

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РФ**

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСиС»**

На правах рукописи

Конов Илья Сергеевич

Разработка цифровой динамической модели
транспортной среды карьера на основе телеметрической и гео-
пространственной информации
25.00.35 – «Геоинформатика»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, заведующий кафедрой
автоматизированных систем управления Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Темкин Игорь Олегович

Москва, 2021

Содержание

Введение.....	4
Глава 1 Анализ горно-транспортного комплекса и особенностей геоинформационных потоков	10
1.1 История развития систем управления горно-транспортного комплекса	10
1.2 Особенности функционирования геоинформации в современных системах.	19
1.3. Обзор научных работ по тематике диссертации	22
1.4 Технологии получения геоинформации в современных системах ГТК.....	26
1.5 Выводы по главе 1	36
Глава 2. Динамическая цифровая модель карьерных дорог.....	37
2.1 Информационная база для создание цифровой модели карьера .	37
2.2. Структура цифровой модели карьерных дорог	40
2.3. Связь традиционных графовых моделей с цифровой моделью дорожного полотна	50
2.4. Алгоритмы решения задачи.....	53
2.5 Выводы по главе 2	59
Глава 3. Детальное описание подсистем построения карты дорог.....	60
3.1. Формирование секторов.....	60
3.2. Выделение границ дорожного полотна	66
3.3 Замощение дорожного полотна.....	85
3.4. Построение транспортных зон	93
3.5 Выводы по главе 3	95
Глава 4. Разработка программного комплекса и экспериментальное исследование его работоспособности.....	97
4.1. Методика обработки данных при построении цифровой модели	97

4.2. Инструменты обработки и анализа данных	101
4.3. Результаты вычислительных экспериментов.....	106
4.4 Даталогическое описание информационной базы цифровой модели	121
4.5 Выводы по главе 4	125
Заключение	127
Список литературы	129

Введение

Актуальность работы. Геоинформационные системы уже не одно десятилетие успешно применяются в горной промышленности в качестве инструмента проектирования и планирования горных работ. В последние годы наблюдается существенный прогресс в области разработки и внедрения автоматизированных систем управления горно-технологическими процессами, который достигнут за счет новых программно-технических решений, позволяющих регистрировать, обрабатывать и анализировать большие объемы гео-пространственных данных. Мировым промышленным трендом в технологиях открытых горных работ сегодня является использование роботизированной или полностью автономной карьерной техники для транспортировки горной массы. Постоянное движение по всей производственной зоне предприятия этих машин, снабженных набором разнотипных датчиков, позволяет собирать информацию не только об их техническом состоянии, но и об окружающей технологической среде. Резкое увеличение объемов пространственно-временных данных, поступающих в диспетчерскую систему через средства телеметрии, открывает новые возможности по повышению эффективности и безопасности управления горно-технологическими процессами. Однако, реализация этих возможностей требует наличия достаточно точных цифровых моделей технологической среды, необходимых, в частности, для безопасной эксплуатации беспилотного горного транспорта.

В последние годы цифровизация и интеллектуализация промышленных предприятий с дискретным производственным процессом напрямую связана с технологиями цифрового дублирования. Развитие современных технологий регистрации и передачи данных, появление новых подходов к обработке разнородных гео-пространственных данных, создает предпосылки для применения технологии цифрового дублирования при управлении сложными горнопромышленными объектами, функционирующими в режиме непрерывного

производственного цикла. В этой связи создание цифровых моделей транспортно-технологических зон карьера, в первую очередь, технологических дорог, за счет интеграции разнородной пространственной и телеметрической информации, является актуальной научной задачей, решение которой обеспечивает возможность безопасной эксплуатации автономных объектов горнотранспортного комплекса при осуществлении открытых горных работ.

Целью настоящего исследования настоящего исследования является разработка и апробация процесса построения цифровых динамических моделей транспортных зон карьера на основе интеграции (комплексирования) разнородных массивов пространственных и телеметрических данных.

Поставленная цель достигается решением следующих основных **задач**:

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести анализ существующих технических средств сбора и передачи данных, а также методов обработки и анализа гео-информации, связанной с функционированием горнотранспортного комплекса (ГТК).
- Разработать структуру цифровой модели, включающую основные атрибуты для описания транспортных зон карьера, и определяющую связи между этими атрибутами.
- Разработать правила фрагментации транспортных зон карьера и алгоритм определения граничных точек этих зон (окопирование объектов) с удобным визуальным представлением результатов.
- Провести экспериментальные исследования возможности использования различных геометрических примитивов (треугольники, квадраты, многоугольники) в качестве атомарных элементов, составляющих основу динамической цифровой модели карьерных дорог, и осуществить сравнительный анализ вариантов замощения.
- Разработать прототип цифровой модели технологических дорог карьера и представить результаты автоматического формирования трасс для перемещения беспилотных транспортных средств (автосамосвалов-роботов).

- Представить рекомендации по практическому использованию разработанной методики.

Основная идея работы заключается в описании транспортно-технологических зон карьера при помощи набора связанных между собой атомарных элементов (геометрических примитивов), каждый из которых описывается набором значений в пространстве информационных атрибутов (в том числе координат), описывающих технико-технологические свойства объектов транспортно-технологической инфраструктуры.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- Разработана цифровая модель, которая базируется на использовании атомарных элементов различной геометрической формы, позволяющая оперативно вычислять и динамически обновлять количественные оценки состояния транспортно-технологических зон карьера с требуемой степенью детализации.

- Разработана процедура построения цифровой модели, основанная на интеграции разнородной условно-стационарной пространственной (результаты маркшейдерских съемок или космического мониторинга) и оперативной телеметрической гео-информации, отличающийся возможностью идентификации любых фрагментов транспортных зон (технологические дороги, перекрестки, призабойные экскаваторные площадки, площадки перегрузки - разгрузки), и состоящая из двух частей:

- определение граничных точек и восстановление контура моделируемой технологической зоны (оконтуривание);

- заполнение замкнутого пространства атомарными элементами (геометрическими примитивами) с координатной привязкой опорных точек примитивов.

Научная новизна результатов исследования:

- Сформирована структура базы данных атомарных элементов, объединяющая гео-пространственные, а также качественные и количественные характеристики транспортно-технологических зон карьера или их фрагментов.

- Предложена оригинальная процедура построения трассы (в рамках технологической зоны) для движения автономного транспортного средства, в которой реализуется механизм поиска оптимальной траектории движения на базе цифровой динамической модели.

Теоретическое значение диссертации заключается в разработке нового подхода к использованию гео-пространственных данных для моделирования инфраструктурных объектов карьера и метода построения динамической цифровой модели транспортно-технологических зон карьера.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что:

- создан метод, который может применяться при проектировании и разработке цифровых платформ управления роботизированными и автономными ГТК;

- разработаны алгоритмы и соответствующие программные модули, которые могут быть использованы в рамках существующих сегодня АСУ ГТК для оперативного уточнения пространственных характеристик транспортных зон карьеров.

Обоснованность и достоверность.

основывается на корректном использовании методов системного анализа, теоретических основ геоинформационного анализа, интеллектуальных методов обработки данных и поиска оптимальных решений, а также на значительном объеме вычислительных экспериментов, проведенных с использованием реальных данных инфраструктуры карьеров на территории РФ.

О надежности результатов свидетельствует их повторяемость в процессе тестирования разработанных программных средств.

Методология и методы исследования.

Научные положений, выводов и рекомендаций работы основывается на корректном использовании методов системного анализа, теоретических основ геоинформатики, интеллектуальных методов обработки анализа данных и оптимизации, а также на значительном объеме вычислительных экспериментов, выполненных на исторических данных.

Степень разработанности исследования. Исследования в области геоинформационных технологий велись, начиная с 50-х годов прошлого века. Они реализовывались в Швеции, Англии, США и Канаде, а начиная с конца 60-х годов и в России. Важный вклад в развитие данной области внесли Т. Hagerstrand, W. Garrison, E. Ullman, I. McNarg, G. Langran, M. Wachowicz, M.F. Worboys, M. Yuan, W. Shi, C. Zhu, В. Г. Гитис, А.В. Кошкарев, А.А. Майоров, С.В. Пьянков, И.Н. Розенберг, С.К. Дулин, В.П. Савиных, В.Я. Цветков Н. В. Мельников, К. Н. Трубецкой, В.М. Аленичев, С.В. Корнилов, А.В. Матерухин и др.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на форумах и конференциях. Среди:

- Международная научная-практическая конференция 2017«Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика»;
- XXVI Международный научный симпозиум в рамках «Недели горняка-2018»;
- XXVII Международный научный симпозиум в рамках «Недели горняка-2019»;
- 23 Международная конференция по базам знаний и интеллектуальным информационным и инженерным системам(KES2019: 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. September 4-6, 2019, Budapest, Hungary: «Tradeoff-based architecting of the software system for autonomous robotized);
- 5-й Международной конференции по нечетким системам и интеллектуальному анализу данных (официально отмеченный, как один из лучших докладов конференции): FSDM2019: The 5th International Conference on Fuzzy Systems and Data Mining. October 18-21, 2019, Kitakyushu City;
- Международная научная конференция 2ND SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE OF RUSSIAN AND CROATIAN SCIENTISTS IN DUBROVNIK 2020;

- XXVIII Международный научный симпозиум в рамках «Недели горняка-2020»; Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Цифровые технологии в горном деле».

Реализация и внедрение результатов работы:

Результаты работы использованы при подготовке отчетов по гранту РНФ № 19–17–00184 «Разработка методов построения и моделей функционирования цифровой платформы управления транспортно-технологическими процессами при добыче минерального сырья», а также учтены компанией АО «Вист групп» при разработке специализированного программного обеспечения АСУ ГТК.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 7 индексируются в базах Web of Science/Scopus и 3 печатные работы в прочих изданиях.

Получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (№2019663715, №2019663713).

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список использованных источников. Объем работы составляет 139 стр., в том числе основное содержание – 128 стр., 66 рисунков и 24 таблиц, список литературы из 104 наименований.

Глава 1. Анализ горно-транспортного комплекса и особенностей геоинформационных потоков

1.1 История развития систем управления горнотранспортного комплекса

Процесс добычи полезных ископаемых является основой современного общества. Сам процесс добычи активно развивается с каменного века до настоящего дня. В настоящее время в процесс добычи включены не только извлечение геологических материалов и поиск месторождений, но и анализ развития и прибыльности месторождения, рекультивации земель и процесс закрытия месторождения. Современная добыча это целый комплекс мер по движению руды и отходов, направленных на эффективность и экологичность всех процессов.

Можно выделить два класса полезных ископаемых: нерудные полезные ископаемые или неметаллические полезные ископаемые, применяемые в промышленности или в строительстве в естественном виде (газ, нефть, уголь).

Рудные полезные ископаемые -металлы и минералы, чаще всего применяется в тяжёлой промышленности. Рудные полезные ископаемые находятся в земной коре в виде россыпей, гнёзд, жил, штоков. Большая концентраций полезных ископаемых формируют месторождения.

Выделяют два основных способа добычи полезных ископаемых: подземная добыча и добыча открытым способом. Подземная добыча выемка руды или других типов полезных ископаемых с применением искусственных полостей, без нарушения целостности поверхности.

Открытый способ направлен на удаление верхней части поверхности, под которой находятся залежи полезных ископаемых, разреза. Карьер – это тип разреза, в котором из земли извлекаются полезные ископаемые, в виде горной массы. Именно открытым способом добывается большая часть полезных

ископаемых за исключением природного газа и нефти. Схематически процесс добычи и перемещения горной массы представлен на рисунке 1.1

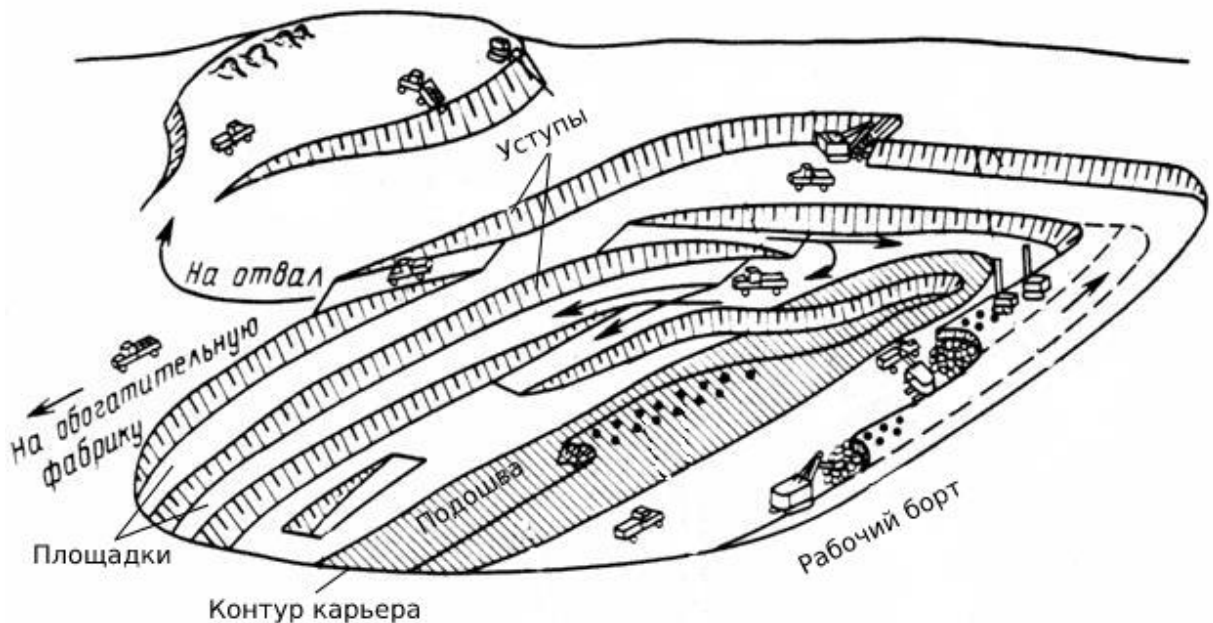


Рисунок 1.1 – Типовое графическое изображение карьера.[102]

В большинстве открытых горных работ вначале формируется вскрышная порода, путём буровзрывных работ, потом с помощью тяжелого оборудования, перемещается порода для дальнейшего извлечения полезных ископаемых.

Внутри карьера можно выделить: стационарные объекты (капитальные здания, инженерные сооружения), мобильные объекты (грейдеры, самосвалы), инфраструктурные объекты (зоны заправки, зоны разгрузки), со временем только стационарные объекты не изменяют своё расположение внутри карьера, остальные объекты могут изменяться в процессе развития карьера.

Под горнодобывающим предприятием будем понимать – организацию, которая осуществляет разведывание или разработку месторождений полезных ископаемых. С учётом специфики работы и непрерывным изменением карьера, возникает потребность использование специализированного транспортного оборудования (мобильных объектов). Классификация транспортного оборудования дана на рисунке (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Классификация транспортного оборудования

Транспортное оборудование (см. рисунок 1.2) можно разделить на следующие виды: обслуживающий и вспомогательный транспорт, выемочные средства, ковшовые погрузчики, добывающее оборудование, транспортировочное оборудование. При определённых ситуациях применяются железнодорожный рельсовый транспорт.

Многие транспортные объекты, оснащены специализированным клиент-серверным оборудованием (навигационными системами, датчиками и системами диагностики, оборудованием, обеспечивающим передачу данных).

Данные, с данного оборудования, позволяют отслеживать местоположение транспортных средств и состояние. Что влияет на оперативные решения.

Если рассматривать горное предприятие и процесс добычи, как информационную систему можно выделить три уровня, уровень управления производством (ERP), уровень горнотранспортного комплекса, состоящий из двух под уровней (рисунок 1.3).

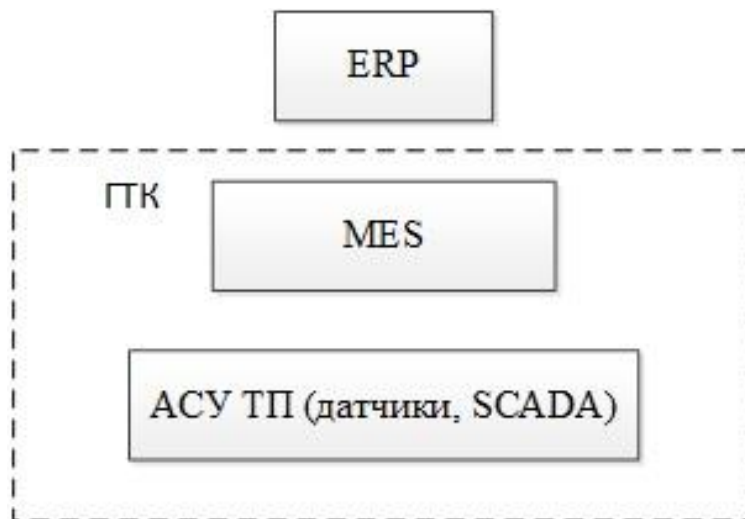


Рисунок 1.3 – Информационная система управления горным предприятием

Первый уровень (нижний уровень) – это система датчиков, которая объединяет информационную систему с производством. Одним из компонентов этой системы является использование специальных программных пакетов для мониторинга и сбора данных (SCADA), которая отвечает за сбор, синхронизацию и передачу данных. Базирующимся на специализированных. Второй уровень (средний уровень) оптимизации параметров рабочего процесса системы (MES), Третий уровень (верхний) – ERP системы или системы планирования ресурсов предприятия. Они отвечают за управление финансами, активами и издержками.

Нижние уровни АСУ ИП и MES формирует автоматизированную систему управления ГТК. Что в свою очередь АСУ ГТК делается на следующие подсистемы, указанные на рисунке ниже (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Подсистемы АСУ ГТК.

Основной целью системой управления горнотранспортным комплекс является выполнение оперативного диспетчерского управления мобильными объектами.

Выделяют следующие функции системы управления ГТК:

- сбор статистики и оценка эффективности по всем видам работ;
- управление техническим обслуживанием и ремонтом, в том числе прогнозирование ремонтов;
- оптимизация и автоматическая диспетчеризация;
- управление потреблением топлива;
- контроль состояния технологической среды;
- наведение с помощью навигации;
- управление ходимостью шин.

Особенно выделяют, диспетчерское управления техникой, который делится на две части: создание и изменение маршрутов движения мобильных объектов и процесс планирование, организации плана нарядов. На рисунке 1.5 представлена оборудование диспетчерского управления горнотранспортного комплекса.

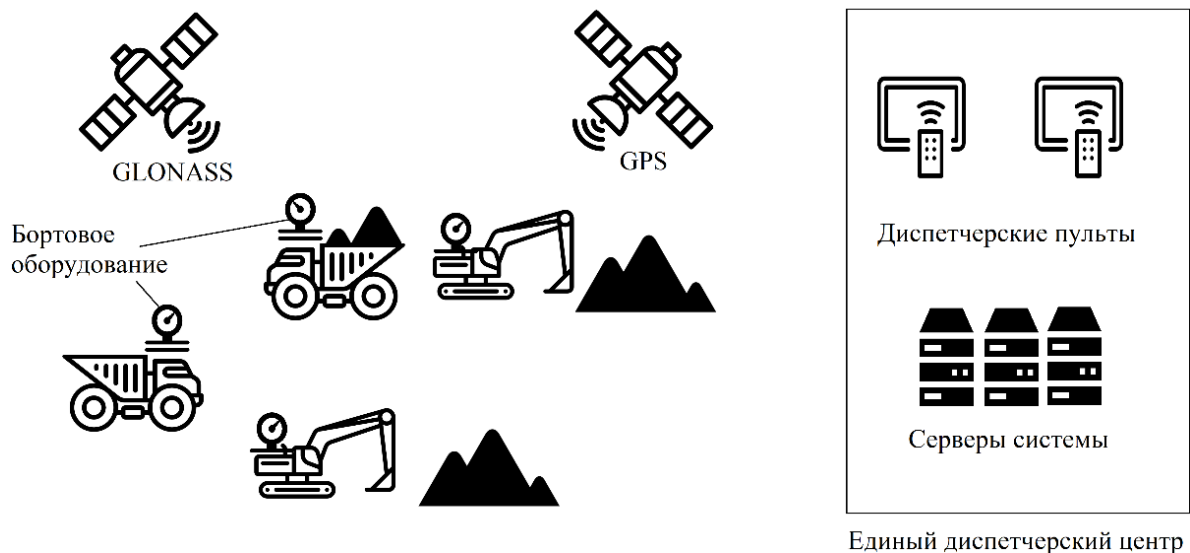


Рисунок 1.5 – Схематичное представление диспетчерского управления горнотранспортного комплекса

Диспетчерский центр осуществляет сбор информации, передаваемой бортовым оборудованием, установленном на мобильных объектах (см. рисунок 1.5). На основе данной информации диспетчерский центр контролируют состояние и процесс работы техники, в режиме реального времени принимая оперативные управленческие решения.

В данной работе рассматривается обобщенная структура горнотранспортного комплекса. За основу геоинформационной модели взяты данные таких ГТК как «Нюрбинский» ГОК и АК «АЛРОСА», а также «Стойленский горно-обогатительный комбинат» (СГОК). В указанных ГТК можно выделить следующие элементы систем управления горнотранспортным комплексом:

- бортовые технические средства, установленные на мобильном оборудовании;
- система радиосвязи для передачи данных в режиме реального времени;
- компьютерное оборудование, включая серверы и рабочие станции пользователей;
- специальное программное обеспечение мониторинга и диспетчерского управления горнотранспортным оборудованием, ведения базы данных,

указанные элементы являются общими для любой системы ГТК и относятся к ключевым элементам её функционирования.

Выделяют следующий функционал типовой системы управления ГТК:

- автоматизация сбора и представления информации о местоположении и состоянии горного и транспортного оборудования для диспетчерского управления комплексом;
- автоматическая оптимальная диспетчеризация экскаваторно-автомобильного комплекса;
- управление полнотой загрузки автосамосвалов;
- контроль соблюдения маршрутов и скорости движения автосамосвалов;
- контроль отклонения технологического процесса от заданных параметров и режимов;
- мониторинг технического состояния и обслуживания оборудования;
- мониторинг эксплуатации шин;
- оперативный и накопительный учет работы оборудования и карьера в целом и др.

Так же выделяют мобильные и стационарные объекты. К стационарным объектам относятся справочные станции, зоны выемочно-погрузочных работ, хозяйственные и вспомогательные здания, т.е. те объекты, функционал и позиция которых, мало изменяется или совсем не изменяется в течении продолжительного периода времени.

К мобильным объектам управления относят:

- буровые станки;
- зарядные машины;
- выемочно-погрузочное оборудование (экскаваторы, бульдозеры, погрузчики);
- технологический автотранспорт;
- технологический железнодорожный транспорт;
- автозаправщики;
- дорожно-строительные машины;

- вспомогательный и хозяйственный автотранспортные средства.

Процесс добычи открытым способом характеризуется рядом особенностей, обуславливающих сложность построения систем управления горными работами в карьерах:

1. В отличие от многих промышленных объектов при управлении технологическими процессами в карьерах трудно сформулировать и строго формально определить цель функционирования объекта.

2. Критерии оптимальности различных технологических процессов, а также процессов, вызванных воздействием на природную среду на всех этапах ведения горных работ, достаточно специфичны, существенно различаются по способам описания и, как правило, противоречивы.

3. Вне зависимости от уровня рассмотрения проблемы (отдельная производственная операция, локальный технологический процесс, комплексная технология), объект управления характеризуется пространственной распределенностью важнейших параметров управления, а взаимосвязи между этими параметрами описываются нелинейными функциями и образуют сложную топологическую структуру, постоянно изменяющуюся во времени.

Кроме того, предсказание поведения основных параметров на основе традиционных моделей и методов прогноза практически невозможно из-за нелинейности, стохастичности и не стационарности процессов в системе «человек-технология-горный массив». Усложняет проблему также большая размерность решаемых задач. Следует дополнительно подчеркнуть, что в последние годы в горной промышленности наблюдается естественный процесс усложнения горно-геологических и климатических условий добычи. Добыча полезных ископаемых с каждым годом ведется на все больших глубинах, а это напрямую сказывается на эффективности и безопасности ведения горных работ. Разработки месторождений, как правило, ведутся в труднодоступных регионах с недостаточно развитой социальной инфраструктурой, что существенно усложняет участие человека в технологических процессах и создает проблемы поиска высококвалифицированного персонала.

В этой ситуации особую значимость приобретает дальнейшее развитие моделей управления и методов автоматизации, разработка и внедрение современных интеллектуальных средств и программных систем и создание на их основе новых технологий извлечения полезного ископаемого, в рамках которых горная техника частично или полностью работает без водителей и операторов. Движение от традиционных формы управления организаций работ при добыче полезных ископаемых открытым способом к интеллектуальному горному предприятию – сложный процесс, в котором можно выделить несколько исторических этапов:

1. Разработка систем автоматизированного управления работой карьера, в которых решение отдельных функциональных задач осуществлялось с использованием компьютерных методов оптимизации.

2. Разработка и применение датчиков контроля различных параметров, которые устанавливались на стационарные и динамические объекты в карьерах, а также систем контроля, сделавших возможным оперативное реагирование диспетчера на изменение технологических ситуаций.

3. Внедрение ГИС в качестве базового элемента диспетчерского управления, обеспечившего новые возможности визуализации управленческих процессов.

4. Создание на основе GPS – технологий комплексной системы контроля и управления с высокой степенью оперативности принятия решений.

5. Создание системы управления, включающей не только функции оперативной диспетчеризации, но и возможности дистанционного управления отдельными карьерными механизмами и агрегатами.

6. Разработка алгоритмов и программ автономного функционирования в автоматическом режиме экскаваторов, автосамосвалов, дорожно-строительных машин и т.д., то есть, разработка комплекса карьерных робототехнических устройств.

7. Создание локальных систем рационального (интеллектуального) взаимодействия агрегатов (динамических и стационарных объектов) в рамках отдельных технологических операций.

8. Создание комплексной системы, реально обеспечивающей безлюдную выемку полезных ископаемых в карьерах, на отдельных временных интервалах и в пределах определенных технологических циклов.

Очевидно, что в процессе перехода от этапа к этапу существенно изменялась программная среда реализации механизмов управления. Кроме того, в последние годы активно развивались принципы моделирования процессов и инструменты моделирования, без использования которых невозможно внедрять новые подходы к контролю и управлению. Одним из этапов развития ГТК можно считать внедрение цифровых двойников на основе информационных моделей с использованием геоинформатики.

Под цифровым двойником в данной работе подразумевается модель физического объекта, построенного с использованием цифровых данных, представляющих физический объект.

Применение цифровых двойников в производстве, в том числе в ГТК комплексе, способно повысить общую производительность комплекса и надёжность определённых частей ГТК, так же, как и в других отраслях промышленности [42].

1.2 Особенности функционирования геоинформации в современных системах.

Под геоинформационной системой (ГИС) в данной работе подразумевается система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информации о необходимых объектах. [1]

Современный термин геоинформационная система был выдвинут Роджером Томлинсоном в 1968 году, в научной статье «Географическая информационная система для регионального планирования».

Базово ГИС хранила и обрабатывали некоторые картографические материалы, либо данные наземной топографической и геодезической съёмки, с группой подсистем обрабатывающих, только свои данные.

Современные геоинформационные системы – это не только карты и объекты на них, но и совокупность бизнес-аналитики, способной помочь в принятии управленческих решений.

С помощью современных ГИС возможно проводить пространственный анализ по многим направлениям, таким как:

- анализ уклонов, в рамках которого определяется крутизна или уклон элементов рельефа. Определяющийся из операций соседства с использованием значений высот соседних объектов [80];

- топологическое моделирование, позволяющее определить смежность между объектами или близость. Данное моделирование базируется на анализе пространственных отношений в цифровых данных;

- гидрологическое моделирование, позволяет определять площадь водосброса или водосбора с учётом уклона и площади;

- картографическое моделирование, в котором обрабатывается и анализируется несколько тематических слоев одной и той же области.

- использование растровых слоёв. Операции над слоями карты могут быть объединены в алгоритмы, а затем в имитационные или оптимизационные модели;

- геостатистика – применение методов статистического анализа к геоинформации и получение пространственной корреляции и корреляций для географических объектов, отражённых в полевых данных;

- обратное геокодирование адреса – это интерполяция пространственных местоположений (координат X,Y) из уличных адресов или любых других

пространственно-привязанных данных, таких как почтовые индексы, участки и адреса и, соответственно, обратный процесс;

- многокритериальный анализ решений – применение методов многокритериального анализа к пространственным данным и помощь в принятии решения.

Таким образом, можно прийти к выводу, что современные геоинформационные системы способны выполнять широкий спектр функций. Ниже на рисунке 1.6 представлена обобщённая структура ГИС системы.

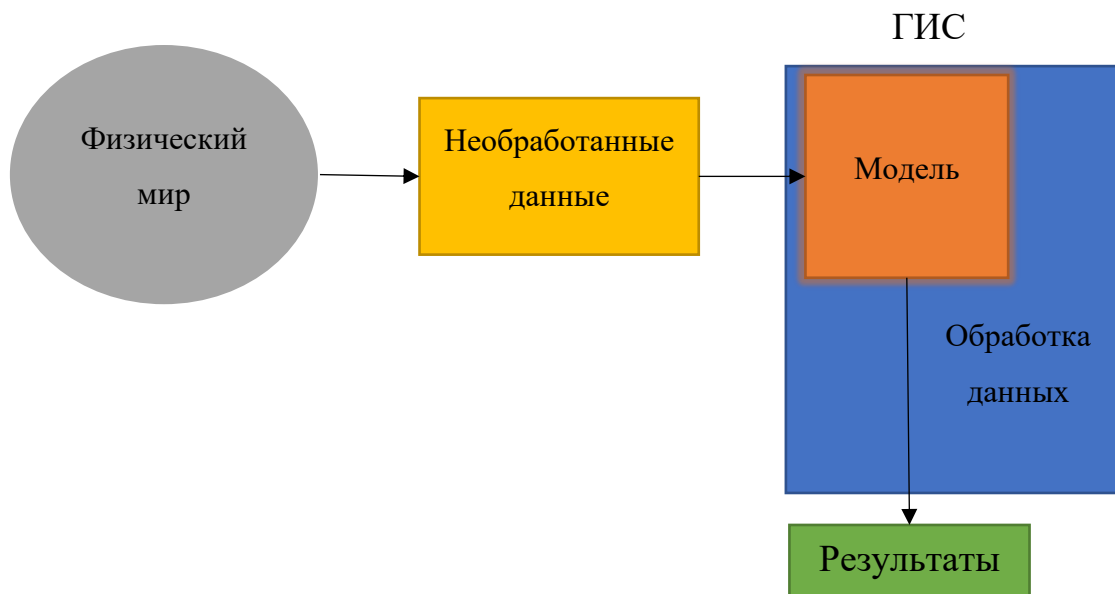


Рисунок 1.6. Обобщенная структура ГИС системы

Существуют ГИС системы, направленные на решение широкого спектра практических задач разведки, добычи, полезных ископаемых ведения геологических карт, атласов, оценки запасов и составления отчетности.

Существует большое количество ГИС систем и целых комплексов, нацеленных на решение определённого спектра задач, например ENVI, SARscape, ArcGIS, PSP-IfSAR., отвечающие за полный цикл обработки входящих данных и интеграции данных в ГИС, но не существует отдельных модулей, работающих с дорожным полотном, как с отдельным физическим объектом. Крупные производители тяжёлой техники продемонстрировали свои

модели беспилотного транспорта. В ноябре 2018 года компания Caterpillar сообщила, что ее карьерные самосвалы, оснащенные системой Cat Command перевезли более 1 млн. тон руды, что являются существенными цифрами в абсолютной величине, но не сравнимо для отрасли в целом. Компания БЕЛАЗ вслед за Caterpillar в 2018 предоставила свой проект беспилотного транспорта. Что показывает заинтересованность производителей в беспилотной технике для карьера, что формирует новые требования к работе современных ГИС систем.

1.3 Обзор научных работ по тематике диссертации

Тематика диссертации лежит на стыке различных предметных областей: системы управления ГТК, геоинформатика и цифровые двойники.

Основываясь на историографии вопросов геоинформатики и геоинформационных систем, можно выделить несколько основных периодов в развитии данной отрасли науки. Первый этап – становление направления и попытки совмещения информатики и географии (1950–1989). Второй этап характеризуется пристальным вниманием к динамическим объектам в контексте геоинформационных исследований (1990–2010). Третий, современный, этап включает в себя интеграцию больших данных в геоинформатике и диверсификацию направлений исследований в этой области.

Исследования в области геоинформационных технологий велись, начиная с 50-х годов прошлого века. Проблемы на стыке географии и информатики начали разрабатываться в Швеции, Англии, США и Канаде. Первые исследования в этой области проводили Т. Hagerstrand, W. Garrison и E. Ullman, I. McNarg. Их работы оказали большое влияние на развитие экономической географии. Благодаря исследованиям Т. Hagerstrand география перешла из области пространственных наук в область пространственно-временную. Он первым применил математические модели для описания и прогнозирования случайных процессов (метод Монте-Карло) для решения ряда задач в области экономической географии [26, 78]. Основной фокус исследований того периода

был сконцентрирован на проблемах и задачах экономической и «городской» географии. W. Garrison и E. Ullman, занимаясь проблемами оптимизации транспортного сообщения в США, интеграцией инновационных систем и логистических кривых, активно применяли статистику и компьютерные технологии для изучения «пространственных проблем» [24, 25, 66]. В конце 60-х годов I. McNarg изложил основные концепции, регулирующие функционирование геоинформационных систем [29]. Следующим шагом в развитии геоинформационных систем считается создание Канадской геоинформационной системы (Canada Geographic Information System, CGIS). Одним из ведущих специалистов, задействованных в ее разработке, является R. Tomlinson. Его диссертация ««Применение методов и технологий электронных вычислений для хранения, компиляции и оценки картографических данных» [30] стала основой для создания и развития современных геоинформационных систем.

В отечественных исследованиях первые вопросы в области геоинформационных систем начинают затрагиваться с конца 70-х годов. Среди исследователей, занимавшихся данной проблематикой, необходимо выделить В. Г. Гитиса [3, 21, 32, 33, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77], А.В. Кошкарева [2, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 8, 49], А.А. Майорова [82, 83, 84, 85], С.В. Пьянкова [53, 54], И.Н. Розенберга и С.К. Дулина [35, 36, 37, 38, 55], В.П. Савиных [56, 57], В.Я. Цветкова [22, 46, 58, 64], Н. В. Мельникова [58], К. Н. Трубецкого [100].

На данном этапе выделили три основных подтипа систем управления:

- 1) Системы управления с ручным режимом, системы, предоставляющие лицу принимающее решение (соответствующему персоналу или диспетчеру) всю информацию об технологическом процессе.
- 2) Системы с режимом советчика, системы, работающие обрабатывающие данные и выдающие оптимальное решение соответствующему персоналу.
- 3) Системы с диалоговым режимом, системы включающие возможности предыдущих систем, но работающие не по заранее заданным критериям, а которые (критерии) диспетчер может изменять в режиме реального времени.

Первые отечественные системы управления «Карат», «Кварцит» «Пуск» и «Гранит» создавались как системы с режимом советчика с использованием ЭВМ [18]. Современные системы управления разрабатываются по принципам информационно-управляющих систем, которые позволяют в реальном времени предоставлять информация обо всех геологических процессах и в режиме реального времени отвечать на изменения в них и в автоматизированном режиме учитывать все управляющие решения [59].

Идеи геоинформационного моделирования открытого горного комплекса, были заложены в диссертациях В.М. Аленичева, С.В. Корнилова. Они базировались на возможности обработки дискретных геоинформационных данных за определённым период времени и построения проекта. Современные же системы моделирования являются непрерывным процессом, начинаются и останавливаются одновременно со всеми процессами открытого горного комплекса. [49].

В конце 90-х и начале 2000-х годов геоинформационные системы стали использовать не только для анализа пространственных свойств различных объектов в статическом состоянии, но и активно интерполировали ранее известные знания на динамические объекты. Первые исследования, посвященные данной проблеме, реализовал G. Langran в 1992 году [27]. Проблемами анализа пространственно-временных отношений между объектами и их отображением в геоинформационных системах занимались M. Wachowicz [23], M.F. Worboys [95], M. Yuan [98, 99, 100].

Идея создания цифровых двойников, имеющая принципиально важное значение для данного исследования, также активно разрабатывалась в указанный период. Одним из первых проблематику разрабатывал Д. Хилер-Гелернет в работе «Mirror Worlds» (1991). Основная концепция, заложенная в этой работе, состоит в применении трех отдельных частей: физического объекта, цифрового объекта и связей между двумя объектами. Связи – это данные, которые передаются от физического объекта к цифровому, и информация, доступная из цифрового объекта в физическую среду. Что позволяет моделировать процессы

без использование физического объекта, и применять уже апробированное управление к физическому объекту и на оборот. На сегодняшний момент данная идея и концепция активно поддерживается, как крупными иностранными корпорациями (Siemens, General Electric), так и отечественными ЦИФРА и Газпромнефть.

Первое десятилетие XXI века было посвящено, в первую очередь, определению и конкретизации основных понятий геоинформатики. В этот же период в научный оборот было введено и четко определено понятие «геоинформация» и «пространственные отношения. Важный вклад в это направлении совершили А.П. Карпик [5], В.Я. Цветков [45, 61], С.В. Еремеев [39, 40], В.П. Кулагин [41]. В этот период также предпринимались активные попытки дать максимально точное определение понятию «геознание», а также процессам его получения из различных видов геоинформации [16, 22, 34, 43, 51, 61, 62].

Начиная с 2015 года исследователи уделяют серьезное внимание анализу влияния «Big Data» (Больших данных) на геоинформатику. В данном контексте следует выделить работу А. А. Майорова и А.В. Матерухина «Вопросы унификации понятийного аппарата в сфере больших пространственных данных и потоков пространственно-временных данных», направленную на выделение основных концепций в данном направлении. Именно в этой работе на обширном аналитическом материале было выведено понятие «большие пространственные данные», которое объединяет в себе ряд категорий, присущих геоинформатике и науке о Больших данных. В этот же период перед исследователями встала проблема обработки пространственных данных [44], в силу их специфики и «трудностей задания пространственных отношений между пространственными объектами в реляционной модели» [12 С. 24].

Проблема обновления информации о траекториях и состояниях дорожного полотна в карьерах, детально рассмотренная в данной работе, начала привлекать пристальное внимание исследователей уже в 2000-х годах. Важное значение в рамках данного направления имеют работы М. Ahmed и R. Ward [65], исследования W. Shi и C. Zhu [91], а также P. Perruchet и R. Peereeman [87]. Эти

исследования получили обширное развитие в 2006–2011 годах. Наиболее актуальными в этот период были работы T. Fawcett [69], W. Yang [96], J. Senthilnath [67], F. Ekpenyong [68] и Z. Niu [85]. Дальнейшее развитие указанной проблематики проходило в 2012–2018 годах. Следует отметить работы D. M. W. Powers [88], M. K. Hasan [78], C. Cao и Y. Sun [67], H. Ouyang [86], J. Qiu и R. Wang [89], X. Sun и F. Tian [92, 93].

По публикационной активности по данной тематике можно выявить или стабильный рост по ключевым темам в кластере Geographic Information Systems, Maps, Models (см. рисунок 1.7)

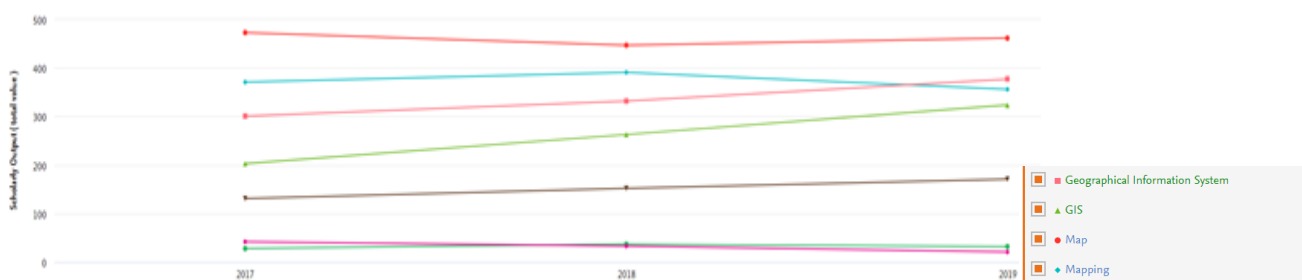


Рисунок 1.7 – Объём публикаций по направлению «геоинформатика»

Исходя из данных, представленных на рисунке 1.7 можно сделать вывод, что начиная с 2017 года существенно возросла публикационная активность по исследуемой тематике. С 2017 по 2020 год было опубликовано порядка 6 000 исследований в рамках проблем ГИС систем и картографии. Что доказывает актуальность проводимого исследования.

1.4 Технологии получения геоинформации в современных системах ГТК

Современные технологии позволяют получить высокоточную пространственную временную детализацию ГТК с использованием как локальных элементов (датчиков давления, гироскопов) так и глобальных систем (GPRS, ГЛОНАСС). Такую детализацию можно охарактеризовать как «VARIETY» с одной стороны и «Volume» с другой стороны, что напрямую указывает на BIG

Data, но хотя современные геоинформационные потоки можно причислить к определённым элементам BIG Data, они имеют свою специфику [47]:

- Геоинформационные данные представляют собой набор кортежей, упорядоченных по времени или по другим атрибутам. Временные метки могут иметь различное время дисконтирования или иметь глобальную ошибку по позиционированию. В отдельных случаях, набор кортежей не доступен изначально, а поступает в течении времени.

- Данные получаются из различных внешних независимых источников и при определённых условиях нет возможности повлиять на порядок их прибытия или скорость передачи.

- Данные приходят непрерывно, образуют бесконечную последовательность с динамической длиной, без явного прогнозируемого завершения.

- Архивные геоинформационные данные, преобразуются без возможности восстановления оригинального потока, что уменьшает пространственную временную детализацию.

Вышеуказанные особенности могут присутствовать в полной мере (данные с мобильных объектов) или только частично (на спутниковых снимках).

На начальном этапе более подробно рассмотрим данные с мобильных объектов. Под мобильными объектами подразумеваются все нестационарные объекты, изменяющие свою позицию в течение пары смен. Это могут быть самосвалы, грейдеры, заправщики, экскаваторы и другие движущиеся объекты.

Все современные мобильные объекты имеют определённый набор датчиков:

- GPRS (устройства пакетной передачи данных радиосвязью общего пользования);
- акселерометры;
- угломер;
- компас;

В зависимости от типа объекта набор датчиков может быть сильно различным.

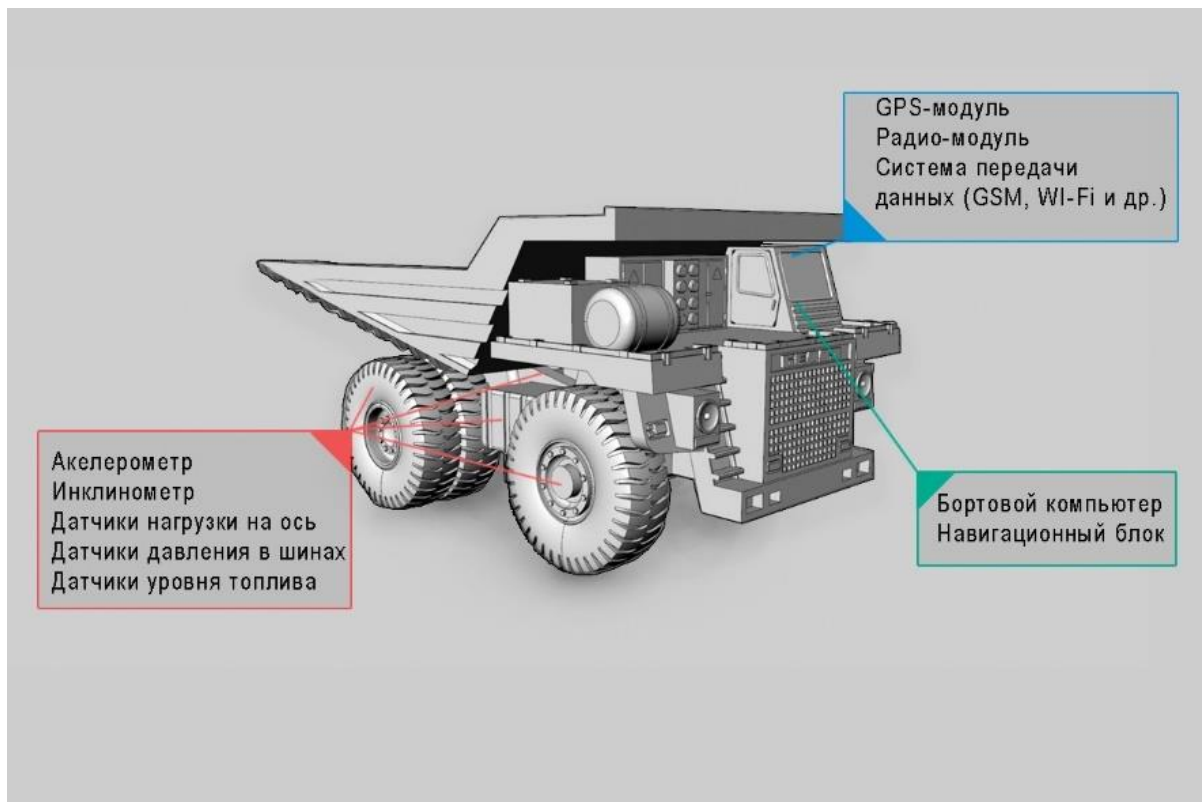


Рисунок 1.8. Обеспечение современного самосвала

Соответственно, данные собираются непосредственно с мобильных объектов и переносятся в реляционную базу данных. Выполняется модель пограничных вычислений, где решение дискретизации данных и первичная обработка перенесена на конечные устройства (ЭВМ на мобильных объектах), а сохранение и обработка в центральной базе данных (БД). Таким образом данные с мобильных объектов легко управляемы, с определённой точности детальные, оперативны, но имеют жёсткую привязку к мобильным объектам.

Другим источником геопространственных данных может служить маркшейдерская съёмка. Маркшейдерская съёмка – совокупность измерений и вычислений, проводимых с целью точного определения положения горных выработок и подземных сооружений по отношению к объектам на земной

поверхности (или под землёй) для обеспечения правильного и безопасного ведения горных работ.

Исходя из инструкции проведения маркшейдерской съёмки, объектами съёмки могут служить:

- горные выработки (уступы, съезды, траншеи, линии закола при взрыве блоков, развалы, дренажные выработки, скважины, водоотводные канавы, участки укрепленных откосов и т.п.);
- отвалы пород внутренние;
- разведочные выработки и элементы геологического строения месторождения, видимые в натуре;
- границы опасных зон (зоны пожаров, затопленных горных выработок, оползней, обрушений и т.п.);
- транспортные пути в карьере и на внутренних отвалах, ленточные конвейеры и переходы через них, лестницы между уступами;
- сооружения (эстакады, подъемники, подвесные канатные дороги, электроподстанции, постоянные линии электропередачи, установки гидромеханизации, плотины, водоспуски, трубопроводы, помещения наносных и землесосных установок) [11].

На рисунке 1.9 указан пример плана развития месторождения на 4 квартала. Стоит обратить внимание на то, что размеры карьера существенно увеличатся, изменится рельеф и дорожное полотно для перемещений транспорта и учесть это в будущем.

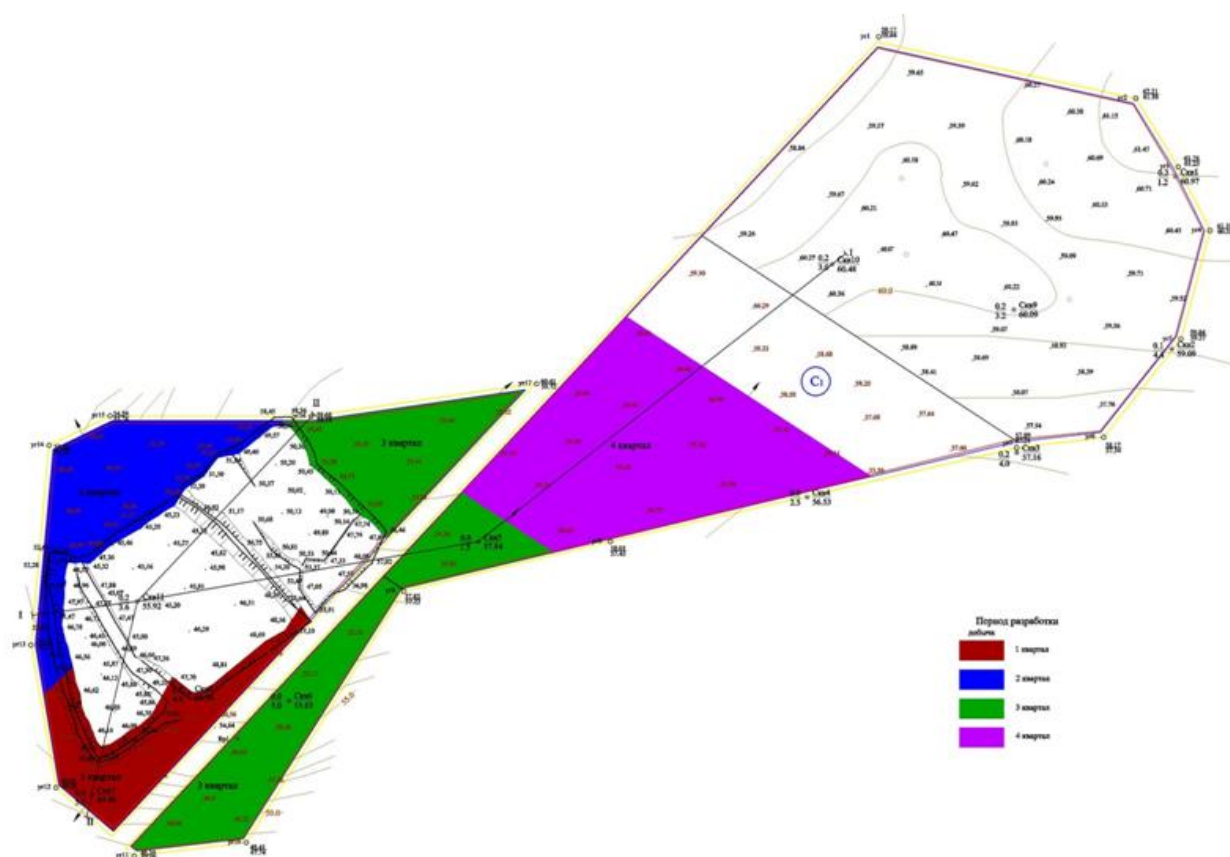


Рисунок 1.9 – Пример плана развития горных работ для месторождения [101]

Очень часто в маркшейдерских съёмках дорожное полотно фигурирует в виде сложных линий (поле линии) и не содержит в себе никаких технических характеристик, связанных непосредственно с полотном дороги (рисунок 1.10).

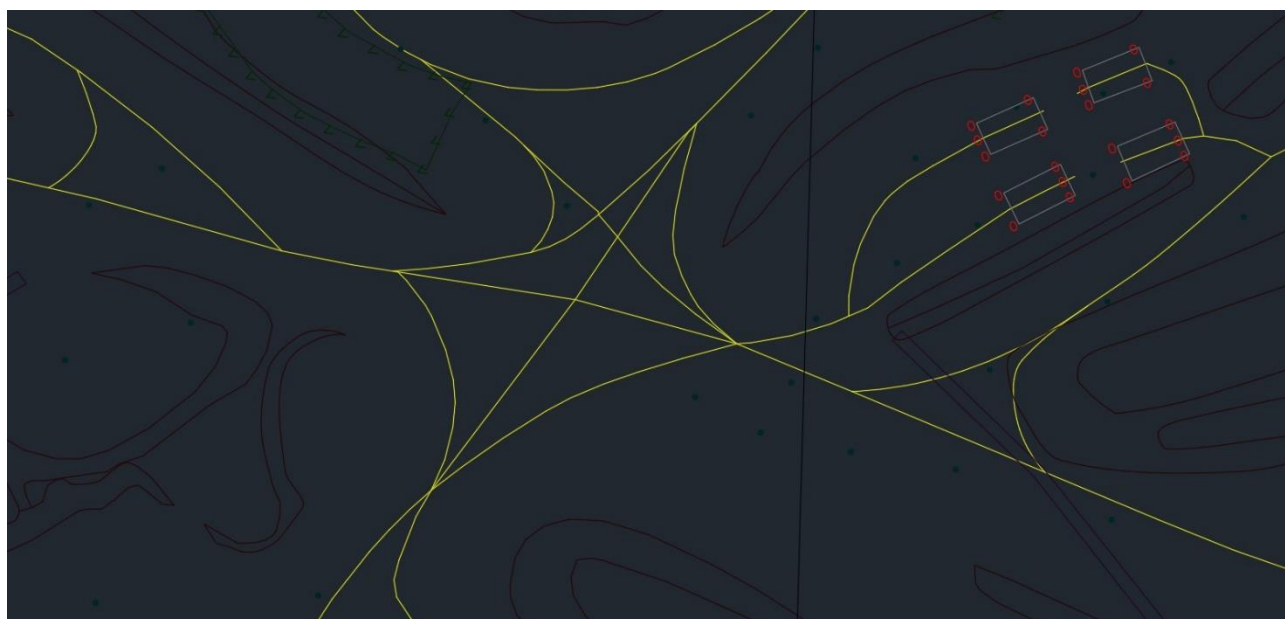


Рисунок 1.10 – Пример маркшейдерская съёмка карьера.

Жёлтыми линиями обозначается дорога, чёрными борта, можно определить, что присутствует дорожное полотно, но нет понимания о размере дорожного полотна, угле наклона, что необходимо учитывать для управления ГТК.

Зачастую маркшейдерская съёмка проводится после буровзрывных работ и полностью описывает состояние карьера на определённый момент времени без учёта предыдущих или дальнейших особенностей. Исходя из вышеуказанного, были получены статичные геоинформационные данные, которые могут служить контрольное-измерительными, но не обладают полнотой и динамикой изменения состояния дорожного полотна.

Следующим источником информации для построения цифровой модели дорожного полотна и, соответственно, цифровой карты дорог может являться аэрофотосъёмка с использованием авиации или беспилотных летающих объектов (БПЛА).

Оптическая информация, получаемая от фотомодуля БПЛА с дополнительной информацией как угол наклона относительно горизонта, высота съёмки, фокусное расстояние. Что позволяет с высокой точностью определять позиционирование и решать задачу распознавания элементов горнотранспортного комплекса (рисунок 1.11)



Рисунок 1.11 – Пример оптической информации полученной с БПЛА

Исходя из рисунка, мы можем выделить все изменение бортов карьера, изменение технологических зон в оперативном режиме, но без 3-й координаты.

БПЛА так же применяются в классической маркшейдерии и позволяет построить, с использованием специализированных якорей, полноценные 3D модели поверхности земли с заявленной ошибкой менее 1 метра в проекции X-Y, и более 5 метров в проекции Z (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Пример 3-мерной модели карьера [13]

Рисунок 1.12 иллюстрирует развитие использование БПЛА в маркшейдерской съёмке и позволяет получить готовую 3D модель, облегчающую выделение определённых объектов, но всё ещё требующую ручную разметку. Данный подход может повысить оперативность съёмки до обновления каждые сутки, но требует дополнительных расчётов и введение новых подходов к получению геоинформатики. Но из-за невысокой точности по высоте (z-координата), применение данного подхода для глубоких карьеров, не соответствует требуемой точности в 1м.

Существует ряд программных продуктов, способных создавать трёхмерные детализированные модели на основе съёмки с БПЛА, таких как Bentley ContextCapture. Результатом работы которого является готовая 3-мерная модель с поддержкой формата geoTIF и облаком точек. На рисунке 1.13 представлен пример работы этой программы.

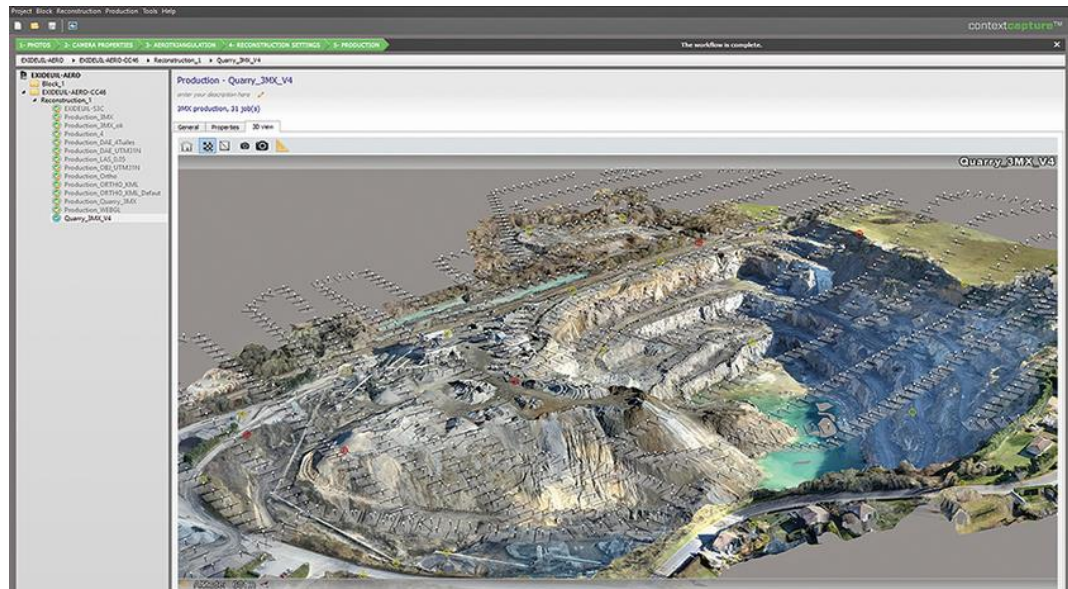


Рисунок 1.13 – Bentley ContextCapture [102]

Данная программа (см. рисунок 1.13) предоставляет удобный инструмент для работы с 3D моделями в рамках маркшейдерской съемки, но не позволяет выделять участки дорожного полотна в отдельные сущности.

Иными словами, съёмка с БПЛА является актуальным и довольно точным источником информации для создания цифровой модели дорожного полотна.

Другим источником геоинформации может служить спутниковая съёмка (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Пример фотографии со спутника участка дорожного полотна карьера.

Данный рисунок позволяет выделить контур дорожного полотна с определенной сущностью, но не обладает детальной информацией по высоте.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что геоинформационные данные со съёмки имеют, похожую характеристику, как данные от маркшейдерии, но имеют следующие нюансы:

- зависимость от геопозиции;
- зависимость от метеоусловий.

Таким образом, только комбинируя несколько источников геоинформационных данных, возникает возможность построения цифровой динамической модели дорожного полотна. Данные с мобильных объектов обладают оперативностью и детализацией, но не обладают обобщающими характеристиками. Маркшейдерская съёмка полностью передаёт состояние карьера на определённый момент времени, но не обладает высокой оперативностью. Спутниковая съёмка обновляется чаще чем маркшейдерия, но имеет проблемы с детализацией. И не одна из них обособленно не обладает всем перечнем геоинформационных данных необходимых для создания и поддержания цифровой динамической модели дорожного полотна.

1.5 Выводы по главе 1

В рамках данной главы были рассмотрены основные понятия и принципы работы горного транспортного комплекса, в рамках открытого способа добычи. Было предложено внедрение идей цифровых двойников и внедрение их в ГТК для повышения эффективности управления и реализации новой концепции работы предприятия.

Был проведён анализ научных работ по смежным тематикам диссертации, были освещены основные научные труды посвящённые разработки и доказан устойчивый интерес со стороны международного сообщества в рамках предложенной темы.

Рассмотрена идея построения цифровой модели дорожного полотна карьера с использованием маркшейдерской съёмки, телеметрии мобильных объектов, спутниковой и аэрофотосъёмки. Были выявлены положительные и отрицательные особенности данных источников в рамках решаемых задач.

Глава 2. Динамическая цифровая модель карьерных дорог

2.1 Информационная база для создание цифровой модели карьера

В первой главе были описаны основные источники геоинформации, которые используются для решения поставленных задач. По отдельности источники обладают существенными недостатками для построения цифровой модели. Повторим ключевые недостатки каждого источника:

- в маркшейдерской съёмке нет возможности контролировать состояние дорожного полотна,
- данные с мобильных объектов не несут в себе информацию о границах дорожной рубашки,
- спутниковая съёмка имеет низкую точность по высоте.

При комбинации источников нивелируются недостатки, что позволит построить цифровую модель пригодную для интеграции в цифровой двойник ГТК.

Цифровая модель – это набор данных, представляющих физический объект и отражающих основные физические параметры. Соответственно, под цифровой моделью карьера понимают набор подходов и данные, отождествляющие физические процессы в карьере.

Логичным продолжением идеи цифровой модели это цифровой двойник. Цифровой двойник – это виртуальное представление, которое сопоставимо в реальном времени физическому объекту или процессу. Одной из важнейших задач при создании цифрового двойника является правильно сформировать базовые цифровые нити. Цифровая нить – конструкция и спецификация самого низкого уровня для цифрового двойника.

В рамках создания цифровой платформы модели карьера определены четыре группы функциональных задач, которые должны решаться с помощью:

1. Анализа и прогнозирования основных интегральных показателей производительности, определяющих эффективность отдельных технологических процессов и производства в целом.

2. Оценки состояния технологического оборудования, включая отдельные узлы и агрегаты мобильной техники, с целью оптимизировать ремонтно-логистические операции.

3. Оценки состояния технологической среды карьера, в первую очередь речь идет о качестве и топологии карьерных дорог, устойчивости бортов карьеров и расположении экскаваторных площадок. От решения этой задачи существенным образом зависит выбор маршрутной схемы (опорного плана) работы транспортно-технологического комплекса.

4. Организации транспортно-технологических процессов, связанных с взаимодействием автономных или частично-автономных мобильных объектов, к которым относятся:

- циклическое движение автосамосвалов по карьерным дорогам между экскаваторными площадками и пунктами разгрузки;
- загрузка автосамосвала экскаватором;
- разгрузка самосвала в пункте разгрузки;
- выезд автосамосвала с пункта стоянки на технологическую дорогу в соответствии с рабочим заданием;
- движение автосамосвала по маршруту и т.д.

В результате анализа информационной среды современных горнодобывающих предприятий была проведена классификация потоков данных, описывающих основные процессы взаимодействия добычного и транспортного оборудования и информационно-управляющих систем открытых горных работ, по их функциональному назначению:

- потоки метаданных, описывающие состояния различных технических и инфраструктурных агентов транспортно-технологического процесса за различные периоды наблюдения. Эта группа потоков непосредственно формирует представление об агентах, может и должна быть однозначно

определена при реализации цифрового дублирования. К этой группе относятся данные телеметрии с бортовых систем агентов, архивные данные телеметрии, архивные и текущие данные горно-геологической информационной системы;

- потоки запросов на определенные данные – адресные обращения, содержащие информацию метаданные объектов из релевантных источников для построения моделей различного назначения информационно-управляющими агентами. Пример этой группы потоков данных – запросы систем диспетчерского управления к бортовым системам телеметрии о получении данных за час-смену-сутки или SQL-запросы к хранилищу данных: они формализуют правила взаимодействия различных агентов между собой;

- потоки команд управления – сообщения с векторами целевых состояний объектов. К этой группе потоков данных относятся разного рода адресные метамоделю управления. В рамках диспетчерского управления ГТК это сменные задания и производственные планы для отдельных технических агентов или их групп.

В соответствии с этой классификацией были каталогизированы потоки данных, определены сроки их жизни (актуальности) и однозначно определены объекты, которыми описываются эти данные. Таким образом, сформулированы первоначальные требования к информационной базе системы, регламентирующие связи и последовательности взаимодействия между информационными сущностями по принципу источники и адресаты (издатели и подписчики) данных, что охарактеризовало и определило последующие направления работ по формированию архитектуры цифровой платформы для интеллектуального управления транспортно-технологическим процессом.

2.2 Структура цифровой модели карьерных дорог

При исследовании мультиагентной схемы транспортно-технологических процессов были выделены четыре группы агентов:

1. Мобильные агенты – это мобильные транспортные объекты (большегрузные а/с, вспомогательные транспортные средства, дорожные машины различного назначения), а также условно стационарные горные машины (экскаваторы, перемещаемые буровые установки). Функционирование этих агентов в беспилотном варианте определяется:

- данными бортовой мониторинговой системы, поставляющую информацию о текущем местоположении и техническом состоянии агента;
- заданиями, получаемыми от диспетчерской системы;
- цифровыми моделями заданных маршрутов;
- сенсорной информацией, получаемой при взаимодействии с другими агентами.

Следует отметить, что степень автономности, то есть реальный алгоритм функционирования напрямую зависит от механизмов взаимодействия с другими участниками движения, в частности, инфраструктурными агентами, а также от той функциональной нагрузки, которая делегируется этим инфраструктурным-технологическим, а также геоструктурным агентам.

2. Инфраструктурные технологические агенты – описывают технологическую среду, в частности: карьерные дороги, борта карьера, экскаваторные и разгрузочные площадки, карьерные технологические дороги. Кратко рассмотрим некоторые из них:

- Агент «экскаваторная площадка». Формируется ряд ограничений и правил на мобильные агенты, вступающие в момент подачи мобильного агента под погрузку, до пересечения границ агента «экскаваторная площадка». Можно выделить следующие этапы: выезд из границ агента, этап погрузки, этап ожидания погрузки и этап разрешение въезда в зону агента.

- Агент «площадка разгрузки». Подобно ранее указанному агенту, формируется ряд правил ограничивающих движения мобильного агента для выполнения процесса разгрузки.

- Агент «дорога». Обычно зоны технологических дорог, по которым происходит движения мобильных объектов. Можно выделить следующие характеристики:

- векторная цифровая модель;
- текущая интенсивность движения – количество транспортных средств, проходящих через данное сечение дороги в единицу времени;
- набор интегральных параметров, таких как: скорость движения, на которую рассчитана трасса; допустимая масса и габариты подвижного состава; пропускная способность.

3. Геоструктурные агенты – представляют собой элементы-блоки, описывающие структуру месторождения аналогично тому, как это делается в классических геоинформационных системах. Геометрические параметры блоков зависят от технологических характеристик горного оборудования (включая, естественно, размер) и определенной на этапе разработки алгоритмов управления требуемой точности позиционирования горных машин и их отдельных элементов (например, ковша экскаватора).

4. Информационно-управляющие (процедурные/операторные) агенты – программные модули, которые обмениваются входной и выходной информацией и в перспективе должны быть способны корректировать свое функционирование в процессе обработки потоков информации, поступающих из внешних источников, в том числе, от других агентов.

В качестве примера этого типа агентов можно рассмотреть специализированного агента «Координатор». Основная функция этого агента – координация перемещения автосамосвалов по дорогам между технологическими зонами (пунктами загрузки и погрузки), а также управление взаимодействием автосамосвала и экскаватора [99]. Фактически, задачи транспортно-технологического процесса центрального планирования включают:

1) Ведение цифровой пространственной модели всех стационарных объектов.

2) Позиционный мониторинг всех перемещающихся объектов.

5. Информационно технологические агенты:

- Рабочие зоны на уступах, с которых происходит вскрышные и добычные работы. В котором происходит основной процесс добычи ископаемых, требующих соблюдения определённых норм и правил движения мобильных объектов.

- Зоны разведочные выработки – зоны разведки, где тоже формируются определённые правила движения мобильных объектов, но не всегда эти зоны постоянны.

- Опасные зоны (зоны пожаров, затопленных горных выработок, оползней, обрушений) зоны предъявляющие особые правила к безопасности всем объектов в карьере.

- Транспортные пути (дорожное полотно, ленточные конвейеры и переходы через них, перекрёстки и т.д.) – зоны, через которые происходят основное движение извлечённых горных пород в карьере.

- Статичные объекты (строение) объекты задействованные в процессе добычи, несущие различную функциональную нагрузку.

- Сооружения (эстакады, подъемники, подвесные канатные дороги, электроподстанции, постоянные линии электропередачи, установки гидромеханизма.

Выделим основные компоненты цифровой модели:

- Дорожный граф, связывающий основные технологические зоны, рассмотренные ранее;

- Система атомарных элементов (атомарный элемент – ориентированный объект в пространстве отождествляющий определённый набор физических характеристик и являющийся наименьшим объектом (записью) в БД), отражающие физические свойства дорожного полотна, качество дорожного покрытия, продольные уклоны и прочие характеристики дорожного покрытия;

- Матрица смежности атомарных элементов, помогающие в построение рёбер графа;
- Система мониторинга текущих условий движения (ремонтные работы, позиционирования самосвалов и прочие условия).

Каждые из компонентов могут быть представлены персональными записями в БД или уже с агрегированные в одну таблицу БД.

В ходе анализа было выделено 3 типа атомарных элементов, исходя из геометрических особенностей:

- Правильный треугольник.
- Квадрат.
- Правильный шестиугольник.
- Правильность фигур было в рамках удобства управления и использование модели.

Пример атомарных элементов продемонстрированы на Рисунке 2.1

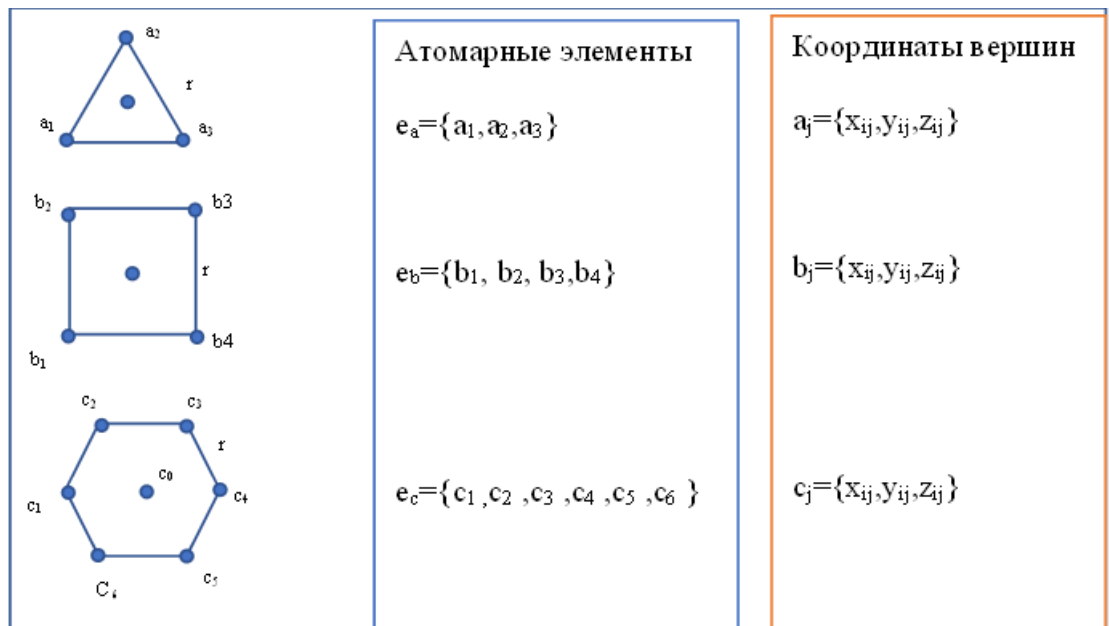


Рисунок 2.1 – Атомарные элементы, с учетом их геометрических особенностей

Атомарные элементы e_a , e_b , e_c , задаются следующим способом: для каждого атомарного элемента e_a , задаются координаты его вершин, $a_j = \{x_i, y_i, z_i\}$, где x_i –

координаты вершины a_j по оси X , y_i – координаты точки a_j по оси Y , z_i – координаты точки a_j по оси Z . Соответственно, каждый атомарный элемент имеет не только пространственные характеристики, но и атрибуты характеризующие дорожное полотно, такие как:

- принадлежность к технологической зоне;
- приоритет проезда по атомарному элементу;
- состояние дорожного полотна.

Для удобства построения маршрутов с учётом ранжирования приоритетов была внедрена матрица смежности, представляющая собой двухмерную матрицу M размерности (n, m) . Где в каждой ячейки указывается приоритет атомарного элемента, или 0 если дорожное полотно отсутствует. Примером матрицы смежности для участка дорожного полотна, рассмотренного дальше по тексту на Рисунке 2. M и M' с учётом ранжирования.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M' = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рисунок 2.2. Матрица смежности

Выделим факторы, влияющие на формирования цифровой модели, а точнее приоритезация различных участков дороги. Данные приоритеты формируются исходя из нескольких источников, таких как, например, стандарт СП 37.13330.2012. Соответственно, базовые значения приоритета элементов модели отличаются для каждой категории и указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Категории типов дорожного полотна

Категория	Значение приоритета. Условные единицы
I-к	1
II-к	2
III-к	3
IV-к	4

Что позволяет довольно легко, исходя из категории дорожного полотна перейти к модификации приоритетов атомарных элементов. Например, атомарные элементы, относящиеся к дорожному полотну первой категории, имеют итоговый приоритет выше, чем атомарные элементы относящиеся к 4-му.

Соответственно, данные категории регламентируют предельные геометрические значения элементов дороги и максимальную скорость на участках, что отражается в модели разным приоритетами участков дороги. Дополнительно можно использовать классификацию дорожных одежд, которые делят дорожные полотна на капитальные, облегчённые, переходные и низшие. Детальная информация по типам дорожных одежд указана в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Классификация дорожных одежд.

Типы дорожных одежд	Материалы и способы укладки	Модификация приоритета
Капитальные	Горячие асфальтобетонные материалы	0.7
Облегченные	холодные асфальтобетонные материалы	0.8
Облегченные	Органоминеральных смесей	0.9
Облегченные	Каменные материалы обработанных органическими вяжущими методом	0.9
Облегченные	Щебня, установленного по принципу заклинки	0.9
Облегченные	Высококачественной асфальтобетонной смеси	0.9
Облегченные	из прочного щебня с двойной поверхностной обработкой	0.9
Облегченные	из щебня прочных пород, устроенные по способу заклинки без применения вяжущих материалов;	1
Низшие	из щебеночно-гравийно-песчаных смесей;	1
Низшие	Из других мало прочных материалов	1.2

Соответственно итоговый приоритет примитива p_a будет рассчитан по формуле (1)

$$p_a = k * p, \quad (1)$$

где k -класс дороги,

p – модификатор приоритета дорожной рубашки. Данные итоговый приоритет применим при полной информации об дорожном полотне, полученные из внешних источников.

Второй источник приоритета может служить правила ПДД. При условии выполнения двухполосного движения. Полосы попутного и встречного направления будут иметь разные приоритеты. Так же будут отдельно оцениваться прилегающие территории, на которых возможна остановка, и территории, около сооружений служащих для фиксации дорожного полотна. Пример – ориентирующий (направляющий) породный вал или удерживающая конструкция ограждения капитального типа. Пример модификаций приоритета дорожного полотна указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Модификации приоритета дорожного полотна

№	Названия зоны	Модификатор приоритета модели дорожного полотна
1	Полоса попутного направления	0
2	Полоса противоположного направления	+3
3	Прилегающая территория	+1
4	Зона обочины	+2
5	Зона, примыкающая к направляющему породному валу	+2
6	Зона, примыкающая к удерживающему породному валу	+2
7	Зона, примыкающая к конструкциям ограждений капитального типа.	+2

Соответствующие зоны и значения приоритетов могут отличаться от карьера к карьере.

Следующим источником приоритета может быть модуль качества дорог, который может вносить локальные изменения в элементы приоритета разных участков дорожного полотна. Например, формирования локальных дорожных повреждений в виде ям, осыпей, бугров может так же влиять на

соответствующие примитивы. Рассмотрим влияния различных модификаторов на построение маршрутов в цифровой модели

Возьмём Т-образный участок дороги, указанный на рисунке 2.3 и построим маршрут по алгоритму A* без учёта разных приоритетов.

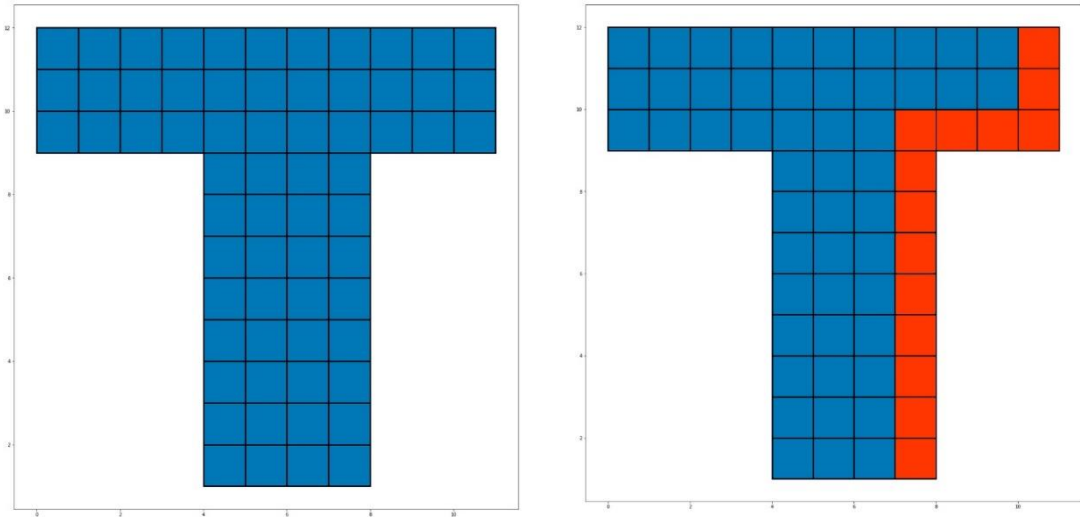


Рисунок 2.3 – Цифровая модель Т-образного участка дороги.

Синим цветом выделены атомарные элементы относящейся к первой категории дорожного полотна, красным цветом указывается кратчайший маршрут.

Теперь ведём дополнительные категории дороги: жёлтая дорога (4-категории). Соответственно, построим тот же маршрут, что и для участка без приоритетов. Соответственно пронаблюдаем, как изменился маршрут при учёте приоритета дороги, пример представлен на рисунке 2.4.

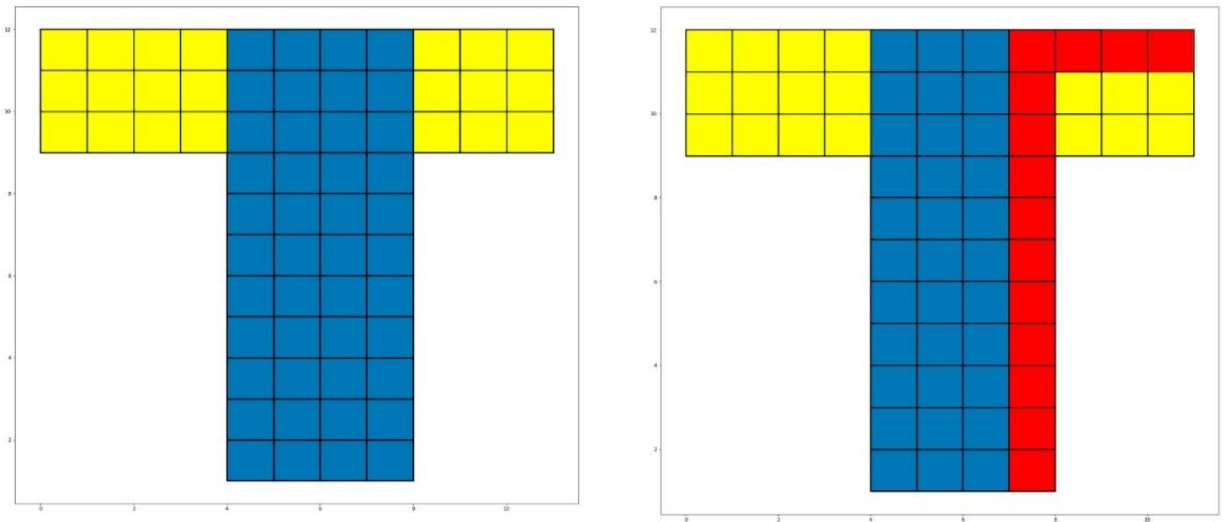


Рисунок 2.4 – Цифровая модель Т-образного участка дороги, дополненная категориями дорожного полотна.

Следует учитывать, что для рисунков 2.3, 2.4 и 2.5. предложена идентичная система цветовых маркеров. Представленные иллюстрации позволяют проследить динамику изменений, учитываемых при разработки дальнейших систем и алгоритмов.

На Рисунке 2.5 представлено изменение маршрута с внедрением зоны обочины, указанной зелёным цветом.

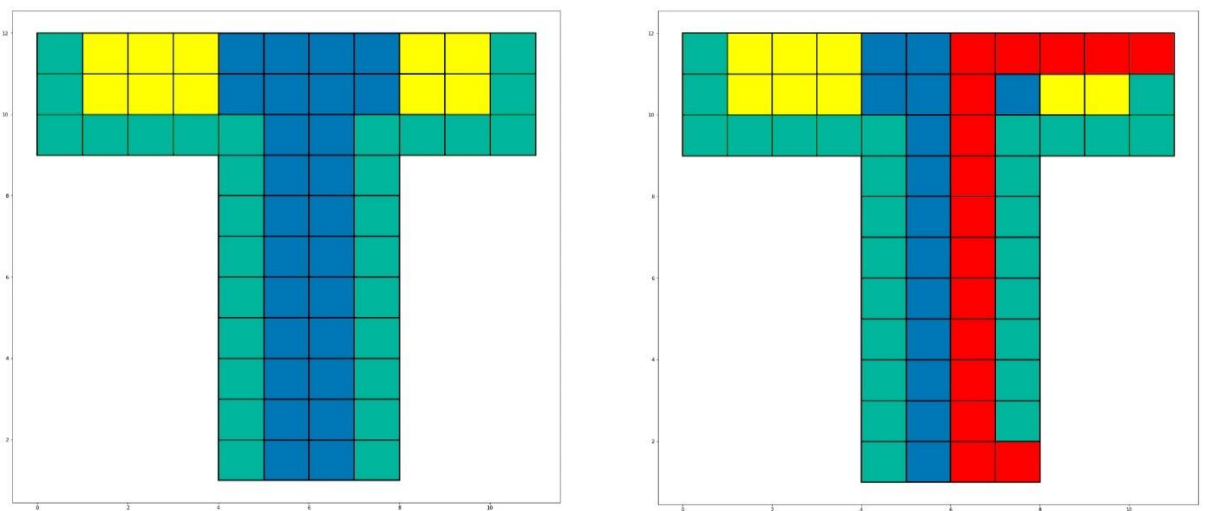


Рисунок 2.5 – Цифровая модель Т-образного участка дороги, дополненная зоной обочины

Подобные трассы стоятся между транспортными зонами. Под транспортными зонами понимаем набор атомарных элементов определяющее пространство, в котором выполняются специализированные тех процессы протекающие в этой области и накладывающие ряд ограничений на поведение мобильных объектов, например максимальная скорость в зонах разгрузки и т.д.

В каждой транспортной зоне формируется уникальные правила движения мобильных объектов. В цифровой модели транспортной зоны представляют собой набор атомарный элементов e_{ij} расположенных на определённом технологическом участке дорожного полотна и объединенные в группы Z_i , в рамках каждой зоны определяется центр технологической зоны Z_{0i} . Соответственно, каждая технологическая зона отождествляет участки дорожного полотна с определённым назначением определённой

Примером транспортных зон могут служить:

- Зоны разгрузки.
- Зоны погрузки.
- Зоны перекрёстков.
- Зоны стоянки.
- Зоны заправки.

В каждой из этих зон могут быть введены особые правила движения мобильных объектов на основе правил техники безопасности и правил ПДД.

Данный подход позволяет представить зоны в виде вершин графа традиционных моделей диспетчеризации.

2.3. Связь традиционных графовых моделей с цифровой моделью дорожного полотна

В ходе исследования предложено объединять атомарные элементы в технологические зоны, а технологически зоны представить в виде вершин графа. Подобный подход позволяет облегчить внедрение в существующие системы и заменить классическую модель графа дорог, подобный граф реализован в АСУ ГТК «карьер». Данная модель используется для создания плана-наряда, расчётов плеч перевозки и т.д. Основная проблема подобных моделей лежит в их статичности. Они редко учитывают состояние дороги, изменение карьера после буровзрывных работ изменение положения технологических зон и т.д. С другой стороны, они уже плотно интегрированы в различные системы карьера.

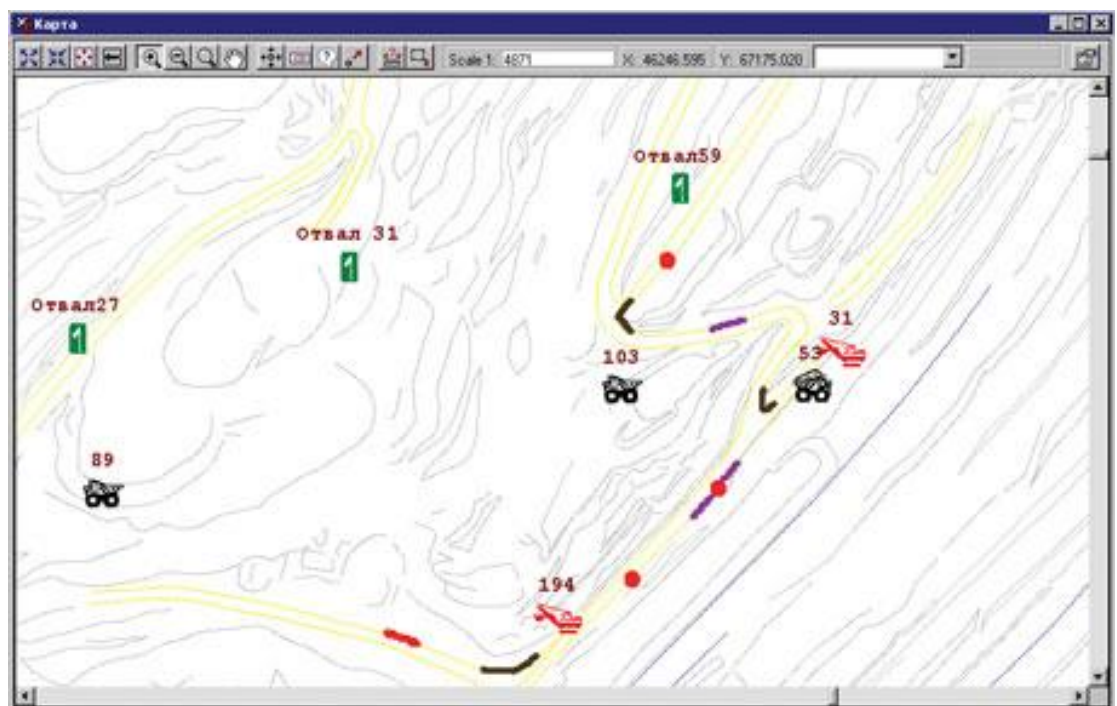


Рисунок 2.7 – Двухмерная карта дорог[101]

В рамках работы предложена двухуровневая модель. На первом уровне происходит обновление основных характеристик в режиме приближённым к реальному времени, а на втором уровне обеспечивается взаимосвязь с ранее разработанными системами.

Представление цифровой модели дорожного полотна состоит из двух уровней:

- Пространственный уровень.
- Логический уровень.

Пространственный уровень состоит из наборов атомарных элементов, где каждый из атомарных элементов имеет набор физических характеристик. Пример прототипа интерфейса и модели представлен на рисунке 2.8

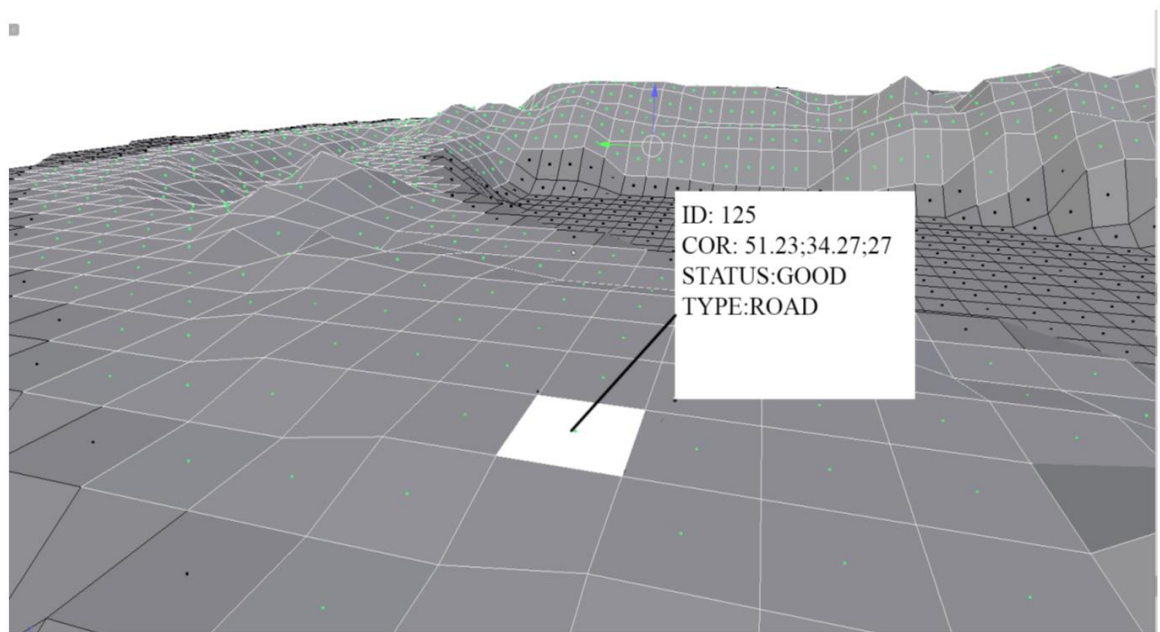


Рисунок 2.8 – Прототип 3-мерного представления цифровой модели дорожного полотна

На этом уровне так же формируются технологические зоны и строятся маршруты и обновляются состояния атомарных элементов. Таким образом формируется набор атомарных элементов A_{ij} на первом уровне представляющий собой массив $[A_{00}, A_{01} \dots A_{ij}]$, где каждый элемент g_n имеет набор физических характеристик отражающие состояние дороги.

На втором уровне набор примитивов R формирует вершину графа. Таким образом, на пространственном уровне получается детальная модель дорожного полотна с учётом технического состояния на определённый момент времени. На

основе этой модели можно построить простой граф, где центры тех зон являются вершинами, а маршруты являются алгоритмами. Такие графы уже образуют логический уровень, который можно ассоциировать с классическим граф дорог (Рисунок 2.9)

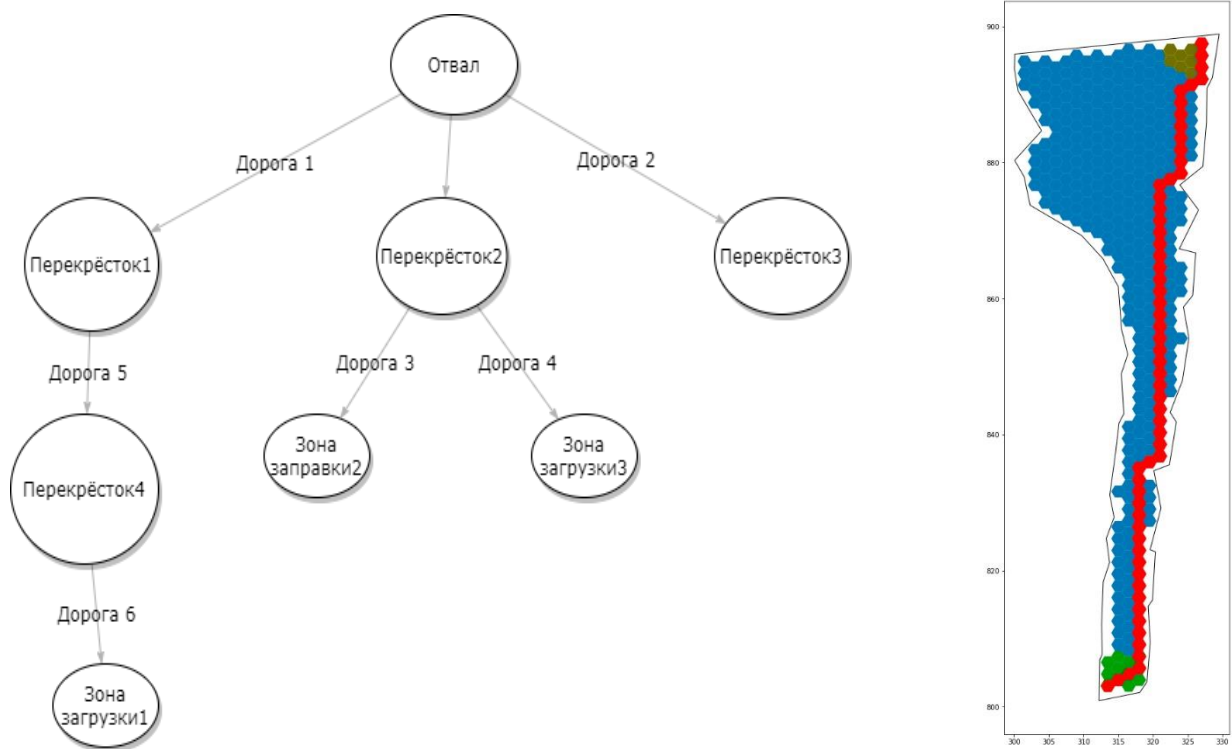


Рисунок 2.9. Логический уровень модели.

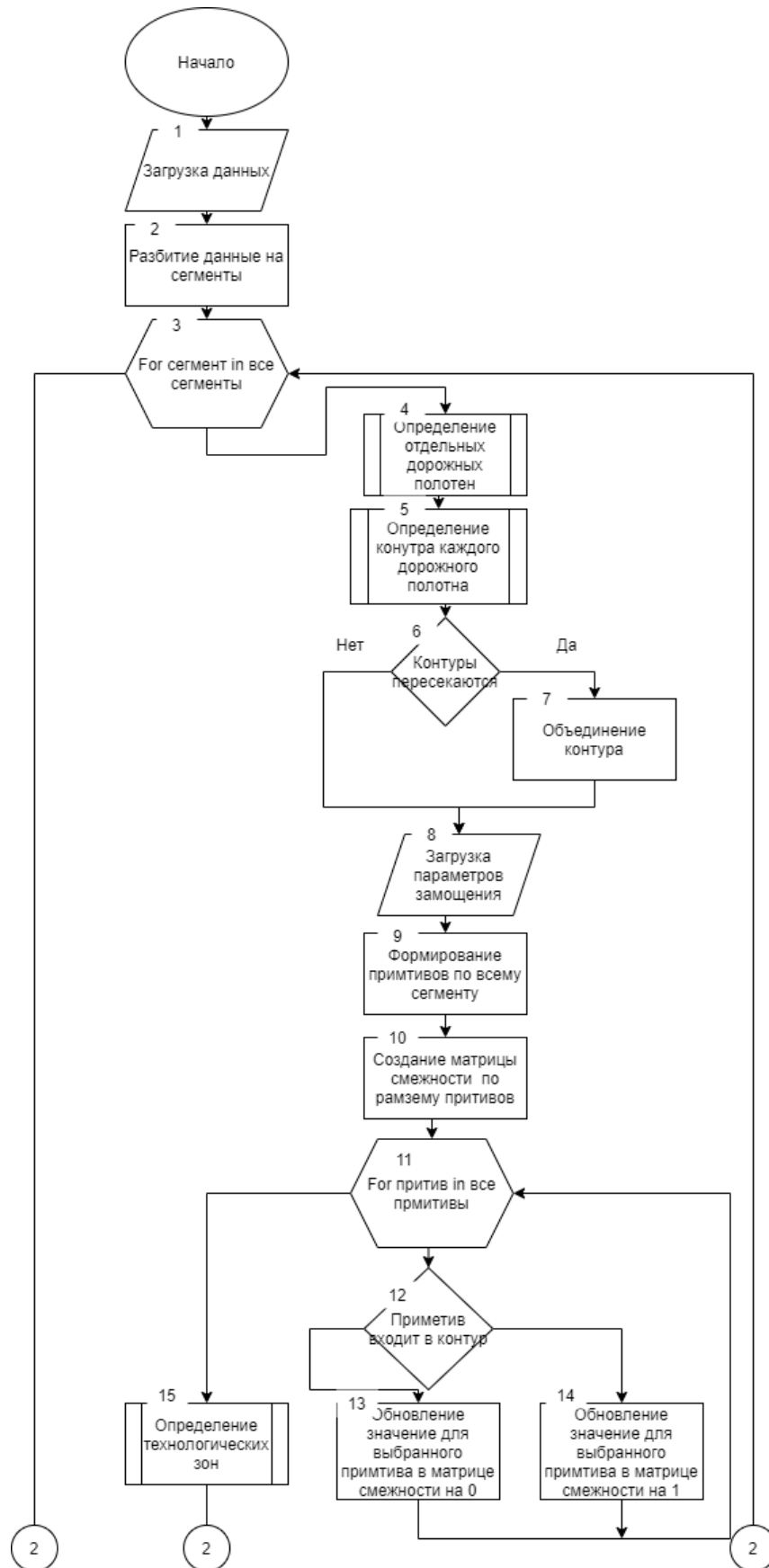
Единственным отличием от классического графа является то, что зоны и дороги обновляясь на пространственном уровне, обновляют и вершины, и рёбра графов.

Данный подход позволяет сохранить преемственность из уже используемых графов дорог, и определяет направления использования инфраструктурных технологических агентов.

2.4 Алгоритмы решения задачи

Основываясь на принципах структуры цифровой модели дорожного полотна, разобранных в пункте 2.2 с учётом того, что используемая модель двухуровневая, был разработан обобщённый алгоритм работы модели (рисунок 2.10), включающий в себя подбор оптимальных параметров дорожного полотна и алгоритма его замощения. Принцип работы цифровой модели основан на разделении всего пространства карьера на сегменты, для возможности многопоточной обработки. Внутри сегментов происходит кластеризация на отдельные дорожные полотна, для повышения точности выделения контура. Выделение контура представляет собой получение замкнутой поли линии из облака точек, наиболее приближенной к форме существующего полотна дороги.

Можно представить обобщённый алгоритм работы цифровой модели и алгоритм подбора оптимальных параметров построения атомарных элементов для участка дорожного полотна (см. рисунок 2.10).



Продолжение рисунка

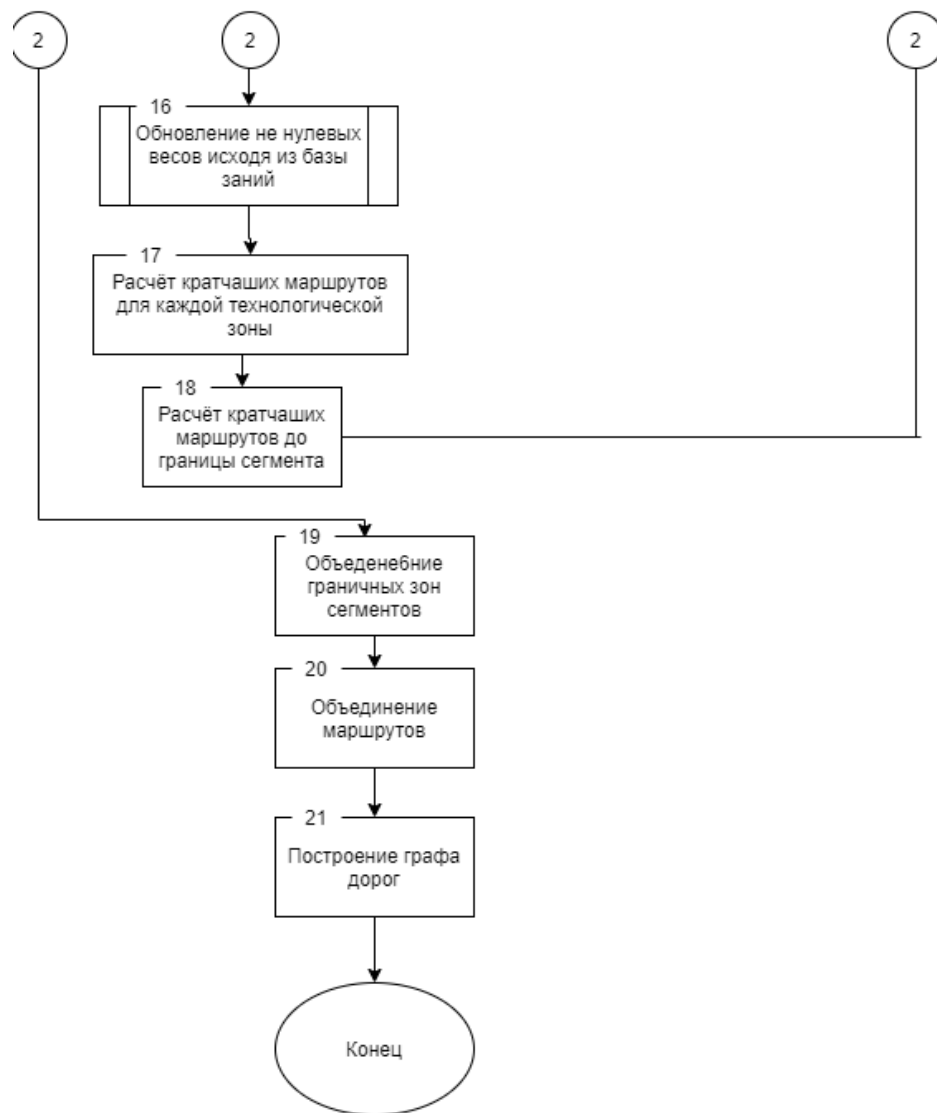


Рисунок 2.10 – Обобщённый алгоритм построения цифровой модели графа дорог

Описание алгоритма.

Блок № 1 – загрузка данных телеметрии и маркшейдерской съёмки, данные предварительно отцентрованные.

Блок № 2 – Разбитие данных на сегменты с заданным шагом .

Блок № 3 – Блок цикла, обработки каждого сегмента.

Блок № 4 – Маркировка для данных телеметрии по алгоритму Optixs, отдельных дорожных полотен.

Блок № 5 – Определение контура дорожного полотна и использование альфа-форм и параметра b – отступа от границ.

Блок № 6 – Проверка пересечения контуров, если да, то блок 7, иначе 8.

Блок № 7 – Объединение контуров в рамках одного сегмента.

Блок № 8 – Загрузка параметров замощения, тип атомарного элемента, размер грани.

Блок № 9 – Формирование набора атомарных элементов по всему сегменту.

Блок № 10 – Создание матрицы смежности, по размеру всех атомарных элементов.

Блок № 11 – Цикл обрабатывающий все атомарных элементов.

Блок № 12 – Примитив входит в контр дороги определённый на шаге 7 и 5, если да то блок 14 иначе блок 13.

Блок № 13 – Значения атомарного элемента в матрице смежности 0.

Блок № 14 – Значения атомарного элемента в матрице смежности 1.

Блок № 15 – Определение технологических исходя из телеметрии и маркшейдерской съёмки.

Блок № 16 – Обновление не нулевых весов в матрице смежности исходя из базы правил.

Блок № 17 – Расчёт кратчайших маршрутов для каждой технологической зоны с использованием A^* .

Блок № 18 – Расчёт маршрутов до границ сегмента.

Блок № 19 – Объединение зон на стыке сегментов.

Блок № 20 – Объединение маршрутов.

Блок № 21 – Пёстрое полноцветного дорожного графа.

В продолжение первого алгоритма нам необходимо рассчитать оптимальные показатели Альфа для формы и Бета отступ от первоначального контура. Алгоритм, изображённый на рисунке № 2.11 описывает поиск оптимальных значений.

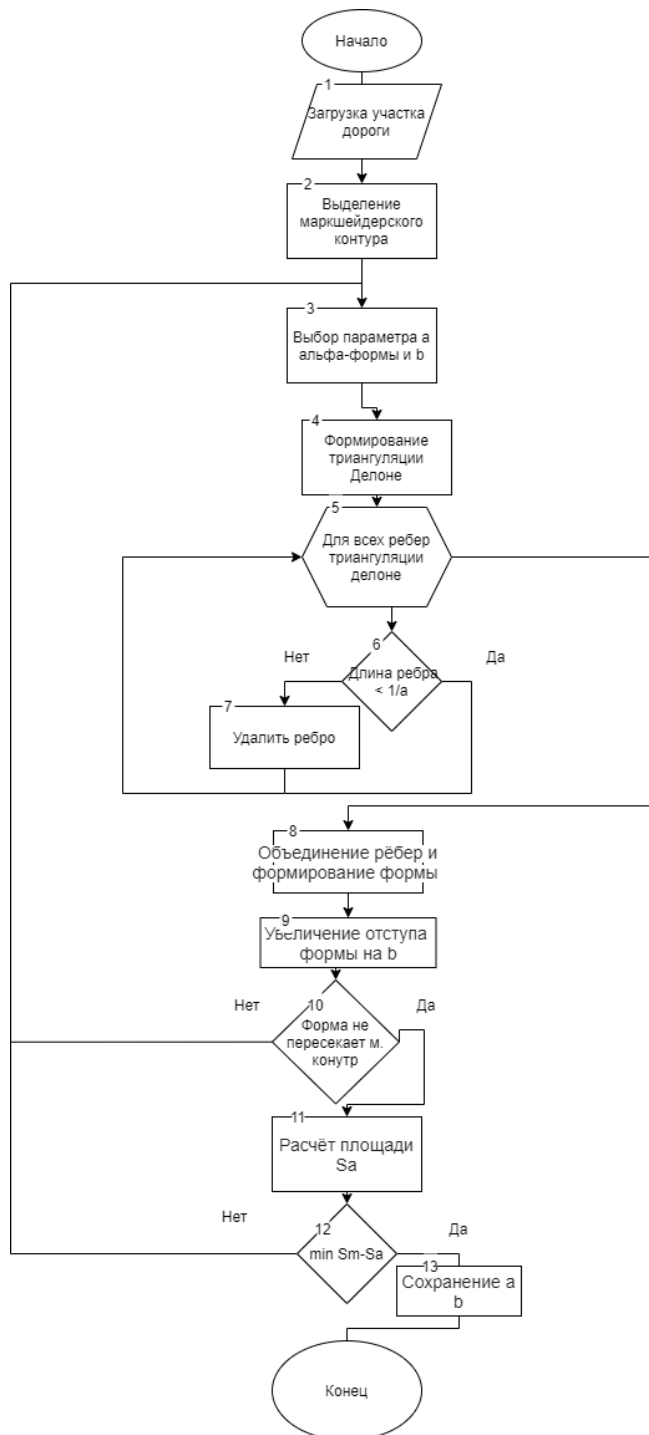


Рисунок 2.11 – Алгоритм подбора оптимальных параметров построения атомарных элементов для участка дорожного полотна

Описание алгоритма.

Блок № 1 – загрузка участка дороги.

Блок № 2 – Выделение эталонного контура дороги исходя из маркшейдерской съёмки.

Блок № 3 – Выбор значения a и b .

Блок № 4 – Формирование триангуляции для всех точек телеметрии.

Блок № 5 – Цикл для всех ребер триангуляции.

Блок № 6 – Если длина ребра больше $< 1/a$ - то переход к блоку 5, иначе - блоку 7.

Блок № 7 – Удаление ребра.

Блок № 8 – Объединение рёбер и формирование альфа формы.

Блок № 9 – Увеличение форму на значение b по всему периметру.

Блок № 10 – Форма не пересекает эталонный контур, построенный в блоке 2, если да - то блок 11, иначе - блок 3.

Блок № 11 – Расчёт площади формы.

Блок № 12 – Разница площадей формы и маркшейдерского контура минимальна, если да, то блок 13 иначе блок 3.

Блок № 13 – Сохранение параметров.

Данный подход, описанный первым алгоритмом (Рисунок №2.10) теоретически должен решать все поставленные задачи. Как показал опыт внедрения, подход жизнеспособен и не требует кардинального изменения. На данном этапе мы не затрагиваем вопрос оптимальности подхода.

2.5 Выводы по главе 2

В рамках данной главы были рассмотрены функциональные задачи, выставленные для цифровой платформы горного предприятия, для которой цифровая модель дорожного полотна является одной из важнейших подсистем. Было предложена классификация цифровых агентов. Были выдвинуты идеи приоритезации атомарных объектов моделей с использованием физических особенностей дорожного полотна и правил ПДД. Выделены и разобраны информационно технологические агенты, а в частности виды рабочих зон. Предложена основные компоненты цифровой модели дорожного полотна:

- Дорожный граф;
- Система атомарных элементов;
- Матрица смежности атомарного элементов.

Так же было предложена обобщённый алгоритм построения цифровой модели графа дорог, отвечающий на поставленные задачи в первой главе.

Было предложено двухуровневое представление цифровой модели. В котором на первом уровне модель является графом дорог, а на следующем уровне, рёбра и вершины представляют собой набор атомарных элементов, отражающих основные физические свойства дорожного полотна и обновляющее в режиме приближенном к реальному времени. За рамки данной главы были вынесены детальный анализ и описание каждого этапа формирования модели, вычислительные эксперименты, доказывающие оптимальность выдвинутого подхода к формированию цифровой модели.

Глава 3. Детальное описание подсистем построения карты дорог

3.1. Формирование секторов

В предыдущих главах были поставлены основные задачи и требования к цифровой модели дорожного полотна. Предложены основные компоненты модели и разработан обобщённый алгоритм работы. В данной же пункте детально опишем первичную обработку геоинформационных данных и идею разбиение данных на секторы, для оптимизации расчётом и внедрения идёт парализации обработки данных.

Исходя из описания геоинформационных потоков, можно сформировать 3 источника информации для построения модели дороги (см. Рисунок 3.1):

- Аэрофотосъёмка или спутниковая съёмка;
- Данные с мобильных объектов;
- Данные от маркшейдерии.

Каждый из которых обладает своим набором характеристик и особенностей.

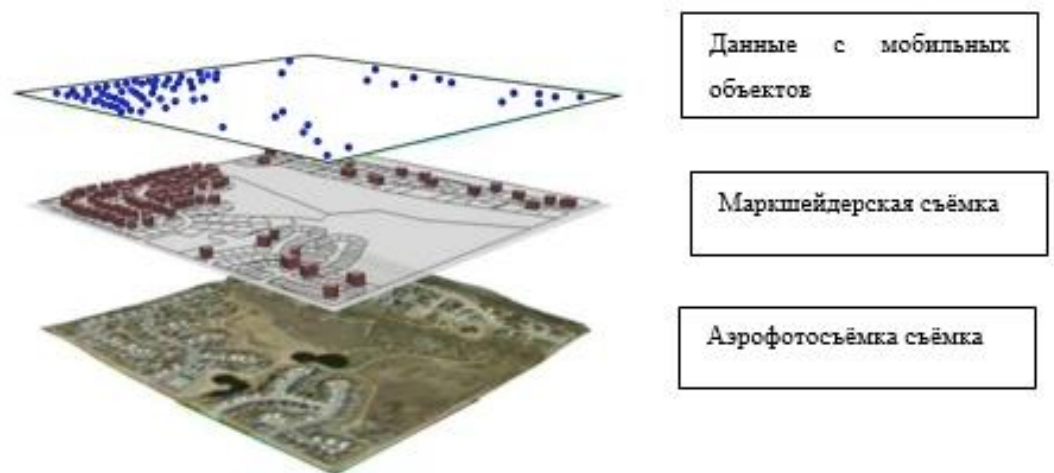


Рисунок 3.1 – Источники информации для построения модели дороги

Можно заметить, что формируется 3 разнородных слоя данных одной поверхности, с различной точностью и различным временем обновления.

Первоначальной задачей является преобразования всех координат из GPRS подобных систем картографическую проекцию в «декартову» систему координат. В первичной обработке можно воспользоваться формулой гаверсинусов, для расчёта расстояние между двумя GPS координатами. В обобщённом формате формула имеет вид:

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (2)$$

где φ_1, φ_2 - широта первой и второй точки (в радианах),

λ_1, λ_2 - долгота первой и второй точки (в радианах),

r - радиус сферы.

Данный подход применим только для оценочного перевода в другую систему координат.

Вторым подходом может являться использование проекцией Гауса Кобгера для избегания неточностей (см. рисунок 3.2).

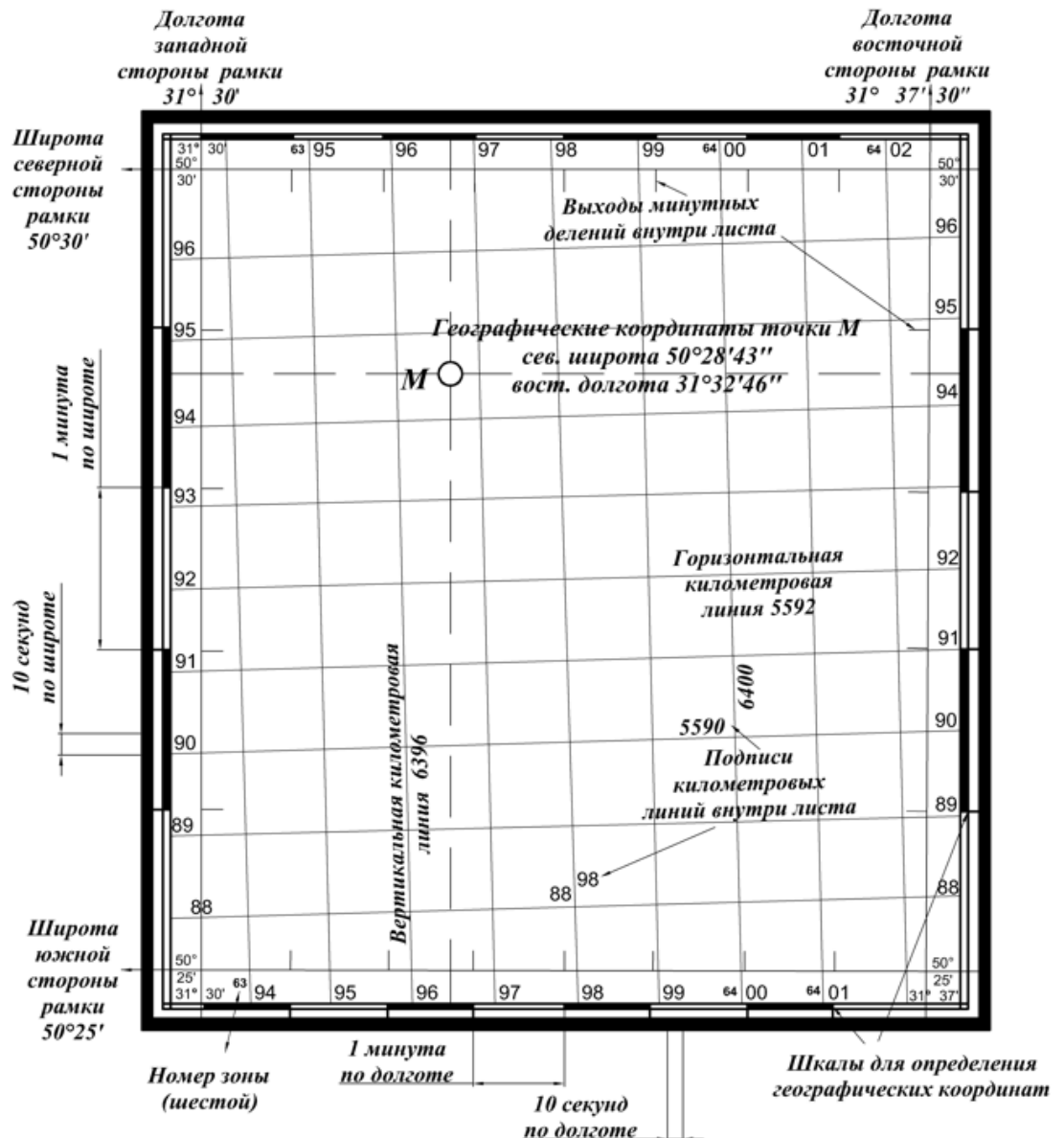


Рисунок 3.2 – Шкалы географических координат и километровая сетка на карте масштабом 1:25000 [17]

Данный подход позволяет построить на этой территории систему плоских прямоугольных координат, и не учитывать искажения на крупных участках поверхности [14].

Итоговым результатом работы данного подхода, будет отцентрированный и построенный в плоских прямоугольных координат 3-х слойный набор точек, со своим набором свойств, Пример данных таблиц указан в Таблицах 3.1–3.3.

Таблица 3.1. Описание пунктов таблицы слоя мобильных объектов

	Название	Описание	Пример значений
1	'Data'	Дата и время точки	2019-11-20 00:00:00.280
2	'Lat'	Широта	51.260093
3	'Lon'	Долгота	37.730011
4	'Height'	Высота над уровнем моря	68.021
5	'GpsQual'	Количество спутников GRPS видимых моб. объектом	5
6	'Azimut'	Значение азимута	342.20404
7	'Speed'	Значение мгновенной скорости	7.973888
8	'AngleX'	Угол наклона по оси X	0
9	'AngleY'	Угол наклона по оси Y	-14
10	'Weight'	Перевозимый вес	20
11	'SuspFL'	Давление на переднюю левую стойку	41.1256
12	'SuspFR'	Давление на переднюю правую стойку	11.9256
13	'SuspRL'	Давление на заднюю левую стойку	42.4306
14	'SuspRR'	Давление на заднюю правую стойку	16.5516
15	'AccX'	Ускорение по оси X	4.728
16	'AccY'	Ускорение по оси Y	5.021
17	'AccZ'	Ускорение по оси Z	-9.584
18	'VectXY'	Ускорение по вектору XY	12.308
19	'VectXZ'	Ускорение по вектору XZ	9.976
20	'VectYZ'	Ускорение по вектору YZ	15.352
21	'VectXYZ'	Ускорение по вектору XYZ	15.6
22	'ID car'	Уникальный ключ мобильного объекта	103
23	'X'	Значения координаты X	713.865869
24	'Y'	Значения координаты Y	1374.118216
25	'Z'	Значения координаты Z	28.021

Таблица 3.2. Описание пунктов таблицы слоя маркшейдерской съёмки

	Название	Описание	Пример значений
1	ID obj	Уникальный ключ объекта	48
2	Type id	Уникальный ключ типа объекта	02
3	'Lat'	Широта	51.260246; 51.256115 51.256175 51.256240
4	'Lon'	Долгота	37.715758 37.715688 37.715630 37.715582
5	'Height'	Высота над уровнем моря	80.221 79.926 79.771 79.472
6	'X'	Значения координат X контура объекта	265.537933 271.552466 278.261968 285.457392
7	'Y'	Значения координат Y контура объекта	382.416322 377.563343 373.459812 370.174635
8	'Z'	Значения координат Z контура объекта	40.221 39.926 39.771 39.472
9	Data	Дата обновления обновления/добавления объекта	10.10.2017

Таблица 3.3. Описание пунктов таблицы слоя аэрофотосъёмка

	Название	Описание	Пример значений
1	ID obj	Уникальный ключ объекта	48
2	Type id	Уникальный ключ типа объекта	02
3	'Lat'	Широта	51.260246; 51.256115 51.256175 51.256240
4	'Lon'	Долгота	37.715758 37.715688 37.715630 37.715582
5	'X'	Значения координат X контура объекта	265.537933 271.552466 278.261968 285.457392
6	'Y'	Значения координат Y контура объекта	382.416322 377.563343 373.459812 370.174635
7	Data	Дата обновления обновления/добавления объекта	10.10.2017

Основной особенностью данных слоёв является, одинаковая ориентация в пространстве и соответствие координат X,Y,Z . Например, объект N–будут иметь одинаковые значения координаты. X,Y,Z во всех слоях.

Следующим шагом можно выделить разделение всех слоёв на сегменты, для повышения скорости расчётов и возможности использования параллелизации. Но следует учитывать, не однородность информации в разных сегментах. На Рисунке 3.3 представлено количество записей о телеметрии за небольшой промежуток времени, с различной размером сегмента. Опираясь на эти значения, мы можем построить гистограмму частот, и понять оптимальный параметр разбиения.

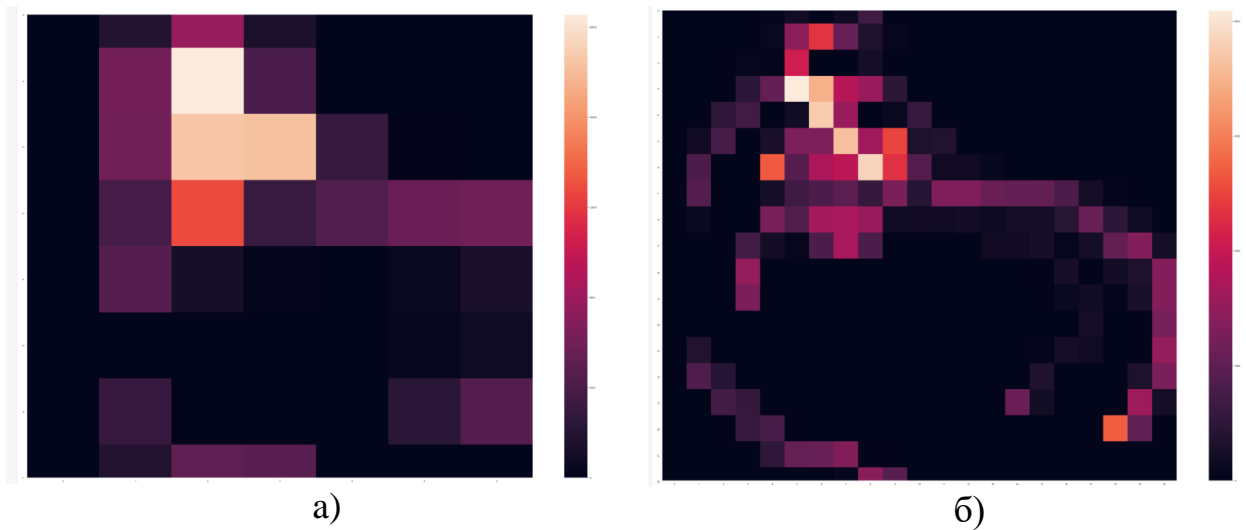


Рисунок 3.3 – а) Разбиение на сегменты с шагом 286 метров б) Разбиение на сегменты с шагом 100 метров.

С помощью визуального анализа мы можем выявить сильный перекося по количеству точек в нескольких сегментах (чем ярче цвет, тем больше точек). Данный перекося затрудняет многопоточную обработку, т.к. происходит процесс гонки и создание модели ограничена выполнением самого насыщенного сегмента, когда все остальные потоки простаивают. Следующей задачей является выделения контуров дорожного полотна из всего облака точек.

3.2. Выделение границ дорожного полотна

При использовании маркшейдерской съёмки или данных с аэрофотосъёмки, границы дорожного полотна после предобработки получаются в виде последовательного набора точек N_i , где каждая точка N содержит в себе $\{x, y, z\}$ параметры или координаты в пространстве, удовлетворяющий интегральной теореме Коши, при учёте замыкания контура дорожного полотна (формула 3).

$$\oint_{\Gamma} f(z) dz = 0 \quad (3)$$

где некоторая функция $f(z)$, аналитической в некоторой односвязной области $A \subset C$ и для любой замкнутой кривой $\Gamma \subset C$.

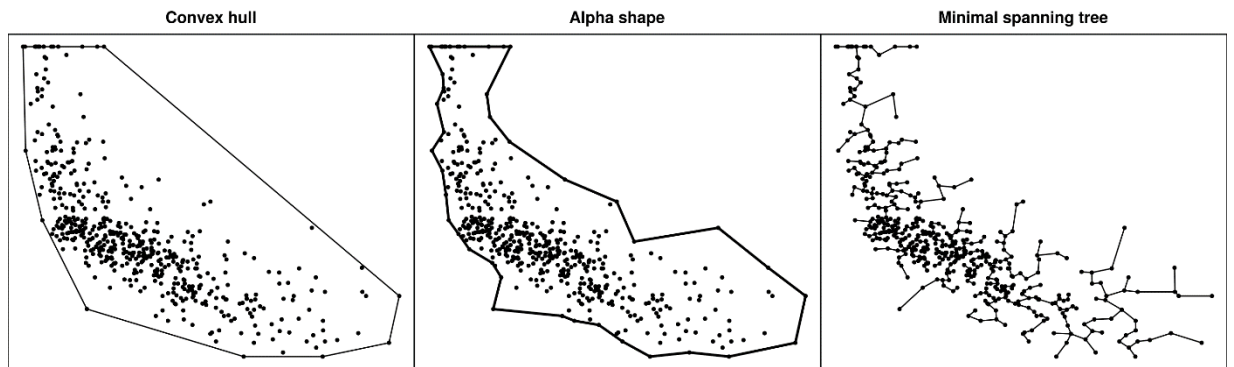
Исходя из обработанных данных формируется контур объекта, без лежащих внутри контура точек по формуле 4.

$$\oint_{\Gamma} f(N) dN = 0 \quad (4)$$

С другой стороны, при получении облака точек с мобильных объектов N , для части которых не соблюдаются условия интегральной теоремы Коши, соответственно возникает задача поиска контура дорожного полотна данных мобильных объектов, что является задачей вычисления выпуклой оболочки. В ходе исследования было разработано 2 подхода: нахождение в интервале крайних точек и объединение найденных крайних точек в контур или создание альфа формы.

Суть первого подхода заключается в следующем: примем, что есть точка $N_i\{x_i, y_i\}$, где x_i — значение координаты абсцисс, y_i — значение координаты ординат. На следующем шаге происходит формирование интервалов $I_j\{y_j, y_{j+1}\}$ по оси ординат заданным интервалом h , таким что $y_j + h = y_{j+1}$. Для точек $N'_i \in I_j$ находятся точки $N'_{i \min}$ и $N'_{i \max}$, далее создается набор точек $K\{N_{1 \min} \dots N_{i \min}, N'_{i \max} \dots, N'_{1 \max}\}$. Данный набор точек является некоторым контуром, требующим проверки на соблюдение интегральной теоремы Коши, при соблюдении которой мы можем считать его оптимальным. Такой подход можно назвать поиском выпуклой оболочки.

Вторым подходом для нахождения выпуклой оболочки является расчёт α -форма, пример которой изображён на Рисунке 3.4. α -форма — это семейство кусочно-линейных простых кривых на евклидовой плоскости, ассоциированных с формой конечного множества точек [23].

Рисунок 3.4 – Виды α -формы[18]

Для расчёта α -форма был выбран алгоритм, базирующийся на триангуляции Делоне. [103] Триангуляция высчитывается постепенно, добавляя по одной точки за раз, а затем выбирая α -комплекс в качестве полкомплекса. Под α -комплексом будем понимать подкомплекс триангуляции Делоне, т.е. с α -форма это объединение всех симплексов в α -комплексе. Каждое ребро или треугольник триангуляции Делоне может быть связано с характерным радиусом, радиусом наименьшего пустого круга, содержащего ребро или треугольник. Для каждого действительного числа α α -комплекс данного множества точек является симплициальным комплексом, образованным множеством ребер и треугольников, радиусы которых не более $1/\alpha$.

Прежде чем рассчитывать полный набор триангуляций, проводится расчет размерности итоговой структуры и размер симплексов.

На начальном этапе расчетов принимают, что S -это набор из n взвешенных точек в пространстве R^2 . Ребра триангуляции Делоне образуют плоский граф. Используя формулу Элера для евклидовой плоскости, получают $\# \text{вершины} - \# \text{ребра} + \# \text{границ} = \# \text{компоненты} + 1$.

В общем формате: $\# \text{вершины} \leq n$, $\# \text{границ} = \# \text{треугольники} + 1$ и $\# \text{компоненты} = 1$.

Отсюда следует вывод, что, $\# \text{ребра} - \# \text{треугольники} \leq n - 1$.

Но у каждого треугольника есть три ребра, и каждое ребро принадлежит двум граням, либо двум треугольникам, либо одному треугольнику и внешней грани. Пусть k -число ребер внешней грани, таким образом:

$$2\#\text{ребра} = 3\#\text{треугольники} + k.$$

Следовательно, $\#\text{ребра} \leq 3n - 3 - k$ и $\#\text{треугольники} \leq 2n - 2 - k$, и вся триангуляция Делоне имеет менее $6n$ симплексов, как и каждый α -комплекс. Данное заключение верно, как для взвешенного случая, так и для невзвешенного

Чтобы объяснить принцип работы следующего шага алгоритма, вернемся снова к двумерному случаю. Примем, что пространства точек S_i состоит из точек $z_1 - z_i$ и мы строим триангуляция Делоне для случая S_{i+1} , т.е. $\text{Del } S_{i+1}$ из $\text{Del } S_i$, добавив точку z_{i+1} . В начале следует рассмотреть, как формируется ячейка Вороного для случая S_{i+1} - $\text{Vor } S_{i+1}$ из $\text{Vor } S_i$, на Рисунке 3.5.

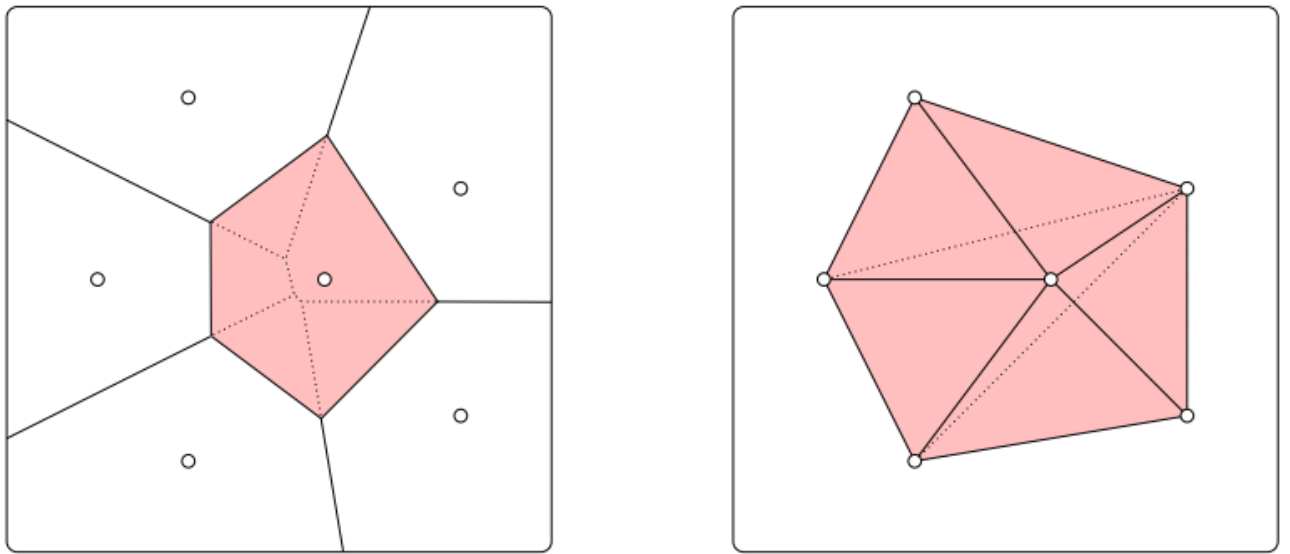


Рисунок 3.5 – Слева: добавление точки посередине создает новую ячейку [103] Вороного, полученную путем изменения элементов из соседних ячеек. Справа: триангуляция Делоне изменение путем замены звезды новой точки набором симплексов, покрывающих одну и ту же область на плоскости.

Исходя из данных, представленных на Рисунке 3.6, точка z_{i+1} вторгается в некоторые из существующих ячеек Вороного, чтобы создать свою собственную ячейку. Формируя множество симплексов, сформированных добавлением точки z_{i+1} и формируя новую звезду $St \ z_{i+1}$ и множество симплексов в $\text{Del } S_i$, занимающую ту же область примитивов (предзвездой) $Pt_{z_{i+1}}$. Таким образом получаем:

$$\text{Del } S_{i+1} = \text{Del } S_i - \text{Pt}_{z+1} \cup \text{St}_{z_{i+1}} \quad (5)$$

Треугольники в области примитивов, чьи окружности пересекаются z_{i+1} , и пустые области, которые они связывают, больше не пусты. Стоит обратить внимание, что область, покрытая предзвездой, не обязательно выпуклая, но она всегда имеет форму звезды, поскольку новые треугольники в звезде образуются путем соединения z_{i+1} с граничными краями этой области.

В базовом варианте сначала убирается вся предзвезда, а затем добавляется вся звезда, следом модифицируется Del_{S_i} по одному симплексу за раз, в завершении он модифицируется в $\text{Del}_{S_{i+1}}$, но следует учитывать триангуляцию в течение всего процесса. Это осуществляется с помощью переворотов, также известных как би-звездные операции. Переворот ребра заменяет два треугольника, разделяющих ребро, двумя другими треугольниками, разлагающими один и тот же четырехугольник. В более общем смысле определяется поворот в пространстве R^2 в терминах границы тетраэдра в R^3 . R^2 проекция является либо четырехугольником, либо треугольником, и его верхняя и нижняя границы обеспечивают две триангуляции этой проекции.

Несмотря на существование конфигураций, требующих квадратичного числа таких переворотов, алгоритм, как правило, довольно эффективен. При применении его как часть инкрементного алгоритма, каждый поворот удаляет один из d -симплексов в предзвезде. Следовательно, количество переворотов напрямую связано с общим количеством симплексов, созданных и уничтоженных в процессе.

Учитывая триангуляцию Делоне, строится α -комплекс, выбирая симплексы, ячейки Вороного которых имеют непустое общее пересечение с объединением окружностей. Чтобы ускорить этот процесс, используется тот факт, что каждый симплекс σ_j , $\sigma_j \in \text{Del } S$ имеет порог α_j такой, что $\sigma_j \in K(\alpha)$ если $\alpha_j \leq \alpha$. Это предполагает, сортировку симплексов в возрастающем порядке порогов и извлечении α -комплекс в качестве префикса этой последовательности.

Для некоторых симплексов порогом является радиус наименьшей окружности, а для других – это порог другого симплекса в его звезде.

Порог каждой вершины равен нулю, а порог каждого треугольника в триангуляции Делоне равен радиусу его окружности. Для ребра $\sigma_j = \text{conv} \{a, b\}$ существуют два случая, которые можно выделить, рассматривая наименьшую окружность, окружность, центрированную в средней точке и проходящую через конечные точки ребра: если другая вершина каждого треугольника лежит вне этой окружности, то порогом является радиус окружности, $\alpha_j = \|a-b\|/2$. В противном случае третья вершина одного треугольника лежит внутри круга и порог ребра такой же, как и у этого треугольника.

После вычисления всех порогов симплексы сортируются в последовательность $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$, таких, что $\alpha_j \leq \alpha_{j+1}$ для всех j . Называя эту последовательность фильтром, формируется фильтрация триангуляции Делоне с учетом всех префиксов симплексов с пороговыми значениями меньше или равными вещественное число α . По техническим причинам, требуется, чтобы все префиксы фильтра комплексов, которые определены действительные числа α . Это достигается путем сортировки симплексов с равными порогами по размерности. Это свойство можно быть сложным численно, но преимущества заключаются в более простых и эффективных алгоритмах для топологических свойств α -комплексов. Приведём пример для 4 точек $s = (a_1, a_2)$, $b = (b_1, b_2)$, $c = (c_1, c_2)$, $x = (x_1, x_2)$ на поверхности.

Точка x лежит на окружности, определяемой a, b, c , если матрица (формула б) имеет нулевой определитель.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & a_1^2 + a_2^2 \\ 1 & b_1 & b_2 & b_1^2 + b_2^2 \\ 1 & c_1 & c_2 & c_1^2 + c_2^2 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 + x_2^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Если a, b, c образуют левый поворот, то точка x лежит внутри окружности, если $\det A < 0$. Наконец, a, b, c образуют левый поворот, если верхняя левая подматрица $3 \times 3 \Delta A$ имеет положительный определитель. Таким образом,

формируется следующая булева функция, которая распознает, когда x лежит внутри круга, определенного a, b, c :

```
boolean isInCircle (a, b, c, x):
```

```
return det  $\Delta$  det  $\Lambda$  < 0.
```

Текст функции прост, но численно неустойчив, если одна или обе матрицы явно не имеют полного ранга. Используя точную арифметику, получаем правильный знак во всех случаях.

Кратко обобщим основную идею α -форм: формирование рёбер α -формы, являющихся рёбрами ячеек Вороного, отсортированных и меньшего радиуса и триангуляции Делоне. Таким образом, составляя отсортированную последовательность симплексов с фильтрацией по α образуется набор координат $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\} \dots \{x_n, y_n\}$, формирующий α -форму и являющиеся рёбрами симплексов.

Общими проблемами этого подходов, является отделение одного дорожного полотна от другого. В качестве примера на Рисунке 3.6, изображён элемент дорожного полотна

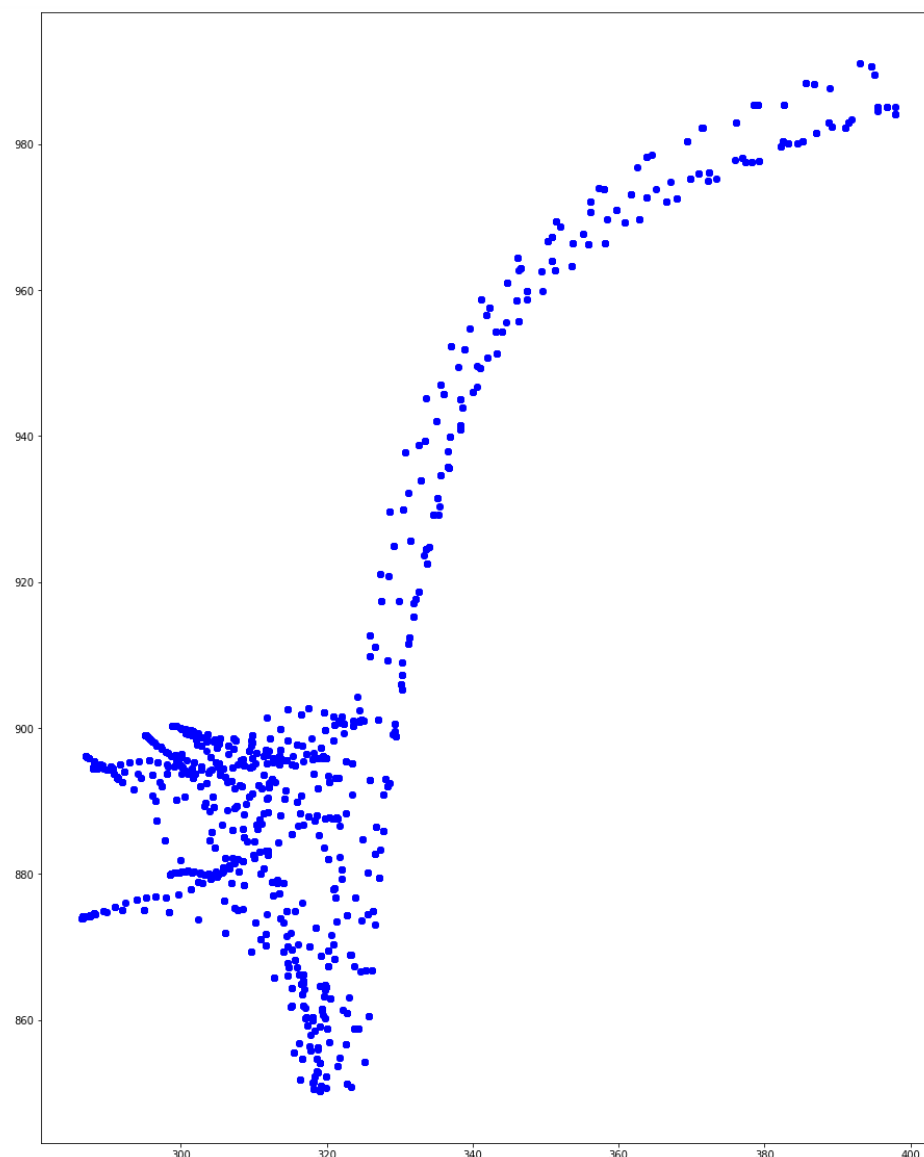


Рисунок 3.6 – Облако точек дорожного полотна

Общее число точек 4538, площадь дорожного полотна при маркшейдерской съёмке 2146.9062. В таблице 3.5 указаны числовые характеристики результатов работы обоих подходов на данном участке работы и % заполнения от площади, полученные с использованием маркшейдерской съёмки с учётом размеров транспортного средства.

Таблица 3.4. Числовые характеристики результатов работы подходов

Подход	Абсолютная контура м ²	Относительная контура %
№1 Выпуклая оболочка	2104.81	98
№2Альфа форма	2201.003	102.51

Анализ комплексного участка дороги, состоящего из S образного серпантина, зафиксированного с использованием маркшейдерской съёмки, представлен на рисунке 3.8.

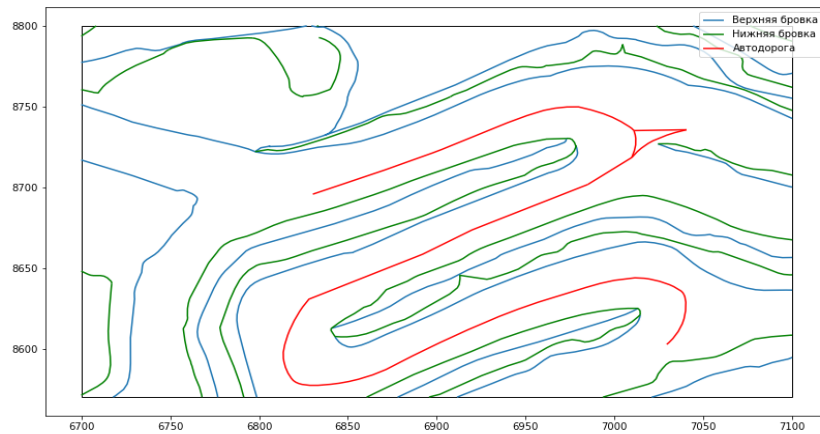


Рисунок 3.7 – S образный участок дороги

Анализ Рисунка 3.8 позволяет сделать вывод о том, что линия автодороги не проходит ровно между бровками и не подходит в виде базиса для расчёта геометрии дорожного полотна. Однако, использование границ верхней и нижней бровки позволяет предположить нахождение между ними поверхности дорожного полотна (см. Рисунок 3.8).

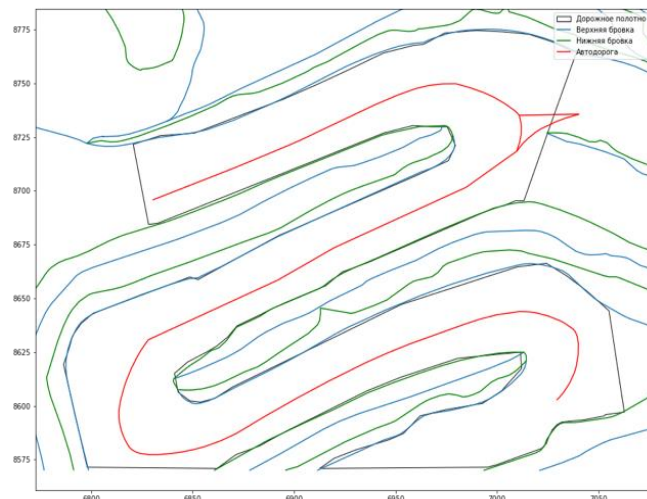


Рисунок 3.8 – Контур дороги S образного участок

Опираясь на Рисунок 3.8 можно осуществить подбор оптимальных гиперпараметров a и b , а так же значение α , определяющее форму оболочку и значения дополнительного размера буфера b . Значение b связано с тем, что данные с мобильных объектов представляют собой материальные точки, но фактически это некоторые объекты со своей шириной, длиной и радиусом разворота.

Исходя из полученных данных формируется задача оптимизации (формула 7):

$$\begin{cases} S_m - S_a \rightarrow \min, \text{ при следующих ограничениях} \\ L_m \cap L_a \\ b > 1 \end{cases} \quad (7)$$

где L_a – границы α -формы,

L_m – границы маркшейдерской формы,

b – коэффициент расширения границы.

Для расчёта площади сложной фигуры используется формулой площади Гауса (формула 8):

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right| \quad (8)$$

где x и y – координаты вершин многоугольника,

n – количество сторон многоугольника.

Таким образом, для данного участка оптимальные значения $a = 0.066$ и значения $b = 1.7$. Используя эти значения, осуществляется восстановление других контуров дороги с некоторой точностью для заданного карьера с помощью гиперпараметров и методов выпуклой оболочки. Полученный контур дороги предоставлен на Рисунке 3.9.

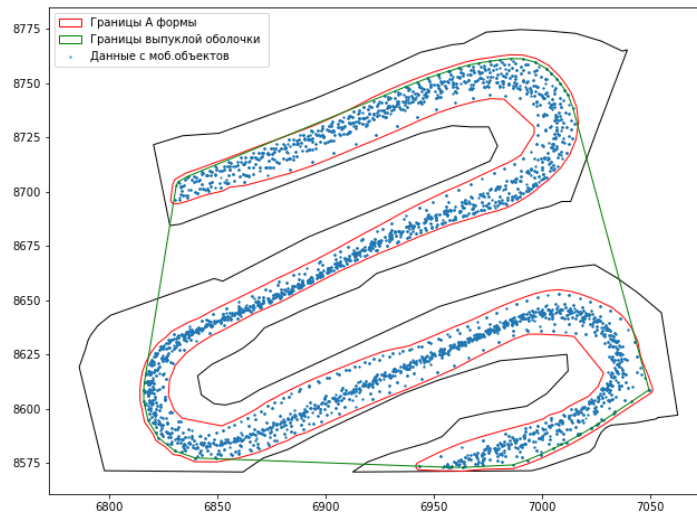


Рисунок 3.9 α -форма и выпуклая оболочка

Анализ Рисунка 3.10, позволяет сделать вывод о том, что метод выпуклой оболочки уступает методу α -формы. Числовые значения результатов двух подходов указаны в таблице 3.5 для s образного участка дороги.

Таблица 3.5. Показатели площади контура для s образного полотна

Подход	Абсолютная площадь контура м2	Относительная площадь контура %
№1 Выпуклая оболочка	13057.21	70.28
№2Альфа форма	33581.63	116.45

Исходя из анализа данных таблицы 3.4 следует, что выпуклая оболочка не подходит для описания сложных участков дороги. Невысокие проценты заполнения для подхода с использованием α -форм, обуславливает наличие дополнительной дороги, по которой не проехал мобильных объект и жёсткой границей в нижней части.

В рамках проводимого исследования, для исключения возможных ошибок и подтверждения полученных выводов, был осуществлен повторный эксперимент для прямого участком дороги длиной около 200 метров при следующие параметрах α -формы: $a = 0.066$, $b = 1.7$. Результат работы подхода с α -формами представлен на Рисунке 3.10.

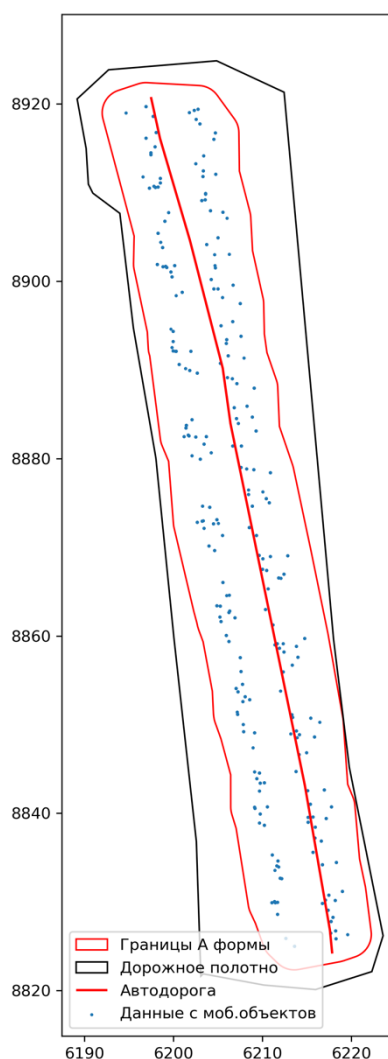


Рисунок 3.10 – α -форма для прямого участка дороги

Стоит отметить, что подход с α -формы зависим от исходных данных и формы дорожного полотна. Также для данного участка было проведено сравнение характеристик подходов α -формы с подходом с выпуклой оболочкой, результаты которого представлены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6. Показатели площади контура для прямого участка дороги.

Подход	Абсолютная площадь контура м ²	Относительная площадь контура %
№1 Выпуклая оболочка	1448	101
№2 Альфа форма	1172	81

На Рисунке 3.11 представлено восстановление другого участка дороги, используя только данные с мобильных объектов и гиперпараметров α -формы.

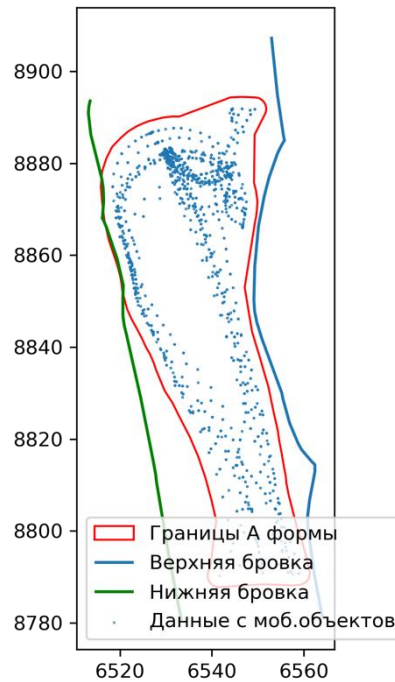


Рисунок 3.11 – Восстановление контура дороги с использованием граница методом α -формы

Анализ Рисунка 3.11 позволяет отметить, что с зафиксированными гиперпараметрами не произошло пересечение бровок и данный контур можно использовать для дальнейшей работы.

Однако, присутствует проблема: при использовании обоих подходов возникает объединение нескольких частей дорог в один контур (Рисунок 3.12).

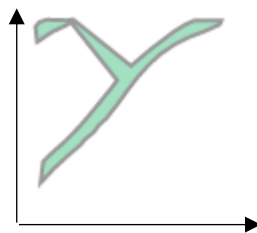


Рисунок 3.12 – Проблема объединения контуров разных участков дорог

Решением данной проблемы служит применённые методов кластеризации со следующими ограничениями:

- Неопределённое кол-во участков различных дорог в произвольном сегменте;
- Сложность детектирования перекрёстков;
- Разноуровневость участков дорожного полотна по оси Z.

Их-за неопределённости количество кластеров невозможно применить методы k-средних или спектрального кластера.

В ходе исследования решение данной проблемы осуществлялось с помощью алгоритма нахождения кластеров в пространственных данных на основе плотности OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure), который сохраняет иерархию кластеров для переменного радиуса окрестности и подходит для использования на больших наборах данных, чем текущая реализация.

Алгоритм OPTICS требует два параметра – параметр ε описывает максимальное расстояние (радиус), принимаемое во внимание, а параметр $MinPts$ описывает число точек, требующихся для образования кластера. Точка p является основной точкой, если по меньшей мере $MinPts$ точек находятся в её ε -окрестности $N_\varepsilon(p)$. В отличие от других возможных алгоритмов (таких как DBSCAN), алгоритм OPTICS рассматривает также точки, которые являются частью более плотного кластера, так что каждой точке назначается основное расстояние, которое описывает расстояние до $MinPts$ -ой ближайшей точки (формула 9):

$$core-dist_{\varepsilon, MinPts} = \begin{cases} \text{UNDEFINED} & |N_\varepsilon(p)| < MinPts \\ MinPts-th N_\varepsilon(p) & |N_\varepsilon(p)| \geq MinPts \end{cases} \quad (9)$$

здесь $core-dist$ = основное расстояние, $MinPts-th N_\varepsilon(p)$ -ое в порядке возрастания расстояние до $N_\varepsilon(p)$.

Достижимое расстояние точки o от точки p равно либо расстоянию между o и p , либо основному расстоянию точки p , в зависимости от того, какая величина больше (формула 10):

$$\text{reachability-dist}_{\varepsilon, \text{MinPts}}(o, p) = \begin{cases} \text{UNDEFINED} & |N_{\varepsilon}(p)| < \text{MinPts} \\ \max(\text{core-dist}_{\varepsilon, \text{MinPts}}(p), \text{dist}(p, o)) & |N_{\varepsilon}(p)| \geq \text{MinPts} \end{cases} \quad (10)$$

Здесь reachability-dist = достижимое расстояние.

Если p и o являются ближайшими соседями, $\varepsilon' < \varepsilon$, следовательно, p и o принадлежат тому же кластеру [79]. Пример извлечения кластеров показан на Рисунке 3.13.

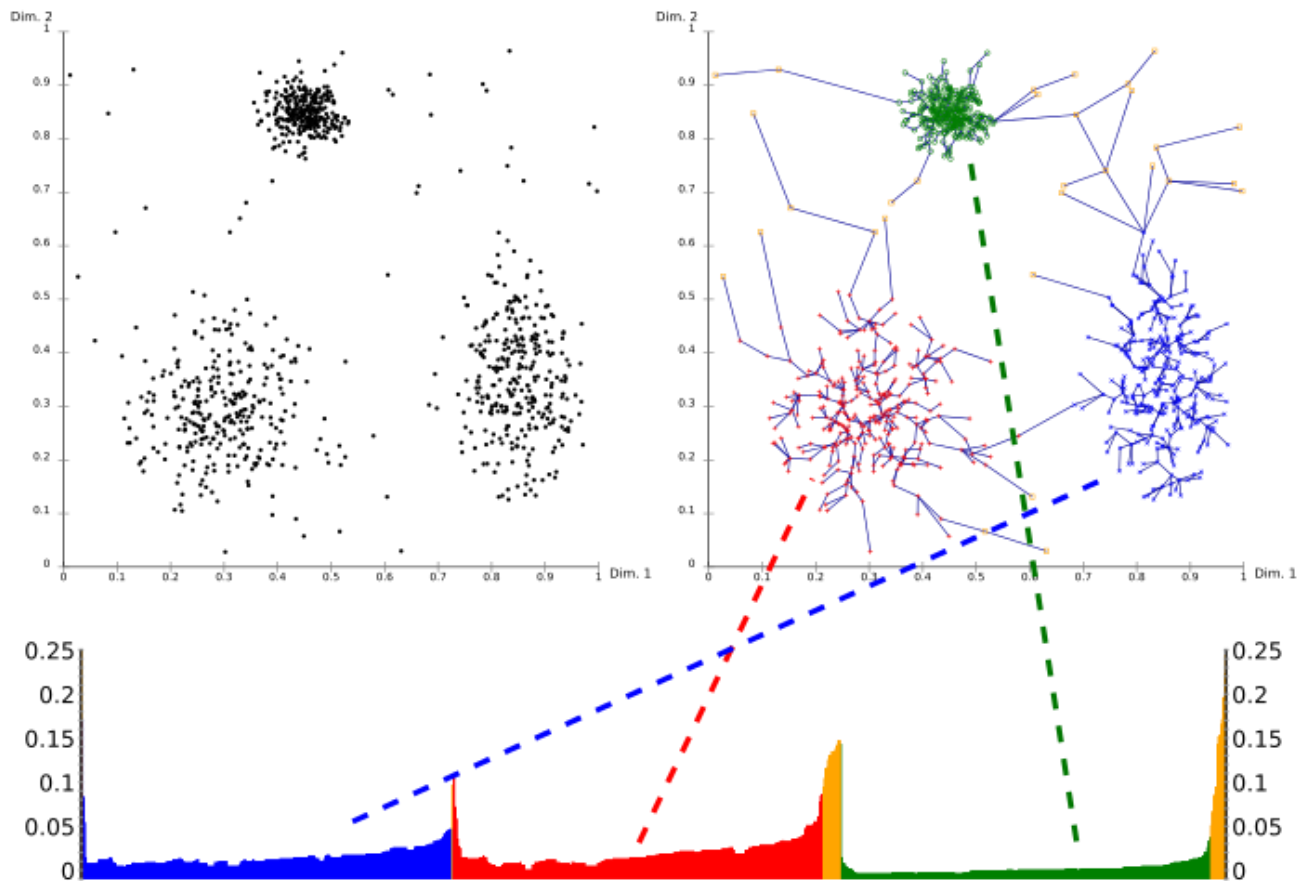


Рисунок 3.13. Пример работы алгоритма кластеризации OPTICS [20]

В данном исследовании реализация алгоритма осуществляется из библиотеки *sk-learn* со следующими параметрами модели:

`min_samples=50, xi=.05, min_cluster_size=.05.`

Полученные результаты, при использовании сегментов с длиной 100м, указанные в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Показатели работы алгоритма OPTICS при разных гиперпараметрах

№	min_samples	xi	min_cluster_size	Точность	Полнота
1	50	0.05	0.05	0.75	0.82
2	100	0.1	0.1	0.86	0.87
3	60	0.07	0.07	0.79	0.81
4	80	0.07	0.07	0.81	0.83

В качестве эталонных значений используются размеченные экспертом данные. Иллюстрации работы алгоритма OPTICS с параметрами, представленными в таблице 3.6, приведены на Рисунке 3.14.

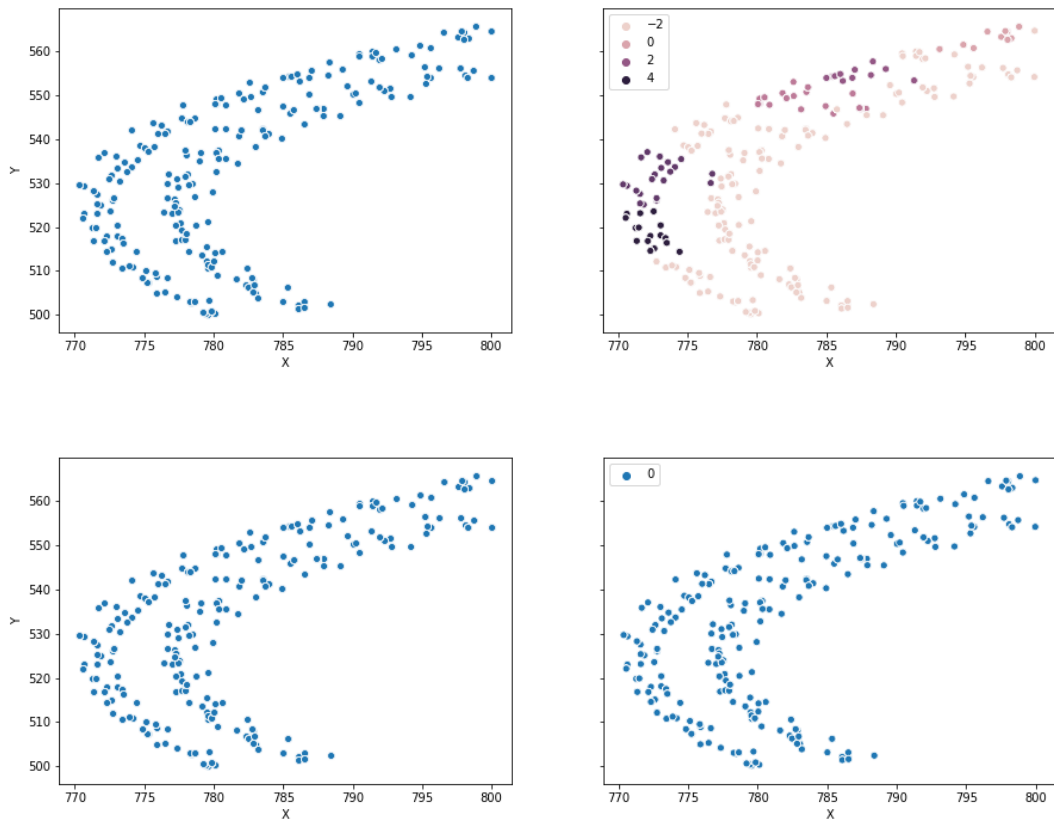


Рисунок 3.14. Иллюстрации работы алгоритма OPTICS с параметрами таблицы 3.6

Основываясь на данных, представленных на рисунке 3.13 и таблицы 3.6. можно сделать вывод, что при гиперпараметрах модели $\text{min_samples} = 100$ и $\text{min_cluster_size} = 0,1$ достигается наибольшая точность. Область исследования гиперпарамтров для min_samples составляла от 20 до 200, а для min_cluster_size от 0,01 до 0.5.

Разделение дорожных полотен и построения правильного контура, основанное на полученных данных, представлено на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15. а) Результат получения контура без алгоритма кластеризации дороги б) Результат получения контура с алгоритмом кластеризации дороги

Для обработки данных с аэрофотосъемки применяется подход сегментации MeanShift и FloodFill, основными задачами которых является получения контура дорожного полотна, подобного рисунку 3.14 б).

Алгоритм MeanShift выполняет кластеризации по общим признакам, например пиксели имеющие одинаковые числовые показатели в кодировке RGB помещаются в один кластер, таким образом на выходе мы получаем группу кластеров, внутри которых пиксели объединены по определённым признакам. Получи данные группы мы можем выделить пространственные координаты формирующие контур дорожного полотна.

Обобщённо можно описать работу алгоритма следующими шагами: вначале формируется окно - небольшой участок изображения, второй шаг, поиск окна с максимальной плотность заданного значения. Для этого внутри окна ищется пиксель с максимальной плотностью параметра (центроид), затем центроид помещается внутри окна. Процесс повторяется до тех пор пока выбранный центроид не будет максимумом точкой плотности.

Функция плотности задается следующей формулой 11:

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{Nh^d} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{\vec{x}-\vec{x}_i}{h}\right), \quad (11)$$

где \vec{x}_i – вектор признаков i -го пикселя;

d – количество признаков;

N – число пикселей;

h – сглаживающий параметр;

$K(\vec{x})$ – ядро.

Для каждого ядра вычитается значения вектора сдвига $M_h(\vec{x})$, достаточного для поиска максимума методом градиентного сдвига.

При задании в векторе признаков, координаты и яркостные составляющие, то алгоритм будет искать соседние пиксели. Данный подход плохо работает если пиксели, которые необходимо выделить, находится далеко или имеют разную яркостную составляющую. Данный подход хорошо работает при трассировке объектов на яркой подложке. Обычно данный подход используется для трассировки движущихся объектов, но при правильном подборе вектора признаков он неплохо справляется и с выделением контуров дорожного полотна.

Метод наводнение (FloodFill) выделяет регионы схожие по цвету. Вначале выбирается стартовая точка затем указывается доверительный интервал для яркостной составляющей цвета. Заданный интервалы могут быть симметричными так и ассиметричными. По результатам работы метода будет выделен участок изображения исходя из начальной точки и цветового диапазона.

Метод FloodFill хорошо выделяет связанные сегменты, начиная с заданной точки. За основу связанности берётся яркостной показатель близости цвета и выбранный интервал. Пиксель в точке (x, y) добавляется к сегменту, если:

$$src(x', y') - loDiff \leq src(x, y) \leq src(x', y') + upDiff \quad (12)$$

где src – исходное одноканальное изображение;

$src(x, y)$ – значение яркости пикселя в точке (x, y) ;

$src(x', y')$ – значение яркости соседнего выделенного пикселя,;

$loDiff$ – максимальная нижняя допустимая разница яркости между пикселями, принадлежащих сегменту;

$upDiff$ – максимальная верхняя допустимая разница яркости между пикселями, принадлежащих сегменту.

Данный алгоритм используется для заливки области со слабыми перепадами цвета однородным фоном (см. рисунок 3.16).



Рисунок 3.16. Пример работы алгоритмов MeanShift.

Основной целью данного раздела является описания подходов получения замкнутого контура дорожного полотна из различных источников. Для маркшейдерской съёмки, приемлемым вариантом будет использование границ бортов карьера, для телеметрии подходом построения α -формы, то для аэрофотосъёмки алгоритмом MeanShift.

3.3 Замоещение дорожного полотна

В предыдущей главе рассматривался замкнутый контур, но построение цифровой модели является нетривиальной задачей. Таким образом, следующим шагом построения цифровой модели является замоещения атомарными элементами, определяющими качественные и количественные показатели дорожного полотна. Исходя из этого, формируется ряд задач по оптимальному замоещению полученного контура. Первой задачей является выбор типа фигуры: замоещение правильными и не правильными фигурами. Замоещения не правильными фигурами несёт проблемы с массовостью и воспроизводимостью, поэтому в рамках данного исследования было использовано замоещение правильными фигурами, как интуитивно понятное, так и наиболее простое в дальнейшей постобработке. В качестве простых примитивов (атомарных элементов) было использованы: треугольник, квадрат, восьмиугольник. Пример замоещения одного участка полотна различными фигурами проиллюстрирован на Рисунке 3.16.

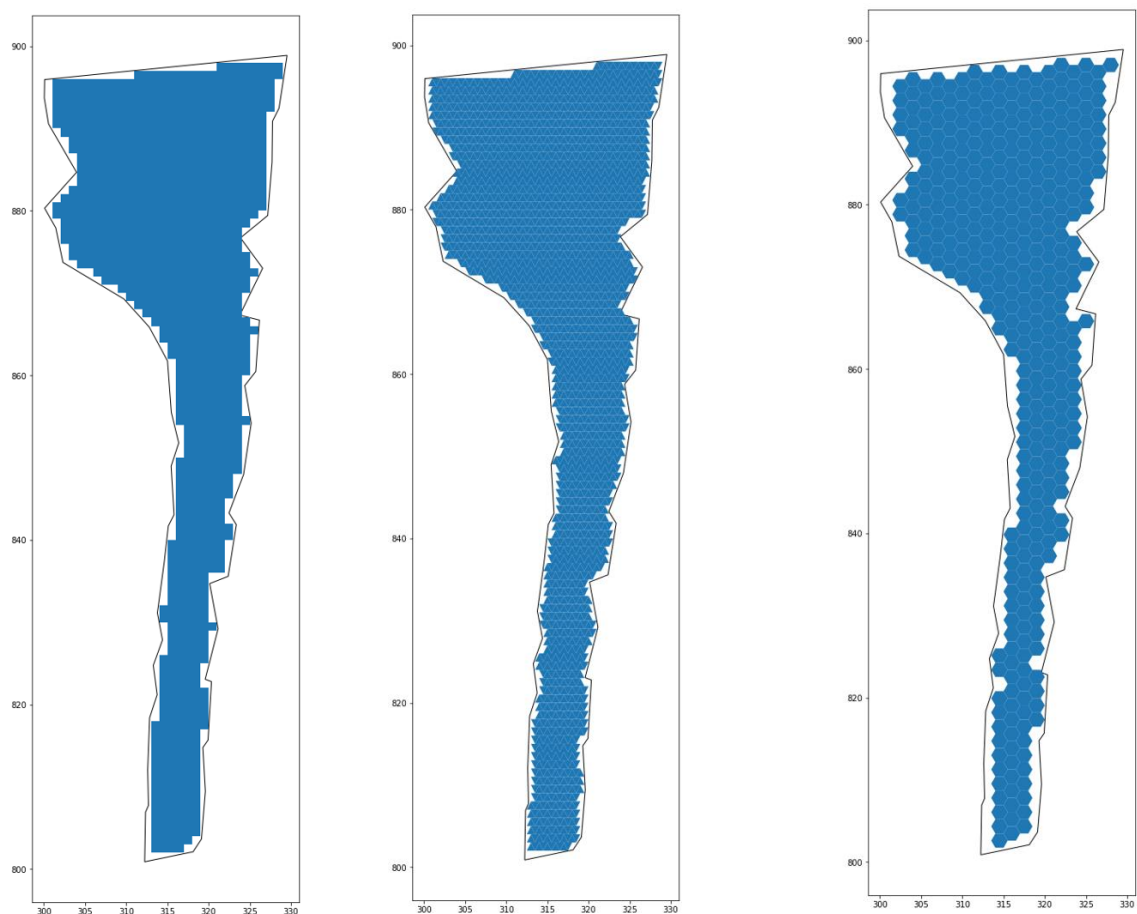
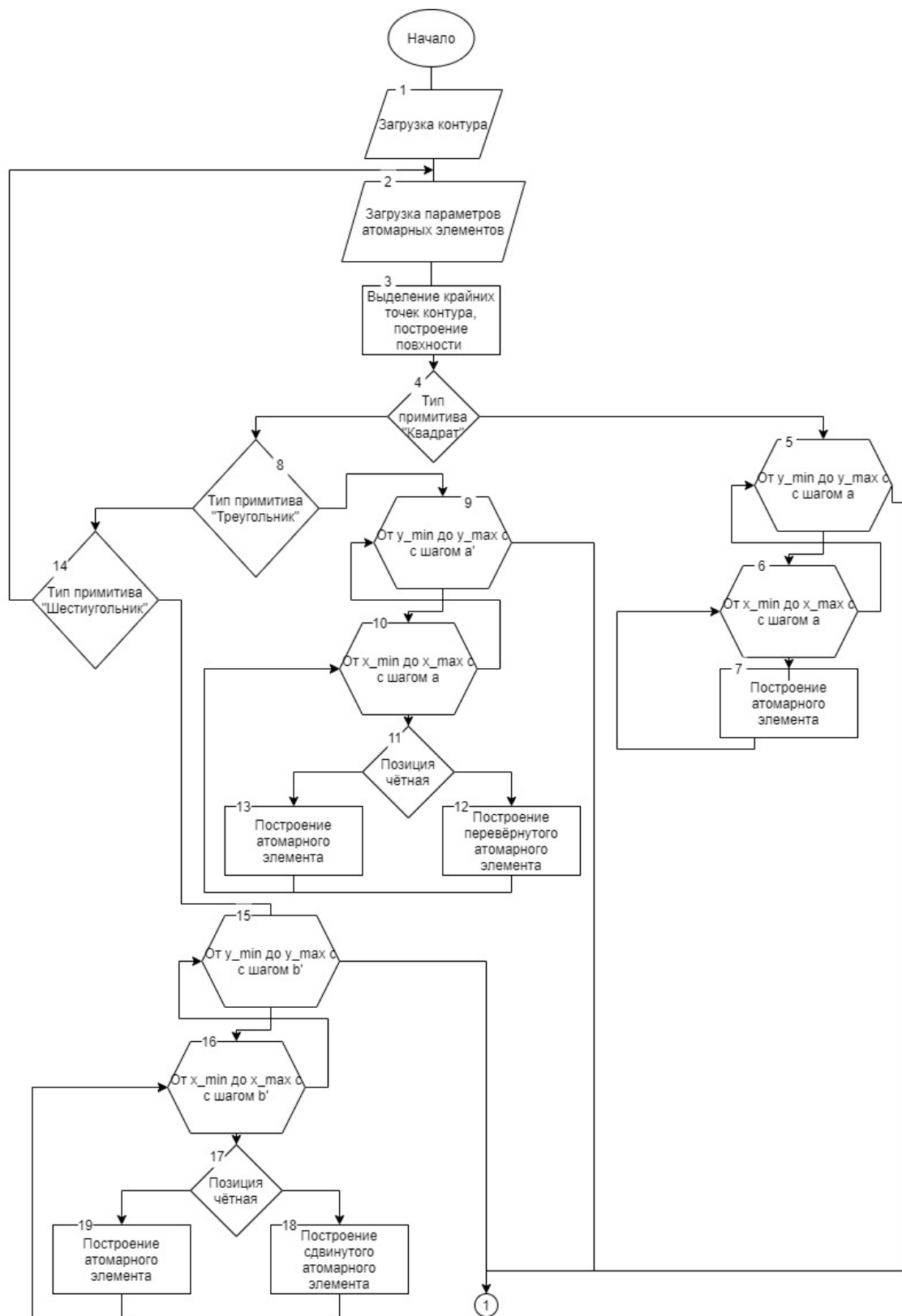


Рисунок 3.17 – Замощение дороги атомарными элементами.

Из визуального анализа рисунка 3.16 можно сделать вывод о том, что наибольшее заполнение контура наблюдается при использовании простой фигуры типа «треугольник», наименьшее же при использовании фигуры «квадрат».

Более детально процесс замощения описан алгоритмом, изображённым на рисунке 3.18.



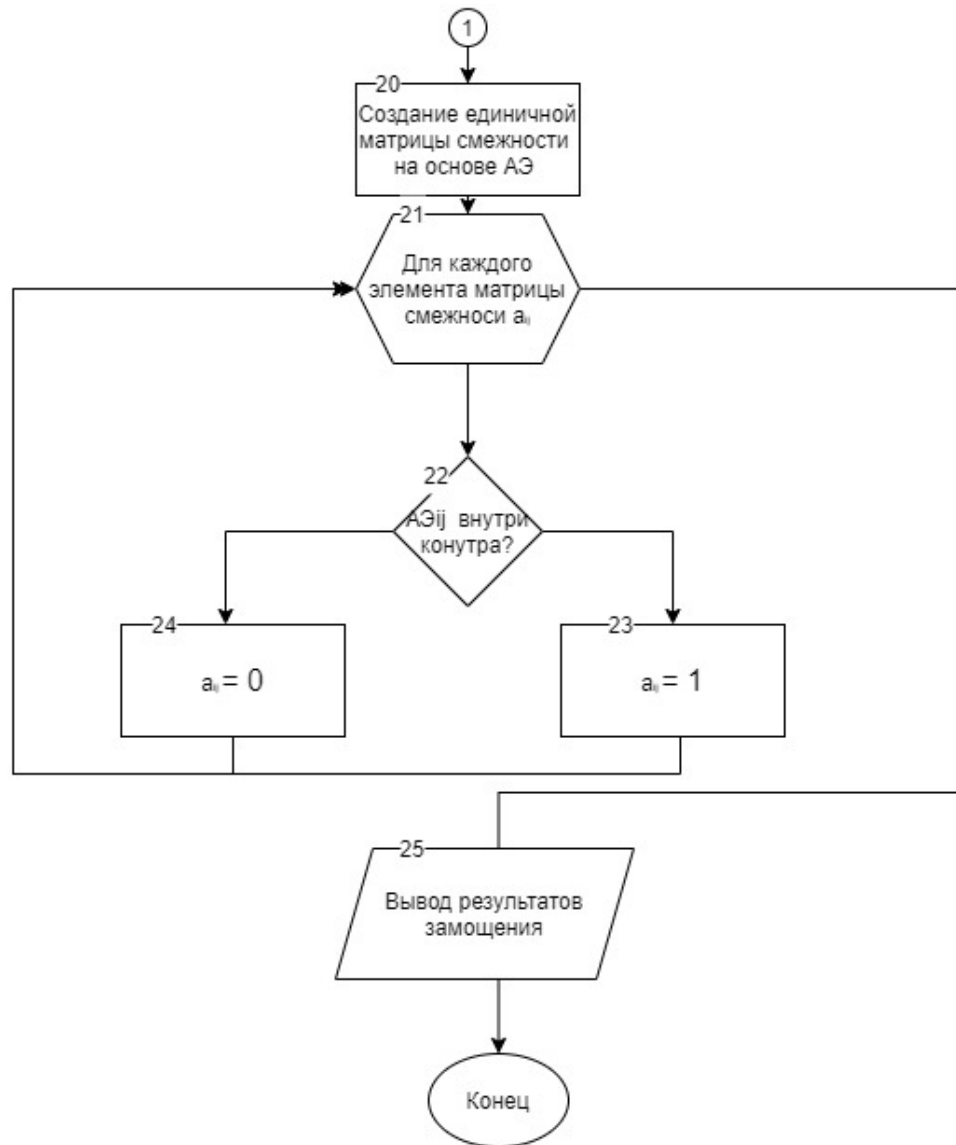


Рисунок 3.18 – Блок схемы алгоритма замощения.

Описание алгоритма:

Блок №1 – Загрузка контура дороги, в виде координат граничных точек.

Блок №2 – Загрузка свойств атомарных элементов для замощения, тип атомарного элемента, длина грани.

Блок №3 – Формирование крайних точек контура со сдвигом наружу на длину грани атомарного элемента.

Блок №4 – Тип примитива «Квадрат»? Если, да то блок №5, если нет, то блок №8.

Блок №5 – Цикл со счётчиком, от точки y_min до y_max с шагом длины грани атомарного элемента a.

Блок №6 – Цикл со счётчиком, от точки x_min до x_max с шагом длины грани атомарного элемента a.

Блок №7 – Формирование атомарного элемента с длиной грани a , в точке $x_y_$ параметра счётчиков блока 5 и блока 6.

Блок №8 – Тип примитива «Треугольник»? Если, да то блок №9, если нет, то блок №14.

Блок №9 – Цикл со счётчиком, от точки y_min до y_max с шагом $a' = \sin 60 * a$.

Блок №10 – Цикл со счётчиком, от точки x_min до x_max с шагом длины грани атомарного элемента a .

Блок №11 – Позиция счётчика $x_$ чётная, если да то блок 12, если нет блок 13.

Блок №12 – Формирование перевёрнутого атомарного элемента с длиной грани a и, в точке $x_y_$ параметра счётчиков блока 9 и блока 10.

Блок №13 – Формирование атомарного элемента с длиной грани a и, в точке $x_y_$ параметра счётчиков блока 9 и блока 10.

Блок №14 – Тип примитива шестиугольник, если да, то блок 15, если нет то загрузка параметров замощение в блоке № 2.

Блок №15 – Цикл со счётчиком, от точки y_min до y_max с шагом $a' = 2 \sin 60 * a$.

Блок №16 – Цикл со счётчиком, от точки x_min до x_max с шагом длины грани атомарного элемента $a' = 2 \cos 60 * a + a$.

Блок №17 – Позиция счётчика $x_$ чётная, если да то блок 18, если нет блок 19.

Блок №18 – Формирование атомарного элемента с длиной грани a и, в точке $x_y_$ со сдвигом на длину грани параметра счётчиков блока 15 и блока 16.

Блок №19 – Формирование атомарного элемента с длиной грани a и, в точке $x_y_$ с параметрами счётчиков блока 15 и блока 16.

Блок №20 – Формирования матрицы смежности исходя из циклов со счётчиков x_min , y_min , x_max , y_max , что бы количество элементов в столбце и в строке было одинаковым.

Блок №21 – Цикл со счётчиком для каждого элемента матрицы смежности a_{ij} .

Блок №22 – атомарный элемент a_{ij} находится внутри контура, если да то блок №23 иначе 24.

Блок №23 – Значение коэффициента атомарного элемента в матрице смежности $a_{ij} = 1$.

Блок №24 – Значение коэффициента атомарного элемента в матрице смежности $a_{ij} = 1$.

Блок №25 – Вывод матрицы смежности и матрице атомарных элементов.

В данном исследовании работа алгоритма рассматривалась на участке дорожного полотна, проиллюстрированном на Рисунке 3.16 разными типами примитивов (атомарных элементов). В результате были получены следующие показатели, указанные в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Числовые показатели

N	Тип замощения	Длина грани, м	Количество элементов n	Di	Sзам (%)
1	Квадрат	1	1114	111	92
2	Треугольник	1	2270	795	94,52
3	Шестиугольник	1	388	60	85

Применяемые в таблице обозначения:

- Sзам – % эффективного адресуемого пространства площади дороги,

$$S_{\text{зам}} = n \cdot l / S_{\text{Э}},$$

где n-количество примитивов,

l-длина грани примитива.

- SЭ площадь дородного полотна полученного от маркшейдерской съёмки,

- Di – количество примитивов, которое необходимо для построения маршрута из крайних точек или, другими словами, количество итераций необходимых для передвижения от крайней нижней левой точки p_1 , до крайней правой верхней точки p_n . Для данного участка дороги p_1 имеет координаты (312,805) p_n (327,890).

Для расчёта итераций маршрута был применён алгоритм A^* в основе которого лежит применение эвристической функции (расстояние + стоимость $f(x)$). A^* пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдёт минимальный. Как и все информированные алгоритмы поиска, он просматривает сначала те маршруты, которые «кажутся» ведущими к цели. От «жадного» алгоритма, который тоже является алгоритмом поиска по первому лучшему совпадению, его отличает то, что при выборе вершины он учитывает, помимо прочего, весь пройденный до неё путь. Составляющая $g(x)$

— это стоимость пути от начальной вершины, а не от предыдущей, как в жадном алгоритме.

В начале работы A^* алгоритма просматриваются узлы, смежные с начальным; выбирается тот из них, который имеет минимальное значение $f(x)$, после чего этот узел раскрывается. На каждом этапе алгоритм оперирует с множеством путей из начальной точки до всех ещё не раскрытых (листовых) вершин графа – множеством частных решений, которое размещается в очереди с приоритетом. Приоритет пути определяется по значению $f(x) = g(x) + h(x)$. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока значение $f(x)$ целевой вершины не окажется меньшим, чем любое значение в очереди, либо пока всё дерево не будет просмотрено. Из множества решений выбирается решение с наименьшей стоимостью [15].

Особенностью реализации данного алгоритма является формирование соседей, т.к. для треугольного примитива необходимо учитывать направление треугольника, а для шестигранника учитывается позиция, пример замощение примитивами и демонстрация соседних элементов показана на Рисунке 3.19.

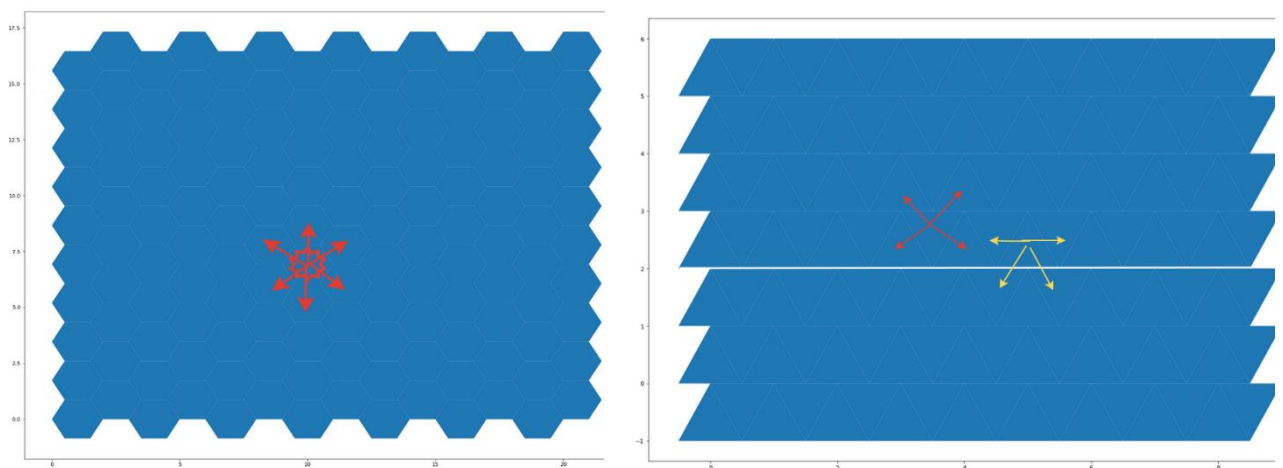


Рисунок 3.19 – Соседние элементы при замощении различными типами

В рамках ознакомления с работой алгоритма было приведено исследование по замощению одного участка полотна различными типами примитивов с различными размерами. Результаты приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9. Результат замощения одного участка полотна

Тип	Длина грани	Количество примитивов	Алг. сложность	Время	Площадь	Проценты
Квадрат	2	245	54	0.041955	980	81.66667
Шестиугольник		77	28	0.023934	800.2075	66.68396
Треугольник		535	96	0.987722	1070	89.16667
Квадрат	1	1114	111	0.495518	1114	92.83333
Шестиугольник		394	60	0.096748	1023.642	85.3035
Треугольник		2270	192	39.84173	1135	94.58333
Квадрат	0.5	4723	226	7.859441	1180.75	98.39583
Шестиугольник		1754	121	1.716243	1139.256	94.93803
Треугольник		9352	381	611.7371	1169	97.41667
Квадрат	0.25	19466	458	127.1476	1216.625	101.3854
Шестиугольник		7355	247	28.92333	1194.303	99.52526
Треугольник		37988	758	8402.03	1187.125	98.92708
Квадрат	0.1	123930	1149	5627.666	1239.3	103.275
Шестиугольник		47333	621	1252.139	1229.747	102.479
Треугольник		239586	*	**	1197.93	99.8275

Отсутствие данных в графах * и ** аргументировано особенностью работы алгоритма А* для треугольного примитива, так как маршрут строится больше 5 часов, и, соответственно данные, для этой позиции приведены не полностью. Визуализация графиков представлен на Рисунке 3.20.

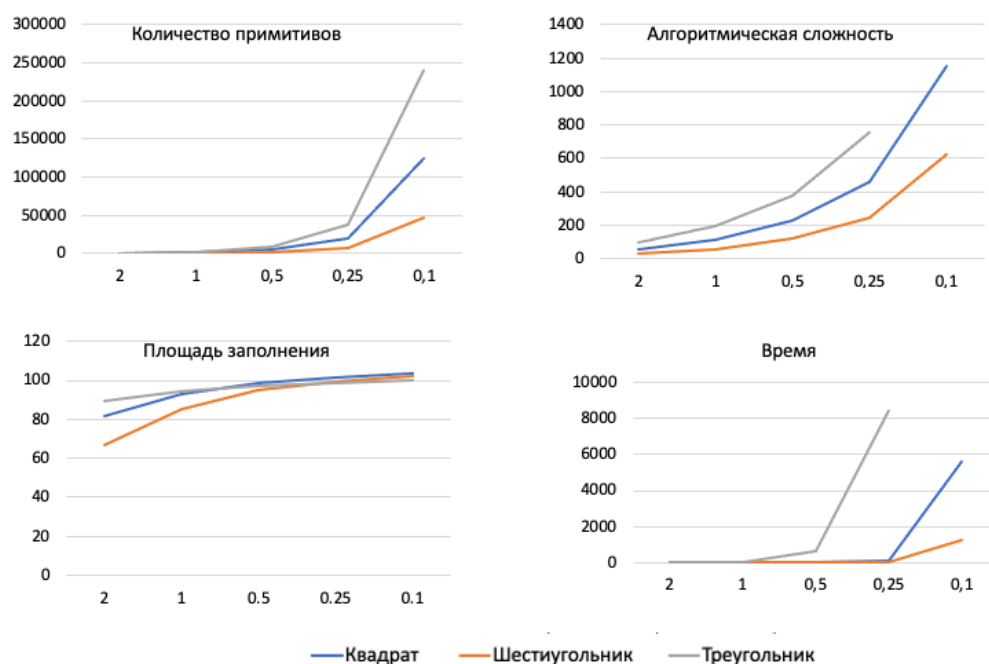


Рисунок 3.20 Визуализация параметров замощения

Проведя замощение различными типами фигур, можно сделать выводы о взаимосвязи между длиной грани и различными параметрами: при уменьшении длины грани увеличиваются основные показатели. Таким образом, можно определить резкое увеличение времени работы алгоритма нахождения пути и количество итераций при размере грани примитива 0.1м. Для данного участка дорожного полотна лучше всего применим шестиугольник с длиной ребра 0,25м, исходя из площади покрытия и времени построения маршрута. Данное утверждение верно только для данного участка полотна, что ставит задачу выбора оптимальной формы атомарного элемента и проверки теории замощения для различных форм дорожного полотна.

3.4 Построение транспортных зон

Как было ранее указано, транспортные зоны являются важной частью модели и дополнительным уровнем абстракции, позволяя перейти от связи «многие ко многим» к связи «одним ко многим» в рамках базы данных.

Детально опишем построение транспортной зоны погрузки. В начале формируется опорные точки. Например, для данных с мобильных объектов, выделяются точки, где «Изменение веса > 20 т и скорость движения $= 0$ », то это опорная точка погрузки. Следующим шагом формируются r – формирующий окружность, внутри которой все атомарные элементы определяются в группу определённой технологической зоны. На рисунке 3.19 показывается пример формирования опорных точек (темно зелёный цвет) и технологической зоны погрузки (зелёный цвет).

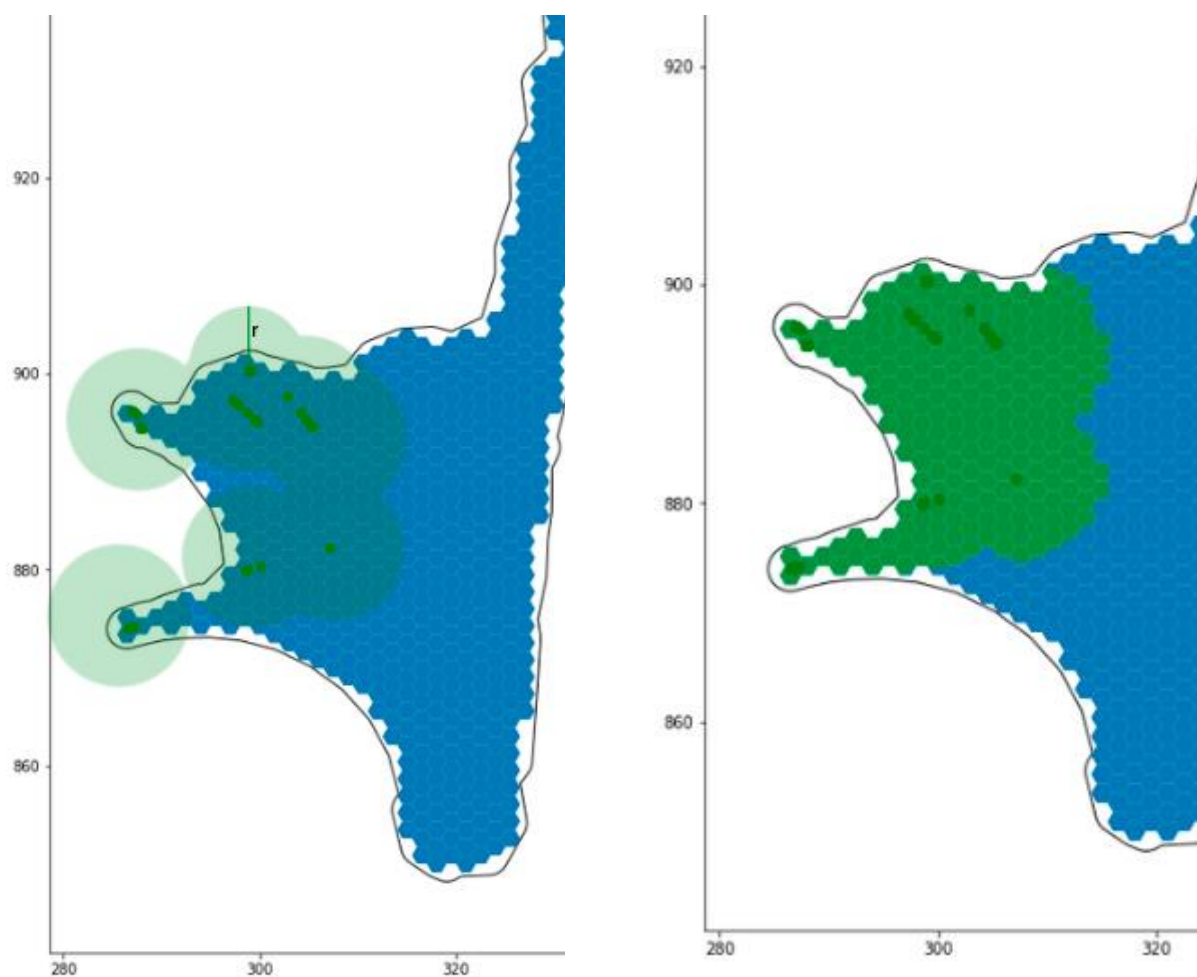


Рисунок 3.19 – Точки загрузки.

Коэффициенты r сильно зависят от размера и типа карьера, но в ходе числовых экспериментов на полученные данные, было предложено следующие показатели r указанные в таблице №3.9.

Таблица №3.9 Коэффициенты r для разных технологических зон

№	Описание технологической зоны	Коэффициент r (м)
1	Перекрёсток	2
2	Зона погрузки	5
3	Зона разгрузки	5
4	Зона заправки	3
5	Зона стоянки	3

В соответствующих технологических зонах формируются определённые правила движения транспорта. Данная группировка атомарных элементов позволяет перейти от отношения «многие ко многим» к отношению - «один к одному» и снизить количество взаимодействий. С использованием данной группировки возможна постройка графовой модели дорог, которые применяются в различных системах ГТК.

Данный подход позволяет представить зоны в виде вершин графа традиционных моделей диспетчеризации.

3.5 Выводы по главе 3

В данной главе рассмотрены подходы получения информации из различных источников их предварительной обработки, затронуты проблема перевода в единую систему координат из всех числовых источников, а также предложены и описаны процедуры получения контура дорожного полотна с использованием подхода «поиска контура выпуклого тела» и применение подхода альфа форм для мобильных объектов. Для аэрофотосъёмки подходы MeanShift и FloodFill. Были проведены числовые эксперименты на различных типах участков дороги, для которых подход с альфа формами показал положительные результаты, а подход с выпуклой оболочкой не справился с поставленной задачей. Продемонстрирована возможность применение в массовом характере подхода альфа форм для разных участков дорожного полотна с получением оптимальных параметров только на одном из участков. Была затронута проблема объединение нескольких дорожных полотен и предложено решение в виде дополнительного уровня кластеризации методом OPTICS.

Был предложен алгоритм замощения треугольниками квадратами и шестиугольниками, как правильными фигурами, удобными для дальнейшей работы. Были введены критерии замощения на основе отношений площадей контура и суммы площадей атомарных элементов; время расчёта между крайними диагональными атомарными элементами с использованием алгоритма

А*. В ходе исследований было выявлено, что наиболее точной фигурой для получения максимальной эффективной поверхности является атомарная фигура в формате «треугольник», однако, эта форма требует наиболее длительных расчётов и, в ходе тестирования показала отрицательный результат ввиду чрезмерной длительности построения. Фигура «квадрат» представляла наиболее оперативный вариант в темпоральной перспективе, однако существенно проигрывала в четкости представляемых данных фигуре «звездочка».

Глава 4. Разработка программного комплекса и экспериментальное исследование его работоспособности

4.1. Методика обработки данных при построении цифровой модели

С учётом особенностей предметной области ГТК можно выделить ряд требований к разрабатываемой модели и программного обеспечения:

- открытость – по причинам необходимости интеграции с программно-аппаратной платформой объекта модернизации и информационной системой предприятия. Следовательно, цифровая модель должна быть разработана на основе open – source программных инструментов и библиотек, исключающих ограничения к доступу или распространению исходного кода, а также позволяющих взаимодействовать с другим ПО;

- расширяемость и модифицируемость – необходимые для изменений функциональных возможностей системы, в виду сложной формализации задач управления; изменения требований технико-технологических условий конкретных горнодобывающих предприятий и базовых объектов модернизации; роста темпов развития отрасли и информационных технологий;

- масштабируемость – для обеспечения работы модели в условиях сокращения или увеличения объемов информационных потоков и обрабатываемых данных;

- производительность – для организации параллельных вычислений и обработки больших объемов данных;

- массовость – модель должна решать определённый класс задач, различающихся только различными исходными данными;

- точность – модель должна показывать соответствующие показатели адекватности построенных моделей и статистических функций;

- универсальность – модель должна быть применима для различных ГТК.

Следует выделить особенности разрабатываемой модели:

- обработка входных данных ГТК. Необходимо сформировать доверительные интервалы входных данных, определенные границами измерения датчиков; а также логическими правилами для определённых типов данных.
- построение интеллектуальных переменных для формирования новых зависимостей или преобразования числовых данных в категориальные, для повышения точности модели или облегчение восприятия результатов её работы.
- работа с временными рядами. Специфика данных ГТК часто привязана к последовательности операций, и, как следствие, к позиционированию данных во времени. Данную особенность надо учитывать, как во время предобработки, так и во время построения моделей.
- первичный статистический анализ. Аналитическая платформа должна обладать функциями базового статистического анализа на всём цикле обработке данных, для проверки адекватности направления работы.
- построение моделей машинного обучения, с различными параметрами, является ключевой особенностью работы аналитической платформы.
- учёт различных метрик оценки моделей.
- формирование выводов, позволяющих снизить порог вхождения для использования аналитической платформы и продемонстрировать базовые зависимости и упрощённые результаты.

На рисунке 4.1 представлены требования, которые подробно описывают этапы обработки информации и формирование результатов.

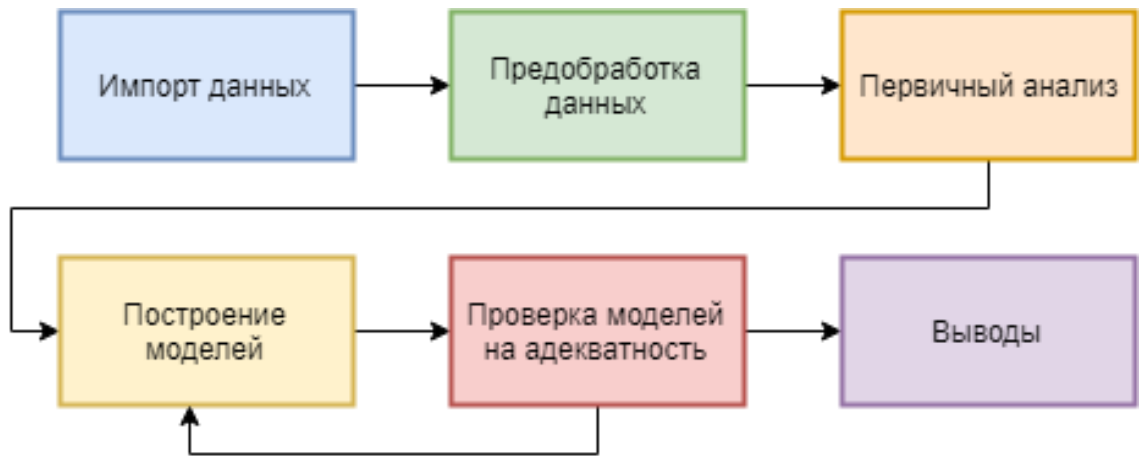


Рисунок 4.1 – Ключевые этапы обработки информации

Первый этапом является импорт данных. Источником данных может служить как файловое хранилище, например файл с расширением .csv, .xlsx или их аналоги. Другим источником информации может является sql подобные базы, часто встречается импорт данных через формирования файла, а также существует возможность непосредственно обратиться к самой базе данных через специальную надстройку, эмулирующую подключения клиента к базе с использованием языка SQL. Третий случай доступ к по SQL базам данных, сильно зависит от типа базы данных, и возможность её API.

В ряде случаев есть требования работать с формата .dxf, и возможности обработки графической информацией между приложениями САПР.

Предобработка данных связана с индивидуальной настройкой работы соответствующего модуля и направлена на повышение качества исходных данных, путём работы с пропусками, фильтрации данных. В отдельных случаях необходимо вводить дополнительные – «интеллектуальные» переменные необходимые для кодировки определённых параметров или для наглядности применения результатов.

Процесс выбора и/или обучения моделей зависит от поставленной задачи и заключается в выборе модели и определение её первичных характеристик.

Процесс проверки модели на адекватность, вектор на определение пригодности выбранной модели для решения под ту или иную задачи путём

определения и подсчёта метрик модели, и при необходимости, построение соответствующих графиков.

Процесс формирования выводов направлен на помощь принятию решения об адекватности построенной модели и формирования коэффициентов и результатов модели.

4.2 Инструменты обработки и анализа данных

Первоначально работа модели строится на функционале импорта данных. Функционал импорта данных с различных источников в виде структурированной так и не структурированной информации. Выделение ключевой информации в большом объёме данных, так называемый «парсинг» элементов.

Функционал предварительной фильтрации данных, направленный в первую очередь на правильную интерпретацию данных и во вторую на повышение качества данных. Под качественными данными подразумевается [13]:

- высокую степень отражение в данных реальных процессов;
- данные, отвечающие полнотой, точностью, своевременностью достоверностью и последовательностью, для конкретной прикладной задачи;
- достижимостью цели анализа;
- соблюдение последовательности и точности с привязкой по времени.

Именно качество данных сильнее всего влияет на достижимость цели анализа [14].

Подходы к визуализации данных. В рамках ГТК необходимо понимать особенность технологических процессов, связанных с трёхмерным представлением. Таким образом, дорожная карта карьера без учёта третьего измерения не отражает полноценную суть процессов. Примеры визуализации транспортных процессов показаны на рисунках 4.2 и 4.3.

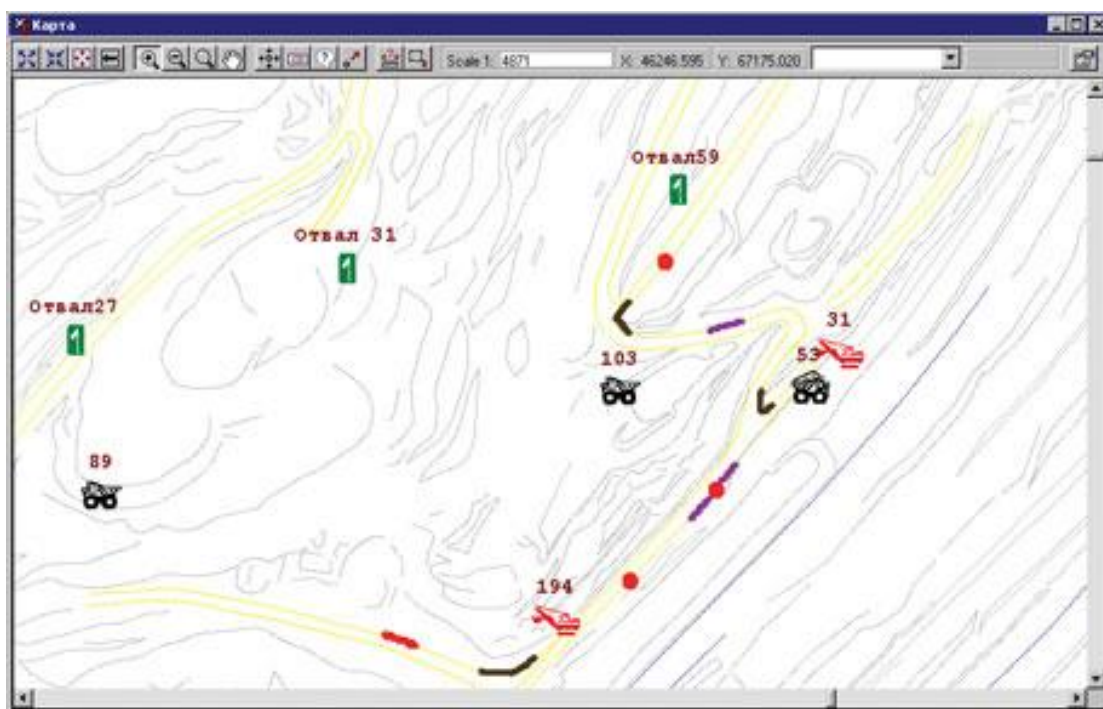


Рисунок 4.2. Двухмерная карта дорог на карьере [15]

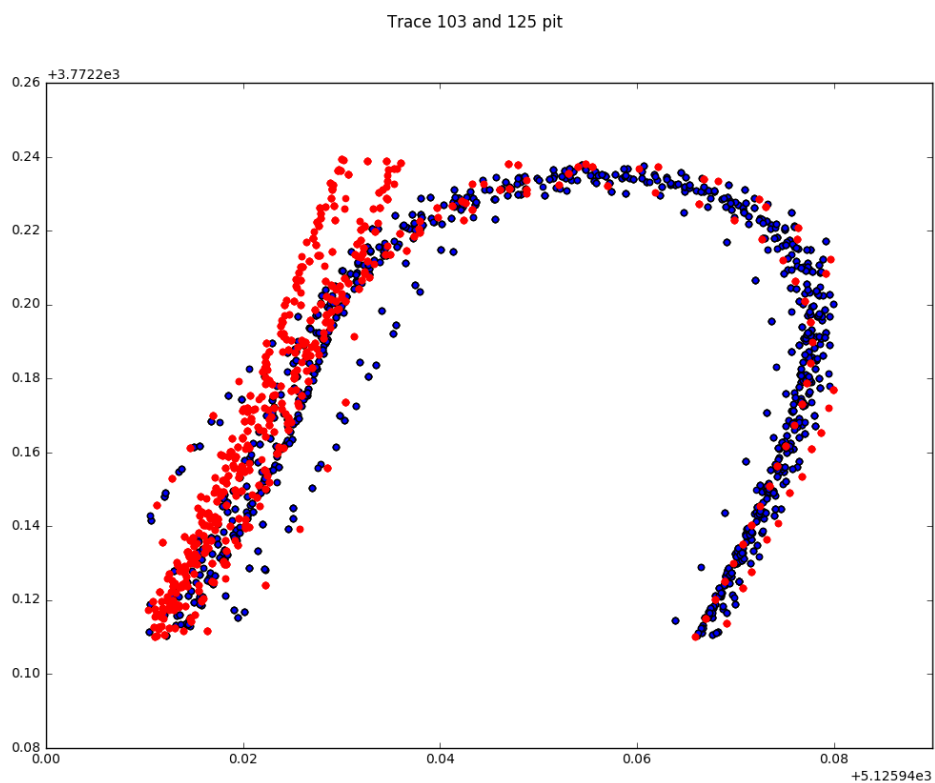


Рисунок 4.3 – Двухмерное представление полотна дороги на карьере

На Рисунке 4.2 предоставляется карта дорог в АСУ ГКТ «Карьера», Рисунок 4.3 2-х мерная визуализация данных с мобильных объектов. Стоить

отметить, что отсутствие 3-го измерения не даёт объективно оценить сложность участка и даёт искажённое представления между расстояниями.

Трёхмерная карта дорог позволяет учитывать глубину карьера и определять проблемные участки с учётом угла наклона дорожного полотна, но, в то же время, не так удобна для использования диспетчером. Пример трехмерной дороги транспортной сети на карьере представлены на рисунках 4.4 и 4.5.

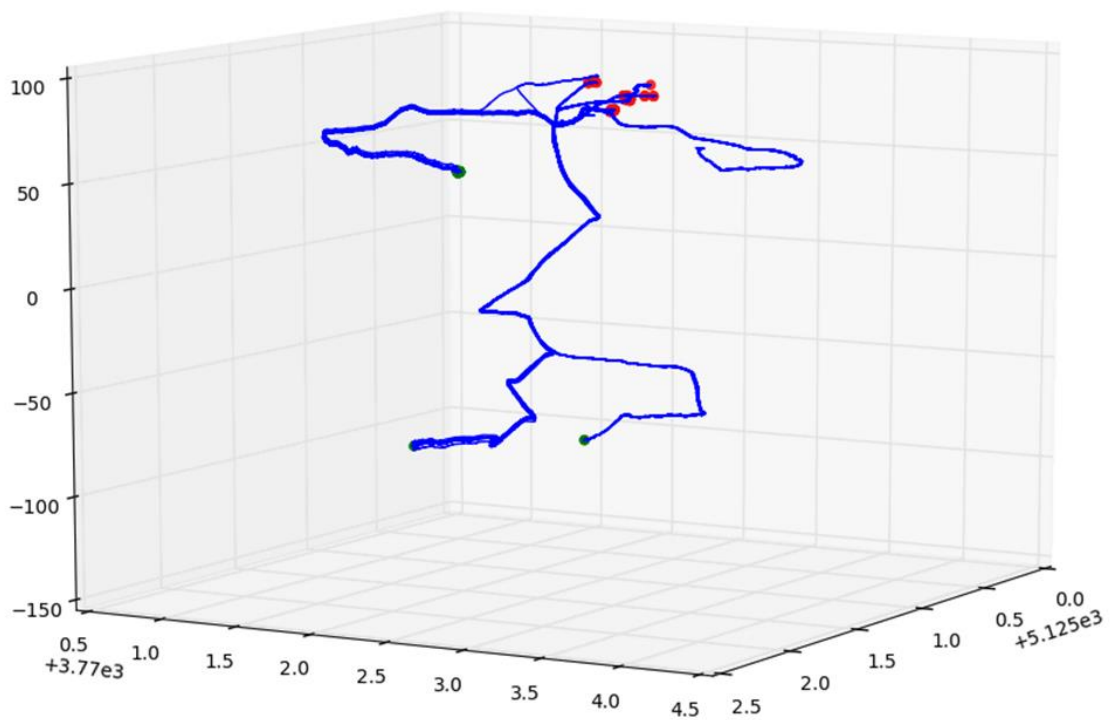


Рисунок 4.4 – Трёхмерное представление дороги на карьере

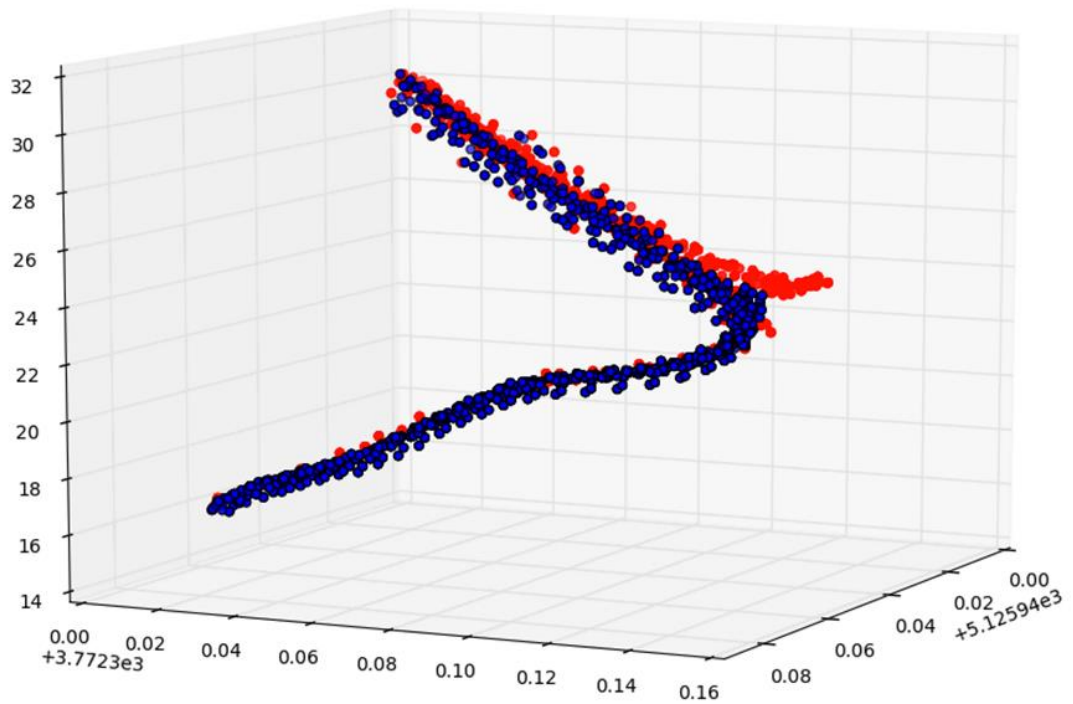


Рисунок 4.5 – Трёхмерное представление полотна дороги на карьере

На рисунках показаны участки дорог в трёх мерой проекции, позволяющее учитывать степень наклона и крутизну дорожного полотна.

Методика формирования и использование интеллектуального представления, заключается в создании дополнительных переменных, для повышения точности, путём создание категориальных признаков, либо для облегчения восприятия конкретных задач.

С технической стороны модель представляет собой готовую библиотеку, написанную на языке Python. Этот язык был выбран в качестве основного языка разработки, благодаря его универсальности, лёгкости внедрения и распространённости.

На сегодняшний день структурно библиотека представляет собой высокоуровневую подсистему интеграции и объединение различных функциональных элементов низкого уровня с целью представления программного API для работы формирования модели дорожного полотна.

В качестве низкоуровневых элементов были использованы следующие инструменты:

Geopandas – как модуль взаимодействия с геоданными, а в частности с данными полученными с маркшейдерской съёмки.

Numpy модуль оптимизированных для работы с массивами и матрицами

Shapely модуль взаимодействия векторными фигурами

Alphashape модуль построения α -форм.

Важно учитывать все особенности потоков данных и пользоваться готовыми специализированными инструментами, для получения воспроизводимых результата эксперимента.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существует большой выбор современных средств для осуществления анализа и обработки поступающих данных ГТК различными способами (аэросъемка, построение моделей с применением α -форм), позволяющих упростить восприятие огромного количество информации.

4.3. Результаты вычислительных экспериментов

В рамках исследования использовался алгоритм A^* для оценки подходов замощения и поиска кратчайшего пути на наборе атомарных элементов (примитивов).

В таблице 3.8 для расчёта показателя «Алгоритмическая сложность» и время использовался алгоритм A^* . В ходе анализа полученных данных было выявлено, что наиболее оптимальным является использование больших временных интервалов при малой длине грани и большом количества атомарных элементов. В качестве оптимизации алгоритма A^* использовалась структура кучи на этапе хранения нод, для быстрой сортировки ноды с наименьшим показателем. В результате проведенного исследования был выявлен прирост в 30% прирост при большом количестве элементов. Более детально показатели времени указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Влияние оптимизации на задачу построения кратчайшего маршрута

Тип примитива	Размер грани	Общее кол-во примитивов	Алгоритмическая сложность	Время работы с оптимизацией	Время работы без оптимизации
Квадрат'	2	245	54	0.386	0.046
Квадрат'	1	1114	111	0.393	0.52
Квадрат'	0.5	4723	226	5.106	7.478
Квадрат'	0.25	19466	458	80.638	119.897
Квадрат'	0.1	123930	1149	4800.916	5166.72
Шестиугольник'	1	394	60	0.092	0.279
Шестиугольник'	0.5	1754	121	1.526	0.939
Шестиугольник'	0.25	7355	247	24.290	11.874
Шестиугольник'	0.1	47333	621	1005.220	565.891

Опираясь на представленные данные, полученные по времени работы модели с оптимизацией и без, можно сделать вывод, что время расчёта задачи сократилось на 30% для большинства решений с использованием оптимизации.

Для иллюстрирования оптимизации воспользуемся описанием алгоритма A^* в псевдо коде:

```

function A*(start, goal, f)
  % множество уже пройденных вершин
  var closed := the empty set
  % множество частных решений
  var open := make_queue(f)
  enqueue(open, path(start))
  while open is not empty
    var p := remove_first(open)
    var x := the last node of p
    if x in closed
      continue
    if x = goal
      return p
    add(closed, x)
    % добавляем смежные вершины
    foreach y in successors(x)
      enqueue(open, add_to_path(p, y))
  return failure

```

Именно хранения набора closed, в куче позволяет получить значительную прибавку. Под кучей будем понимать абстрактный тип данных, подобный обычной структуре данных очереди или стека, в которой каждый элемент дополнительно имеет связанный с ним «приоритет». В приоритетной очереди элемент с высоким приоритетом обслуживается перед элементом с низким приоритетом. В некоторых реализациях, если два элемента имеют одинаковый приоритет, они обслуживаются в соответствии с порядком, в котором они были поставлены в очередь, в то время как в других реализациях порядок элементов с одинаковым приоритетом не определен.

Данный эксперимент показывает эффективность введённой оптимизации алгоритма A*, но не позволяет исследовать процесс замощения разных контуров.

В рамках исследования был проведён дополнительный эксперимент по расчёту показателя замощения. Было выбрано три контура:

- Повторяющийся участок дороги;
- Прямоугольник;
- Круг.

Детально контуры указаны на рисунке 4.6. Каждый контур имеет одинаковую площадь 1254 м^2 . Следующим шагом была выполнена задача замощения, различными типами примитивов и с различным шагом длины грани. Для каждого случая посчитан маршрут от крайних точек с использованием модифицированного алгоритма A^* , разобранный на предыдущем шагу. количество итераций составляло 544 для каждой контура. Сокращённые данные приведены в таблице 4.2 для всех контуров.

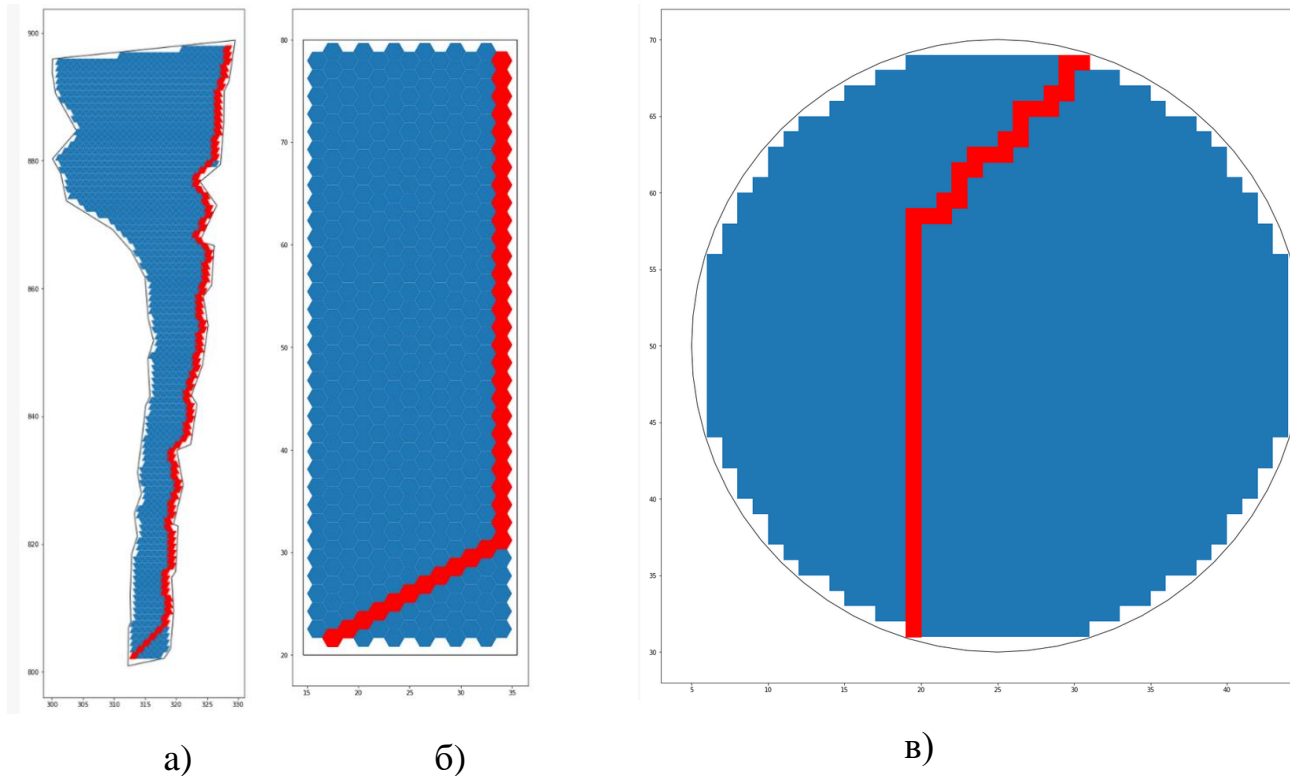


Рисунок 4.6 – Контуры, представляющие результат эксперимента по расчету показателя замощения

Таблица 4.2 Сокращённые данные всего эксперимента

№	Тип атомарного элемента	Тип контура	Длина грани м.	Размер сетки у.е.	Кол-во шагов в маршруте шт.	Относительная площадь замощения %	Время
0	Квадрат	Контур дороги	1.99	249	54	78.650108	0.036901
100			0.99	1138	112	88.962397	0.364607
200		Круг	1.79	347	24	88.618325	0.031422
300			0.79	1908	60	94.911876	0.374547
400		Прямоугольник	1.59	444	48	89.511675	0.093754
500			0.59	3535	135	98.128668	4.654657
600	Шестиугольник	Контур дороги	1.31	213	45	75.747430	0.039455
700			0.31	4734	198	94.275176	5.767168
800		Круг	1.11	352	22	89.810789	0.056887
900		Прямоугольник	1.91	102	20	77.094120	0.019947
1000			0.91	518	44	88.872397	0.142653
1100	Треугольник	Контур дороги	1.71	839	130	84.732231	0.192480
1200			0.71	5377	316	93.616240	6.370083
1300		Круг	1.51	1173	58	92.308256	0.493767
1400			0.51	10873	178	97.606419	34.454851
1500		Прямоугольник	1.31	1560	104	92.442204	0.738612
1600			0.31	29526	443	97.978571	289.306102

Всего было получено 1612 записей. В пункте «Длина грани» указывается размер грани атомарного элемента, в эксперименте было использована длина от 2м до 0.20м с шагом 0.01м для всех типах атомарного элемента и контуров. «Размер сетки» - количество атомарных элементов, созданных для каждого типа контура. Количество шагов в маршруте – количество атомарных элементов, которое необходимо для построения маршрута по диагонали контуров, от крайних левых нижних до крайних правых верхних атомарных элементов, и соответствие время для расчёта маршрута. Относительная площадь замощения –

это процент эффективного использования контура атомарными элементами, рассчитанный по формуле:

$$S_{\%} = n * S_{ae} / S_c * 100, \quad (13)$$

где n - количество атомарных элементов (Размер сетки).

S_{ae} – площадь одного атомарного элемента с заданной длиной грани.

S_c – площадь соответствующего контура.

Наибольший интерес вызывают следующие параметры «Время», «Относительная площадь замощения» и «Размер сетки». Соответствующая визуализация показателя время предоставлена на рисунках 4.7 – 4.10

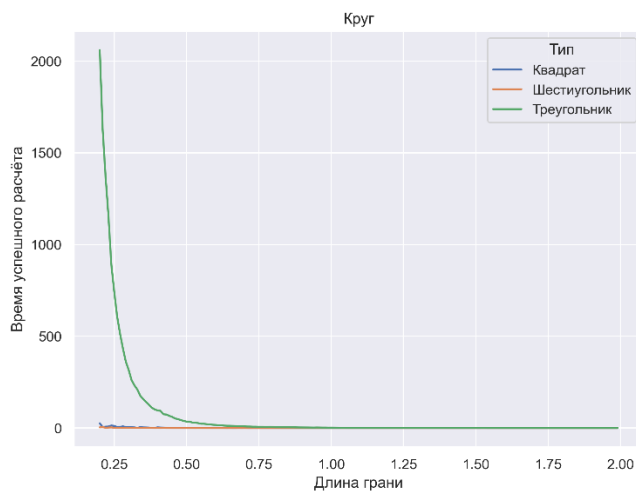


Рисунок 4.7 – Время расчёта маршрута для контура круг

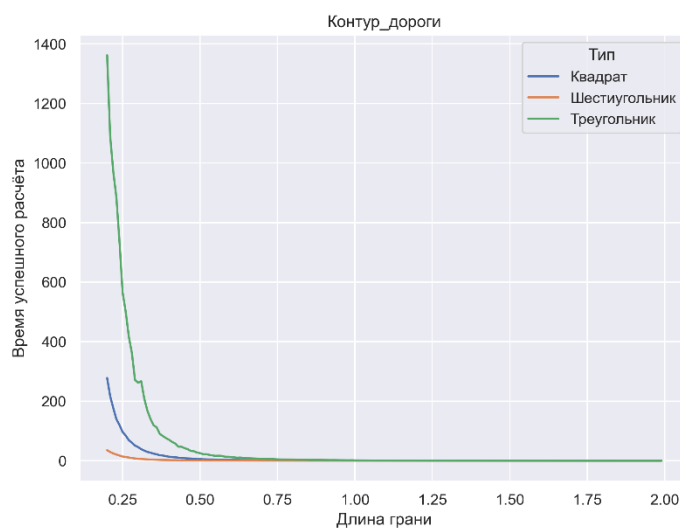


Рисунок 4.8 – Время расчёта маршрута для контура участка дороги

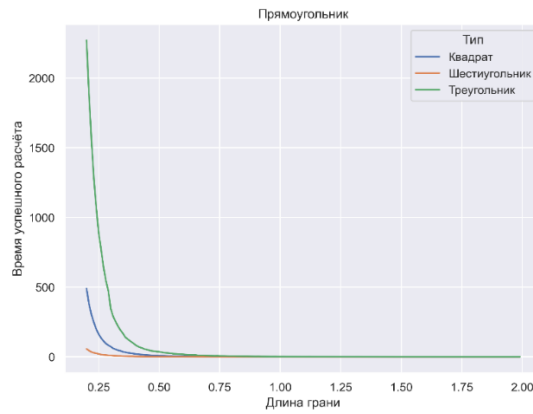
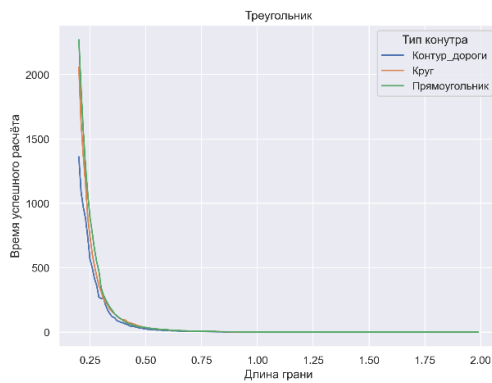
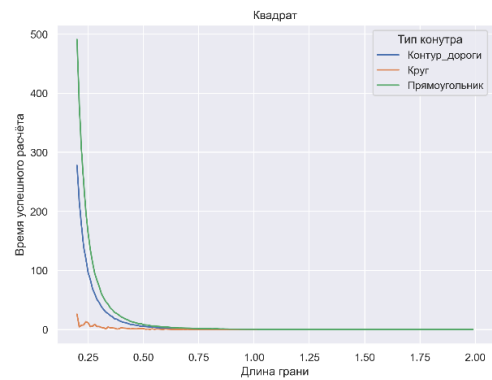


Рисунок 4.9 – Время расчёта маршрута для контура прямоугольник

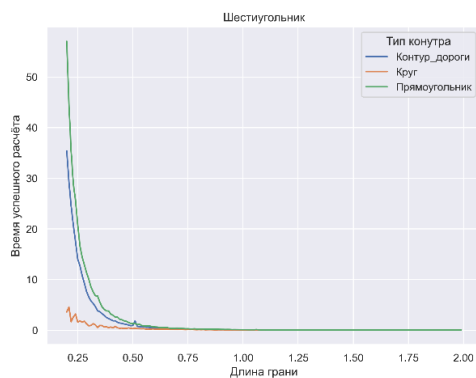
Основываясь на полученных данных можно сделать вывод, что параметр времени носит подобие экспоненциальной функции и не имеет серьезной зависимости от типа контура, что позволяет внести теорию о возможности аппроксимации. При первом приближении, контур в виде круга выбивается, но если изменить масштаб, то поведения других типов атомарных элементов подобно. Данные графики для каждого из типов атомарного элемента представлены на Рисунке 4.10.



а)



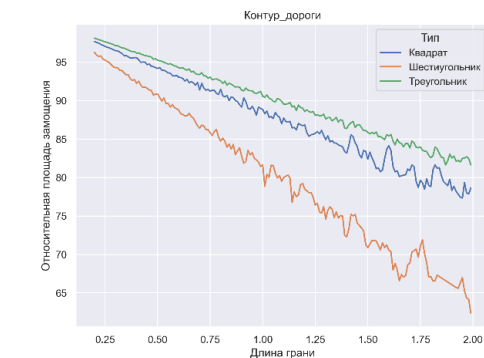
б)



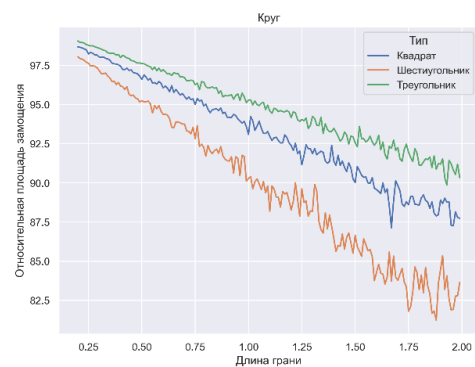
в)

Рисунок 4.10 – Время расчёта маршрута для всех контуров и для атомарных элементов: а) в форме квадратов б) в форме треугольников в) в форме шестиугольников.

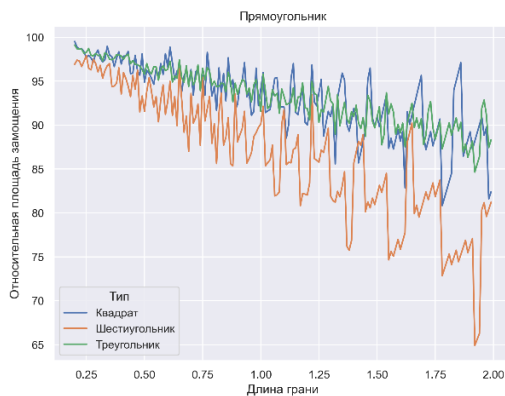
Показатели «Относительная площадь замощения» и «Размер сетки», представленных в графическом варианте на рисунках 4.11 и 4.12.



а)



б)

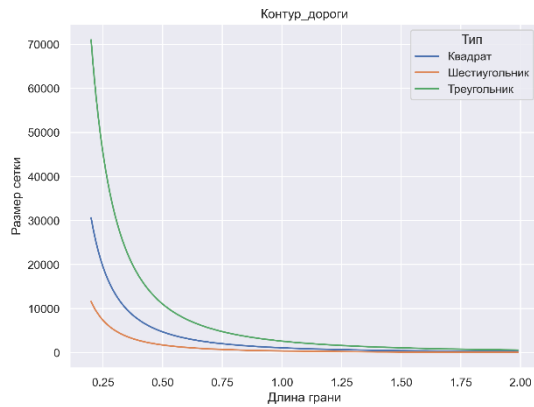


в)

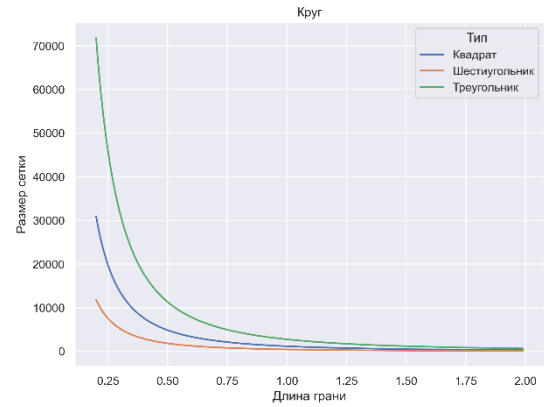
Рисунок 4.11 – Относительная площадь замощения для всех типов атомарных элементов и для контуров в форме участка дорожного полотна: а) в форме квадратов б) в форме треугольников в) в форме шестиугольников.

Стоит отметить биение показателей на графиках, что связано с уменьшением площади атомарного элемента, но не увеличение количество вписывающихся элементов в контур, таким образом площадь уменьшается, но

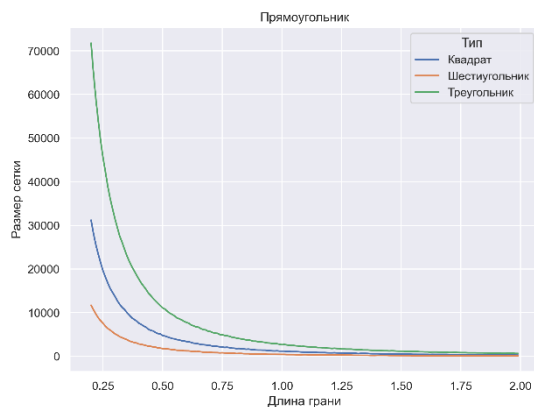
ощущается нехватка места для дополнительного элемента. Как только появляется возможность добавить элемент происходит резкий скачок, и следующее за ним падение. В общем виде без учёта биения прослеживается линейная форма зависимости.



а)



б)



в)

Рисунок 4.12 – Размер сетки замощения для всех типов атомарных элементов и для контуров в форме участка дорожного полотна: а) в форме квадратов б) в форме треугольников в) в форме шестиугольников.

Стоит отметить, параметр «размер сетки» носит подобие экспоненциальной функции и не сильно завит от типа контура, что позволяет внести теорию о возможности аппроксимации.

Исходя из представленных графиков можно сделать предварительные выводы о том, что все используемые параметры могут быть аппроксимированы, а фигура «шестиугольник» подходит лучше всего для данного участка дороги.

На Рисунке 4.13 показаны аппроксимирующие функции для показателей времени, для каждого типа примитива для контура дороги.

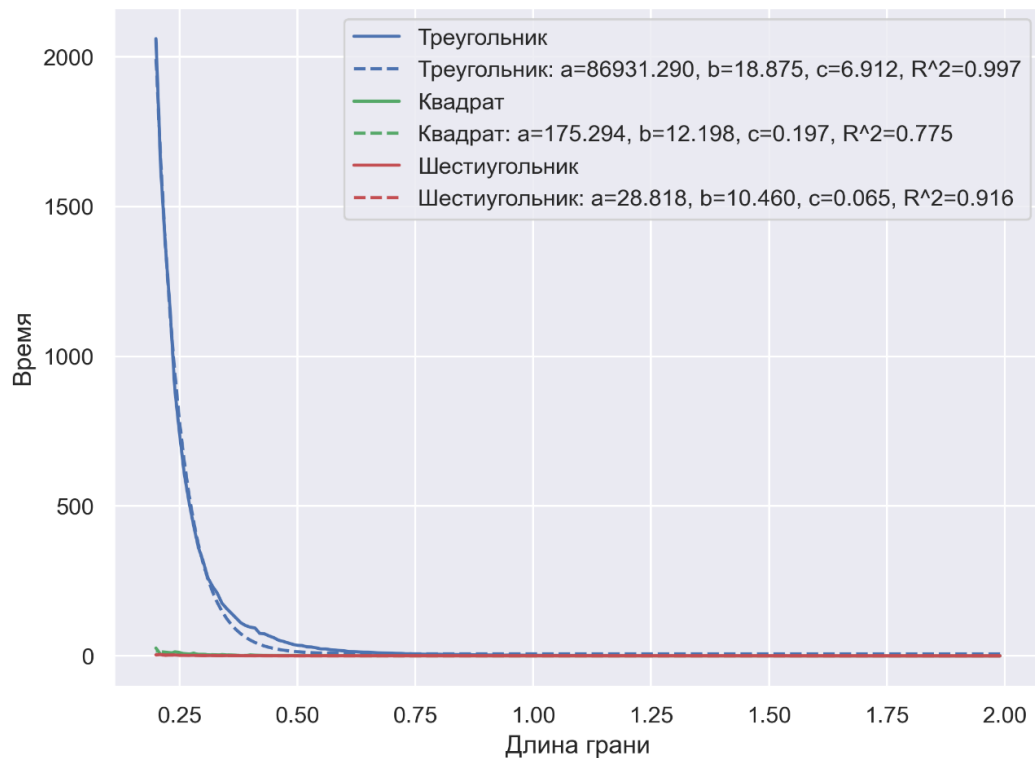


Рисунок 4.14 – Аппроксимация показателя время для контура дороги

Результат, отраженный на Рисунке 4.11 позволяет утверждать, об адекватности аппроксимирующих функции для примитивов, исходя из высокого показателя аппроксимации $R^2 > 0.9$ и повторений тенденций убывания по экспоненте исходя из визуального анализа. Общий вид аппроксимирующей функции представлен в виде формулы (14).

$$y = ae^{-bx} + c \quad (14)$$

где y – время работы алгоритма,

x – длина грани атомарного элемента,

a, b, c -подбираемые параметры.

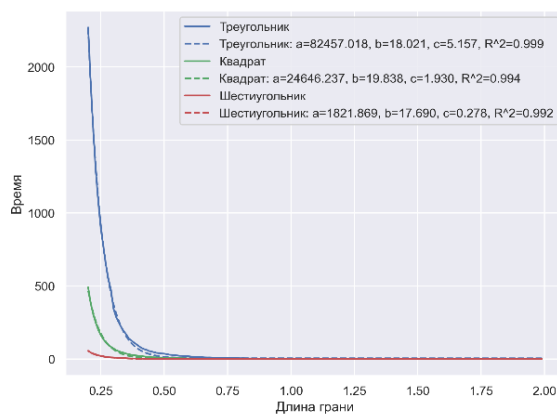
Числовые показатели аппроксимирующей функции времени для контура дороги указаны в Таблице 4.3

Таблица 4.3. Аппроксимация показателя времени для контура дороги

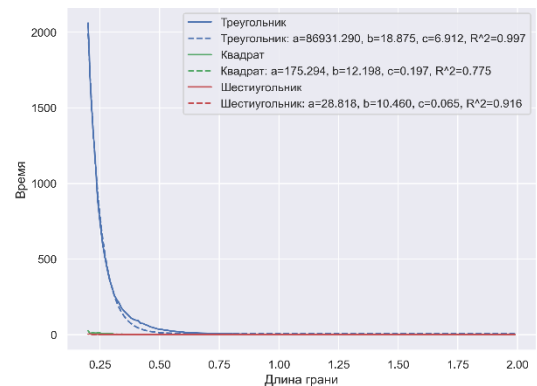
Тип атомарного элемента	a	b	c	R ²
Треугольник	3.281e+04	1.601e+01	3.094e+00	0.997
Квадрат	1.054e+04	1.84843236e+01	1.126e+00	0.994
Шестиугольник	8.929e+02	1.63206239e+01	1.736e-01	0.996

Стоит отметить, достижение высокого показателя R^2 и значения коэффициентов аппроксимирующей функции для всех типов атомарных элементов в одном порядке, что доказывает высокую обещающую способность.

Аппроксимации для контура в форме прямоугольника и в форме круга представлены на Рисунке 4.15.



а)



б)

Рисунок 4.15 Аппроксимация показателя времени для контура дороги: а) в форме прямоугольника, б) в форме круга.

Визуальный анализ подтверждает повторение аппроксимирующей функции и так же показывает высокий показатель R^2 . Числовые значения коэффициентов для построенных аппроксимирующих функций представлены в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4. Аппроксимация показателя времени для контура в форме прямоугольника

Тип атомарного элемента	a	b	c	R ²
Треугольник	8.246e+04	1.802e+01	5.157e+00	0.999
Шестиугольник	1.822e+03	1.984e+01	1.929e+00	0.994
Квадрат	2.465e+04	1.984e+01	1.929e+00	0.992

Таблица 4.5. Аппроксимация показателя времени для контура в форме круга

Тип атомарного элемента	a	b	c	R ²
Треугольник	8.693e+04	1.887e+01	6.912e+00	0.997
Квадрат	175.294	12.197	0.197	0.775
Шестиугольник	28.817	10.459	0.065	0.916

Из всех типов атомарных элементов выбивается квадрат, что это связано с диапазоном исследуемых значений параметра длина грани: если продлить данный диапазон в сторону уменьшения, то показатели сравняются со всей выборкой.

Визуализация обобщённой аппроксимирующей функции для расчёта времени на произвольном размере сетке продемонстрирована на рисунке 4.13

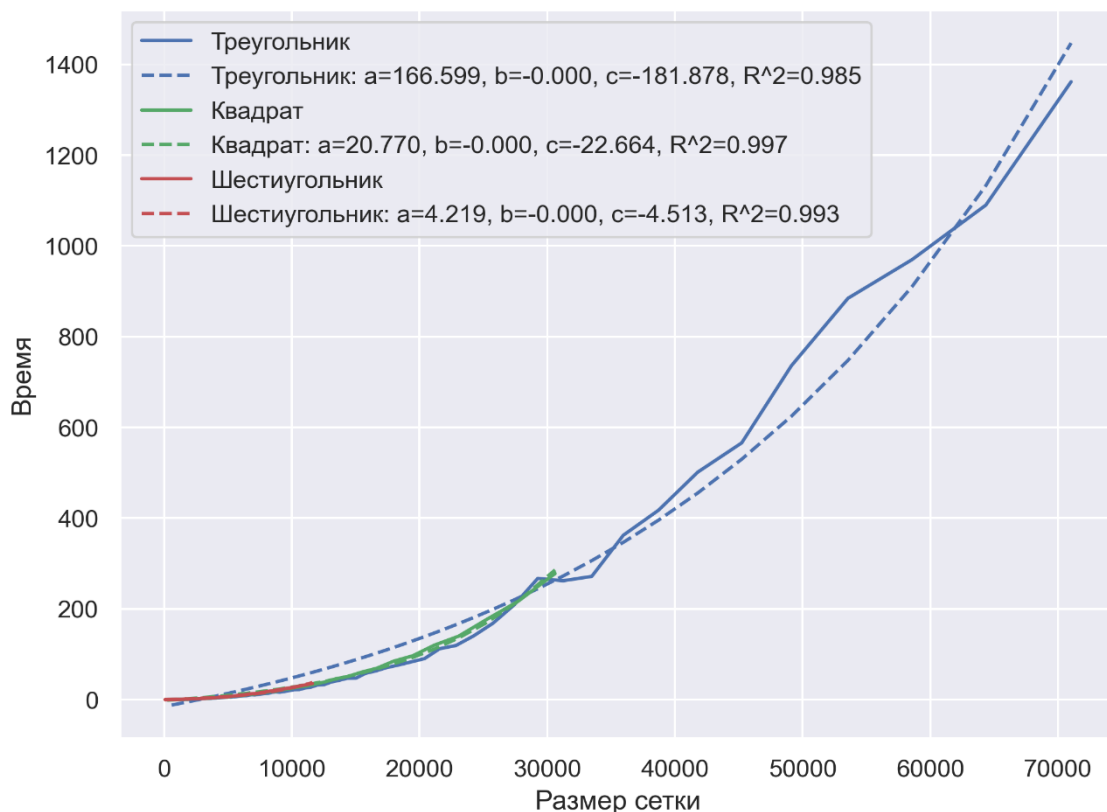


Рисунок 4.16 Аппроксимация показателя времени для контура дороги на размер сетки.

Основываясь на представленном графике, можно составить прогноз временных затрат на расчёт и обновление маршрутов.

Аппроксимирующую функцию для отношения размера грани к размеру сетки представлена на рисунке 4.17. Общий вид аппроксимирующей функции для данной зависимости указан в формуле (15).

$$y = \frac{a}{bx} + c \quad (15)$$

где y – время размер сетки,

x – длина грани атомарного элемента,

a, b, c -подбираемые параметры.

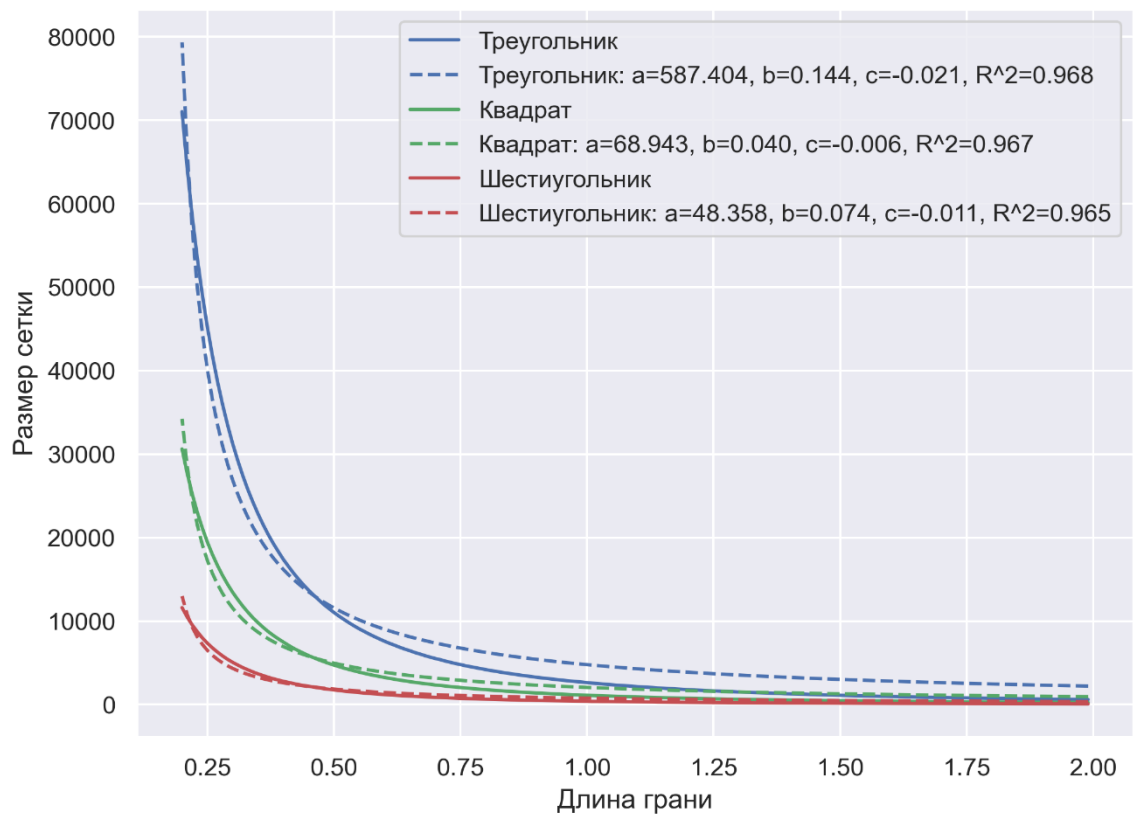


Рисунок 4.17 – Аппроксимирующую функцию отношения размера грани к размеру сетки для контура дороги.

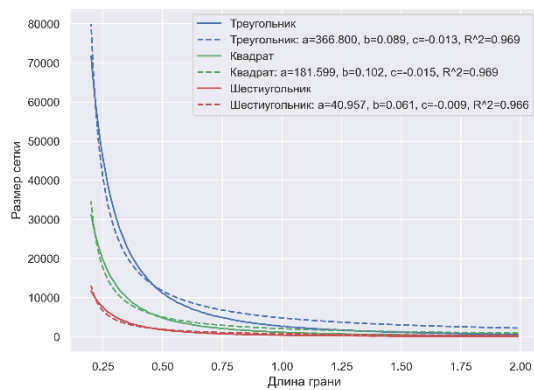
Исходя из графического анализа, аппроксимирующая функция с небольшими недочётами, но демонстрирует поведения исходных данных, а высокий показатель R^2 доказывает возможность её использования для прогнозирования зависимостей. Детальные значения указаны в таблице 4.6

Таблица 4.6. Аппроксимация показателя размер сетки для контура в форме контура дороги

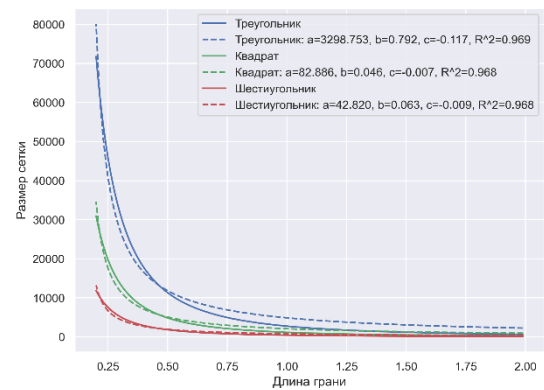
Тип атомарного элемента	a	b	c	R ²
Треугольник	5.874e+02	444e-01	48e-02	0.968
Квадрат	6.894e+01	957e-02	992e-03	0.967
Шестиугольник	4.836e+01	447e-02	17e-02	0.965

Значения коэффициентов находятся в рамках одного порядка с высоким показателем R².

Аппроксимирующие функции для других контуров дорог представлены на Рисунке 4.18



а)



б)

Рисунок 4.18 – Аппроксимирующую функцию отношения размера грани к размеру сетки для контуров формы: а) прямоугольник, б) круг.

Значения R² и конфидентов подобны, значит можно использовать ранее указанную аппроксимирующую функцию.

Аппроксимируемое отношение между длиной грани и относительной площадью замощения проиллюстрировано на Рисунке 4.19.

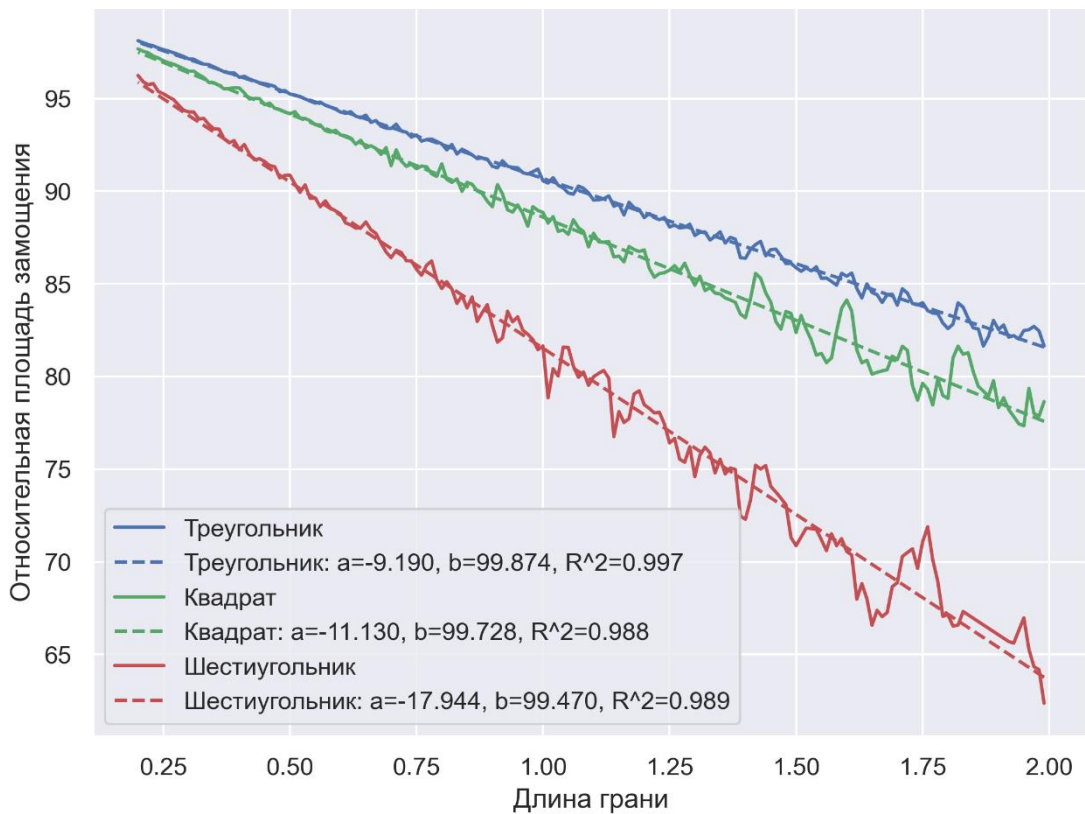


Рисунок 4.19 – Аппроксимация зависимостей между относительной площадью замощения и длиной грани для участка дорожного полотна.

Вид аппроксимирующей функции задан формулой (16)

$$y = ax + b \quad (16)$$

где y – относительная площадь замощения,

x – длина грани атомарного элемента,

a, b -подбираемые параметры.

Детально аппроксимации указаны в таблице 4.7

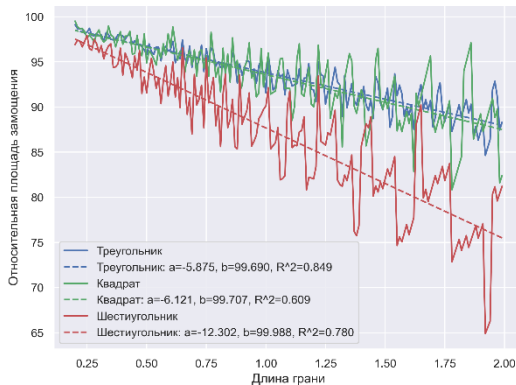
Таблица 4.7. Аппроксимация зависимостей между относительной площадью замощения и длиной грани для участка дорожного полотна

Тип атомарного элемента	a	b	R^2
Треугольник	9.19017797	99.87404132	0.997
Квадрат	11.130132	99.72832652	0.988
Шестиугольник	17.94378638	99.47033108	0.989

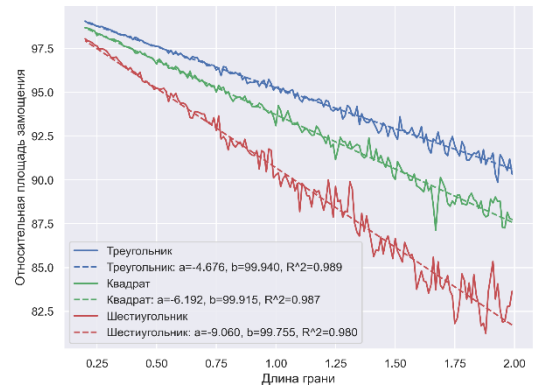
Данная аппроксимация позволит рассчитать длину грани для достижения нужной эффективности, соединив с предыдущими аппроксимирующими

функциями можно получить заданные параметры цифровой модели по быстродействию и точностью.

Аппроксимации для других форм контуров представлены на Рисунке 4.20.



а)



б)

Рисунок 4.20 – Аппроксимирующую функцию отношения площади замощения к длине грани сетки для контуров формы а) прямоугольник и б) круг.

Исходя из данных, представленных на рисунке 4.17, значения R^2 и коэффициентов подобны, что позволяет использовать ранее указанную аппроксимирующую функцию.

Все числовые эксперименты проводились в однопоточном тесте на процессоре Intel 8 700 с частотой 3.5 ГГц.

Данный числовой эксперимент позволил получить аппроксимирующие функции для ключевых показателей модели: время работы, размер сетки и эффективная площадь работы, что позволит подобрать оптимальные параметры атомарных элементов для эффективной работы цифровой модели.

4.4 Даталогическое описание информационной базы цифровой модели

Атомарные элементы и технологические зоны, которые были разработаны в предыдущих главах, являются структурированными данными. Оптимальной формой хранения, которых, является реляционная база данных. Основываясь на принципах открытости основным элементом хранения модели и управления информацией о модели, была выбрана система управления базами данных Oracle Database 19c, поддерживающая следующие особенности: перенаправление DML Active Data Guard, автоматическое создание индексов, ведение статистики в реальном времени, SQL-запросы к хранилищам объектов, In-Memory для потоков данных IoT, гибридные секционированные таблицы, автоматическое управление планами SQL, карантин SQL, исправление грид-инфраструктуры с нулевым временем простоя, дополнительное ведение журнала с более тонкой детализацией, автоматическое перемещение PDB. Так же подобная система управления базами данных довольно часто применяется в качестве АСУ ГТК (она является базовой составляющей АСУ ГТК «Карьер» от ВИСТ Групп).

Рассмотрим даталогическую модель цифровой модели дорожного полотна, позволяющую отследить логическую связь между элементами данных, независимо от их содержания и хранения. Прототип даталогической модели представлен на Рисунке 4.21.

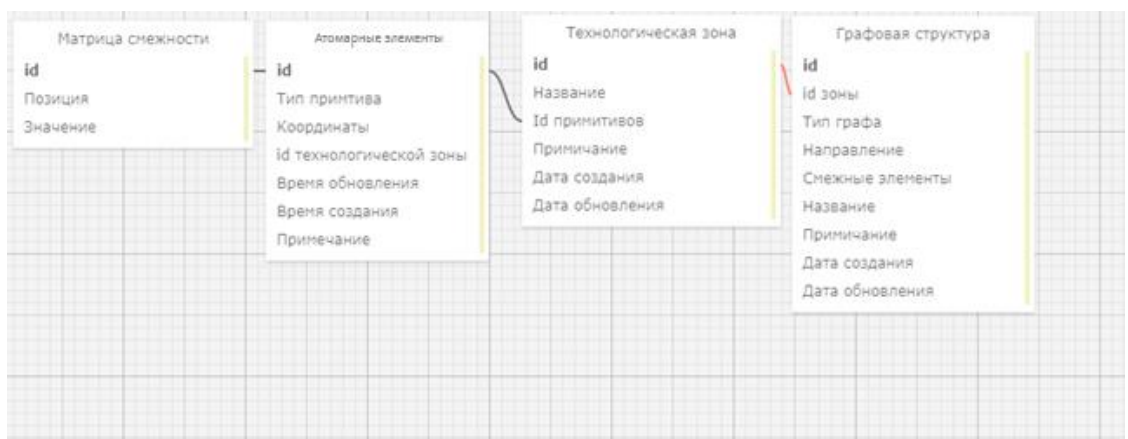


Рисунок 4.21 – Даталогическая модель цифровой модели дорожного полотна.

Применяемые в данном исследовании сущности, такие как атомарный элемент, матрица смежности, технологическая зона, графовая структура. представляют структурированные данные и хорошо формируют связанные между собой таблицы.

Матрица смежности является собой таблицу содержащие приоритет проезда по атомарному элементу, данная матрица используется для построения маршрутов. Данная матрица используется для повышения производительности обновления маршрутов, детальное описание указано в таблице 4.8.

Таблица 4.8. Описание таблицы «Матрица Смежности»

№	Название	Тип	Описание
1	ID	Числовой	Первичный ключ
2	Позиция	Кортеж	Позиция в двух мерной матрице формата (2,3)
3	Значения	Число	Число для определения постройки маршрута

Каждая запись в матрице смежности связана один к одному с запись в таблицы «Атомарные элементы». Таблица 4.9 содержит информацию о каждом атомарном элементе, используемом в модели, и несёт числовые показатели о состоянии дорожного полотна в области затронутым атомарным элементов. Детальное описание всех пунктов указано в таблице 4.9

Таблица 4.9. Описание таблицы «Атомарные элементы»

№	Название	Тип	Описание
1	ID	Числовой	Первичный ключ
2	Тип атомарного элемента	Текстовый	Геометрический тип атомарного элемента
3	Координаты	Кортеж	Кортеж чисел в метрической системе координат, определяющий позиционирование элемента
4	Id технологической зоны	Число	Внешний ключ
5	Приоритет	Числовой	Базовый приоритет
6	Состояние	Числовой	Отображает физическое состояние дорожного полотна.
7	Время обновления	Время/Дата	Дата и время обновления
8	Время создания	Время/Дата	Дата и время создания
9	Примечание	Текстовое	Примечание к примитиву. Справочная информация, не является обязательной

Таблица «атомарные элементы» связана с таблицей «технологическая зона» через внешний ключ ID технологической зоны. Исходя из названия, она несёт информацию об всех технологических зонах карьера, дороги, перекрёстки, зоны разгрузки и является логической группировкой атомарных элементов. Связь между данными таблицами «многие к одному». В таблице описываются перечень атомарных элементов, включённых в отдельные технологические зоны, типы технологических зон, название. Детальное описание таблице указано в Таблица 4.10

Таблица 4.10. Описание таблицы «Технологическая зона»

№	Название	Тип	Описание
1	ID	Числовой	Первичный ключ
2	Название	Текстовый	Название технологической зоны
3	Id примитивов	Кортеж	Кортеж числа ключей приливов
4	Примечание	Текст	Примечание к зоне
5	Время обновления	Время/Дата	Дата и время обновления
6	Время создания	Время/Дата	Дата и время создания

Записи в таблице «Технологическая зона» соотносятся один к одному к записям в таблице «Графовая структура», через внешний ключ ID. Таблица «Графовая структура» служит транскодером к уже созданным АСУ ГТК и её

пункты могут сильно отличаться в зависимости от необходимости. Детальное описание всех пунктов и их типов указано в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Описание таблицы «Графовая структура»

№	Название	Тип	Описание
1	ID	Числовой	Первичный ключ
2	Id зоны	Числовой	Внешний ключ
3	Тип графа	Тест	Текстовое название графа
4	Направление	Текст	Описание типа направления для ребра
	Смежные элементы	Кортеж	Кортеж чисел смежных элементов
5	Примечание	Время/Дата	Примечание к элементу графа. Справочная информация, не является обязательной
6	Время создания	Время/Дата	Дата и время создания
7	Время обновления	Текстовое	Дата и время обновления

Предложенная датологическая модель просуществовав является эталонной с одной стороны, т.к. она (модель) отвечает поставленным требованиям и хорошо иллюстрирует все уровни абстракции, с другой стороны она является прототипом, т.к. итоговые формы записи будут зависеть от конкретного карьера, источников данных и уже внедрённых систем СУ ГТК.

4.5 Выводы по главе 4

На основе разработанного дательного описания цифровой динамической модели дорожного полотна, был реализован программный комплекс, выполняющие поставленные задачи.

Была выбрана концепция open-source проекта позиционирующая идеи открытости, массовости и масштабируемости. Основываясь на этих принципах, был осуществлен подбор технологических средств и библиотек, отвечающих данной концепции.

В ходе работы были проведены исследования, позволяющие связать ключевые показатели модели: время обновления, эффективная площадь замощения, размер сетки между собой. Результаты позволили выделить аппроксимирующие функции, позволяющие высокой точностью спрогнозировать основные показатели модели от длины примитива. Так, для параметра «эффективная площадь замощения» была выявлена линейно зависимость от длины грани, а зависимость между «время обновления» и «длиной грани» уже несёт экспоненциальный вид зависимости. Полученные зависимости позволяют подобрать оптимальные параметры цифровой модели исходя из вычислительных мощностей и требованиям к времени обновлению модели. Продемонстрированы функции, аппроксимирующие ключевые показатели, и доказательство их релевантности ко всем типам участков дорожного полотна, что позволило подобрать оптимальные параметры атомарных элементов для эффективной работы цифровой модели.

Была представлена оптимизация алгоритма A^* , используемая для постройки маршрутов между технологическими зонами, и проведён числовой эксперимент, доказывающий адекватности используемой оптимизации и существенно увеличивший производительность алгоритма.

Предложена датологическая модель, декларирующая основную структуру цифровой модели дорожного полотна и описывающая взаимосвязь между элементами. Данная модель объединяет в себе, с одной стороны, точность

эталонной модели и вариативность гибкой модели. Данный подход позволяет легко встроиться уже в реализуемый процесс управления ГТК.

Заключение

В рамках выполнения исследования, описанного в настоящей диссертационной работе, были решены следующие задачи:

1. Проведён анализ существующих методов сбора, обработки и анализа горно-технической (телеметрической) и гео-пространственной информации, необходимой для обеспечения функционирования ГТК. В результате определены основные информационные потоки и массивы данных, которые нужно использовать при построении динамической цифровой модели технологической среды карьера.

2. Разработана структура динамической цифровой модели, состоящая из трех компонент: графа технологических дорог карьера или его фрагмента; матрицы связности атомарных элементов, описывающих карьерные дороги и другие транспортные зоны; множество атрибутов, значения которых привязаны к каждому атомарному элементу. Последние два компонента образуют динамическую базу знаний, лежащую в основе модели.

3. Разработаны процедура фрагментации транспортных зон карьера и алгоритм определения граничных точек этих зон (оконтуривание объектов), результаты работы которых могут быть представлены в удобной визуальной форме.

4. Разработан алгоритм замощения, позволяющий представить любой выделенный фрагмент транспортных зон карьера с помощью набора связанных между собой атомарных элементов. Проведены экспериментальные исследования использования различных геометрических примитивов (треугольники, квадраты, многоугольники) в качестве атомарных элементов; выполнены сравнительные оценки качества замощения с использованием различных критериев для нескольких типов геометрических форм замощаемых поверхностей.

5. Разработан алгоритм трассировки (выбора оптимальной трассы движения автономного самосвала-робота) с использованием динамической

цифровой модели, который позволяет при адекватном выборе типа атомарного элемента построить трассу, отвечающую требованиям технологического процесса.

6. Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать ряд рекомендаций по их возможному дальнейшему использованию:

- в качестве аналитического материала при изучении внедрённых геосистем в горнотранспортном комплексе, путём моделирования взаимодействия с другими системами и направления развития;
- при проектировании и разработке новых и модернизации существующих систем управления ГТК, в качестве средства моделирования и прогнозирования состояния карьерных дорог;
- при разработке цифровых двойников технологических процессов открытых горных работ в качестве элемента динамической 3D модели инфраструктурно-технологической среды карьера.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные материалы при выполнении данной диссертационной работы могут использоваться по следующим направлениям:

При изучении внедрённых геосистем в ГТК, путём моделирования взаимодействия с другими системами и направления развития.

При проектировании и разработке новых ГТК систем, путём моделирования и прогнозирования состояния и производительности карьерных дорог.

При решении комплексной задачи создания полноценной цифровой модели ГТК.

Полученные результаты позволяют взглянуть на дорожное полотно с применением новых патетических и пространственных подходов

Дальнейшая разработка темы заключается в создании обобщённой модели ГТК, включающей в себя не только автодороги и колёсный транспорт, но и все другие виды транспорта, применяемые при добыче ископаемых открытым способом.

Список литературы

Книги

1. Браун Л. А. История географических карт. — Москва: Центрполиграф, 2006. — 477 с.
2. Гармиз И. В., Кошкарев А. В., Межеловский Н.В., Рамм Н.С. Геоинформационные технологии: принципы, международный опыт, перспективы развития. — Москва: ВИЭМС, 1989. — 55с.
3. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. — Москва:ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 256 с.
4. Зинчук Л.Н., Кошкарев А.В. Произведения автоматизированной картографии. Каталог карт и атласов, составленных при помощи ЭВМ. — Москва: Государственная библиотека СССР им. В.И. Ленина, 1990. — 108 с.
5. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. — Новосибирск: СГГА, 2004. — 252 с.
6. Кошкарев А.В. Картография в эпоху инфраструктур пространственных данных // Картография в цифровую эпоху / Под ред. В. М. Котляков, И. К. Лурье, А. А. Медведев, Т. Е. Самсонов, серия Вопросы географии, место издания Издательский дом Кодекс Москва, том 144, — 2017. — с. 29—41
7. Кошкарев А.В. Понятия и термины геоинформатики и ее окружения: учебно-справочное пособие. — Москва: ИГЕМ РАН, 2000. — 76 с.
8. Кошкарев А.В., Каракин В.П. Региональные геоинформационные системы. — Москва: Наука, 1987. — 126 с.
9. Кошкарев А.В., Каракин В.П., Стариков В.Г. Автоматическое создание карт в структуре геоинформационной системы. — Владивосток: ТИГ ДВНЦ АН СССР, 1982. — 24 с.

10. Кошкарев А.В., Стариков В.Г. ЭВМ-картографирование для целей природопользования (программное обеспечение геоинформационной системы). — Владивосток: ТИГ ДВНЦ АН СССР, 1982. — 42 с.
11. Кошкарев А.В. Картографические аспекты геоинформационной технологии: Препринт. — Владивосток: ТИГ ДВНЦ АН СССР, 1986 — 41 с.
12. Матерухин А. В. Теоретические основы и методология обработки потоков пространственно-временных данных: дисс. д. тех. н.: 25.00.35. — Москва, 2018. — 173 с.
13. Плаксин И.Н. и др. Учёные ИГД им. А. А. Скочинского и развитие горной науки / Под ред. Худина Ю. Л. — Москва: Издательство АГН, 1997. — 239 с.
14. Потокий М. В. Картография с основами топографии, комплекс программно-методических материалов по предмету. — Москва: ВоенИздат, 1977. — 280 с.
15. Рассел С. Дж., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. — Москва: Вильямс, 2006. — 1408 с.
16. Савиных В.П. Геознание. — Москва: МАКС Пресс, 2016. — 132 с.
17. Серапинас Б. Б. Математическая картография. Учебник для вузов. — Москва: Издательский центр «Академия», 2005. — 336 с.
18. Спиваковский А.О. Рудничный транспорт. — Москва: Госгортехиздат, 1959. — 237 с.
19. Спиваковский А.О., Потапов М.Г. Транспортные машины и комплексы открытых горных разработок. — Москва: Недра, 1974. — 492 с.
20. Спиваковский А.О., Потапов М.Г., Андреев А.В. Транспорт на открытых разработках. — Москва: Госгортехиздат, 1982. — 392 с.
21. Турбович И.Т., Гитис В.Г., Маслов В.К. Оpozнание образов (детерминированно-статистический подход). — Москва: Наука, 1971. — 246 с.
22. Цветков В.Я. Извлечение знаний для формирования информационных ресурсов. — Москва: Госинформобюро, 2006. — 158 с.

23. Цветков В.Я. Формирование пространственных знаний. — Москва: МАКС Пресс, 2015. — 68 с.
24. Akkiraju N., Edelsbrunner H., Facello M., Fu P., Mucke E. P., Varela C. Alpha shapes: definition and software. — Minneapolis, 1995. — 32 p.
25. Garrison W.L., Berry B.J., Marble D.F, Nystuen J. D., Morrill R.L. Studies of Highway Development and Geographic Change. — USA: University of Washington Press, 1959. — 291 p.
26. Garrison W.L., Levinson D. M. The Transportation Experience: Policy, Planning, and Deployment. Oxford University Press, 2005. — 472 p.
27. Hägerstrand T. Innovationsförloppet ur korologisk synpunkt. (Eng. Innovation as a Spatial Process.) Lund: Meddelanden från Lunds universitets Geografiska Institutioner 25, 1953. — 304 p.
28. Langran G. Time in geographic information systems. — London: Taylor and Francis, 1992. — 180 p.
29. McHarg I. Design with nature. — The Natural History Press, 1969. — 208p.
30. Tomlinson R. The application of electronic computing methods and techniques to the storage, compilation, and assessment of mapped data. — London: University of London 1974. — 444 p.

Стандарты

31. РД 07—603—03 «нормативные документы Госгортехнадзора России инструкция по производству маркшейдерских работ» 2003

Статьи

32. Гитис В.Г., Вайншток А.П., Ошер Б.В., Юрков Е.Ф. Инструментальная среда GEO // Труды 3-й конференции по искусственному интеллекту. — 1992. — Т.1. — С. 169—172

33. Гитис В.Г., Петрова Е.Н., Пирогов С.А. Модель локального взаимодействия компонент геоэкологической структуры // Информационные процессы. — 2004. — №1 (Vol.4). — С. 1—7.
34. Господинов С. Г. Геоданные и геознания // Перспективы науки и образования. — 2016. — №5. — С. 20—23.
35. Дулин С. К., Розенберг И.Н., Уманский В.И. Обработка геопространственной информации на базе репозитория геоинформационной системы // Информация и её применение. — 2012. — Т. 6 (выпуск 2). — С. 29–42
36. Дулин С. К., Розенберг И. Н., Уманский В. И. Аспекты пространственной согласованности географической информационной системы // Системы и средства информации. — 2011. —Т 21 (выпуск 2). — С. 73–96
37. Дулин С. К., Розенберг И. Н., Уманский В. И. Методы кластеризации в исследовании массивов геоданных // Системы и средства информации. — 2009.— С. 86–113
38. Дулин С. К., Розенберг И. Н. Концепция комбинированных картографических образов — основа снижения избыточности единой геоинформационной системы // Sistemy i Sredstva Inform. — 2008. — С. 175–203
39. Еремеев С.В. Моделирование пространственных объектов в ГИС на основе топологических отношений // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. —2004. — № 9(1). — С. 74—79.
40. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Веденин А.С. Построение и использование топологических отношений между группами пространственных объектов в геоинформационных системах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2014. — № 47. — С. 130—133 .
41. Кулагин В.П. Геореференция в пространственных отношениях // Образовательные ресурсы и технологии. — 2016. — № 5 (17). — С. 80—86.

42. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International journal of open information technologies. — 2019. Vol.1
43. Майоров А.А. Геознание как новая форма знания // Перспективы науки и образования. 2016. № 4 (22). С. 23—Кулагин В.П., Цветков В.Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты // Информационные технологии. 2013. № 12. С. 2—9.
44. Майоров А.А., Матерухин А.В. Пространственные большие данные и современное российское образование в области геоинформатики. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2015. — № 6. — С. 105—108.
45. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 87—89
46. Майоров А.А., Матерухин А.В., Кондауров И. Н. Анализ существующих методов и средств выполнения пространственных запросов к пространственно-временным потокам данных для их возможного использования в киберфизических системах // Геодезия и аэрофотосъемка. — 2019. — № 63(5). — С. 598-605
47. Малинников В.А., Цветков В.Я. Динамическая модель геоданных // Науки о Земле. — 2012. — № 1. — С. 49—53.
48. Матерухин А.В. Проблематика создания ГИС на основе систем управления потоками данных // Геодезия и картография. — 2017. — №4. — С. 44—47.
49. Медведев А.А., Кошкарев А.В., Шварев С.В. Новые информационно—телекоммуникационные технологии сбора и организации пространственных данных для обеспечения экологической безопасности // Материалы Международной научной конференции государств-членов ОДКБ

Проблемы безопасности окружающей среды , место издания Издательство Гитутюн НАН РА Ереван. — 2016. — С. 131—138

50. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Организация автоматизации инженерного обеспечения приведении открытых горных работ. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — №9. — С.32–40.3.

51. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Создание единой геолого-маркшейдерской информационной среды для планирования открытых горных работ в системе // МАЙНФРЭЙМ. ГИАБ. – 2010. — №4 (2). — С. 336–342.

52. Ожерельева Т.А. Геознания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — №5 (часть 4). — С. 669—689 .

53. Пьянков С.В., Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Применение ГИС-технологий для оценки и прогноза экологической ситуации в угледобывающих районах с критической техногенной нагрузкой // Материалы Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС , . — 2017. — Т.23. — С. 154—167

54. Пьянков С.В., Осовецкий Б.М., Конаплев А.В., Ибламинов Р.Г. Систематизация материалов инженерно-геологических изысканий на основе ГИС—технологий // Фундаментальные исследования, издательство Акад. естествознания (Пенза). — 2014. — № 11(2). — С. 353—356.

55. Розенберг И.Н., Вознесенская М.Е. Геознания и геореференция // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. — 2010. — № 2. — С. 116—118.

56. Савиных В. П. Геоинформатика в системе наук // Образовательные ресурсы и технологии. — 2016. — №4 (16). — С. 106—113.

57. Савиных В.П. Информационные пространственные отношения / Образовательные ресурсы и технологии. — 2017. — № 1 (18). — С. 79—88.

58. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформатика как система наук // Геодезия и картография. – 2013. – № 4. – С. 52—57.
59. Сидоренко А. В., Соколов Б. С., Яншин А. Л. и др. Выдающийся деятель горной науки и промышленности академик Н. В. Мельников (1909—1980) // Известия АН СССР. Серия геологическая. — 1981. — № 8. — С. 143—150.
60. Темкин И.О., Клебанов Д.А Интеллектуальные системы управления горно-транспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. Труды международного симпозиума «Неделя Горняка» (Москва, 27—31 января 2014 г.). — 2014 — Отдельный выпуск №1 – С. 257—266.
61. Цветков В.Я. Виды пространственных отношений // Успехи современного естествознания. — 2013. — № 5. — С. 138—139 .
62. Цветков В.Я. Применение геоинформационных технологий для поддержки принятия решений//Геодезия и аэрофотосъемка. — 2001 — №4. — С. 128—138 .
63. Цветков В.Я. Пространственные знания в науках о Земле // Международный журнал экспериментального образования. — 2016. — № 10(2). С. 216—219 .
64. Цветков В.Я. Пространственные отношения в геоинформатике // Науки о Земле. —2012. — №1. — С.59—61.
65. Шавнина Ю.Н., Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Моделирование сработки водохранилища и расчет мощности донных отложений // Вопросы современной науки и практики. — 2007. — №2— с. 87—93
66. Ahmed M., Ward R. A rotation invariant rule—based thinning algorithm for character recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2002. — Vol. 24(12). — P. 1672–1678
67. Berry B., Garrison W. L. The functional bases of the central place hierarchy // Economic Geography. — 1958. — №34. — P.145 – 154.

68. Cao C., Sun Y. Automatic Road centerline extraction from imagery using road GPS data // *Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 6 (9). — P. 9014–9033
69. Ekpenyong F., Palmer D.B. Brimicombe A. Extracting Road information from recorded GPS data using snap-drift neural network // *Neurocomputing*. — 2009. — Vol. 73(1-3). — P. 24–36.
70. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // *Pattern Recognition Letters*. — 2006. — Vol. 27(8). — P. 861–874.
71. Gitis V., Deart D., Jurkov E., Sapronov G., Vainshtok A., Osher B., Trofimov D. Instrumental Environment for the design of computer based seismotectonic models // *Abstracts of the 27 General Assembly of IASPEI, Wellington, New Zealand*. — 1994. — P. 320—346.
72. Gitis V., Jurkov E., Pirogov S., Sobolev G., Ponomarev A., Osher B. GeoTime: A geoinformation system for space-time analysis of earthquake precursors // *Abstracts of XXIV General Assembly of ESC, Athens, Greece*. — 1994. — P. 95-113.
73. Gitis V., Jurkov E., Vainchtok A., Ermakov B., Osher B., Schenk V. Geoinformation technology for seismic hazard forecasting. // *Abstracts of XXIV General Assembly of ESC, Athens, Greece*. — 1994. — P. 30—42
74. Gitis V., Yurkov E., Pirogov S., Petrova E., Weinstock A., Derendyaev A., Metrikov P. Web—GIS for complex analysis of spatio—temporal processes // *Abstracts of the General Assembly of IASPEI, Santiago*. — Vol.1. — 2005. — P.98—137.
75. Gitis V., Yurkov E., Shchukin Yu. Fundamental Principle of the GEO expert system and application to Mmax Earthquake Assessment. // *Proc. of the PRC/USSR Workshop on Geodynamics and Seismic Risk Prediction, May 1991, Beijing, China*. — 1991. — Vol.1— P.42—44.
76. Hägerstrand T. Geographic measurements of Migration // *Swedish data, Entretiens de Monaco en Sciences Humaines*.—1962. — Vol.1. — P.61—83
77. Hasan M. K., Khan J. I., Ahmed R., Hossain M. M., Nur M., Shams Us. Road structure analysis using GPS information // *In Proceedings of the 2013*

International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT). —2014. — P. 1–6.

78. Kriegel H.P., Kröger P., Sander J., Zimek A. Density—based clustering // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. — 2011. — Vol.1 (3) — P. 231–240.

79. Longley, P. A. Goodchild, M. F. McGuire, D. J. Rhind, D. W. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties // Geographic Information Systems and Science. West Sussex, England: John Wiley and Sons. — 2005. —P. 328 – 343.

80. Maiorov A.A. Modern Development of Geoinformatics // European Researcher. —2014. —№82(9—1). —P.1620—1627

81. Maiorov A.A. Information interaction applied Geoinformatics // Educational Resources and Technology. — 2016. — Vol. 1. — P.7-16.

82. Maiorov A.A., Materukhin A. A Conceptual Model of an Information Measurement System Based on Distributed Networks of Smart Geosensors // Measurement Techniques. — 2018. — № 61(1). — P. 1—7

83. Maiorov A.A., Materukhin A., Kondaurov I.N. Analysis of existing methods and means of performing spatial queries to spatio-temporal data streams for their possible use in cyber-physical. — Geodesy and Aerophotosurveying. — 2019. — № 63(5). — P. 598—605.

84. Niu Z, Li S., Pousaeid N. Road extraction using smart phones GPS // In Proceedings of the 2nd International Conference on Computing for Geospatial Research & Applications. — 2011. — Vol.1. — P. 1–6.

85. Ouyang H., Liu J.X., Liu Y.Z., Liao Z.H., Chen S.X. // An extraction method of road network based on walking GPS trajectories Computer and Modernization. — 2014. — Vol. 2. — P. 124–128.

86. Perruchet P., Peereman R. The exploitation of distributional information in syllable processing // — Journal of Neurolinguistics. — 2004. — Vol. 17. — P. 97–119.

87. Powers D. M. W. The problem with kappa //In Proceedings of the 13th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, EACL. — 2012. — P. 345–355.
88. Qiu J., Wang R. Automatic extraction of road networks from GPS traces // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 82(8). — P. 593–604.
89. Senthilnath J., Rajeshwari M., Omkar S.N. Automatic road extraction using high resolution satellite image based on texture progressive analysis and normalized cut method // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. — 2009. — Vol. 37(3). — P. 351–361.
90. Shi W., Zhu C, The line segment match method for extracting road network from high-resolution satellite images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2002. — Vol. 40(2). — P. 511–514, 2002.
91. Sun X. Y., Tian F.L., Zhang H., Sun B. Traffic flow model in open pit mine for needs of fixed assignment of truck // Journal of the China Coal Society. — 2016. — Vol. 41. — P. 583–588.
92. Sun X. Y., Tian F.L., Zhang H., Li Z. Automatic extraction of road network in open pit mine based on GPS data // Journal of the China Coal Society. — 2017. — Vol. 42(11). — P. 3059–3064.
93. Worboys M. F. A unified model for spatial and temporal information. // The Computer Journal. — 1994. — №37. — P. 26–33.
94. Worboys M.F. Event—oriented approaches to geographic phenomena // International Journal of Geographical Information Science. — 2005. — Vol.19. — P. 1—28.
95. Yang W., Guo K., Wei Y An efficient index thinning algorithm of fingerprint image based on eight neighborhood points // Journal of Sichuan University of Science and Engineering. — 2008. — Vol. 21. — P. 61–63.
96. Yuan M. Wildfire conceptual modeling for building GIS space time models // GIS/LIS 94, Phoenix, Arizona. — 1994. — P. 860—869.

97. Yuan M. Representing complex geographic phenomena with both object— and field—like properties // Cartography and Geographhic Information Science. — 2001. — Vol.28. — P.83— 96.
98. Yuan M.: Representing geographic information to enhance GIS support for complex spatiotemporal queries // Transactions in GIS. — 1999. — Vol. 3. — P.37—60.
99. Темкин И. О., Дерябин С. А., Куляница А. Л. Вычислительные модели взаимодействия автономных мобильных агентов транспортного комплекса горных предприятий. Научно-технологический журнал информация и космос. 2017г.

Электронные ресурсы

100. Алта техно. 3D—Модель карьера [Электронный ресурс]: <http://altatechno.ru/projects/proekty—aerofotosemki/3d—model—karera/>
101. Вист групп АСУ ГТК Карьер [Электронный ресурс]: <https://www.zyfra.com/ru/product/openmine/>
102. Галкин В.И. презентационный материал Основы горного и строительного дела Москва 2013
103. Проектирование горных производств [Электронный ресурс]: <http://gor—delo.ru/plan—razvitiya—gornykh—rabot>
104. Bentley Infrastructure Digital Twins [Электронный ресурс]: <https://www.bentley.com/en/products/product—line/digital—twins>
105. Herbert Edelsbrunner. Alpha Shapes — a Survey <http://graphics.stanford.edu/courses/cs268-14-fall/Handouts/AlphaShapes/2010-B-01-AlphaShapes.pdf>