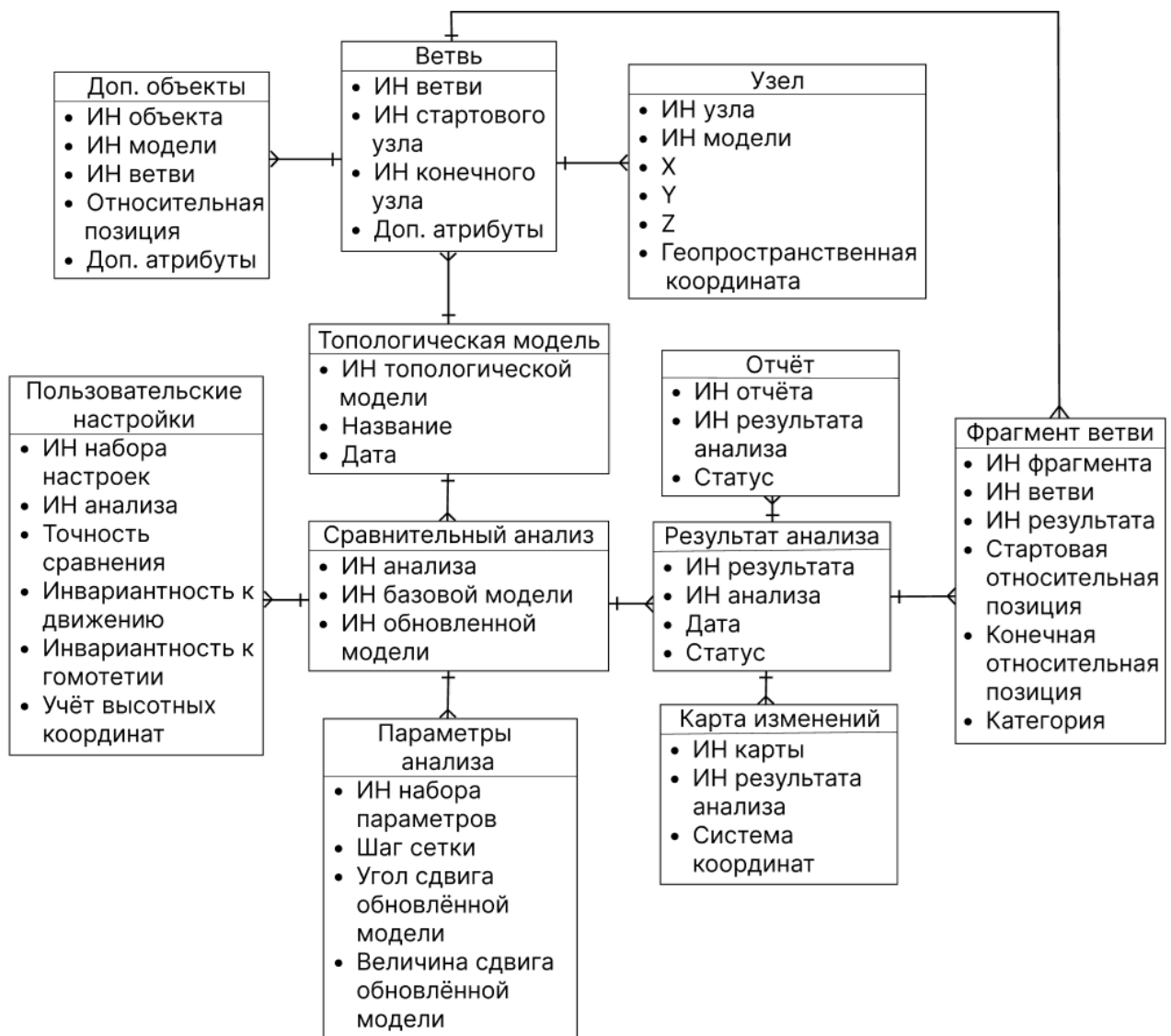


Рисунок 20 – ER-диаграмма классов

Таким образом, обеспечение функциональности ГИС обуславливается совместной работой модулей, которые должны обмениваться друг с другом информацией в ходе выполнения задач. Обработка данных является важной составляющей работы ГИС, от которой зависит её эффективность, поэтому последовательность этапов обработки должна быть правильно спланирована во избежание ситуаций, которые могли бы привести к коллизиям внутри системы. На рисунке 21 представлена схема потоков данных, иллюстрирующая последовательность этапов обработки данных системой [29].



Рисунок 21 – Схема потоков данных

Из представленной диаграммы видно, что инициатором начала работы системы является пользователь, загружающий в систему файлы моделей, данные из которых сохраняются в отдельной таблице. После этого модели, над которыми был совершён ряд преобразований, позволяющих подготовить их к сравнению, сохраняются в отдельную таблицу. Набор данных из этой таблицы в виде списка узлов и

ветвей с указанными пространственными характеристиками и дополнительными атрибутами подвергается процессу геометрического анализа.

В рамках геометрического анализа между моделями выявляются различия, основанные на разнице в их геометрических характеристиках. Данные различия сохраняются в отдельную таблицу. Впоследствии данные из этой таблицы вместе с геопространственными координатами из сходных моделей используются для проведения визуализации и генерации картографического материала. Визуализация предоставляется пользователю в виде трехмерного отображения, доступного для просмотра и интерактивного взаимодействия с ним при помощи интерфейса системы. Картографический материал поступает пользователю в виде сгенерированных изображений векторных и растровых типов, а также файлов специальных форматов, предназначенных для хранения пространственных данных и их экспорта в другие ГИС. Таким образом, данные, загруженные пользователем в систему, проходят поэтапную обработку, и выходные данные системы позволяют ему сделать вывод об изменениях, внесенных изучаемую модель, а также принять дальнейшие решения о проектировке работ на изучаемом объекте.

3.3 Описание информационной модели ГИС

Для проектируемой геоинформационной системы характерна работа с большим количеством разнородных данных. Следствием этого является высокая важность грамотно организованной структуры баз данных системы [79]. Для её проектирования была построена информационная модель ГИС, представленная на рисунке 22.

Информационная модель системы позволяет охарактеризовать различные виды данных, которые циркулируют в системе. Это необходимо для того, чтобы при проектировке определиться с тем, в каком виде хранить данные, какой инструментарий можно использовать для их разработки и какие способы передачи могут быть задействованы для передачи данных в систему и экспорте данных из неё.

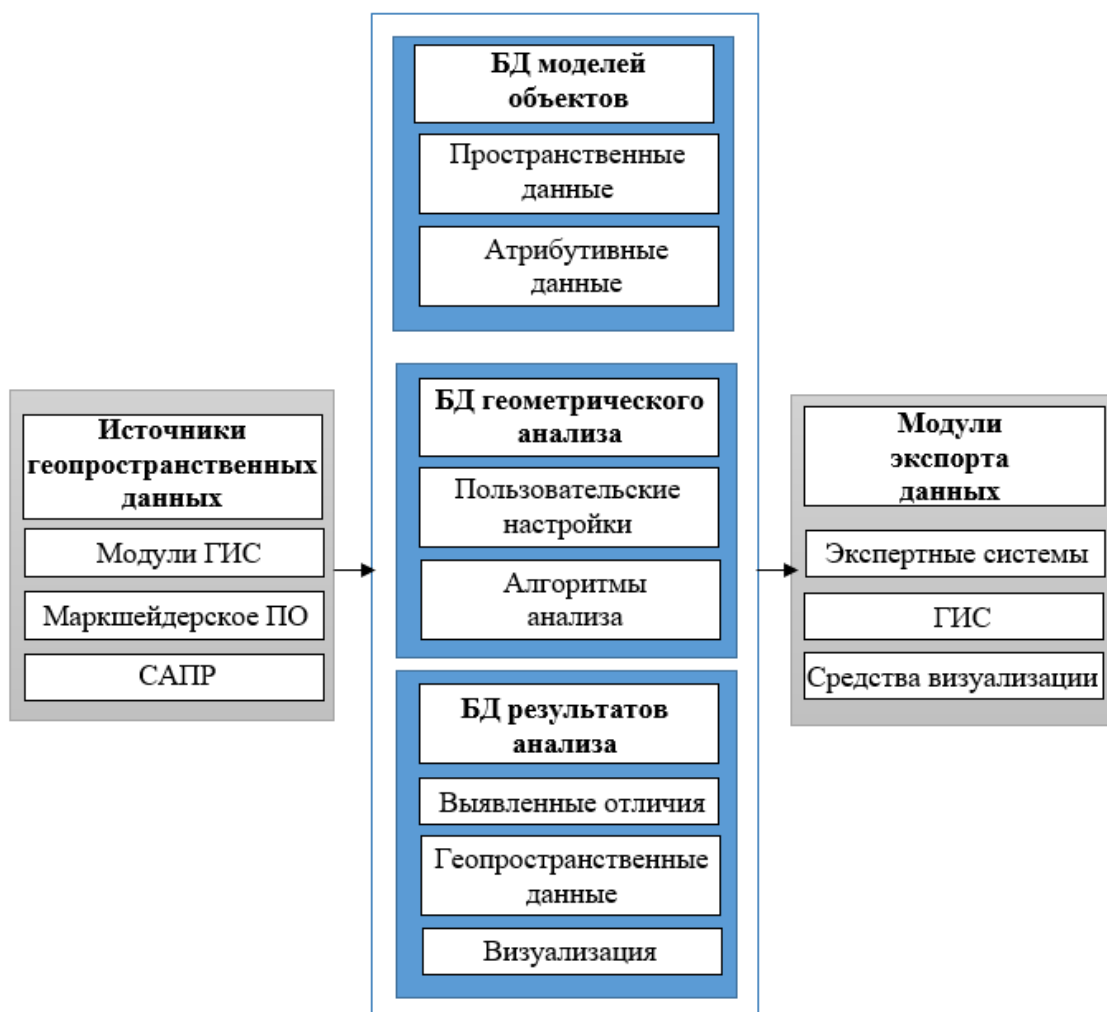


Рисунок 22 – Информационная модель ГИС

Модель состоит из нескольких частей: внутренней, которая отвечает непосредственно за описание информационной структуры проектируемой системы, и внешней, отвечающей за аспекты интеграции сторонних систем. За интеграцию систем, которые ответственны за входящие данные, отвечает блок «Источники геопространственных данных». В роли источников внешних данных могут выступать различные программные решения, в зависимости от проектной области решаемой задачи. Наиболее популярными решениями для работы с геоданными, использующимися в том числе при проведении геодезических работ, являются ГИС. Их инструментарий позволяет хранить и обрабатывать геопространственные данные, что особенно актуально для создания моделей пространственных объектов. В число популярных платформ входят QGIS, распространяемые на коммерческой

основе ArcGIS Pro и MapInfo Professional, а также продукты NextGIS Web и NextGIS Mobile, позволяющие работать с геопространственными данными с использованием web-приложений и мобильных приложений [55]. В сферах, связанных с производственным проектированием, нередко используются системы автоматизированного проектирования (САПР). САПР используются для построения чертежей исследуемых объектов, основанных на полученных пространственных данных. Широкое распространение получила САПР AutoCAD, разработанная компанией Autodesk, однако на российском рынке в последнее время увеличилась популярность таких решений, как nanoCAD и Компас 3D. Специализированное программное обеспечение позволяет создавать модели, описывающие исследуемые объекты в виде геометрических графов, основываясь на данных, считанных с подобных чертежей [33]. В частности, в угольной промышленности для построения моделей используется программный комплекс «Вентиляция 2.0».

Когда модель пространственного объекта сформирована, она поступает на вход системы. Внутри системы данные, получаемые из модели, распределяются между базами данных, подвергаются обработке и анализу. За хранение моделей в системе отвечает блок «СУБД моделей объектов». Сами данные, считываемые системой, можно разделить на пространственные и атрибутивные. К пространственным относятся данные о координатах объектов, включая геопространственные координаты.

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 [86]:

$$\varphi_2 = \arcsin(\sin \varphi_1 * \cos \delta + \cos \varphi_1 * \sin \delta * \cos \theta); \quad (30)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \operatorname{atan2}(\sin \theta * \sin \delta * \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 * \sin \varphi_2), \quad (31)$$

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.

К атрибутивным относятся об непространственных характеристик объектов, например ширина выработки. Для хранения подобной информации, как правило, используются реляционные базы данных [13]. Одним из самых популярных решений для работы с геопространственными данными является СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS. Использование данного решения позволяет обеспечить целостность и надёжность хранения данных [14]. Однако при работе с большими объёмами данных при использовании реляционных решений могут возникнуть проблемы со скоростью выполнения запросов [36, 42]. В таком случае актуальными могут стать нереляционные решения, например MongoDB или Redis. Redis позволяет обеспечить высокую скорость доступа к данным за счёт того, что они находятся в оперативной памяти [9]. MongoDB может увеличить производительность запросов по сравнению с реляционными решениями в случае необходимости получить совокупность пространственных и атрибутивных данных объекта, так как в документноориентированной СУБД они будут храниться в одном документе. С учётом хранения моделей объектов в формате JSON, предоставляющим широкие

возможности для интеграции, документоориентированные СУБД могут стать оптимальным вариантом для хранения данных [26].

За информационное обеспечение алгоритма пространственного сравнения, играющего ключевую роль в функциональности, связанной с геометрическим анализом, отвечает блок «СУБД геометрического анализа». В его задачи входит хранение параметров алгоритма, заданных пользователем. В них включаются значение точности алгоритма, величина погрешности сравнения. Также хранятся непространственные атрибуты, выбранные пользователем для сравнения объектов с одинаковой геометрией. Наборы подобных параметров могут храниться отдельно для каждого пользователя системы, позволяя в дальнейшем быстро настраивать работу с системой, исходя из поставленных задач. Помимо этого, в системе должна присутствовать возможность вариативности выбора алгоритма геометрического анализа. Алгоритм, разработанный в рамках данной работы, может в будущем подвергнуться модификациям. Помимо этого, различные задачи могут потребовать других подходов к сравнению геометрии объектов. В связи с этим СУБД должна иметь возможность хранить различные алгоритмы и предоставлять к ним доступ модулю анализа данных без необходимости вносить изменения в сам модуль. Для этого важно обеспечить единый формат входных и выходных данных алгоритмов.

Результаты осуществления анализа обрабатываются в блоке «СУБД результатов анализа». По результатам проведения геометрического сравнения формируется итоговое представление о различиях между исследуемыми моделями. Оно должно как учитывать пространственные изменения, так и указывать на атрибутивные изменения идентичных объектов.

Получив на вход данные и обработав их, система должна предоставлять пользователю выходные данные. В связи с разнообразием задач, для решения которых может использоваться результат геометрического анализа, форматы выходных данных должны быть адаптированы под различные типы систем. Система должна предоставлять отчёты, например в легко читаемом формате JSON, для проведения

дальнейшей экспертизы при помощи экспертных систем. Эта экспертиза может быть направлена на планирование инфраструктурных изменений или оценку и прогнозирование динамики производственных работ на исследуемом объекте. Таким образом, выходной формат данных должен хранить в себе сведения, достаточные для проведения оценки состояний сравниваемых моделей, как в пространственном, так и в атрибутивном ключе. Вместе с экспертными системами для решения описанных задач могут использоваться геоинформационные системы. ГИС может стать инструментом проведения дополнительного пространственного анализа или визуализации с геопространственной привязкой. Для обеспечения интеграции результатов работы проектируемой системы в сторонние ГИС следует иметь возможность экспорта данных в популярные векторные данные: Shapefile, GeoJSON, GeoPackage [90]. Подобные требования выдвигаются к проектируемой системе также по причине необходимости потенциальной интеграции результатов анализа со сторонними системами визуализации данных.

3.4 Визуализация и интерпретация полученных результатов

Основная цель визуализации результатов проведения геометрического анализа заключается в том, чтобы облегчить процесс верификации данных сравниваемых моделей. Наглядное представление сравниваемых моделей и выявленных изменений позволяет пользователю сразу обратить внимание на те фрагменты топологий, которые были построены на основе потенциально недостоверных данных. Подробное и детализованное представление о характере выявленных изменений может быть впоследствии получено пользователем из сформированного отчёта. Однако визуализация позволяет соотнести представленные в текстовом виде пространственные данные с конкретными участками исследуемого объекта.

Визуализация пространственного объекта достигается при помощи отображения топологии, состоящей из узлов и соединяющих их ветвей в трёхмерном про-

странстве. Так как целью визуализации не является соотнести объект с его положением на поверхности Земли, топология строится в локальных декартовых координатах. Точка начала отсчёта, как правило, произвольно выбирается составителем модели. В случае подземных выработок, например, таковой может стать координата одной из скважин, которые были пробурены в ходе подготовительных работ к формированию шахты.

Основным вариантом визуализации выявленных различий является одновременное отображение сравниваемых моделей с выделением изменившихся промежутков при помощи различных цветов. Формат выходных данных проведения геометрического анализа позволяет выделить необходимые участки вне зависимости от возможных различий между сравниваемыми топологиями в аспекте разбиения на ветви. Помимо пространственных изменений система также должна опционально визуализировать атрибутивные изменения для тех фрагментов топологии, которые были классифицированы как «сохранившиеся». Пример визуализации результатов проведения геометрического сравнения моделей выработанного пространства представлен на рисунке 23.

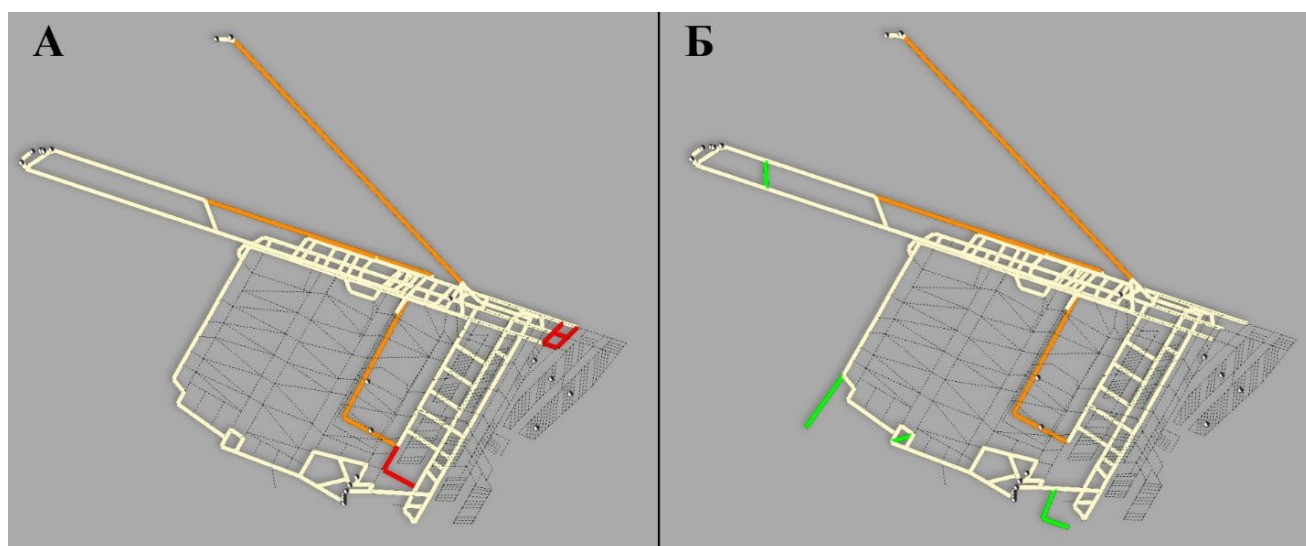


Рисунок 23 – Визуализация результатов геометрического сравнения:

а) старая версия модели; б) новая версия модели

На представленном примере красным цветом были выделены ветви, помеченные как «удалённые», зелёным выделены «добавленные» ветви. Среди ветвей, охарактеризованных как «сохранившиеся», более тёмным оттенком жёлтого цвета раскрашены ветви, для которых были выявлены атрибутивные изменения по сравнению с идентичными ветвями сравниваемой топологии. Более светлым оттенком жёлтого выделены ветви, для которых не было выявлено атрибутивных изменений.

Конкретными признаками, которые могут указывать на то, что одна из сравниваемых моделей была построена на основании некорректных данных, являются следующие.

1 Изменения топологии, выявленные в тех участках, в которых не было запланировано проведения работ, которые должны были изменить геометрию исследуемого объекта.

2 Изменения топологии, несопоставимые по своим пространственным характеристикам с регулярно вносимыми изменениями.

3 Атрибутивные изменения ветвей, которые существенно отличаются от регулярно вносимых изменений.

Если в результате проведения геометрического анализа был выявлен хотя бы один из данных признаков, пользователю, который проводил сравнение, стоит инициировать проведение экспертизы моделей на предмет корректности данных. Нереалистичные геометрические или атрибутивные изменения могут являться свидетельством того, что данные, на основе которых строились сравниваемые модели, были намеренно или случайно искажены.

Проектируемая ГИС предполагает возможность экспорта результатов анализа в формате JSON-документа, который является легко читаемым, гибким и не зависит от языка программирования. Это позволяет визуализировать результаты анализа внешними по отношению к ГИС средствами отображения. Однако в случае необходимости, пространственные объекты с выявленными деформациями могут

быть перенесены в векторный формат, позволяющий отображать объекты в трёхмерном пространстве, например DXF.

Описываемый метод визуализации не предусматривает использование геопространственных данных, хранимых в моделях исследуемых объектов. Однако их наличие позволяет ГИС создавать картографический материал – цифровые карты изменений. Цифровые карты изменений служат для отображения трансформаций, которые наблюдались в исследуемый промежуток времени [20].

На цифровой карте отображаются, построенные по геопространственным координатам узлов, ветви или их участки более поздно созданной топологии, а также ветви более старой топологии, помеченные как «удалённые». Разные группы ветвей визуализируются в разном стиле для того, чтобы наглядно отобразить выявленные изменения. Пример цифровой карты изменений, построенной по результатам сравнения дорожных сетей, показан на рисунке 24. Карта открыта при помощи геоинформационной системы QGIS.

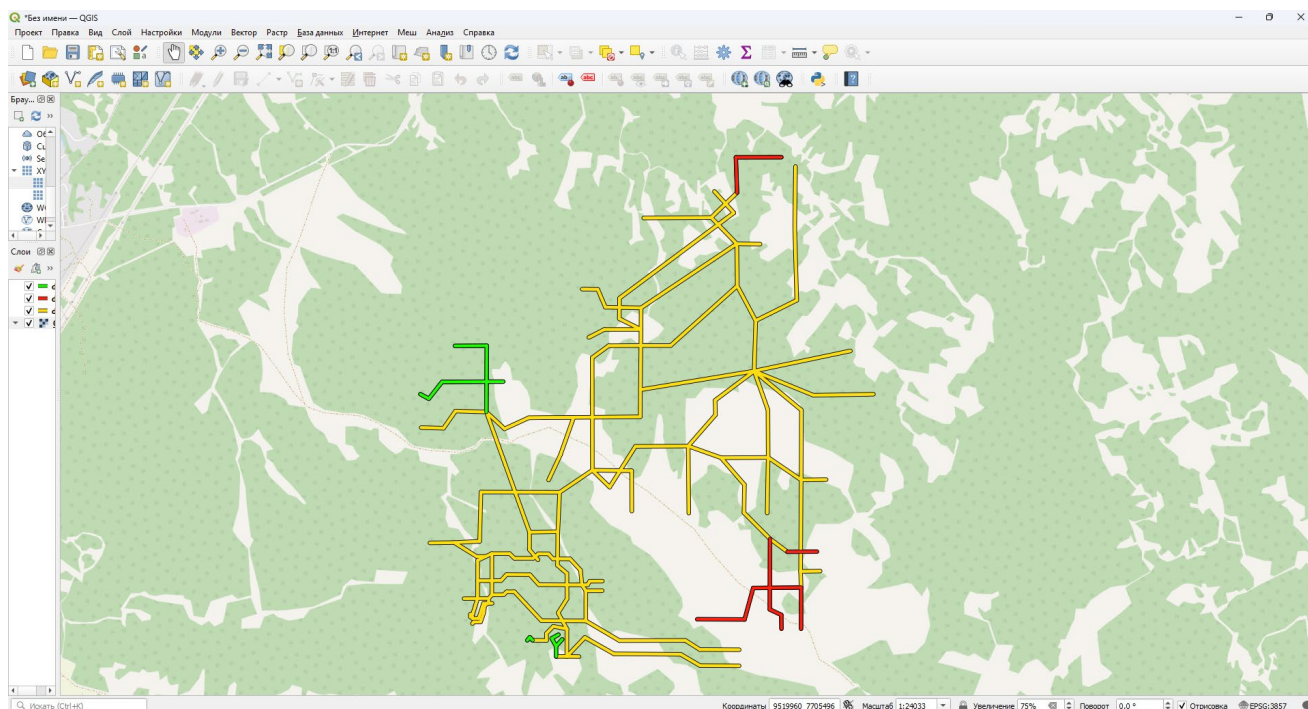


Рисунок 24 – Цифровая карта изменений

Наличие геопространственной привязки исследуемого объекта позволяет оценить, как выявленные изменения располагаются в пространстве относительно других объектов на местности. Это даёт возможность более детального проектирования работ, которые вносят изменения в строение исследуемого пространственного объекта, с учётом их потенциального влияния на окружение. Например, с опорой на подобный картографический материал может быть принято решение о продолжении горнодобывающих работ, приводящее к расширению сети горных выработок, которые могут находиться вблизи жилых домов. Накопленные данные об изменениях позволят отобразить на карте длительный процесс формирования исследуемого пространственного объекта и проанализировать его характер. В частности, могут быть оценены скорость внесения изменений и их соответствие изначальному планированию. Карты изменений также позволяют актуализировать картографические материалы, созданные как для исследуемого объекта, так и для других объектов, расположенных в зоне выявленных деформаций [1, 97].

Геопространственные данные также дают возможность проводить операции геоинформационного анализа данных, основанного на результатах проведения геометрического сравнения. Среди видов геоинформационного анализа, которые можно применить в рамках полученных данных, можно выделить следующие.

1 Сетевой анализ. Моделирование пространственных объектов в виде геометрических графов позволяет решать задачи сетевого анализа, актуальные для исследуемой предметной области. Так, для моделей сети горных выработок важной является задача поиска кратчайших маршрутов для построения планов ликвидации аварии. Проведение геометрического анализа позволяет обнаружить изменившиеся участки сети и скорректировать кратчайшие маршруты до точек выхода на поверхность, исходя из выявленных изменений [7].

2 Построение буферных зон. Выделение буферов вокруг удалённых или добавленных объектов позволяет определить области, которые попали под влияние изменений, выявленных ГИС [21]. Применительно к анализу дорожных сетей это могут

быть области вокруг удалённых ветвей, которые лишились доступа к дорожно-транспортной сети. Для анализа сетей горных выработок это могут быть зоны вокруг добавленных ветвей, для которых важно обратить внимание на то, как подземные работы могут оказывать влияние на состояние почву и поверхностные объекты.

3 Зонирование. Следующим шагом после построения буферных зон вокруг ветвей может стать выделение зон исследуемой области по критериям, определяющим характер выявленных изменений. Так, исследуемая территория разделяется на небольшие равномерные участки, для каждого из которых определятся наличие добавленных или удалённых ветвей, либо же ветвей с атрибутивными изменениями [106]. Объединение таких фрагментов по критерию наличия схожих изменений позволяет выявить зоны деформации. В частности, можно выделять зоны интенсивных изменений и зоны стабильности либо зоны изменений различных атрибутов.

4 Оверлейные операции. Чтобы придать контекст выявленным изменениям, а также буферам и зонам, построенным на основе данных о выявленных изменениях, следует объединить эти данные с уже имеющимися сведениями об исследуемой территории. Для этого используются оверлейные операции, которые позволяют объединять слои, на которых содержатся различные типы данных [49]. Например, может быть произведено наложение слоя с выделенными зонами интенсивности изменений дорожной сети на слой, отображающий административное деление населённого пункта, в котором располагается эта сеть. Таким образом, происходит выявление тех административных районов, которые попали под наибольшее воздействие изменений, произошедших в ходе изменений дорог. Подобные районы могут стать объектом тщательного анализа, связанного с доступностью ключевых инфраструктурных объектов. Ещё один вариант применения оверлейных операций может заключаться в объединении слоя, содержащего добавленные ветви подземной выработки, с слоями, содержащими данные о типах горных пород и грунтов

исследуемой местности. Подобное объединение даёт возможность проанализировать риски, возникающие в результате появления большого количества новых выработок в областях с малоустойчивыми горными породами.

Экспорт картографических данных возможен как в форматах, позволяющих хранить географические объекты и их атрибуты, например, GeoJSON, так и в форматах, которые предназначены для мгновенного просмотра. Например, интерактивные карты могут создаваться в формате HTML на основе цифровых карт, предоставляемых различными сервисами, такими как OpenStreetMap или Яндекс Карты.

Таким образом, система позволяет визуализировать результаты сравнения для более наглядной верификации модели, а также генерировать картографический материал для проведения анализа обнаруженных изменений.

3.5 Выводы по третьему разделу

Для автоматизации алгоритма геометрического сравнения топологий необходима реализация в виде геоинформационной системы с соответствующей функциональностью. Работа с объёмными по количеству содержащихся объектов моделями и множество процессов их обработки и анализа задают высокие требования к производительности системы. Для того, чтобы её добиться, необходимо спроектировать систему таким образом, чтобы она обеспечивала эффективное выполнение внутренних процессов.

Благодаря анализу системы на предмет взаимодействия потоков данных в ней была модульная структура, подразумевающая разбиение системы на взаимодействующие компоненты. Помимо выделения самих компонентов, таких как модуль настройки и оптимизации алгоритма сравнения, модуль геометрического анализа, модуль визуализации и модуль генерации картографического материала, были описаны связи между ними и данные, необходимые для взаимодействия. Благодаря подобной структуре отдельные аспекты системы могут модернизироваться без необ-

ходимости перерабатывать систему целиком. Наличие конкретно описанных интерфейсов модулей также позволяет интегрировать проектируемую ГИС в другие более крупные системы, требующие проведения геометрического анализа [37].

Предложенная структура базы данных позволяет хранить большие объёмы геопространственных и атрибутивных данных, получаемых из сторонних источников, а также экспортировать необходимые данные для внешних систем. В частности, результаты проведения анализа могут быть экспортированы в виде файлов визуализации или картографического материала – цифровых карт изменений. Наличие наглядной визуализации, а также геопространственной привязки позволяет решать задачи, связанные с верификацией моделей и анализом пространственных изменений.

Таким образом, было обосновано научное положение: применение геопространственных данных в рамках интерпретации результатов геометрического сравнения моделей сетей горных выработок позволяет решать задачи геопространственного анализа, включающего оценку эффективности изменений, выявленных в результате мониторинга.

4 МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СРАВНЕНИЯ ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА

4.1 Процедура выполнения геометрического сравнения

Достоверность моделей пространственных объектов играет важную роль в обеспечении процессов, связанных с их модернизированием и эксплуатацией. От достоверности зависит точность расчётов, проводимых на основе данных модели, а также аналитики, опирающейся на смоделированные данные. Алгоритм геометрического сравнения графов позволяет верифицировать модели путём сопоставления последовательно созданных экземпляров, относящихся к одному объекту.

Работа с используемой ГИС, реализующей алгоритм сравнения, начинается с загрузки моделей в систему. Модели представляют из себя файлы формата JSON. Структура файлов моделей включает набор узлов, для которых хранятся их координаты, а также набор ветвей, которые содержат идентификаторы начального и конечного узла, а также дополнительную атрибутивную информацию. В случае с сетями дорог в качестве атрибутивной информации могут выступать категория дороги и ширина проезжей части. В случае с сетями горных выработок дополнительными атрибутами могут стать сечение и тип выработки.

Загрузка моделей в систему инициируется нажатием на кнопку «Загрузить модель». Для проведения первичного визуального сопоставления интерфейс системы предоставляет возможность одновременного отображения загруженных моделей на экране. Под окном предварительного просмотра модели находится окно с информацией о загруженной модели. В нём содержатся такие данные, как название модели, дата загрузки модели, количество ветвей модели и их общая протяжённость. Это позволяет дополнительно оценить загруженные данные и удостовериться в том, что была выбрана правильная модель. На рисунке 25 показан графический интерфейс модуля, отвечающего за загрузку и предварительный просмотр моделей.

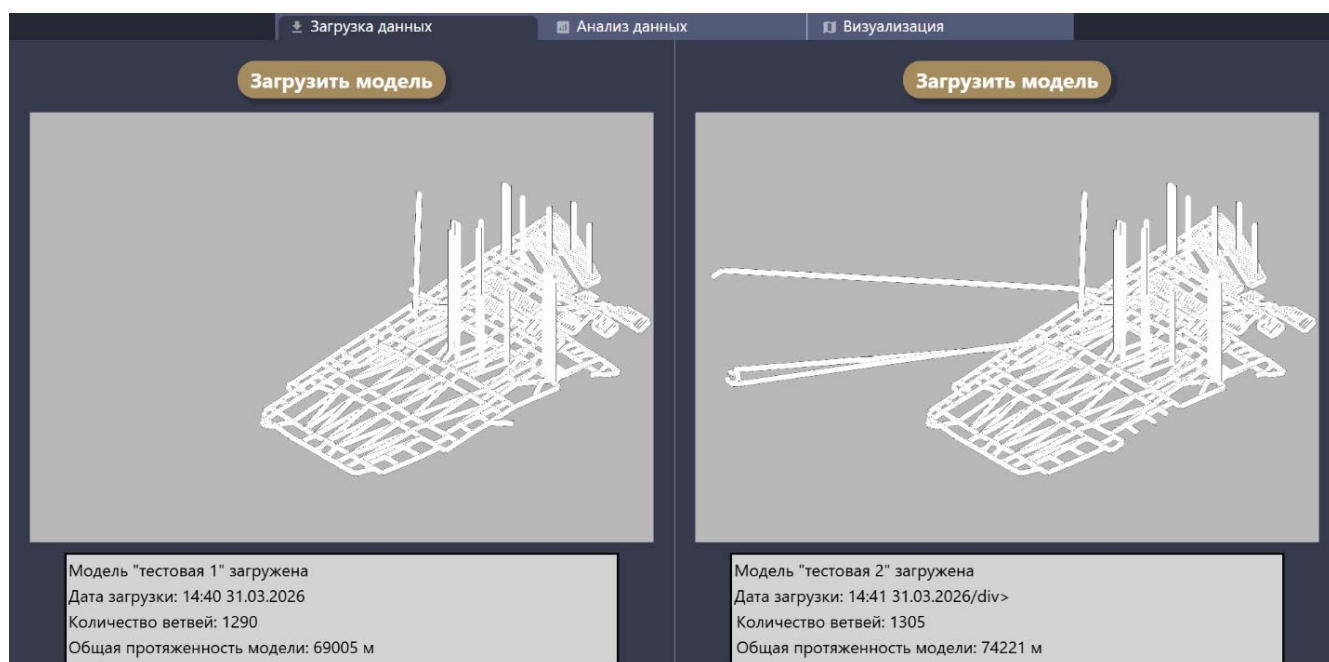


Рисунок 25 – Окно загрузки данных

Перед тем, как приступить к анализу, пользователь имеет возможность детализировать его параметры таким образом, чтобы они наилучшим образом соответствовали поставленной задаче. Среди доступных пользователю настроек:

1 Точность сравнения. Отвечает за максимально допустимое расстояние отклонения двух точек в пространстве, при котором они будут восприниматься алгоритмом как одинаковые.

2 Инвариантность к движению. Если данный параметр включён, система анализирует топологии и постарается определить величину, на которую смещена относительно другой. Дальнейшее сравнение топологий будет проводиться с учётом этого смещения, так чтобы одинаковые по геометрии топологии, одна из которых смещена в пространстве, не были определены различными. Если пользователю заранее известна величина смещения одной из моделей, он может ввести её самостоятельно.

3 Инвариантность к гомотетии. Если данный параметр включён, система анализирует топологии и постарается определить значение коэффициента масштабирования одной топологии относительно другой. При сравнении топологии будут

приведены к одинаковому масштабу. Если пользователю заранее известен коэффициент масштабирования одной модели относительно другой, он может указать его самостоятельно.

4 Учёт высотных координат. Данный параметр позволяет не учитывать при сравнении высотные координаты узлов. Подобный аспект позволит предотвратить проведение некорректного сравнения, если специфика предметной области не позволила точным образом отразить высотные координаты объектов в модели.

5 Проведение атрибутивного сравнения. Данный параметр отвечает за необходимость проведения атрибутивного анализа сравниваемых моделей после проведения геометрического анализа.

Выбор настроек вынесен на окно управления анализа, которое показано на рисунке 26.

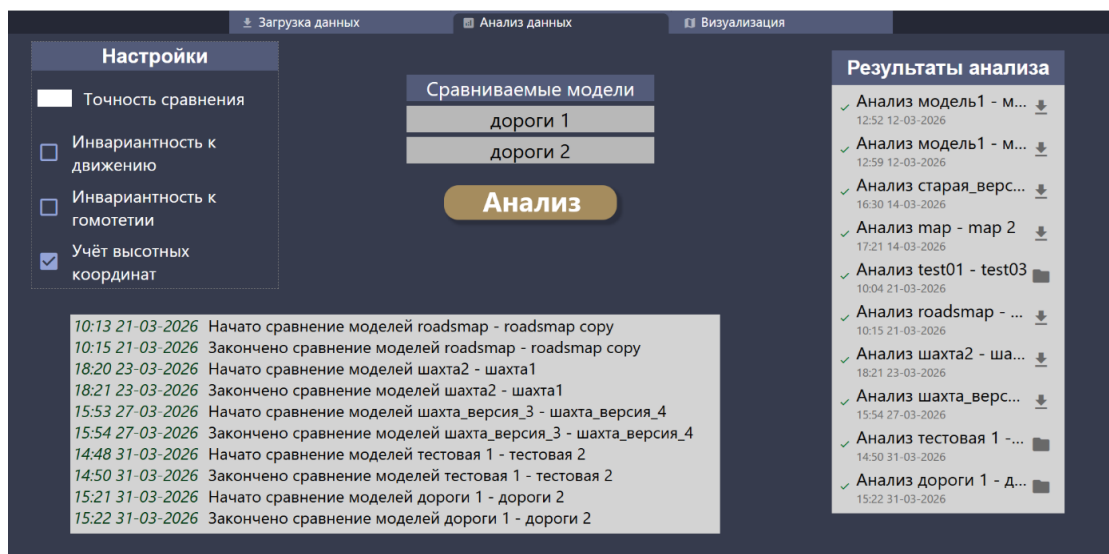


Рисунок 26 – Окно анализа данных

Запуск геометрического анализа загруженных моделей инициируется нажатием на кнопку «Анализ». Над этой кнопкой расположены названия сравниваемых моделей, что позволяет удостовериться в том, что были загружены нужные файлы. В нижней части окна анализа данных расположено окно, содержащее в себе описа-

ние событий, связанных с проведением анализа. В это окно помещаются сообщения о начале и окончании анализа вместе с датами этих событий. Это позволяет отслеживать работу алгоритма и оценивать время его выполнения. После выполнения анализа генерируется отчёт о его результатах. Файл представляет из себя JSON-структуру, в которой хранятся списки ветвей по категориям: «удалённые», «добавленные», «сохранившиеся». Созданный файл отображается в списке «Результаты анализа» в левой части окна анализа данных. Из данного списка можно скачать необходимый файл и открыть директорию, в которую он был скачан.

Помимо предоставления информации в текстовом виде система также визуализирует результаты проведения анализа и генерирует цифровую карту изменений. Графический интерфейс модуля визуализации представлен на рисунке 27.

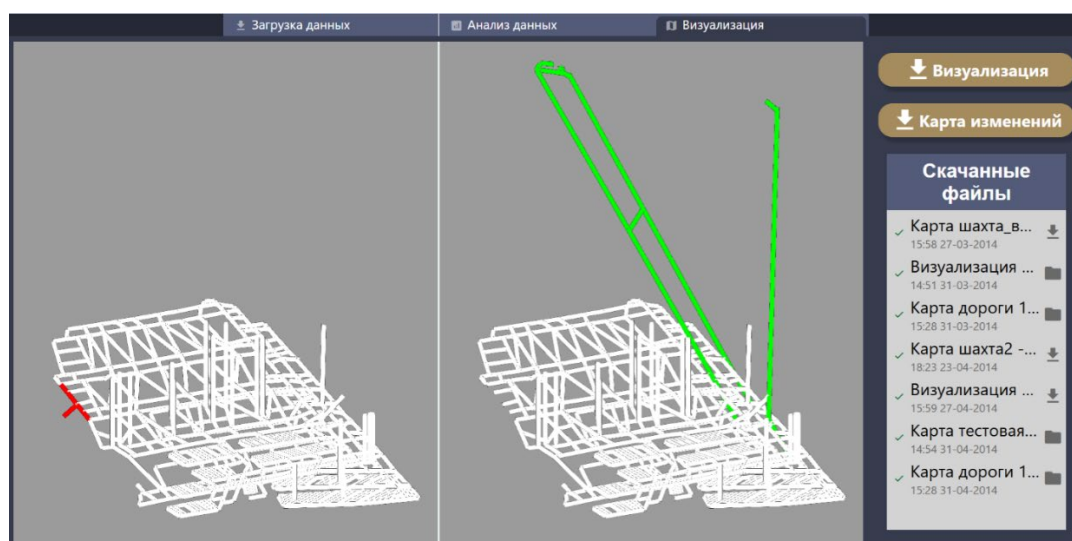


Рисунок 27 – Окно визуализации результатов анализа

Окно визуализации результатов анализа демонстрирует выявленные изменения путём одновременной демонстрации сравниваемых моделей с выделением разных категорий ветвей разными цветами. Удалённые ветви отмечены красным цветом, добавленные модели отмечены зелёным цветом. Это позволяет наглядно отобразить различия между моделями и провести их первичный визуальный анализ.

При нажатии на кнопку «Визуализация» осуществляется скачивание файла визуализации в векторном формате. Файл содержит набор многомерных векторных объектов с атрибутивными данными, влияющими на параметры их отображения, в частности цвет. Нажатие на кнопку «Карта изменений» позволяет скачать файл формата GeoJSON, который можно открыть в сторонних ГИС, например QGIS. Файл представляет из себя структуру, содержащую массив объектов типа «LineString», отображающихся на карте в виде линий, которые должны обозначать ветви. Каждая группа ветвей вынесена в отдельный массив, что позволяет изобразить их разными цветами, а также включать или выключать их отображение на карте.

Таким образом, для проведения геометрического анализа при помощи ГИС необходимо загрузить файлы моделей, определить параметры проведения сравнения, инициировать запуск сравнения и скачать полученные файлы с результатами.

4.2 Апробация алгоритма геометрического сравнения

В рамках апробации алгоритма было подготовлено два набора данных. Первый из них представляет из себя две последовательно созданные модели некоторой сети дорог. Координаты ключевых точек сети были определены в результате проведения геодезических работ и оцифрованы. Второй набор данных – две последовательно созданные модели некоторой модели горных выработок. Данные для формирования моделей были получены в результате проведения маркшейдерских работ, сами модели были сформированы с использованием ПО «Вентиляция 2.0». Все представленные модели состоят из набора узлов с известными координатами в трёхмерном пространстве и ветвей, которые их соединяют.

Основной проблемой проведения геометрического сравнения моделей пространственных объектов без использования автоматизированных средств является сложность в анализе большого количества элементов топологии. Для оценки эффективности алгоритма были выбраны модели, содержащие такое количество ветвей, при котором проведение сравнения без использования информационной системы становится затруднительным. Ранняя и итоговая модели сети дорог состоят

из 7 638 и 7 624 ветвей соответственно. Версии моделей сети горных выработок состоят из 6 094 и 6 115 ветвей. Представленные модели визуализированы на рисунках 28, 29. Пунктирными линиями на моделях сети горных выработок изображены ветви, относящиеся к типу непроходимых.



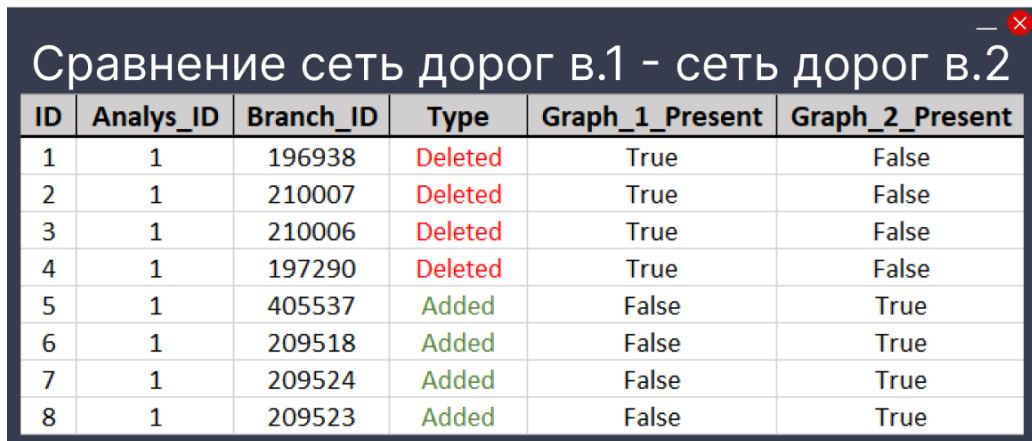
Рисунок 28 – Модели сети дорог



Рисунок 29 – Модели сети горных выработок

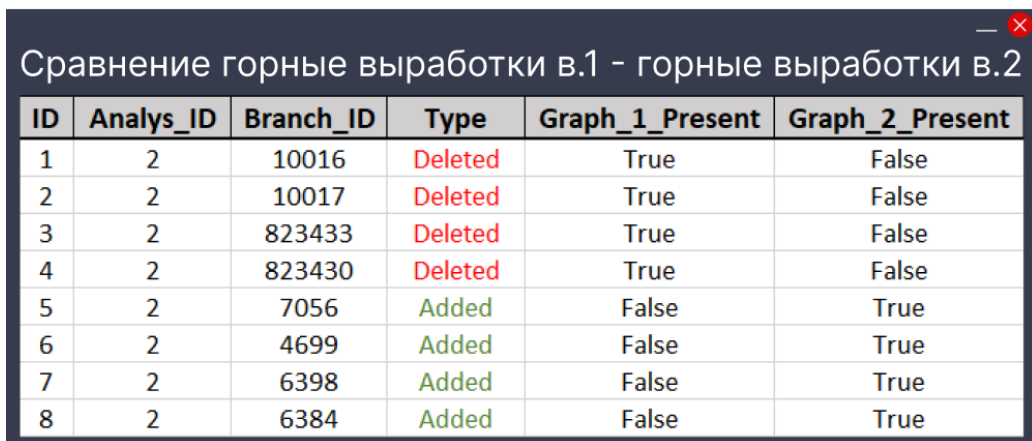
Для представленных моделей был проведён геометрический анализ. Параметры анализа включали в себя учёт высотных координат, инвариантность к движению и к гомотетии. Значение показателя точности сравнения равнялось 2 м.

Для моделей сети горных выработок был дополнительно проведён атрибутивный анализ. В результате проведения анализа система сформировала табличный файл для каждого сравнения. Из получившихся файлов можно сделать вывод о том, какие объекты сравниваемых моделей были удалены или добавлены при создании новой версии и в каких именно моделях хранились выявленные объекты. Было выявлено, что в новую модель дорожной сети было добавлено 11 ветвей, однако 26 было удалено из старой модели. В случае с моделями сети горных выработок в новую модель было добавлено 40 ветвей и 20 ветвей было удалено из старой. Фрагменты полученных табличных представлений показаны на рисунках 30, 31.



ID	Analys_ID	Branch_ID	Type	Graph_1_Present	Graph_2_Present
1	1	196938	Deleted	True	False
2	1	210007	Deleted	True	False
3	1	210006	Deleted	True	False
4	1	197290	Deleted	True	False
5	1	405537	Added	False	True
6	1	209518	Added	False	True
7	1	209524	Added	False	True
8	1	209523	Added	False	True

Рисунок 30 – Фрагмент табличного представления результатов сравнения моделей сети дорог



ID	Analys_ID	Branch_ID	Type	Graph_1_Present	Graph_2_Present
1	2	10016	Deleted	True	False
2	2	10017	Deleted	True	False
3	2	823433	Deleted	True	False
4	2	823430	Deleted	True	False
5	2	7056	Added	False	True
6	2	4699	Added	False	True
7	2	6398	Added	False	True
8	2	6384	Added	False	True

Рисунок 31 – Фрагмент табличного представления результатов сравнения моделей горных выработок

Для более наглядного представления результаты проведённого геометрического анализа были визуализированы. На рисунках 32–35 показаны файлы визуализации для обоих случаев сравнения, а также цифровые карты изменений, открытые с помощью программного обеспечения QGIS. На изображениях с визуализацией удаленные в результате построения новой модели ветви раскрашены в красный цвет, а добавленные в новую версию модели ветви – в зелёный.

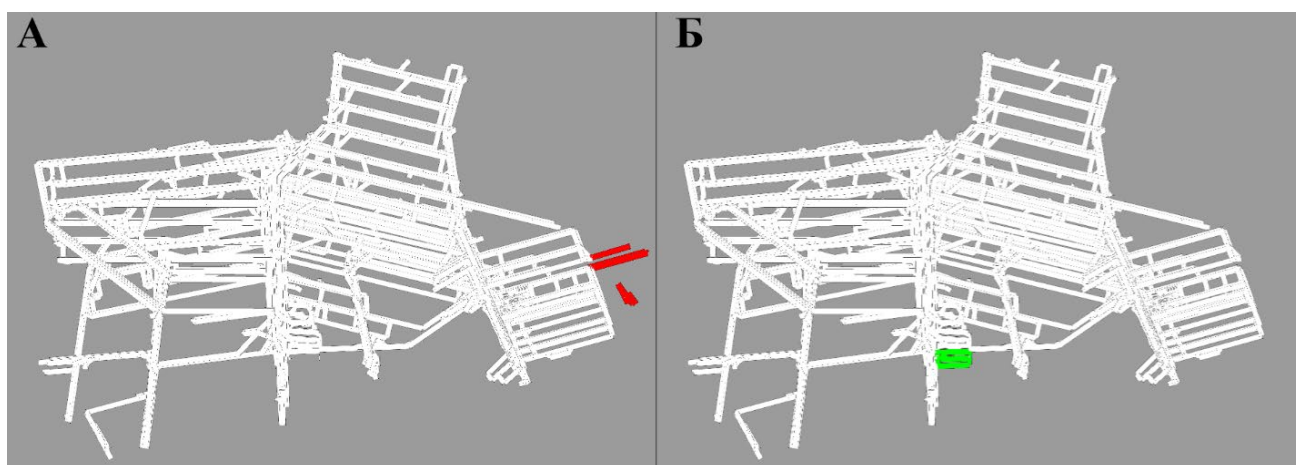


Рисунок 32 – Визуализация результатов геометрического сравнения моделей дорожной сети: *а)* старая версия модели; *б)* новая версия модели

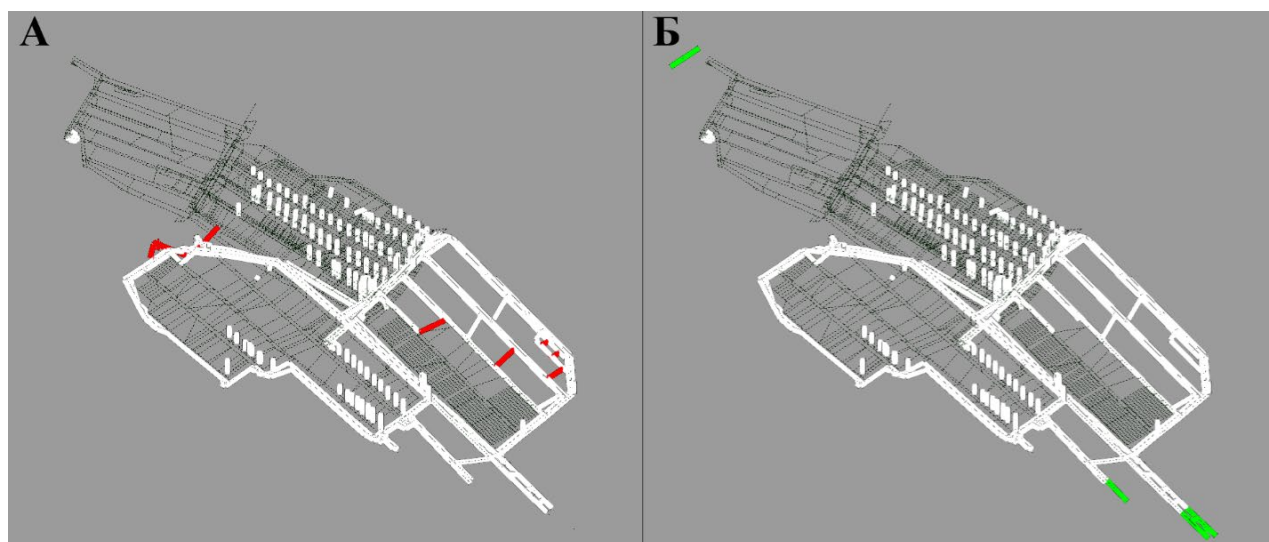


Рисунок 33 – Визуализация результатов геометрического сравнения моделей сети горных выработок: *а)* старая версия модели; *б)* новая версия модели

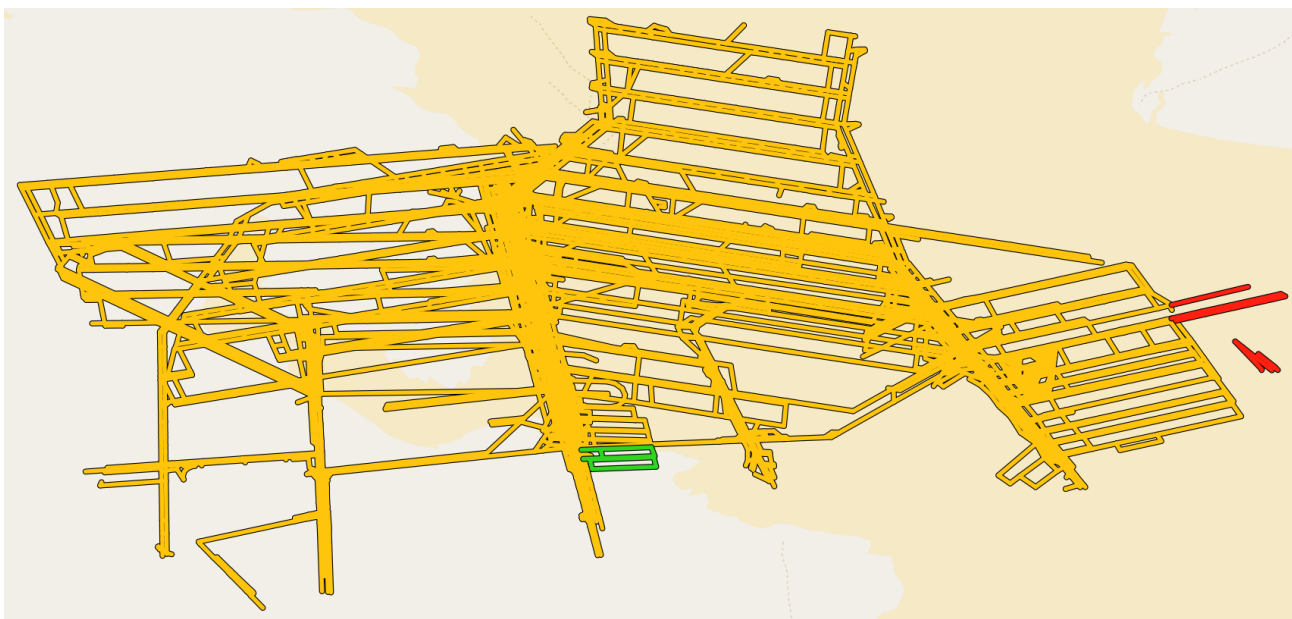


Рисунок 34 – Цифровая карта изменений дорожной сети

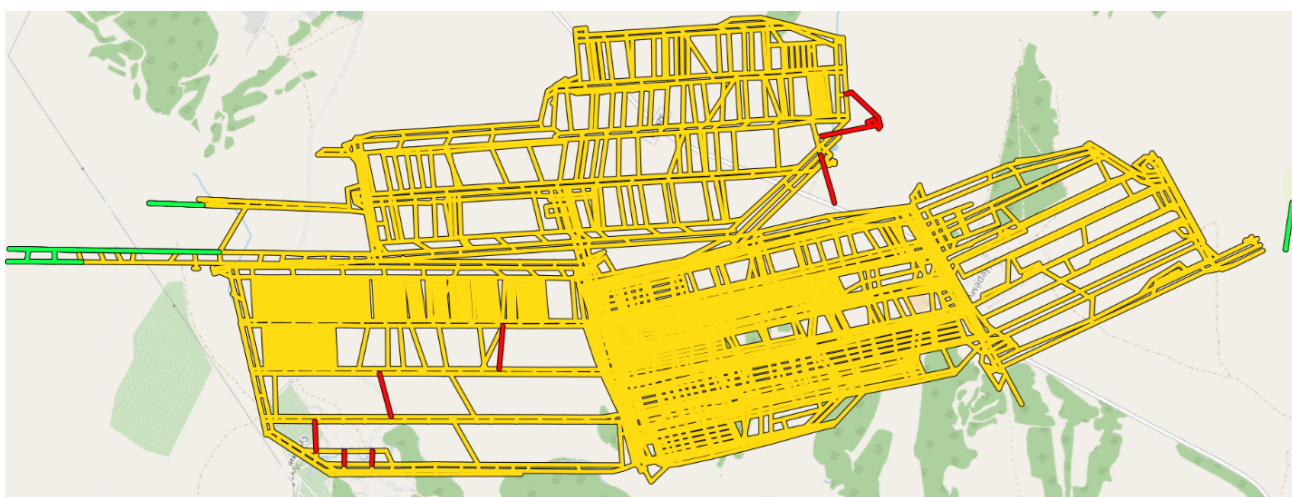


Рисунок 35 – Цифровая карта изменений сети горных выработок

После проведения геометрического сравнения также проводится атрибутивное сравнение аналогичных пар объектов исследуемых моделей. Это помогает выявить дополнительные изменения, внесённые в модель, которые могут отразиться на характеристиках исследуемых пространственных объектов. В результате проведения атрибутивного анализа моделей сети горных выработок были обнаружены изменения для 14 пар идентичных ветвей. Фрагмент табличного представления найденных изменений атрибутов представлен на рисунке 36.

Атрибутивное сравнение					
ID	Analys_ID	Branch_ID	Attribute	Old_Value	New_Value
1	3	6226	Ширина	3,94	5
2	3	6930	Ширина	3,9	4,7
3	3	8867	Высота	4,85	4,2
4	3	6216	Высота	4,7	4,2
5	3	826301	Номер пласта	2	3
6	3	826298	Номер пласта	2	3
7	3	826288	Номер пласта	2	3
8	3	826282	Номер пласта	2	3

Рисунок 36 – Фрагмент табличного представления результатов атрибутивного сравнения моделей горных выработок

Также был сгенерирован визуальный файл, отображающий выявленные изменения. Он представлен на рисунке 37. Светло-жёлтым цветом на нём изображены ветви, идентичные и по геометрии, и по атрибутам, оранжевым – ветви, идентичные по геометрии, но различающиеся по атрибутам.

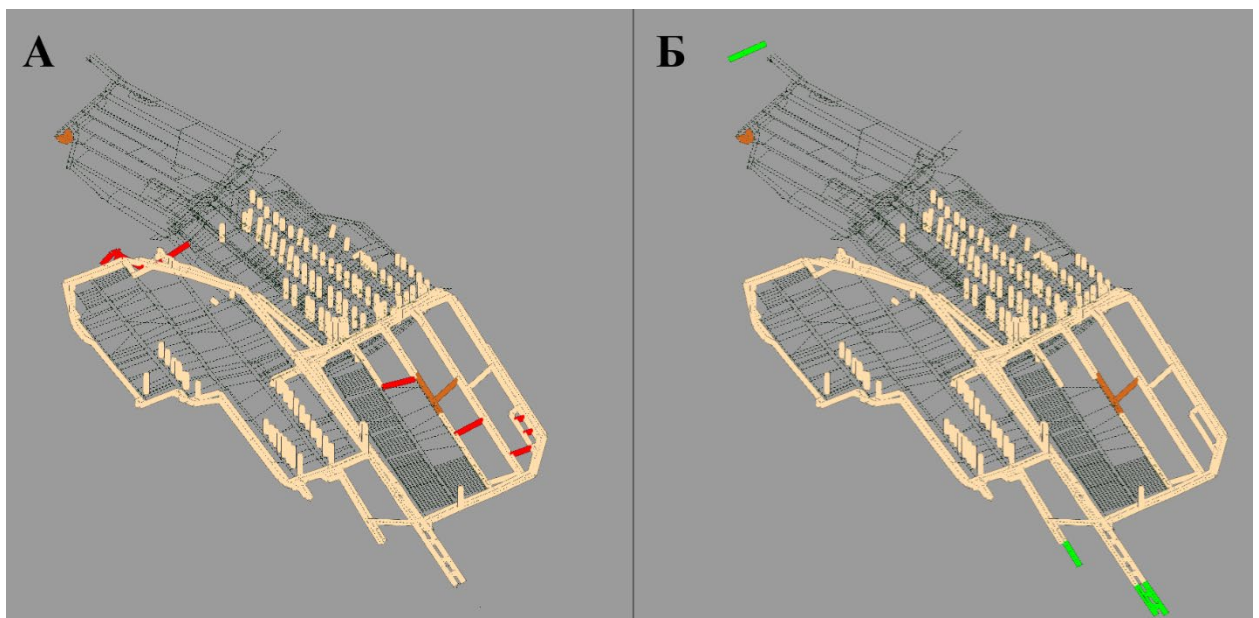


Рисунок 37 – Визуализация результатов атрибутивного сравнения моделей сети горных выработок:

а) старая версия модели; б) новая версия модели

На рисунках 38, 39 показаны расположенные в аналогичных местах фрагменты рассматриваемых топологий. На обоих фрагментах присутствуют две ветви, соединённые общим узлом. При этом для обоих фрагментов общий узел, новой версии дорожной сети смещён на величину, показанную на следующих изображениях буквой Δ .

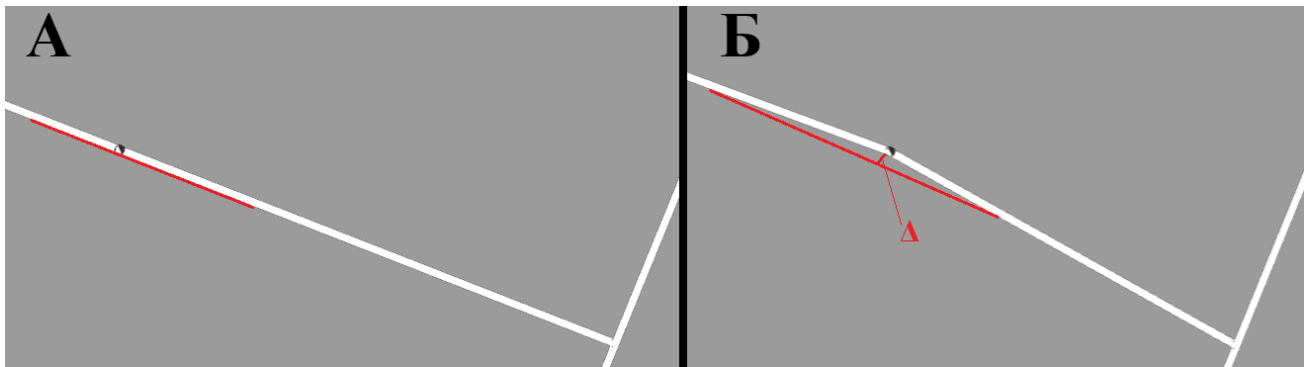


Рисунок 38 – Первый фрагмент:

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

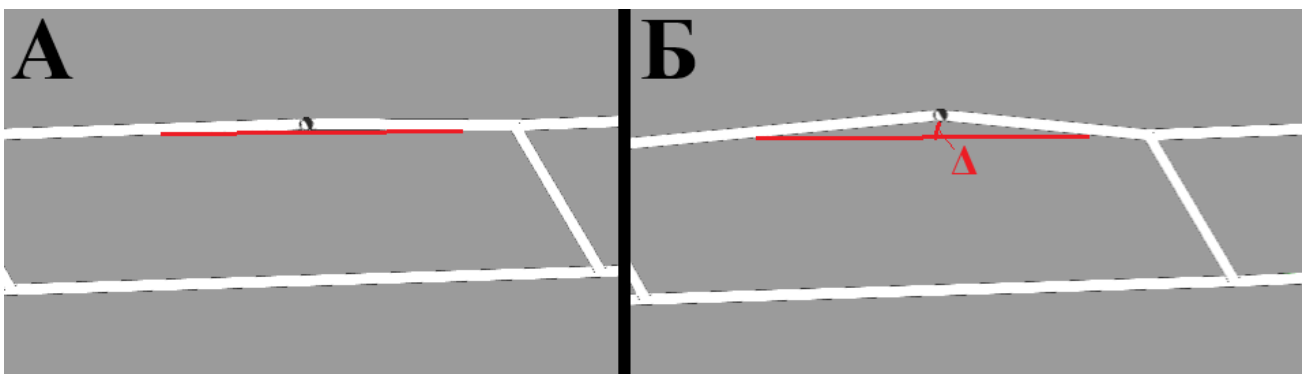


Рисунок 39 – Второй фрагмент:

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

Для демонстрации влияния параметра точности сравнения было проведено дополнительное геометрическое сравнение моделей дорожных сетей. Показатель точности сравнения был уменьшен в 4 раза до 0,5 м. Визуализация проведения повторного анализа с изменившимся параметром точности показана на рисунке 40.

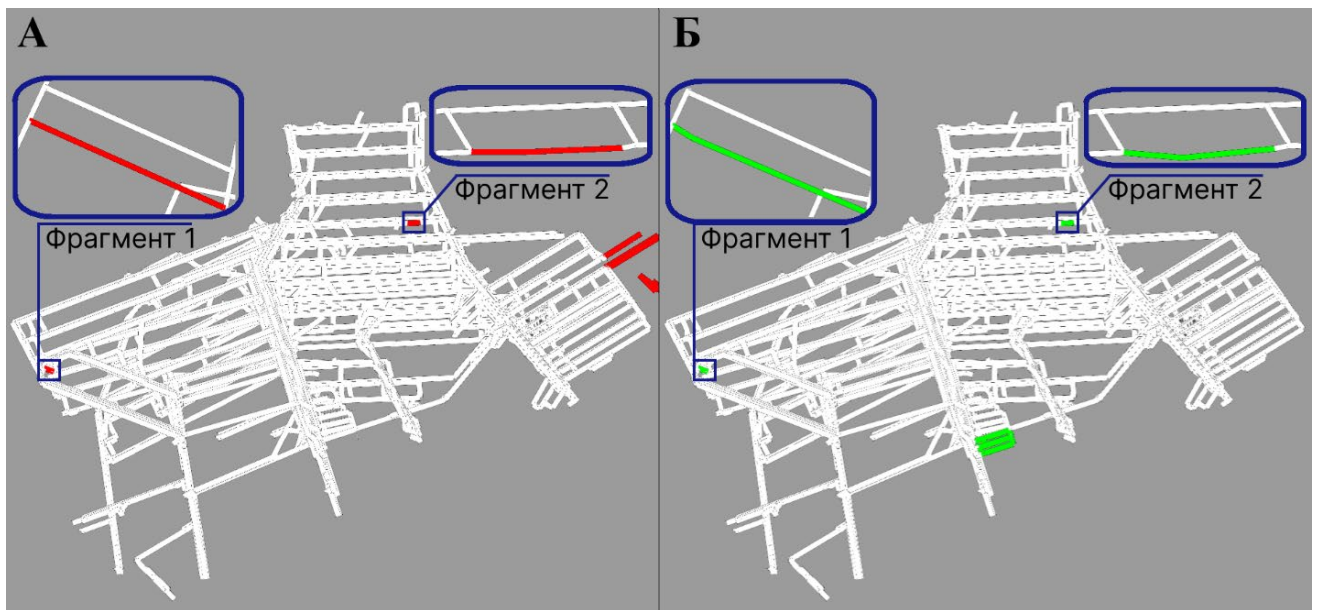


Рисунок 40 – Визуализация результата сравнения
дорожных сетей с измененным показателем точности:
а) старая версия модели; б) новая версия модели

Как видно из изображения, при повторном проведении геометрического анализа с изменившимся показателем точности сравнения были получены другие результаты. Ветви, приведенные в обоих фрагментах, перестали распознаваться как «сохранившиеся». Вместо этого они стали отмечаться «удалёнными» для старой версии топологии и «добавленными» для новой. Таким образом, изменение показателя точности сравнения способствует определению даже малейших сдвигов узлов в модели. В зависимости от задачи, в которой используются результаты сравнения, высокой точностью можно пренебречь в пользу выявления более заметных изменений.

С целью определить эффективность применения предлагаемого алгоритма по сравнению с уже имеющимися вариантами сравнения топологий были произведены оценки точности и времени выполнения задачи. В качестве метрики точности работы алгоритма использовалась метрика «макро-усреднённое значение F-меры», описанная во втором разделе. В качестве альтернативных вариантов сравнения топологий использовались сопоставление моделей по уникальным идентификаторам

ветвей, а также метод, заключающийся в визуальном сопоставлении топологий. Результаты сравнения методов на двух приведённых наборах данных показаны в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Сравнение точности и времени выполнения алгоритмов для моделей сети горных выработок

	Алгоритм геометрического анализа	Сопоставление идентификаторов ветвей	Визуальное сопоставление
Время выполнения, с	0,879	1,392	8435
Усреднённое значение F-меры	0,987	1	0,861

Таблица 4 – Сравнение точности и времени выполнения алгоритмов для моделей дорожных сетей

	Алгоритм геометрического анализа	Сопоставление идентификаторов ветвей	Визуальное сопоставление
Время выполнения, с	0,855	1,441	10 036
Усреднённое значение F-меры	0,980	0,349	0,773

Как видно из приведённых данных, рассматриваемый алгоритм геометрического анализа в среднем примерно на 63 % быстрее автоматизированного алгоритма сопоставления идентификаторов ветвей, а также более чем сотню тысяч раз быстрее неавтоматизированного метода, основанного на визуальном сопоставлении. Для обоих наборов данных алгоритм геометрического анализа допускал ошибки, однако в среднем показал высокую точность по метрике усреднённого значения F-меры. Алгоритм сопоставления ветвей смог показать идеальный результат

при сравнении моделей сетей горных выработок благодаря тому, что у данных наборов данных совпадали идентификаторы идентичных ветвей. Однако, на втором наборе данных идентификаторы идентичных ветвей отличались, что привело к существенному снижению точности. В среднем алгоритм геометрического сравнения точнее, чем сопоставление идентификаторов ветвей на 66 % и точнее, чем визуальное сопоставление на 21 %. Таким образом, при помощи предлагаемого алгоритма можно добиться уменьшения выполнения геометрического сравнения минимум на 63 % и увеличения точности минимум на 21 %.

4.3 Интерпретация результатов анализа

В результате полного цикла работы ГИС предоставляет пользователю отчёт о выявленных изменениях в сравниваемых моделях, с прилагающейся визуализацией, а также цифровую карту изменений. Благодаря полученным данным пользователь может провести оценку того, насколько достоверными являются построенные модели, а также проанализировать, как именно выявленные изменения могут оказать влияние на моделируемый объект.

Для приведённого в предыдущем разделе примера с моделями сети горных выработок показано, что в результате изменений в модели были удалены ветви типов «выработка» и «поддерживаемая выработка». Ветви типа «поддерживаемая выработка» не предназначены для добычи полезных ископаемых, но используются в шахтах для обеспечения вентиляции выработок, где происходит добыча. Удаление таких ветвей из модели чревато привнесением искажений в вентиляционные расчёты шахты, что может стать причиной неправильной настройки вентиляционного оборудования [44]. Таким образом, разрабатываемая система позволила указать пользователю на критически важное для расчёта изменение в модели. Получив отчёт и визуальное представление, соответствующий специалист или система принятия решений может сделать вывод об корректности подобного удаления ветвей из модели. Вдобавок к этому удалось обнаружить изменения в атрибутах ветвей,

таких как «ширина» и «высота», которые влияют на сечение ветви и, как следствие, на объёмы воздуха, которые могут пройти через неё. Это, в свою очередь, также влияет на вентиляционные расчёты, и поэтому необходимо провести дополнительную инспекцию новой модели [57].

Также были выявлены добавленные в сеть горных выработок ветви типа «выработка». Выявленные изменения следует проанализировать на предмет соответствия имеющимся в распоряжении планам горных работ. В случае выявления существенных несоответствий следует провести дополнительную верификацию корректности изменений модели. В случае, если изменения оказались релевантными проводимым в шахте горным работам, из появления новых ветвей можно сделать вывод о необходимости провести новые вентиляционные расчёты, а также обновить планы ликвидации аварий.

Результаты сравнения моделей дорожной сети также показали наличие изменений. Были выявлены добавленные и удалённые участки дорожной сети. Наличие подобных изменений помогает установить необходимость проведения верификации новой модели на предмет релевантности добавленных объектов. Если изменения удалось подтвердить, ориентируясь на имеющиеся достоверные геопространственные данные, то сведения о характере изменений можно использовать для дальнейшего анализа и планирования. Так, изменившаяся модель требует проведения оптимизации реализованной логистики: изменения логистических коридоров, основанных на существовавших кратчайших путях между объектами; повторного анализа загруженности дорожной сети. Полученные сведения о ходе развития транспортной сети позволят оценить эффективность строительных работ и внести возможные корректировки в план работ, опираясь на фактические данные о темпах строительства. Также данные об изменениях дорог можно использовать в целях оценки экологической обстановки исследуемой территории, а также обновления кадастровых материалов и управления земельными ресурсами.

Наличие картографической привязки позволило построить цифровую карту изменений, благодаря которой можно провести геопространственный анализ. Первым делом, на исследуемом пространстве горнодобывающего предприятия была построена равномерная прямоугольная сетка. Затем, вокруг ветвей различных категорий была выделена буферная зона размером 500 м, отражающая зону влияния различных типов выработок. Данные о буферных зонах были наложены на построенную сетку, таким образом, чтобы выделить зоны исследуемого пространства, показывающие характер выявленных изменений различных участков земной поверхности [18]. Иллюстрация описанных шагов показана на рисунке 41. Красным цветом на рисунке выделены зоны влияния удалённых ветвей, зелёным – зоны влияния добавленных ветвей, жёлтым – оставшихся.

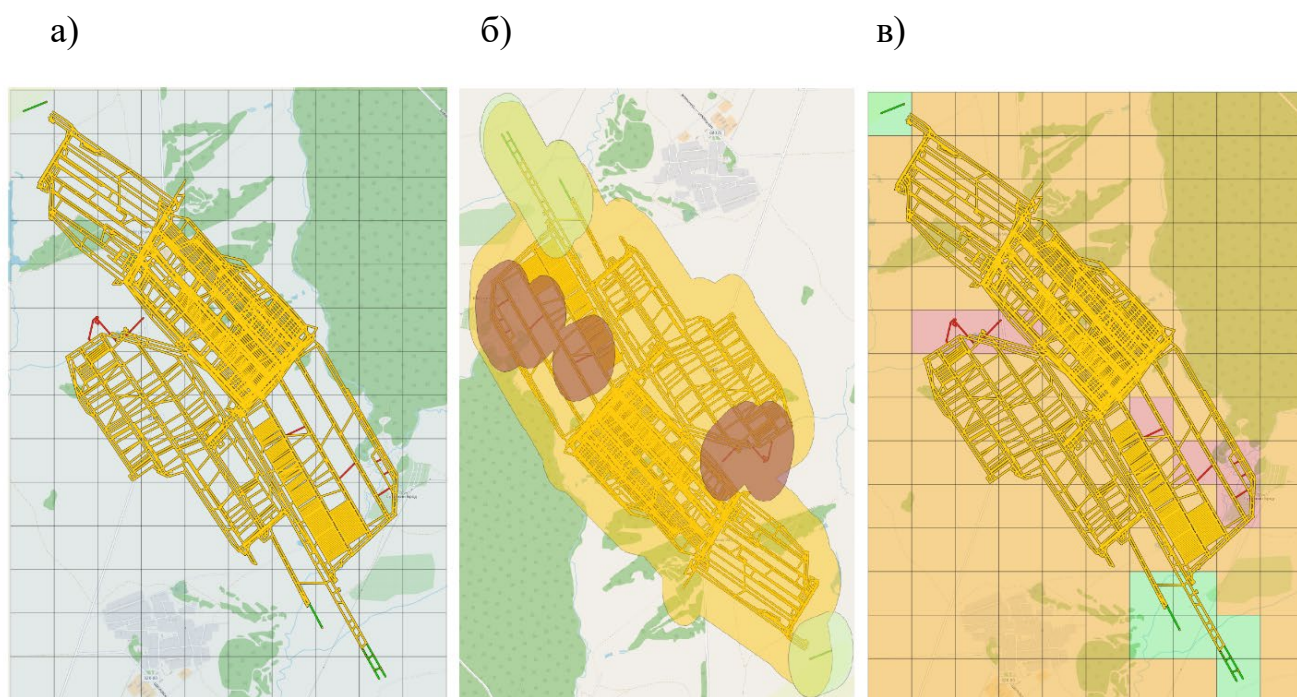


Рисунок 41 – Выделение зон влияния выявленных изменений:

- а) разбиение исследуемого пространства на сетку;
- б) буферизация; в) выделение зон влияния изменений

В результате проведения исследовательских работ на исследуемой местности были получены значения глубины оседания земной поверхности в приведённых

участках сетки до и после проведения угледобывающих работ, результат которых отображён на карте изменений. Визуализация значений представлена на рисунке 42. Для иллюстрации изменения оседаний была построена дополнительная сетка, в которой элементы раскрашены в зависимости от величины разности оседания после и до горнодобывающих работ. Более тёмные участки показывают зоны наибольшего оседания, наиболее светлые – зоны наименьшего оседания или отсутствия оседания.

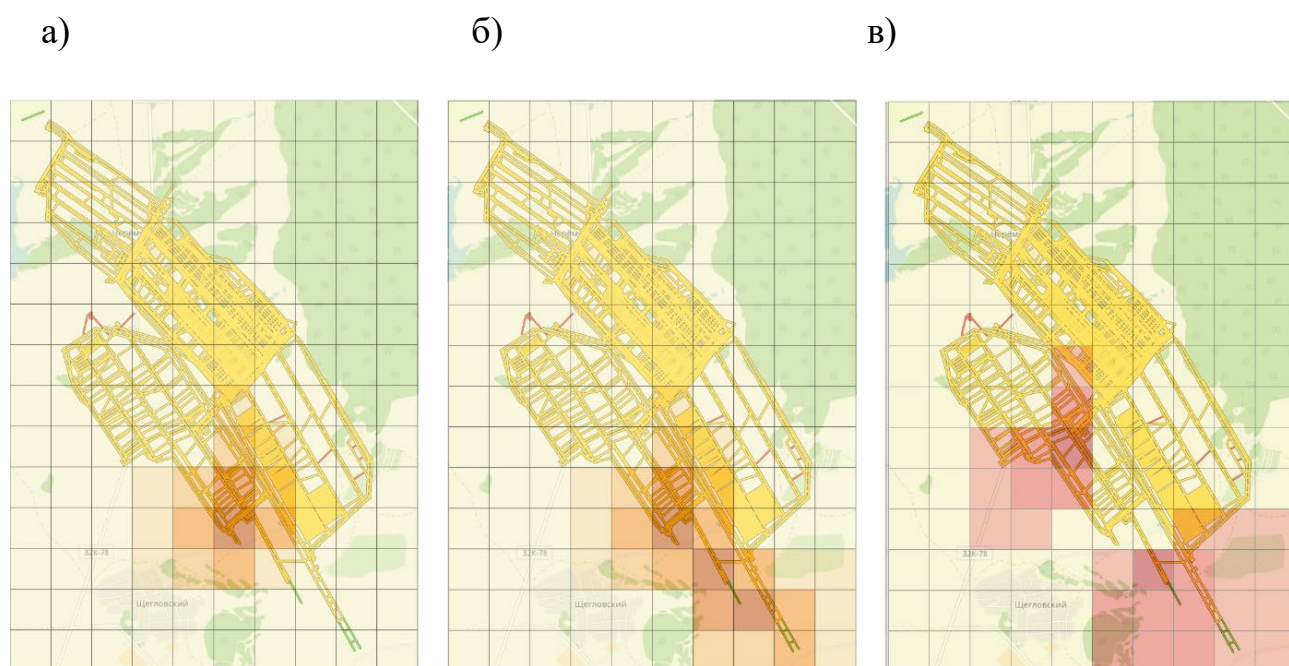


Рисунок 42 – Зоны оседания земной поверхности:

а) до проведения горнодобывающих работ; б) после проведения горнодобывающих работ; в) прирост оседания

Для финального этапа геопространственного анализа на сетку, отображающую характер изменений, выявленных в результате геометрического сравнения тополий, была наложена сетка, отображающая прирост оседания земной поверхности. Для наглядности раскраска участков ветки зависит от характера выявленных изменений, а обводка участков сетки зависит от прироста оседания. Получившаяся карта показана на рисунке 43.

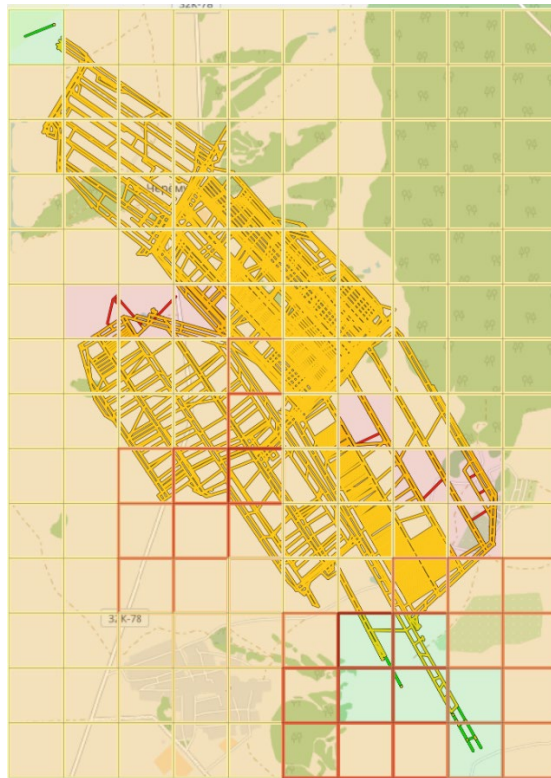


Рисунок 43 – Наложение слоя изменений проседания на слой изменений топологии

На полученной карте видно, что наиболее сильное оседание в результате проведения горнодобывающих работ приходится на зону, в которой были добавлены новые элементы сети горных выработок. Из этого можно выдвинуть гипотезу о том, что продолжение горнодобывающих работ в этой области и последующее расширение выработок в этом направлении приведёт к дальнейшему оседанию почвы.

Таким образом, проведение геометрического анализа посредством разработанной методики, реализованной в спроектированной геопространственной системе, позволило добиться получения возможностей повышения эффективности и безопасности производственных и строительных работ. Данные, полученные при использовании методики, становятся материалом, дальнейший анализ которого позволяет удостовериться в правильности построения модели на основе геометрического графа или, напротив, выявить неточности в её составлении. Выявление неточности позволяет избежать проведения некорректного анализа или нерелевант-

ных обработки данных, из которых состоит модель. В случае же верификации обнаруженных изменений, сведения о них можно использовать для дальнейшего планирования изменений исследуемого объекта, обновления картографического материала и решений задач, связанных с предметной областью исследуемого объекта, например навигационных расчётов или расчётов физических характеристик процессов, зависящих от пространственных характеристик среды [83, 68].

4.4 Выводы по четвертому разделу

В рамках данного раздела была сформулирована методика применения спроектированной ГИС, позволяющей автоматизировать применения алгоритма геометрического сравнения. Были выделены основные этапы работы с программой, а также обозначена их последовательность, позволяющая совершить полный цикл работы: от загрузки данных в систему до получения результата. В качестве результатов работы программы выступает отчёт, в котором перечислены участки обеих загруженных топологий и результат их классификации по признаку присутствия в сравниваемой модели; файлы визуализации, а также цифровая карта изменений.

Был проведён контрольный расчёт на двух наборах данных, один из которых представлял из себя две последовательные модели сети горных выработок, а другой – две последовательные модели дорожной сети. Проведение геометрического анализа позволило продемонстрировать выявленные в обоих случаях изменения топологий. Также было продемонстрировано влияние на проведение анализа такого параметра, как точность. С его изменением результат проведения сравнения изменился, так как алгоритм стал более чувствителен к смещению узлов топологии.

На примере с результатом сравнения моделей сети горных выработок было показано, как генерирующаяся системой цифровая карта изменений позволяет про-

водить анализ последствия горнодобывающих работ. Так, карта изменений топологии была сопоставлена с картой изменений оседания почвы в исследуемой области. На основании сделанного сопоставления была выдвинута гипотеза о существенном влиянии расширения сети горных выработок на оседание земной поверхности.

Сравнение точности и времени выполнения разработанного алгоритма с аналогичными показателями для других используемых алгоритмов показало, что приведённое в работе автоматизированное геометрическое сравнение позволяет увеличить точность минимум на 21 % и сократить время выполнения на 63 %.

Таким образом, обосновано следующее научное положение: использование геометрического сравнения моделей объектов, построенных на основе геометрического графа, позволяет увеличить точность и эффективность обеспечения качества моделей сетей, достигаемую повышением степени достоверности моделей.

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 сравне-

нию 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 ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абламейко, С. В. Информационные технологии создания и обновления цифровых и электронных карт местности / С. В. Абламейко, А. Н. Крючков – Текст : непосредственный // Информатика. – 2004. – № 2 (02). – С. 86–93.
- 2 Автоматизированная система наблюдения, оповещения и поиска персонала при авариях в шахтах / А. И. Благодарный, О. З. Гусев, С. С. Журавлев и др. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2009. – № 1. – С. 34–40.
- 3 Ануфриев, С. О. Технологии сбора пространственных данных аэрокосмическими методами : учебное пособие для вузов / С. О. Ануфриев, О. С. Ануфриев. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 144 с. – Текст : непосредственный.
- 4 Байкенжин, М. А. Подземные маркшейдерские опорные сети / М. А. Байкенжин, Т. А. Азимхан. – Текст : непосредственный // Вестник науки. – 2023. – Т. 1, № 6 (63). – С. 962–971.
- 5 Берленко, Т. А. Разработка геоконтекстных сервисов на платформе Geo2Tag : электрон. учеб.-метод. пособие / Т. А. Берленко, М. М. Заславский, К. В. Кринкин. – 2016. – Текст : электронный.
- 6 Биденко, С. И. Маршрутизация плавания в районах с ограничивающими факторами: графо-нейросетевой метод / С. И. Биденко, И. С. Храмов, С. Г. Черный. – Текст : непосредственный // Эксплуатация морского транспорта. – 2023. – № 2. – С. 89–101.
- 7 Блануца, В. И. Информационно-сетевая география : монография / В. И. Блануца. – Москва : Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2023. – 243 с. – Текст : непосредственный.
- 8 Большинский, М. И. Газодинамические явления в шахтах : монография / М. И. Большинский, Б. А. Лысиков, А. А. Каплюхин. – Севастополь : Вебер, 2003. – 284 с. – Текст : непосредственный

9 Галигузова, Е. В. Сравнение реляционных и нереляционных СУБД / Е. В. Галигузова, Ю. Е. Илларионова. – Текст : непосредственный // Символ науки. – 2023. – № 1-2. – С. 14–17.

10 Голомолзин, В. И. Мощность и сроки службы шахт / В. И. Голомолзин. – Москва : Гос. науч.-техническое изд-во литературы по горному делу, 1961. – С. 158–160. – Текст : непосредственный.

11 Гончарова, Н. В. Использование информационной базы данных ГИС ARCGIS для обоснования качества угольной продукции / Н. В. Гончарова, А. Н. Дворникова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 40–45.

12 Гоффарт, Т. В. Практические задачи обеспечения безопасности в угольных шахтах / Т. В. Гоффарт, А. А. Васильев. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 138–145.

13 Григоренко, Л. А. Организация хранения данных в базе распределенного реестра. – Текст : непосредственный / Л. А. Григоренко, Д. А. Романовская. – Текст : непосредственный // Нацразвитие. Наука и образование. – 2023. – № 3 (15). – С. 49–51.

14 Динамическая компиляция SQL-запросов для СУБД PostgreSQL / Бучацкий Р. А., Шарыгин Е. Ю., Скворцов Л. В. и др. – Текст : непосредственный // Труды ИСП РАН. – 2016. – № 28 (6). – С. 37–48.

15 Ефимов, И. Н. Моделирование транспортных потоков с помощью сетевых задач / И. Н. Ефимов, А. В. Деревнин. – Текст : непосредственный // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2011. – № 3. – С. 142–145.

16 Жигалов, Б. К. О применении методов теории графов для анализа геометрических структур в машиностроении / Б. К. Жигалов – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 263. – С. 115–120.

17 Забурдяев, В. С. Метанообильные шахты: добыча угля, газовыделение, метановая опасность / В. С. Забурдяев, О. Н. Малинникова, В. А. Трофимов . –

Текст : непосредственный // Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук. – Калуга : Манускрипт, 2020. – 334 с.

18 Загребин, Г. И. Применение генератора геометрии QGIS при геоинформационном тематическом картографировании / Г. И. Загребин, Н. В. Загребина – Текст : непосредственный // Геоинформационное картографирование в регионах России : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25–28 апреля 2024 года. – Воронеж : Цифровая полиграфия, 2024. – С. 54–58.

19 Загребин, Г. И. Программные решения реализации оптимальных картографических проекций мультимасштабных карт для ГИС и веб-картографирования / Г. И. Загребин – Текст : непосредственный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 395–407.

20 Замятин, А. В. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли / А. В. Замятин, Н. Г. Марков. – Текст : непосредственный. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.

21 Зольников, И. Д. Введение в геоинформационные системы и дистанционное зондирование : учебно-методическое пособие / И. Д. Зольников, Н. В. Глушкова. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2023. – 88 с. – Текст : непосредственный.

22 Зыков, А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. – Москва : Наука, 1987. – 384 с. – Текст : непосредственный

23 Иванов, А. О. Геометрия расстояний Хаусдорфа и Громова-Хаусдорфа: случай компактов / А. О. Иванов, А. А. Тужилин ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Механико-математический факультет, Кафедра дифференциальной геометрии и приложений. – Москва : Издательство Попечительского совета механико-математического факультета МГУ, 2017. – 111 с. – Текст : непосредственный.

24 Кадыркулова, Н. К. Визуализация картографических данных в среде ГИС / Н. К. Кадыркулова, Э. О. Гапырова. – Текст : непосредственный // Современные научные знания : сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 17 апреля 2023 года. – Пенза : Наука и Просвещение, 2023. – С. 52–55.

25 Казаков, К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов. – Текст : непосредственный // Труды ИСП РАН. – 2016. – С. 241–294.

26 Кайралапов, А. М. Поддержание целостности баз данных / А. М. Кайралапов. – Текст : непосредственный // Матрица научного познания. – 2023. – № 2-2. – С. 32–37.

27 Каледина, И. О. Компьютерное моделирование шахтных вентиляционных сетей : методические указания / И. О. Каледина, С. Б. Романченко, В. А. Трофимов – Москва : МГГУ, 2004. – 72 с. – Текст : непосредственный.

28 Карпик, А. П. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.

29 Киселев, Д. Ю. Структурный анализ потоков данных (Data Flow Diagrams – DFD) / Д. Ю. Киселев, Ю. В. Киселев, В. Д. Макарьев. – Самара : СГАУ, 2014. – 12 с. – Текст : непосредственный.

30 Клековкин, Г. А. Геометрическая теория графов : учебное пособие для вузов / Г. А. Клековкин, Л. П. Коннова, В. В. Коннов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2026. – 165 с. – Текст : непосредственный.

31 Кологривко, А. А. Маркшейдерское дело. Подземные горные работы / А. А. Кологривко. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2011. – 412 с. – Текст : непосредственный.

32 Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов, В. Н. Костеренко и др. – Москва : Горное дело ; Кимерийский центр, 2011. – 160 с. – Текст : непосредственный.

33 Копылов, Ю. Р. Основы компьютерных цифровых технологий машиностроения : учебник / Ю. Р. Копылов. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 496 с. – Текст : непосредственный.

34 Куприянов, А. О. Цифровое моделирование при подземных геодезических работах / А. О. Куприянов. – Текст : непосредственный // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – № 4 (12). – С. 57–65.

35 Куракина, Н. И. Организация и геоанализ цифровых данных : учебное пособие / Н. И. Куракина, Н. В. Орлова ; Минобрнауки России. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. – 53 с. – Текст : непосредственный.

36 Куценко, И. Л. Оптимизация запросов в реляционных базах данных / И. Л. Куценко. – Текст : непосредственный // Евразийский Союз Ученых. – 2018. – №11-2 (56). – С. 52–58.

37 Лапин, С. Э. К разработке геоинформационной панели безопасности подземных горных работ на основе связанных решений по прогнозу развития напряженного состояния массива горных пород и газовых потоков / С. Э. Лапин, В. Б. Писецкий. – Текст : непосредственный // Чебышевский сборник. – 2017. – № 3 (63). – С. 350–362.

38 Лапин, С. Э. Методология и практика построения геоинформационной системы ГИС МИКОН прогноза динамики состояния горного массива в процессах подземной разработки угольного месторождения / С. Э. Лапин – Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11. – С. 60–66.

39 Львова, Л. В. Геометрия. Преобразования и построения : учебное пособие / Л. В. Львова. – Барнаул : АлтГПУ, 2016. – 124 с. – Текст : непосредственный.

40 Маврин, А. С. Типы расчетных сеток и способы хранения информации о них / А. С. Маврин – Текст : электронный // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. – 2018. – № 3. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/tipy-raschetnyh-setok-i-sposoby-hraneniya-informatsii-o-nih>.

41 Макаров, И. Н. Формирование оптимальной топологии инфраструктурной сети агломерации на основе взаимодействия рельсового и колесного транспорта с использованием инструментария дискретной математики и теории графов / И. Н. Макаров – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 219–230. – DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-219-230.

42 Маликов, А. В. Управление иерархическими данными в реляционных базах данных / А. В. Маликов – Текст : непосредственный // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2009. – № 2. – С. 3–8.

43 Матвеев, С. И. Графы и навигация / С. И. Матвеев, И. Н. Розенберг. – Москва : ВИНТИ РАН, 2011. – 193 с. – Текст : непосредственный.

44 Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов и др. – Текст : непосредственный // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.

45 Метрики качества моделей бинарной классификации – URL: <https://loginom.ru/blog/classification-quality> – Текст : электронный.

46 Моделирование аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий / Д. Ю. Палеев, В. В. Аксенов, О. Ю. Лукашов [и др.]. – Текст : электронный // ГИАБ. – 2015. – № S7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-aerogazodinamicheskikh-protsessov-v-ventilyatsionnyh-setyah-sovremennyh-gornodobyvayuschih-predpriyatij>.

47 Насибуллина, Т. В. Решения для подземной шахтной навигации в кризисных ситуациях / Т. В. Насибуллина, О. Ю. Лукашов – Текст : непосредственный // Уголь. – 2020. – № 4 (1129). – С. 29–32. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-4-00-00>.

48 Основные проблемы повышения безопасности и эффективности разработки угольных пластов подземным способом / В. С. Забурдяев, О. Н. Малинникова,

В. А. Трофимов [и др.] – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10, Специальный выпуск 30. – С. 3–16. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-30-3-16.

49 Основы геоинформатики : в 2 т. : учебное пособие для вузов / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарёв, В. С. Тикунов и др., под ред. В. С. Тикунова. – Москва : Академия, 2004. – 352 с. – Текст : непосредственный.

50 Очистка полуструктурированных и неструктурированных данных дистанционного зондирования Земли / А. Д. Хомоненко, А. Б. Кириенко, С. Е. Злобин, Д. Давыдова – Текст : непосредственный // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 4 (40). – С. 67–77. – DOI: 10.20295/2413-2527-2024-440-67-77.

51 Палеев, Д. Ю. Совершенствование подготовки планов ликвидации аварии с использованием программных комплексов "Вентиляция", "Ударная волна" и "Водоснабжение" / Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 6. – С. 227–237.

52 Радченко, Л. К. Навигационная картография : учебное пособие / Л. К. Радченко – Текст : непосредственный. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 69 с.

53 Решение для формата файлов ГИС – URL: <https://products.aspose.app/gis/ru>. – Текст : электронный.

54 Русских, В. В. Параметры взрывозащитных устройств для гашения ударных воздушных волн при подземной добыче руд : монография / В. В. Русских, А. В. Яворский, Е. А. Яворская. – Донецк : Национальный горный университет, 2012. – 93 с. – Текст : непосредственный.

55 Самардак, А. С. Геоинформационные системы: учеб. пособие / А. С. Самардак. – Владивосток : Дальневосточный государственный университет тихоокеанский институт дистанционного образования и технологий, 2005. – 123 с. – Текст : непосредственный.

56 Сарайский, Ю. Н. Геоинформационные основы навигации : учеб. пособие / Ю. Н. Сарайский. – Университет ГА. Санкт-Петербург, 2010. – 250 с. – Текст : непосредственный.

57 Сарнацкий, Р. Б. Расчет проветривания сети подземных производственных помещений / Р. Б. Сарнацкий, О. Ю. Лукашов, А. Ю. Крайнов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, Томск, 21–25 сентября 2016 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016. – С. 435–436.

58 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.

59 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.

60 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.

61 Синишина Е. А. Построение структурированных сеток / Е. А. Синишина, В. Д. Гольдин. – Текст : непосредственный // Все грани математики и механики : сборник статей Всероссийской молодежной научной конференции (Томск, 12–15 мая 2020 г.) / под ред. Л. В. Гензе. – Томск : НТЛ, 2020. – 140 с.

62 Смолич, С. В. Маркшейдерское дело : учебное пособие : в 2 ч. / С. В. Смолич, Б. А. Просекин. – Чита : ЗабГУ, 2019–2022. Ч. 2. – 2022. – 182 с.

63 Смольянинов, Ю. А. Пространственный анализ в аванпроекте скоростной транспортной системы : учеб. пособие / Ю. А. Смольянинов. – Москва : МАИ, 2025. – 86 с. – Текст : непосредственный.

64 Соловьев, А. Н. Основы геодезии и топографии / А. Н. Соловьев. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 240 с. – Текст : непосредственный

65 Сохранных В. А. Геоинформационное моделирование речной сети на основе векторных данных с неопределенным направлением линий водотоков / В. А. Сохранных, Т. Е. Самсонов. – Текст : электронный // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова – Москва : КДУ ; Добросвет, 2022. – С. 115–120. – URL: https://www.researchgate.net/publication/365775407_Capabilities_of_urban_activity_analysis_based_on_network_models.

66 Сравнительный анализ форматов сериализации и передачи данных JSON, XML, CBOR и GPB / В. Д. Шульман, В. В. Шабанов, П. А. Сухов, А. О. Чунихин – Текст : электронный // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 7. – С. 171. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-formatov-serializatsii-i-peredachi-dannyh-json-xml-cbor-i-gpb>.

67 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.

68 Степанов, Ю. А. Компьютерное моделирование в задаче обеспечения безопасности ведения горных работ / Ю. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 67–72.

69 Степанов, Ю. А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий / Ю. А. Степанов. – Текст : непосредственный // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (104). – С. 118–122.

70 Тарутина, А. Е. Экономическая безопасность России : учеб.-метод. пособие / А. Е. Тарутина. – Калининград : КГТУ, 2023. – 91 с. – Текст : непосредственный.

71 Техническая документация. Программа для ЭВМ «Вентиляция» версия 2 – URL: <https://minesoft.ru/userfiles/documentation/cooling2usermanual.pdf> (дата обращения: 04.02.2026). – Текст : электронный.

72 Чупин, В. Р. Теория графов и моделирование объектов городского хозяйства / Чупин В. Р., Майзель И. В., Чупин Р. В. – Иркутск : ИРНИТУ, 2020. – 208 с. – Текст : непосредственный.

73 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>.

74 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 года. – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2025. – С. 136–138.

75 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.

76 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.

77 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.

78 Шабаров, А. Н. Обеспечение геодинамической безопасности при подземной разработке месторождений / А. Н. Шабаров, С. В. Цирель – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2017. – № 9 – С. 65–70.

79 Шекхар, Ш. Основы пространственных баз данных: [учебное пособие]: пер. с англ. / Шаши Шекхар, Санжей Чаула. – Москва : Кудиц-образ, 2004. – 330 с. – Текст : непосредственный.

80 Яглом, И. М. Геометрические преобразования : в 2 т. Т. 1. Движения и преобразования подобия / И. М. Яглом. – 2-е изд. – Москва : ЛЕНАНД, 2018. – 288 с. – Текст : непосредственный.

81 Яковлев, А. М. Практическое применение геоинформационных технологий для моделирования качественных показателей комплексных руд / А. М. Яковлев, Р. С. Титов, В. Д. Кантемиров. – Текст : непосредственный // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сборник докладов, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 229–234.

82 A (sub) graph isomorphism algorithm for matching large graphs / L. P. Cordella, P. Foggia, C. Sansone, M. Vento. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Oct. 2004. – Vol. 26, no. 10. – Pp. 1367–1372. – DOI: 10.1109/TPAMI.2004.75.

83 Abu-Abed, F. N. Development of Three-Dimensional Models of Mining Industry Objects / F. N. Abu-Abed. – Текст : непосредственный // E3s web of conferences : The Second Interregional Conference, Kemerovo, 21–23 сентября 2021 года. – Vol. 278. – P. 01002. – DOI 10.1051/e3sconf/202127801002.

84 Adrienko, N. Spatial Generalization and Aggregation of Massive Movement Data / N. Adrienko, G. Adrienko – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – Feb. 2011. – Vol. 17, no. 2. – Pp. 205–219. – DOI: 10.1109/TVCG.2010.44.

85 Alt, H. Computing the Fréchet distance between two polygonal curves / H. Alt, M. Godau. – Текст : непосредственный // International Journal of Computational Geometry & Applications, 1995, – Vol. 5, No. 1–2ю – Pp. 75–91. – DOI: 10.1142/S0218195995000064.

86 Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points: – URL: <https://loginom.ru/blog/classification-quality>. – Текст : электронный.

87 Chang S. Data structures and algorithms / S. Chang – Текст : непосредственный // Software Engineering and Knowledge Engineering – 2003. – Vol. 13. – 360 p.

88 Conflation. – URL: <https://atlas.co/gis-use-cases/conflation>. – Текст : электронный.

89 ConflEX. – URL: <https://citygategis.com/products/conflex>. – Текст : электронный.

90 Diamond, L. Vector Formats and Sources / L. Diamond. – Текст : электронный // The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge (4th Quarter 2019 Edition), John P. Wilson (ed.). DOI: 10.22224/gistbok/2019.4.8. – URL: <https://gistbok-ltb.ucgis.org/34/concept/10532>.

91 Feature Compare (Data Management) – URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/feature-compare.htm>. – Текст : электронный.

92 Gadi, H. K. Road Networks Matching Supercharged With Embeddings / H. K. Gadi, L. Liu, L. Meng. – Текст : электронный // In Proceedings of the 7th ACM SIGSPATIAL International Workshop on AI for Geographic Knowledge Discovery (GeoAI '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 27–37. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3687123.3698283>.

93 Gross, J. L. Graph Theory and Its Applications (3rd ed.) / J. L. Gross, J. Yellen, M. Anderson – Текст : электронный // CRC Press Taylor & Francis Group, 2019. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429425134>. – URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780429757099_A35628491/preview-9780429757099_A35628491.pdf.

94 Hickmann, K. A Path-Based Distance for Street Map Comparison / K. Hickmann, C. Wenk, B. Fasy – Текст : электронный // ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems. – DOI: 10.1145/2729977. URL: https://www.researchgate.net/publication/256981648_A_Path-Based_Distance_for_Street_Map_Comparison.

95 Hypothesis testing procedure for binary and multi-class F1 -scores in the paired design / K. Takahashi, K. Yamamoto, A. Kuchiba [и др.] – Текст : электронный // Statistics in Medicine. – 2023. – 42 (17). – pp. 4177–4192. DOI: [doi:10.1002/sim.9853](https://doi.org/10.1002/sim.9853). – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11483486/>.

96 JOSM/Plugins/Conflation – URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/JOSM/Plugins/Conflation>. – Текст : электронный.

97 Knudsen, T. Automated Change Detection for Updates of Digital Map Databases / T. Knudsen, B. P. Olsen – Текст : электронный // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2003. – №69 (11). – pp. 1289–1296. – URL: <https://isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm2/papers/193.pdf>.

98 Li, Z. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology (1st ed.). / Li, Z., Zhu, C., & Gold, C. – Текст : электронный // CRC Press. URL – <https://doi.org/10.1201/9780203357132>.

99 Nguyen, H. An Area Partitioning and Subgraph Growing (APSG) Approach to the Conflation of Road Networks / H. Nguyen, H. Jeong. – Текст : электронный // Road

Networks. Sensors (Basel). 22(4). – 2022. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8877969/>.

100 OSM Conflator – URL: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/OSM_Conflator. – Текст : электронный.

101 Ressler, J. Semantic Method of Conflation / J. Ressler, E. Freese, V. Boaten – Текст : электронный // Proceedings of the Terra Cognita Workshop, collocated with the 8th International Semantic Web Conference (ISWC-2009), Washington DC, USA, 518, Oct. 2009. – URL: https://ceur-ws.org/Vol-518/terra09_submission_3.pdf.

102 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.

103 Sitarz, M. Extending F1 Metric, Probabilistic Approach / M. Sitarz – Текст : электронный // Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning. – 2023. – Vol. 03. – P. 1025–1038. – URL: https://www.researchgate.net/publication/372087954_Extending_F1_Metric_Probabilistic_Approach.

104 Ullmann, J. R. An Algorithm for Subgraph Isomorphism Problem / J. R. Ullmann. – Текст : электронный // Journal of the Association for Computing Machinery. – 1976. – Vol 23 (1). – P. 31–42. – URL: <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/321921.321925>

105 Werman, M. A distance metric for multidimensional histograms / M. Werman, S. Peleg, A. Rosenfeld. – Текст : электронный // Computer Vision, Graphics, and Image Processing – 1985. – Vol. 32 (3). – URL: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90055-6).

106 Yingqiao, W. Research on territorial spatial planning based on data mining and geographic information visualization / W. Yingqiao – Текст : электронный // Nonlinear Engineering. – 2025. – №14(1). – URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/nleng-2025-0090/html>.

107 Yue, Cao. Collaborative Control Digital Twin Technology for Mines / Yue Cao, Yuhang Zhong — Текст : электронный // Proceedings of the 2025 4th International Conference on Engineering Management and Information Science (EMIS 2025). – Atlantis Press, 2025. – P. 96–104. – (Advances in Computer Science Research). – URL: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-736-6_13.

108 Zhang, M. Automatic and Accurate Conflation of Different Road-Network Vector Data towards Multi-Modal Navigation / M. Zhang, W., Yao, L. Meng – Текст : электронный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2016; – 5(5):68. – URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi5050068>.