

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

Конов Илья Сергеевич

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

Автореферат диссертации
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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 горно-транспортного комплекса при осуществлении открытых горных работ.

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

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 горно-транспортного 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 (оконтуривание 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 заключается в том, что:

- 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 научных положений, выводов и рекомендаций работы 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.

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

Перечень опубликованных работ приведен в конце автореферата.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, определяются цель, и задачи исследования, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные понятия современной организации процессов добычи полезных ископаемых открытым способом. Современная организация процессов включает в себя наличие роботизированной техники и локальных систем автоматизаций. Это оборудование снабжено множеством датчиков, функционирующих на различных принципах, которые обеспечивают возможность собирать большие объемы разнородной информации. Различное программное обеспечение позволяет решать комплекс разнородных функциональных задач, в том числе обеспечивать поддержку диспетчерскому персоналу карьера. Схематически процесс добычи и перемещения горной массы представлен на рисунке 1

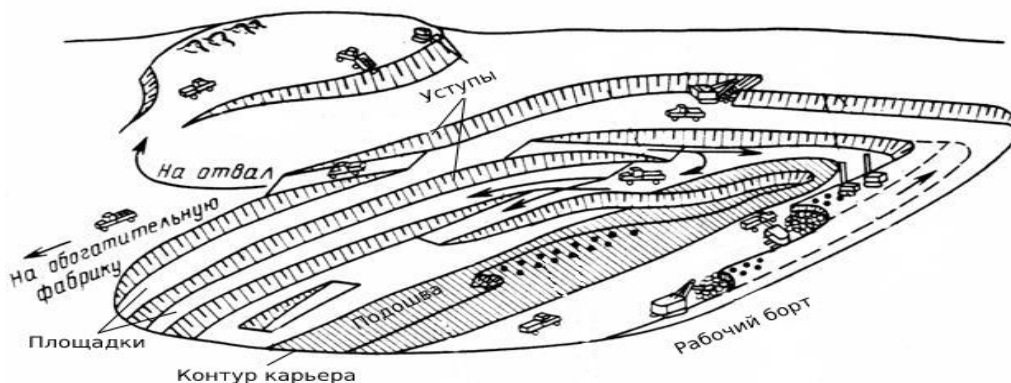


Рисунок 1 – Типовое графическое изображение карьера

Тематика диссертации лежит на стыке различных предметных областей: геоинформационных систем, моделирования горно-транспортных процессов и методов обработки и анализа данных.

Общая теоретическая база в области технологий реализации и моделей оптимизации открытых горных работ сформирована работами таких учёных: академиков Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, К. Н. Трубецкого, докторов технических наук: Арефьева С.П., Анистратова К. Ю., Богомоллова С. В. , Васильева М. В., Вашлаева И. И., Ворошилова Г. А., Галкина В. А., Глебова А. В., Довженка А. С., Зырянова И. В., Колчанова А. Г., Кузнецова Ю.Н., Леля Ю. И., Макарова А. М., Михайлова В. А. ,Новожилова М. Г., Певзнера Л.Д.,Потапова М. Г., Рыльниковой, М. А,Симкина Б. А., Смирнова В. П., Стенина Ю. В., Торова В.С.

Теоретические основы автоматизированных систем управления ГТК был заложен в 60-х годах прошлого века, когда были определены основные направления применения методов моделирования и автоматизации открытых горных работ.

Современные системы управления горными работами в карьерах представляют собой сложный комплекс аппаратно-программных средств, который позволяет в реальном времени предоставлять информацию обо всех технологических процессах и учитывать ее при формировании управляющих решений в автоматизированном режиме (рисунок.2).

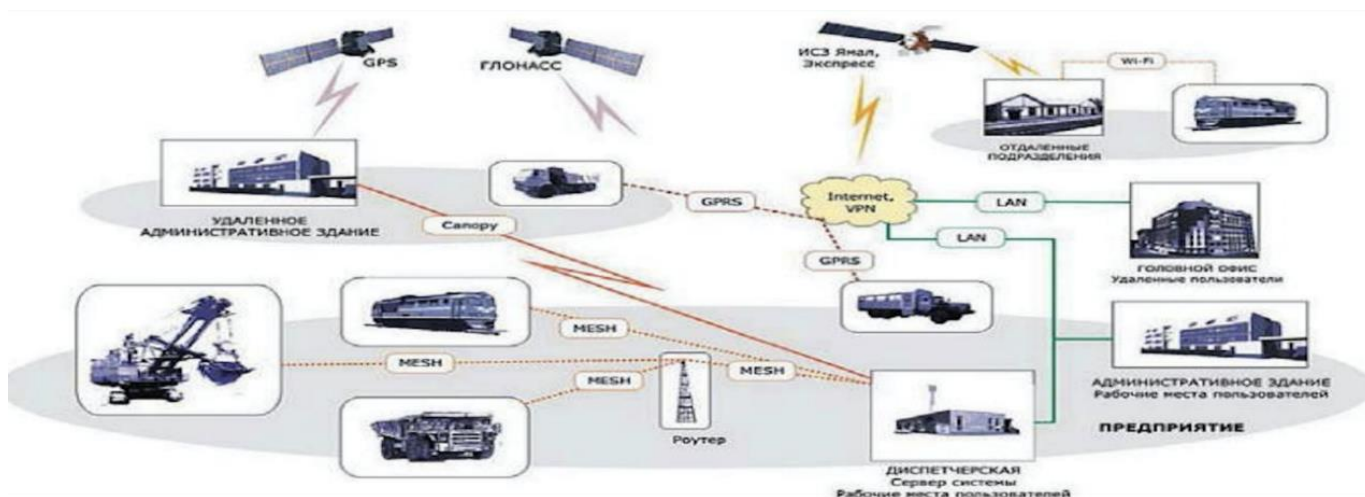


Рисунок 2 – Комплекс технических средств, задействованных в современной системе управления ГТК карьера

Следует отметить, что процесс перехода от традиционных форм управления организацией работ при добыче полезных ископаемых открытым способом к современному интеллектуальному горному предприятию занял более 50 лет и может быть представлен в виде последовательной цепочки шагов: от систем автоматизированного управления работой карьера, в которых осуществлялось решение отдельных функциональных задач с использованием компьютерных методов оптимизации и постепенного внедрения Гео-Информационных Систем (ГИС) в качестве базового элемента диспетчерского управления, до интеллектуальных систем управления роботизированными и полностью автономными объектами ГТК, которые разрабатываются компанией ВИСТ Групп (проект «Интеллектуальный карьер»).

Идея создания цифровых двойников впервые была затронута на абстрактном уровне достаточно давно, в работе Д. Хилера-Гелернета «Mirror Worlds» в 1991 году. На современном этапе идея цифровых двойников постепенно превращается в технологию, которая активно развивается крупными корпорациями, такими как «Siemens» и «General Electric», а так же отечественными компаниями, такими как: «ЦИФРА», «Сбербанк» и «Газпром-нефть».

Основная концепция цифрового дублирования заключается в объединении трех компонент: физического объекта, цифрового объекта и связей между ними. Связи - это данные, которые передаются от физического объекта к цифровому и информация, доступная из

цифрового объекта в физическую среду. Это позволяет моделировать процессы без использования физического объекта и применять уже апробированное управление к физическому объекту и на оборот.

Современные технологии позволяют получить высокоточную пространственно-временную детализацию ГТК с использованием, как локальных элементов (датчиков давления, гироскопов др.), так и глобальных систем (GPRS, ГЛОНАСС). Такие массивы данных, характеризующиеся разнородностью и большими объемами можно охарактеризовать термином «big data», учитывая при этом, что геоинформационные потоки имеют свою специфику

- Геоинформационные данные представляют собой набор кортежей, упорядоченных по времени или по другим атрибутам. Временные метки могут иметь различное время дисконтирования, либо иметь существенно смещение во времени. В некоторых случаях набор кортежей не доступен изначально, а поступает в течении времени.
- Данные поступают из различных внешних независимых источников. При определённых условиях нет возможности повлиять на порядок прибытия или скорость их передачи.
- Данные приходя 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.

В данной работе рассматриваются три возможных источника получения гео-пространственных и телеметрических данных.

В качестве первого источника выступают данные с мобильных объектов. Под мобильными объектами понимаются все нестационарные объекты, изменяющие свою позицию в течение смены или нескольких смен (самосвалы, грейдеры, заправщики, экскаваторы, буровые установки и другие перемещающиеся объекты). Все современные мобильные объекты имеют определённый набор датчиков: GPRS, акселерометры, угломеры, компас др. Например в системе АСУ ГТК «Карьер» используется датчики в цилиндрах подвески для контроля загрузки и расчёте перевезённой руды. Для контроля дорожного полотна используется 9-ти осевые цифровые акселерометры.

Данные с мобильных объектов и переносятся в реляционную базу данных. При этом реализуется схема так называемых пограничных вычислений, где дискретизация данных и первичная обработка перенесена на конечные устройства (ЭВМ на мобильных объектах), а сохранение и аналитическая обработка – в центральную базу данных (БД). Таким образом, данные с мобильных объектов легко управляемы, с определённой точности детальны, оперативны, но имеют жёсткую привязку к мобильным объектам.

Другим источником гео - пространственных данных может служить маркшейдерская съёмка. Очень часто в маркшейдерской съёмке дорожное полотно фигурирует в виде поли линии и не содержит в себе никаких технических характеристик, связанных непосредственно с характеристиками реального дорожного полотна рисунок 3.

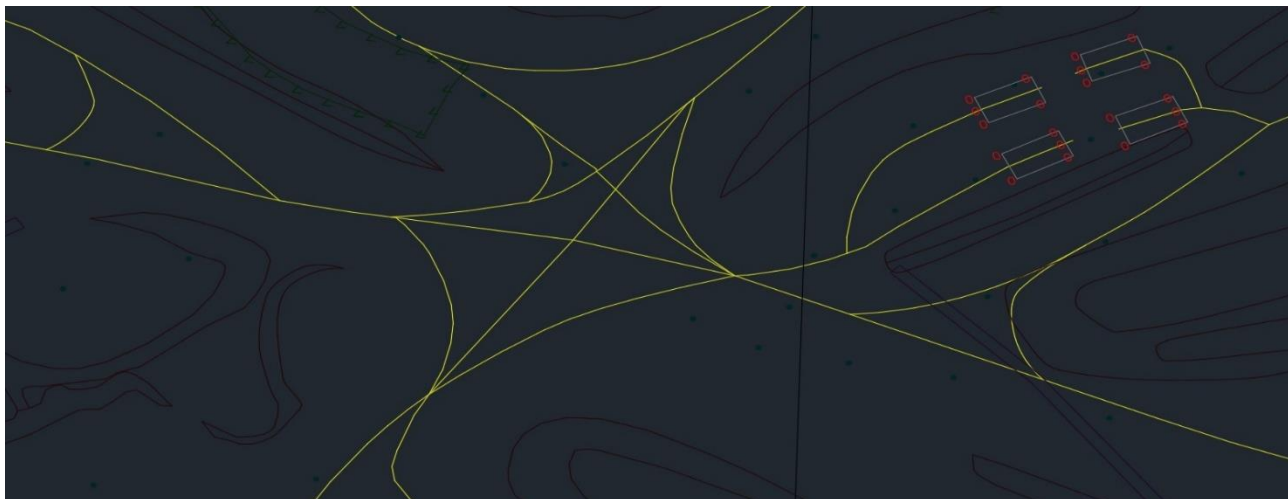


Рисунок 3 – Данные маркшейдерской съёмки карьера

Часто маркшейдерская съёмка проводится после буровзрывных работ и полностью описывает состояние карьера в определённый момент времени, без учёта предыстории и возможных дальнейших изменений. То есть, это достаточно статичные геоинформационные данные, которые выполняют контрольно-регистрационные функции, но не отражают динамику изменения состояния дорожного полотна.

Важным источником информации для построения цифровой модели дорожного полотна и, соответственно, цифровой карты дорог, может являться космическая или аэрофотосъёмка, осуществляемая с использованием космических или других летательных аппаратов. В целом, считается, что спутниковые данные могут приближаться к маркшейдерской съёмке по точности представления информации и чаще обновляются, однако, являются чувствительными к геопозиции спутника и текущим метеоусловиям. На рисунке 4 представлен пример космического снимка.



Рисунок 4 – Пример фотографии со спутника участка дорожного полотна карьера.

На основе проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод, что только при комбинировании нескольких источников геоинформационных данных, возникает возможность построения цифровой динамической модели дорожного полотна. Данные с мо-

бильных объектов обладают оперативностью и детализацией, но не обладают обобщающими характеристиками. Маркшейдерская съёмка полностью передаёт состояние карьера на определённый момент времени, но не может оперативно корректироваться. Спутниковая съёмка обновляется чаще чем маркшейдерия, но имеет проблемы с детализацией. Таким образом, ни один из этих информационных источников обособленно не обладает всем перечнем геоинформационных данных необходимых для создания и поддержания цифровой динамической модели дорожного полотна.

Во второй главе описываются основные компоненты цифровой модели и структура информационной базы. При разработке цифровой модели принимался во внимание тот факт, что технологические операции, которые могут реализовывать автономные объекты ГТК достаточно разнообразны и их осуществление определяется информационными потоками, порождаемыми принципиально различными информационными сущностями. Поэтому для достаточно формального описания процедур взаимодействия автономных объектов, таких как: «экскаватор – забойное пространство», «экскаватор – автосамосвал», «автосамосвал – маршрут», «автосамосвал – автосамосвал», «автосамосвал-дорожная трасса», «автосамосвал – транспортные зоны зона (погрузка, разгрузка)», необходимого для построения цифрового двойника карьера, предложено рассматривать технологическую среду (технологические дороги и другие производственные зоны карьера), как отдельную агентную систему.

Схемы представления данных, описывающих геометрические, пространственные и геологические свойства производственной среды, существенно различны, так как в их основе разные по природе происхождения данные, трудно поддающиеся интеграции в виде единой цифровой функциональной структуры. Разница природы происхождения заключается как в частоте обновления и срокам актуальности данных, так и в надежности их источников и способах первичного получения. Далее разработанная процедура построения цифровой интерактивной модели основного элемента инфраструктурной системы: транспортно – технологической среды, рассматривается более подробно.

Можно сделать вывод, что управление с использованием цифрового двойника должно учитывать не только точное позиционирование всех объектов инфраструктурной и транспортной системы, но и качественные характеристики единичных участков инфраструктурных агентов. Таким образом, целостное представление общего инфраструктурного агента «карьер» есть множество точек с координатами x, y, z , размещенных внутри условного «куба» с присвоенными этим точкам дополнительными геоинформационными признаками.

Такое представление цифровой модели карьера является избыточным. В этой связи, предлагается разбить исходное множество координатных точек на некоторое семейство подмножеств - структурно и функционально унифицированных атомарных элементов, обладающих полным набором горно-геологических и геоинформационных характеристик и обеспечивающих взаимодействие с другими агентными системами.

Разделение геоинформационного пространства открытых горных работ на атомарные элементы включает два этапа:

1. Разбиение инфраструктурного агента «карьер» на атомарные элементы вдоль поверхности с целью выделения основных транспортных зон, их геометрической ориентации в пространстве и возможности присвоения качественных свойств грунта (дорожного полотна).

2. Разбиение карьера вглубь в виде блочной модели для определения геологического состава месторождения и сопутствующих геофизических свойств отдельных инфраструктурных частей.

При разработке процедуры разбиения поверхностной части пространства карьера на атомарные элементы (примитивы) были предварительно определены источники информации, позволяющие с наибольшей точностью и полнотой формировать и обновлять геопространственные структуры карьера, которые были рассмотрены в первой главе.

Каждый из перечисленных ранее источников информации формирует отдельный слой данных, описывающих геопространственное положение технологических зон карьера, поставляет схожую по своим свойствам информацию, но различную по физической сущности измерения. Общая схема такого решения для построения модели транспортно-технологических зон карьера (дорожного полотна) – основного инфраструктурного элемента технологической среды, а также общее послойное представление геопространственных данных, получаемых в результате обработки различных информационных потоков, представлены на рисунке 5.

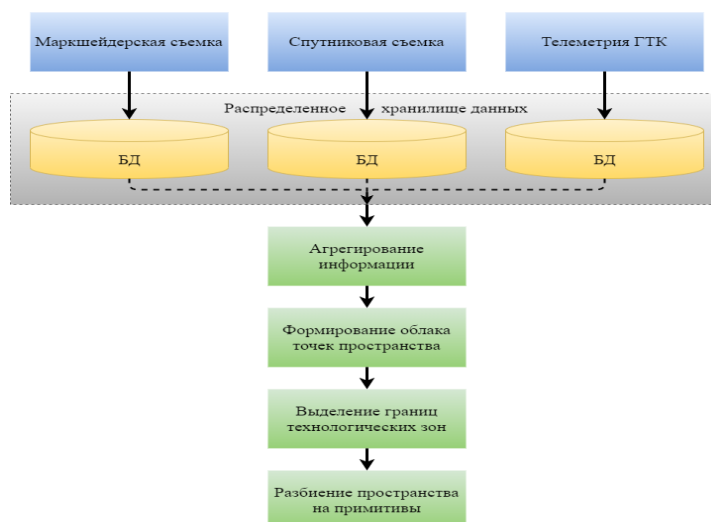


Рисунок 5 – Общая схема процедуры построения динамической модели транспортно-технологических зон карьера

В целом, процесс построения цифровой модели технологической среды карьера (инфраструктурная агентная система) включает в себя следующие этапы:

1. Агрегирование информации в распределенном хранилище данных;
2. Определение координат исходных границ транспортных зон;
3. Накопление координат перемещающихся мобильных агентов и формирование облака точек в пространстве транспортных зон;
4. Разбиение пространства транспортных зон на атомарные элементы (замощение);
5. Формирование цифровой модели транспортных зон;
6. Обновление координат границ транспортных зон (оконтуривание).

Этапы 2-6 повторяются с периодом, зависящим от конкретных технологических процессов.

Цифровую динамическую модель будем определять, как логически связанную систему атомарных элементов (примитивов), каждый из которых описывается вектором атрибутов, значения которых изменяются во времени, и уточняются с использованием различных источников информации.

Основным элементом динамической модели является множество атомарных элементов, которые геометрически представляют собой правильные многоугольники, заданные координатами $\{x_i, y_i, z_i\}$, $i = 0, 1, \dots, k$; k – число вершин геометрической фигуры; x_i координаты вершины атомарного элемента в плоскости x ; y_i координаты вершины атомарного элемента в плоскости y ; z_i координаты вершины атомарного элемента в плоскости z . В качестве геометрических примитивов, задающих атомарные элементы в данной работе использовались равносторонние треугольники, квадраты и правильные шести-угольники

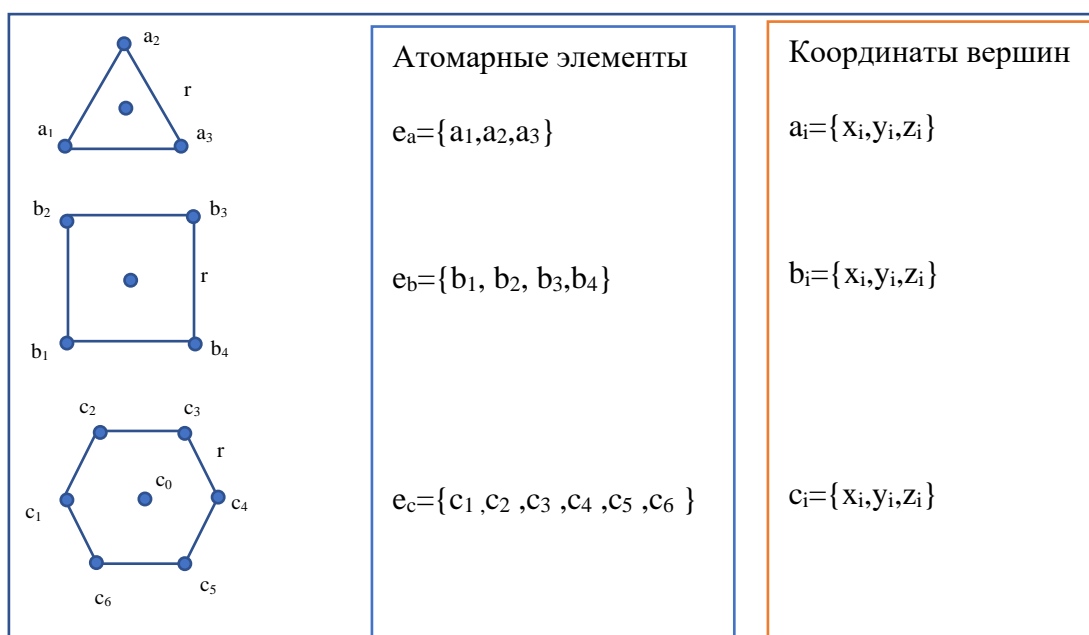


Рисунок 6 – Атомарные элементы.

Данные геометрические фигуры образуют каркас для построения цифровой модели технологической среды карьера, которая представляет собой массив упорядоченных и структурированных данных, размерность которого может изменяться, в зависимости от заданных ограничений: точность решения задач, зависящая от погрешности измерений, требуемая оперативность построения трассы для каждого мобильного агента, степень достоверности вычисления граничных точек транспортных зон.

Цифровая модель состоит из трех компонент:

- дорожный граф;
- структура описания атомарного элемента;
- матрица смежности атомарных элементов;

Такое представление позволяет описывать и моделировать транспортную среду с различной степенью точности (детализации) и при различных вариантах разбиения на фрагменты.

Одновременно с этим, модель представляет собой совокупность динамических баз данных: S_1, S_2, \dots, S_M , где M – множество фрагментов транспортных зон, каждая из которых представляет собой вектор атомарных элементов $S_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{ipq}\}$, где p и q – задают количество элементов, покрывающих прямоугольник дорожного полотна по координатам X и Y соответственно. Когда транспортный фрагмент имеет неправильную форму (это ти-

пичная ситуация) p и q для каждого столбца и каждой строки таблицы может быть различным. Каждый атомарный элемент e_{ij} (где i и j – номера строк и столбцов в матрице смежности атомарных элементов) задан в пространстве атрибутов $\{a_{ij}(1), a_{ij}(2), \dots, a_{ij}(m)\}$, определяющих все его характеристики, такие как:

- уникальный идентификационный номер;
- принадлежность к определенной транспортной зоне;
- тип покрытия;
- набор координат вершин и центра атомарного элемента.

Более подробное описание этих атрибутов представлено в таблице 1.

Таблица № 1 Атрибуты атомарного элемента

№	Название	Описание
1	Позиция в матрице смежности	(i, j) индексы в матрице смежности
2	Тип примитива	Геометрический тип примитива (треугольник, шестиугольник, квадрат)
3	Координаты	Кортеж чисел в метрической системе координат, определяющий позиционирование примитива
4	Номер транспортной зоны	Показывает принадлежность к определённой транспортной зоне. Например «Перекрёсток 3» или «Дорога 2»
5	Приоритет	Базовый приоритет проезда по данному атомарному элементу исходя из класса дороги
6	Состояние	Модификатор приоритета, отображающего физическое состояние дорожного полотна в определённый момент времени.
7	Время обновления	Дата и время обновления информации по данному атомарному элементу

Наряду с пространственными характеристиками каждому атомарному элементу присваивается определенный вес-рейтинг. Этот параметр - C_{ij} - выступает в роли качества атомарного элемента (вычисляемый коэффициент). Показатель C_{ij} играет ключевую роль в процессе автоматического формирования трасс для движения беспилотных мобильных агентов. Данный коэффициент является целочисленным и вычисляется с помощью комбинаций статических P и динамических D факторов влияющие на пригодность использования для движения мобильных объектов.

Статистические факторы P рассчитываются по формуле (1)

$$P = \text{round}(m_p \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3), \quad (1)$$

где S_1 - класс дорожного полотна ($S_1=1$ для дороги 1-й категории, с максимальной скоростью 60 км/ч, $S_1=5$ для дорог 5-й категории, грунтовые дороги);

S_2 - типы дорожного полотна пригодных для движения мобильных объектов (элемент насыпной обочины $S_2 = 2$, дорожная рубашка $S_2 = 1$);

S_3 -особые зоны с учётом правил дорожного движения ($S_3=2$ перекрёсток, зона одностороннего движения попутного направления $S_3=1$);

m_0 – весовой коэффициент, устанавливаемый для каждой карьера;

round -функция округления.

Динамических факторов D , влияние которых постоянно изменяется во времени, рассчитываются по формуле 2:

$$D = \text{round}(m_d * D_1 * D_2 * D_3), \quad (2)$$

где D_1 – погодные условия ($D_1 = 1$ отличные погодные условия, $D_1 = 3$ плохие погодные условия);

D_2 – состояние дорожного полотна, на наличие деформации ($D_2 = 1$ без деформаций, $D_2 = 5$ присутствует гребёнка);

D_3 – состояние дорожного полотна, на наличие временных препятствий ($D_3 = 1$ без ограничений, $D_3 = 2$ запылённость, $D_3 = 4$ гололёд и т.д.);

m_d – весовой коэффициент, устанавливаемый для каждой карьера;

round -функция округления.

Соответственно итоговое значение C_{ij} , рассчитывается следующим образом:

$$C_{ij} = \text{round}(m_o * D * P), \quad (3)$$

где m_o – общий весовой коэффициент, устанавливаемый для каждой карьера;

round -функция округления.

Поскольку конечной целью построения цифровой модели является автоматическое формирование трасс для движения беспилотного транспорта, необходимо описать структуру связей между атомарными элементами. Для этих целей нами использована матрица смежности, представляющая собой двумерную прямоугольную таблицу M , где в каждой ячейке указывается приоритет атомарного элемента, или 0 если данная зона не пригодна для движения. Примером матрицы смежности для участка дорожного полотна, рассмотренного на рисунке 7, являются матрицы - M (без учёта ранжирования) и M' (с учётом ранжирования)

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

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

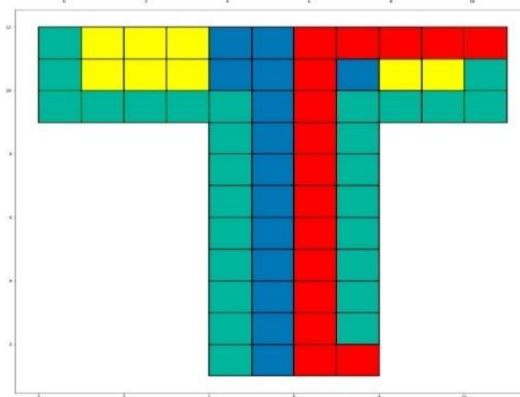
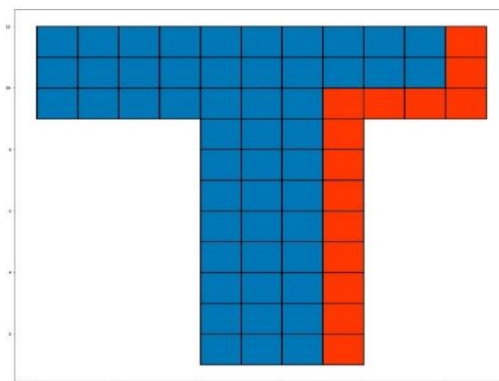


Рисунок 7 – Матрицы смежности М и М' и влияние на построение маршрута

В итоге мы получаем двухуровневое представление цифровой модели. На первом уровне модель представлена в виде графа дорог, а на втором - рёбра и вершины описываются набором примитивов, отражающих основные физические характеристики дорожного полотна, обновляющиеся в режиме приближенном к реальному времени.

Соответственно, транспортные зоны представляют собой набор атомарных элементов, объединённых в группу, и являются вершинами графовой модели дорожного полотна, изображенного на рисунке 8.

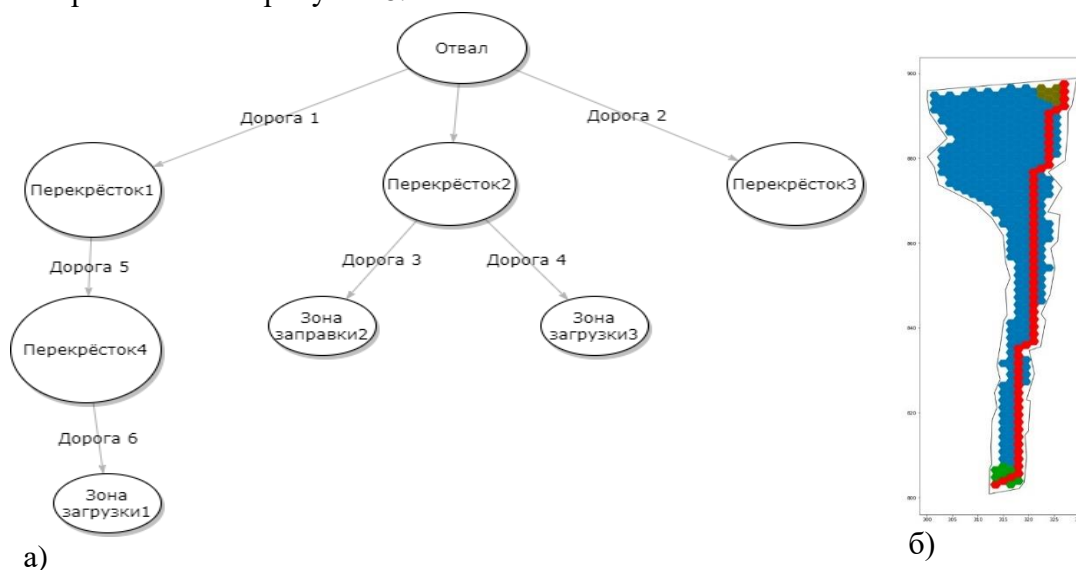


Рисунок 8 – Двухуровневое визуальное внешнее представление модели:

а) графовое представление общей структуры модели; б) графический образ цифровой модели фрагмента технологической дороги.

В символьном виде модель можно записать как:

В символьном виде модель можно записать как:

$$\left[\begin{array}{l} < G, M, BD > \\ f\{DB, M\} \rightarrow M', \\ f'\{DB, M'\} \rightarrow G \end{array} \right. \quad (4)$$

Где DB – база данных атомарных элементов;

M- матрица смежности;

G – графовая модель;

M' - матрица смежности с учетом оценочных коэффициентов атомарных элементов.

Визуальное представление модели предоставлено на рисунке 9 .

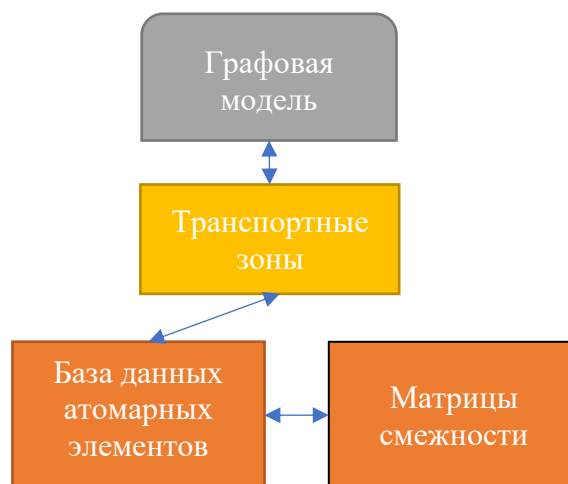


Рисунок 9 – обобщённые элементы цифровой модели.

На нижнем уровне формируются две взаимосвязанные абстракции: база данных атомарных элементов, содержащая наборы атрибутов атомарных элементов и координаты вершин, вторая матрица – матрица смежности, необходимая для учёта динамического состояния дорожного полотна и построения кратчайшего маршрута. Выше уровнем находится набор транспортных зон, содержащий определённые примитивы и верхним элементом модели является графовое представление транспортных зон.

В третьей главе рассматривается поэтапный подход к построению цифровой модели, который объединяет в себе процедуру построения замкнутого контура объекта инфраструктуры (алгоритм оконтуривания), а также процедуру формирования блочного описания поверхности объекта с использованием атомарных элементов (алгоритм замощения). Очевидно, что в случае использования данных маркшейдерской съёмки поиск граничных точек – это рутинная операция.

С целью унификации представления данных было осуществлено преобразование всех координат, получаемых, в том числе, из GPS подобных систем, в единую декартову систему координат. В ходе первичной обработки была использована формула гаверсинусов, для расчёта расстояния между двумя GPS координатами:

В обобщённом формате формула имеет вид:

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (5)$$

,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, а более высокая точность достигается за счет использования проекций Гаусса – Крюгера. Этот подход позволяет без существенных искажений изобразить довольно значительные участки земной поверхности и, построить на этой территории систему плоских прямоугольных координат

Данный подход позволяет без существенных искажений изобразить довольно значительные участки земной поверхности и, построить на этой территории систему плоских прямоугольных координат. Эта система является наиболее простой и удобной при проведении инженерных и топографо-геодезических работ

Рассмотрены 2 подхода к построению контура: с использованием крайних точек и использованием α -форм.

Опишем подход поиска крайних точек. Допустим, что определена некая точка $N_i\{x_i, y_i\}$, принадлежащая границе дорожного полотна. Следующим шагом является 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 $N_{i \max}$, и формируется набор точек $K\{N_{1 \min} \dots N_{i \min}, N_{i \max} \dots, N_{l \max}\}$. Данная последовательность является некоторым контуром, требующим проверки на соблюдение интегральной теоремы Коши, при соблюдении которой мы можем считать его оптимальным. Можно назвать этот подход поиском выпуклой оболочки. Однако, такой подход к поиску контура (выпуклой оболочки) работает только в случае достаточно простой формы объекта. В случае, если нам необходимо выделить объект сложной формы (например, технологическая дорога S-образного вида) требуется использовать более тонкий инструмент.

Для решения нашей задачи воспользуемся методологией α -форм. Данный подход можно описать как формирование рёбер α -формы, являющихся рёбрами ячеек вороного, отсортированных и меньших радиуса a триангуляции Делоне. Таким образом формируя отсортированную последовательность симплексов с фильтрацией по α мы получаем набор координат $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\} \dots \{x_n, y_n\}$, определяющий α -форму и выступающих в роли рёбер симплексов. Что в свою очередь, на наборе рёбер формируется контур фигуры. В дополнении, т.к. самосвал, не является материальной точкой, был введён коэффициент b , задающий расширение контура «наружу».

На рисунке 10 проиллюстрированы оба подхода на сложном участке дорожного полотна. Можно заметить, что зелёный контур (контур полученный при помощи подхода выпуклой оболочки), объединяет все точки и пересекает истинные границы дорожного полотна, указанные чёрным цветом, что недопустимо

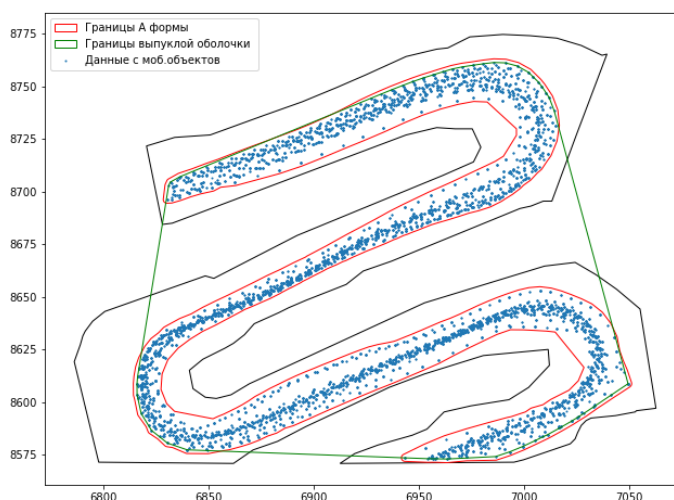


Рисунок 10 – Работа обоих подходов на сложном участке дороги.

В рамках расчёта числовых оценок метрик качества вычислялась площадь фигуры с использованием формулы площади Гаусса.

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|, \quad (6)$$

Соответственное сравнение подходов указано в таблице 2 для S образного участка дороги.

Таблица 2 Оконтуривание S образного участка дороги.

Подход	Абсолютная площадь контура (м2)	Относительная площадь контура (%)
№1 Альфа форма	13057.21	75.28
№2 Выпуклая оболочка	33581.63	116.45

Невысокие проценты заполнения для подхода с использованием альфа форм обуславливаются наличием дополнительной дороги, по которой не проехал мобильных объект и срезом границ в нижней части, что не позволило подобрать коэффициент расширения b . Для простого участка дороги процент площади составляет 98%.

Как отмечалось ранее, процедура заполнения транспортных зон правильными многоугольниками является важным этапом построения цифровой модели, так как задает пространственные характеристики атомарных элементов. На рис. 12 представлены варианты замощения реального фрагмента дорожного полотна с помощью атомарных элементов трех типов (треугольник, квадрат, шестиугольник). Важным параметром, который необходимо учитывать при использовании модели для решения практических задач, является площадь этой транспортной зоны. В таблице 4 представлены количественные оценки для трех вариантов замощения при фиксированной величине ребра атомарного элемента (1 м). Очевидно, что для всех элементов при уменьшении размера ребра l , выполняется следующее выражение:

$$\lim_{l \rightarrow 0} \{S - S^*\} \rightarrow 0, \quad (7)$$

где S - площадь контур;

S^* - суммарная площадь все многоугольников.

Однако, также очевидно, что в этом случае и количество атомарных элементов будет стремиться к бесконечности, что сделает модель непригодной для использования.

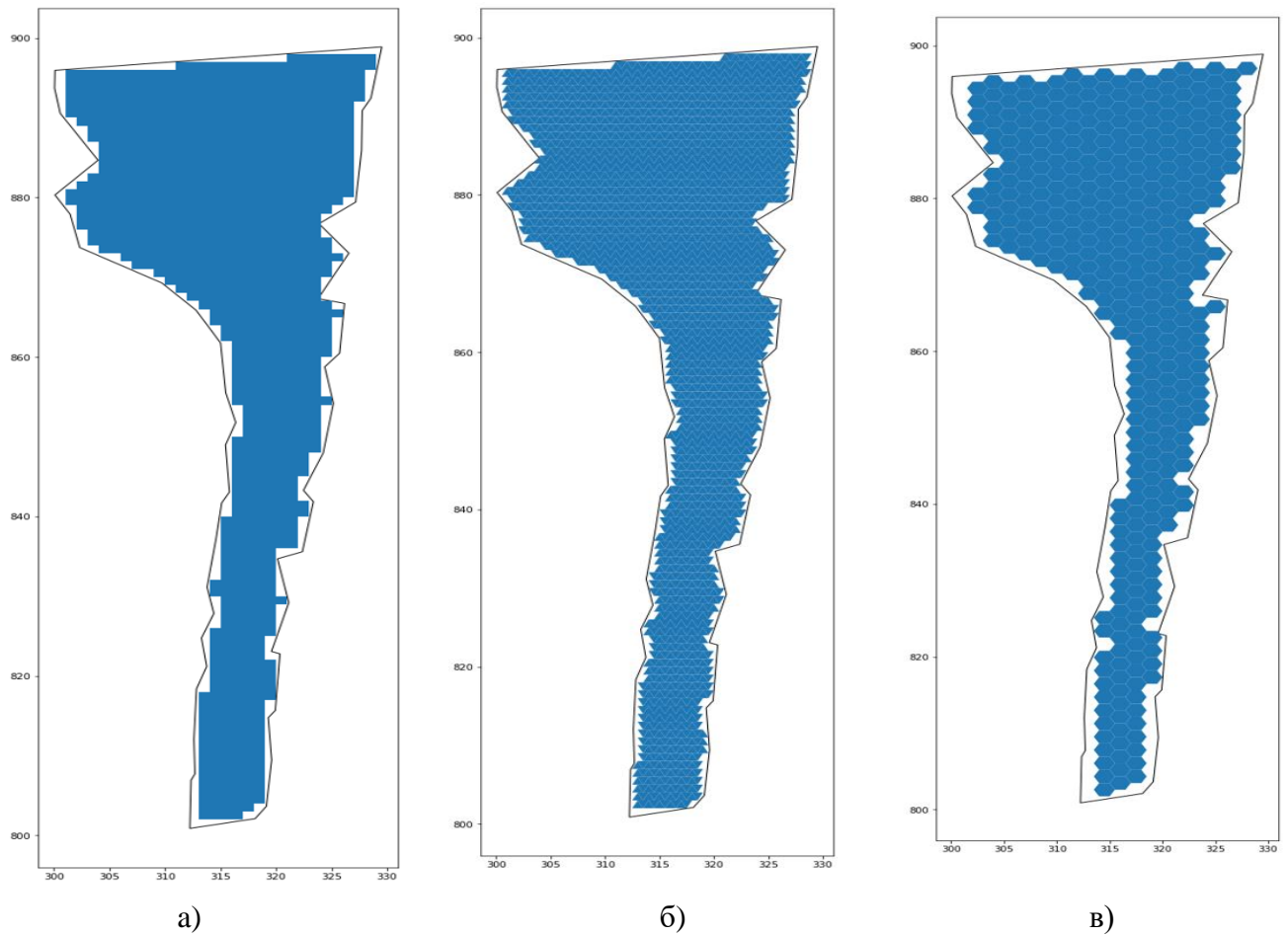
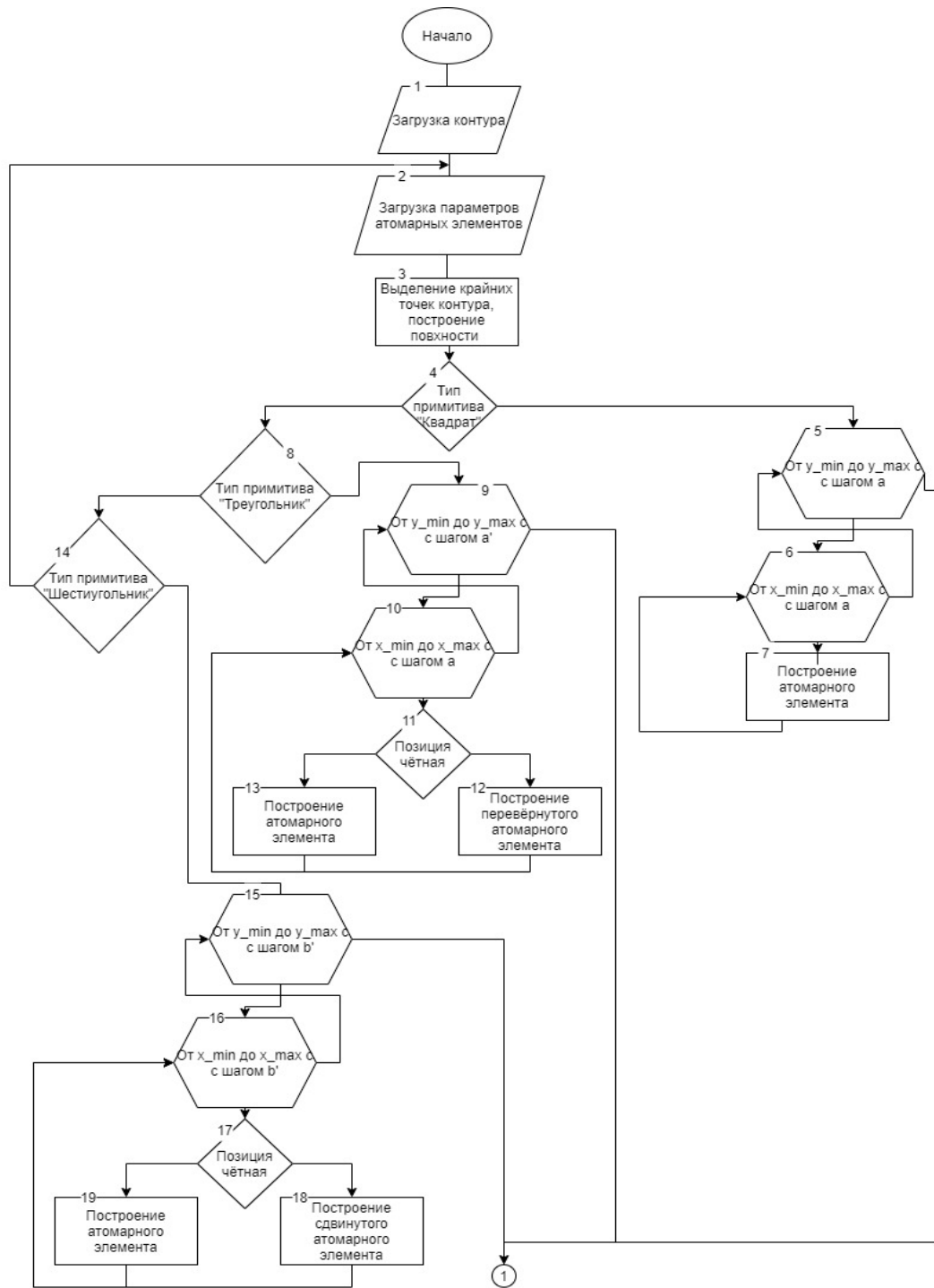


Рисунок 11 – Замощения участка дороги разными типами атомарных элементов.
а)- квадратами, б) – треугольниками, в)- шестиугольниками.

На рисунке 12 представлена общая блок –схема алгоритма замощения, представляющего собой поисковую процедуру, настраиваемую с учетом геометрической формы примитива и обеспечивающую вычисление координат центральных точек каждого атомарного элемента.



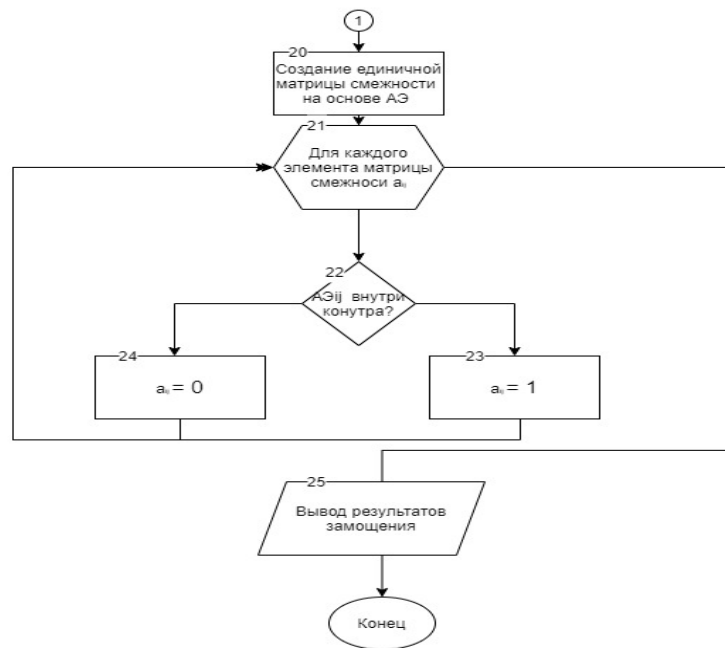


Рисунок – 12 блок схемы алгоритма замощения

В таблице 3 представлены сводные результаты замощения фиксированного фрагмента дорожного полотна (рис.11). Очевидно, что наиболее эффективным конструктивом, с позиции точности воспроизведения геометрии дорожного полотна, является треугольный примитив. Однако, время построения цифровой модели, а также способ привязки мобильного объекта к координатной сетке, также могут играть важную роль при выборе схемы замощения.

Таблица 3 Характеристики замощения при фиксированной длине грани

N	Тип замощения	Длина грани (м)	Количество элементов (шт)	Эффективная площадь замощения (%)
1	Квадрат	1	1114	92
2	Треугольник	1	2270	94,52
3	Шестиугольник	1	388	85

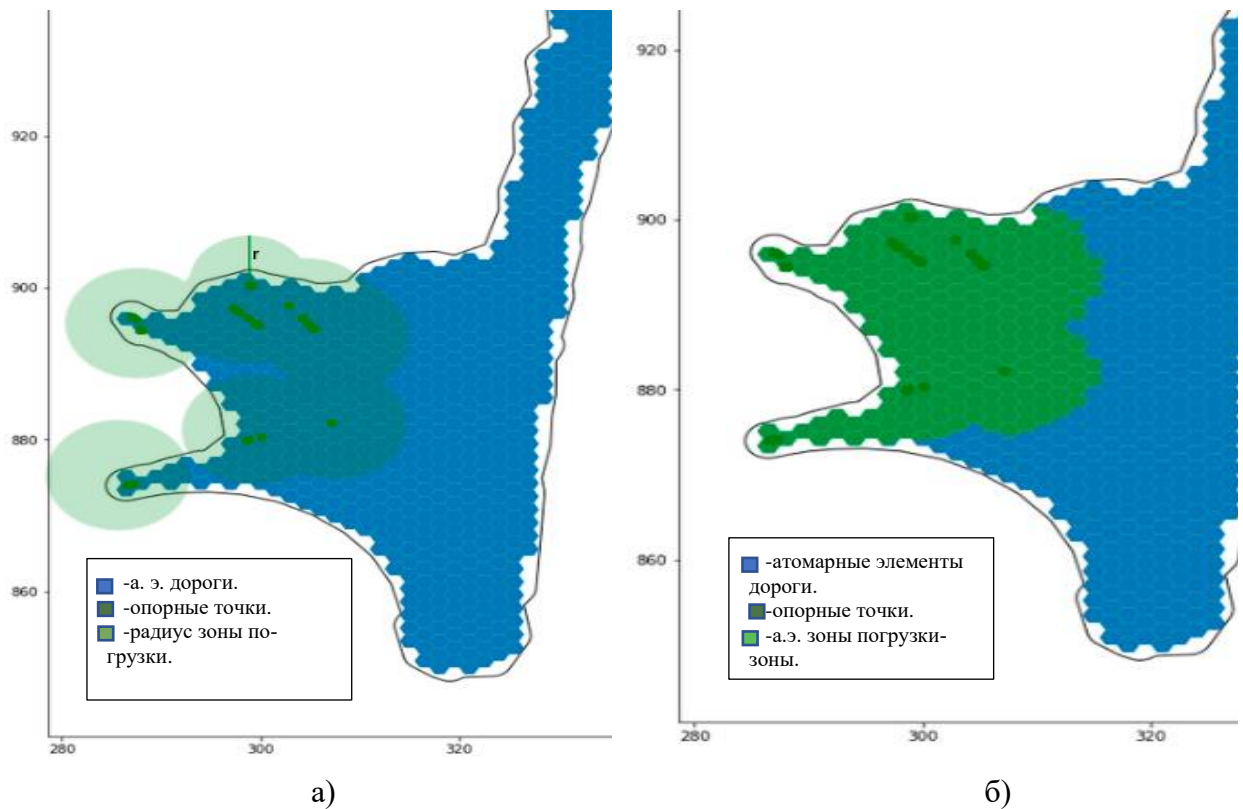


Рисунок – 13 Определение транспортной зоны разгрузки. а) выделение опорных точек транспортных зон б) выделение технологической зоны погрузки

Были рассмотрены варианты построения транспортно-технологических зон: зоны представляют собой набор атомарных элементов e_{ij} расположенных на определённом технологическом участке дорожного полотна и объединённые в группы Z_i , в рамках каждой зоны определяется центр технологической зоны Z_{0i} . Соответственно, каждая технологическая зона отождествляет участки дорожного полотна определённого назначения.

Примером технологических 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.

В начале формируются опорные точки. Например, для данных с мобильных объектов, выделяются точки, которые определяются с помощью простых логических правил, например: если «Изменение веса > 20 т и скорость движения $= 0$ », то это опорная точка погрузки. Следующим шагом определяется условный радиус r , который формирует окружность, внутри которой все атомарные элементы относятся к группе определённой технологической зоны. На рисунке 13 показывается пример формирования опорных точек (темно зелёный цвет) и технологической зоны погрузки (зелёный цвет).

В четвёртой главе рассмотрены конкретные примеры использования цифровой модели для фрагментирования транспортно-технологических зон и автоматического построения трассы для движения автономного объекта

В данной главе рассматриваются практические подходы к программной реализации алгоритма трассировки с использованием цифровой модели. Представлены результаты

проведенных экспериментов над прототипом цифровой модели, в ходе которых жизнеспособность модели проверялась с учетом осуществления всех ключевых этапов обработки информации (рисунок 14).

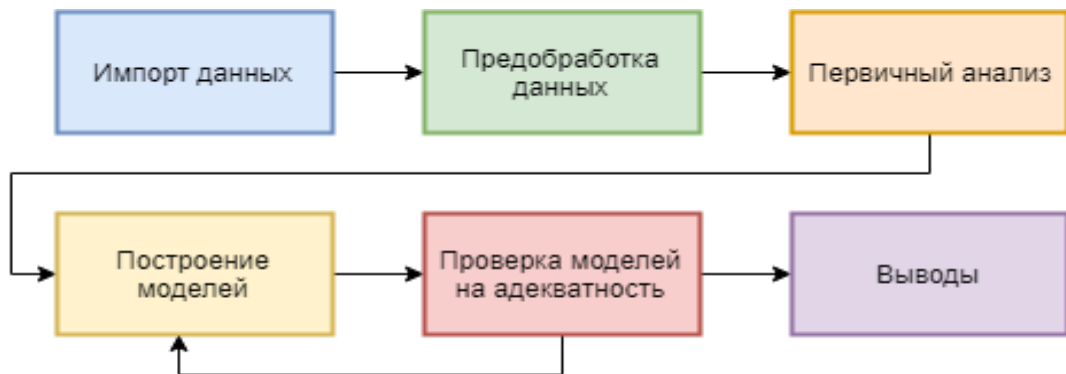


Рисунок 14 – Ключевые этапы обработки информации

Для построения трасс между зонами использовался алгоритм A^* . Так же была произведена оптимизация алгоритма A^* . Был использован абстрактный тип данных, подобный обычной структуре данных очереди или стека, в которой каждый элемент дополнительно имеет связанный с ним «приоритет». Этот тип данных обозначается термином «куча». Подобный подход позволяет получить значительную прибавку эффективности поиска для решаемой задачи (около 50%).

В рамках исследования был проведён эксперимент по расчёту показателя замощения. Было выбрано три контура: реальный участок дороги, прямоугольник, овал. Примеры контуров представлены на рисунке 16. Каждый контур имеет одинаковую площадь 1254 м². 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^* , разобранного на предыдущем шагу. Общее количество итераций составляло 544 для каждой контура. Сокращённые данные приведены в таблице № для контура изображенного на рисунке 15 (а)

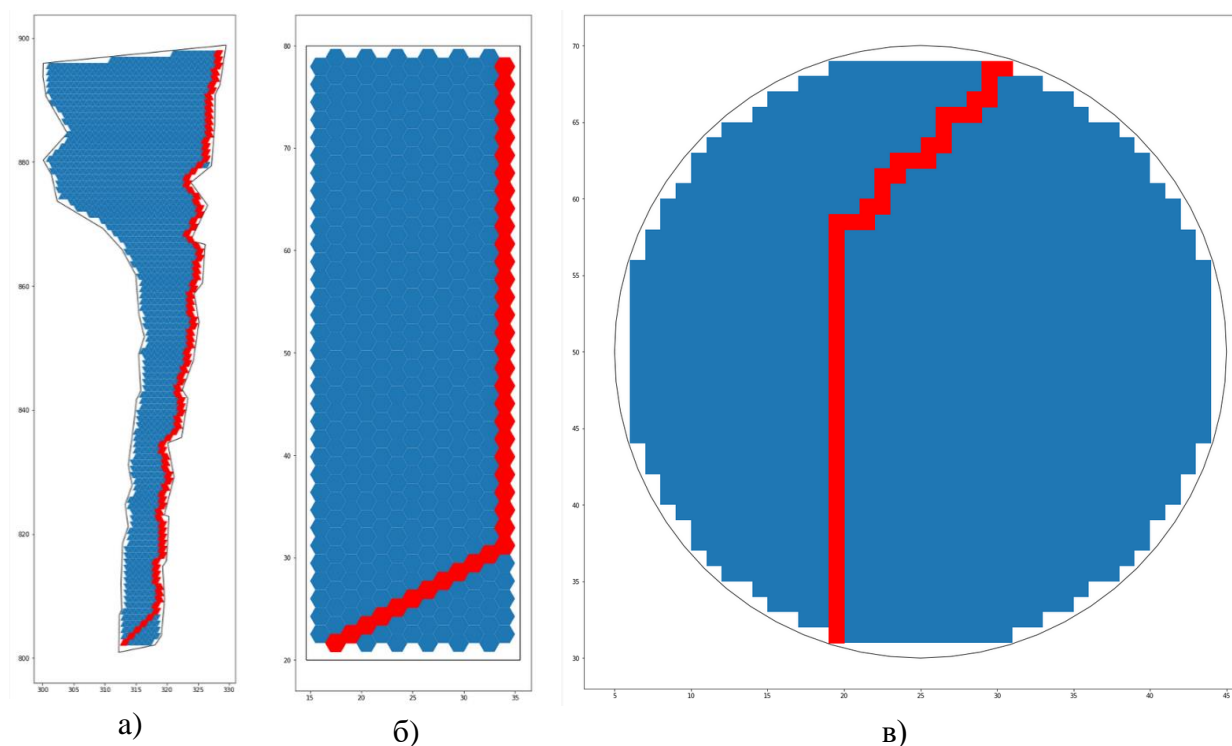


Рисунок 15 – а) Контур дороги, замощённый треугольниками. б) Прямоугольный контур дороги, замощённый шестиугольниками. в) Круглый контур дороги, замощённый квадратными атомарными элементами

В таблице 5 представлены оценки работы алгоритма для контура дороги, полученные в ходе построения трасс использованием цифровой модели.

Таблица 4 Сводные данные трассировки при различных вариантах замощения

Тип атомарного элемента	Длина грани (м)	Размер сетки (у.е.)	Кол-во шагов в маршруте (шт)	Время (с)	Площадь абсолютная (м ²)	Эффективная площадь замощения
Треугольник	1.99	535	96	0.168135	917.4039	73.1582
Треугольник	1.98	536	96	0.081783	909.9045	72.56017
Треугольник	1.97	546	98	0.089872	917.5415	73.16918
Треугольник	1.01	2217	190	0.897631	979.2849	78.0929
Треугольник	1	2270	192	0.944755	982.9388	78.38428
Треугольник	0.99	2316	193	0.958707	982.9006	78.38122
Треугольник	0.28	30230	680	725.1805	1026.254	81.83843
Треугольник	0.27	32549	709	875.3241	1027.462	81.93478
Треугольник	0.26	35107	737	1008.144	1027.64	81.94897
Шестиугольник	1.99	76	29	0.019948	781.9368	62.3554
Шестиугольник	1.98	79	29	0.019966	804.6543	64.16701
Шестиугольник	1.97	80	29	0.016959	806.6299	64.32455
Шестиугольник	1.01	373	59	0.086791	988.561	78.83261
Шестиугольник	1	394	60	0.088249	1023.642	81.63015
Шестиугольник	0.99	401	61	0.092749	1021.096	81.42713
Шестиугольник	0.22	9546	280	23.50563	1200.38	95.72407
Шестиугольник	0.21	10495	295	26.90451	1202.466	95.89046

Шестиуголь- ник	0.2	11611	309	33.43437	1206.651	96.22412
Квадрат	1.99	249	54	0.086778	2561.872	204.296
Квадрат	1.98	249	54	0.041862	2536.189	202.2479
Квадрат	1.97	252	54	0.039918	2540.884	202.6223
Квадрат	1.01	1085	109	0.34408	1106.809	88.26224
Квадрат	1	1114	111	0.375658	1114	88.83573
Квадрат	0.99	1138	112	0.373567	1115.354	88.94368
Квадрат	0.22	25249	520	215.8421	1222.052	97.45228
Квадрат	0.21	27733	545	248.4236	1223.025	97.52993
Квадрат	0.2	30617	573	308.2515	1224.68	97.66188

На рисунке 17 эти результаты представлены в графическом виде.

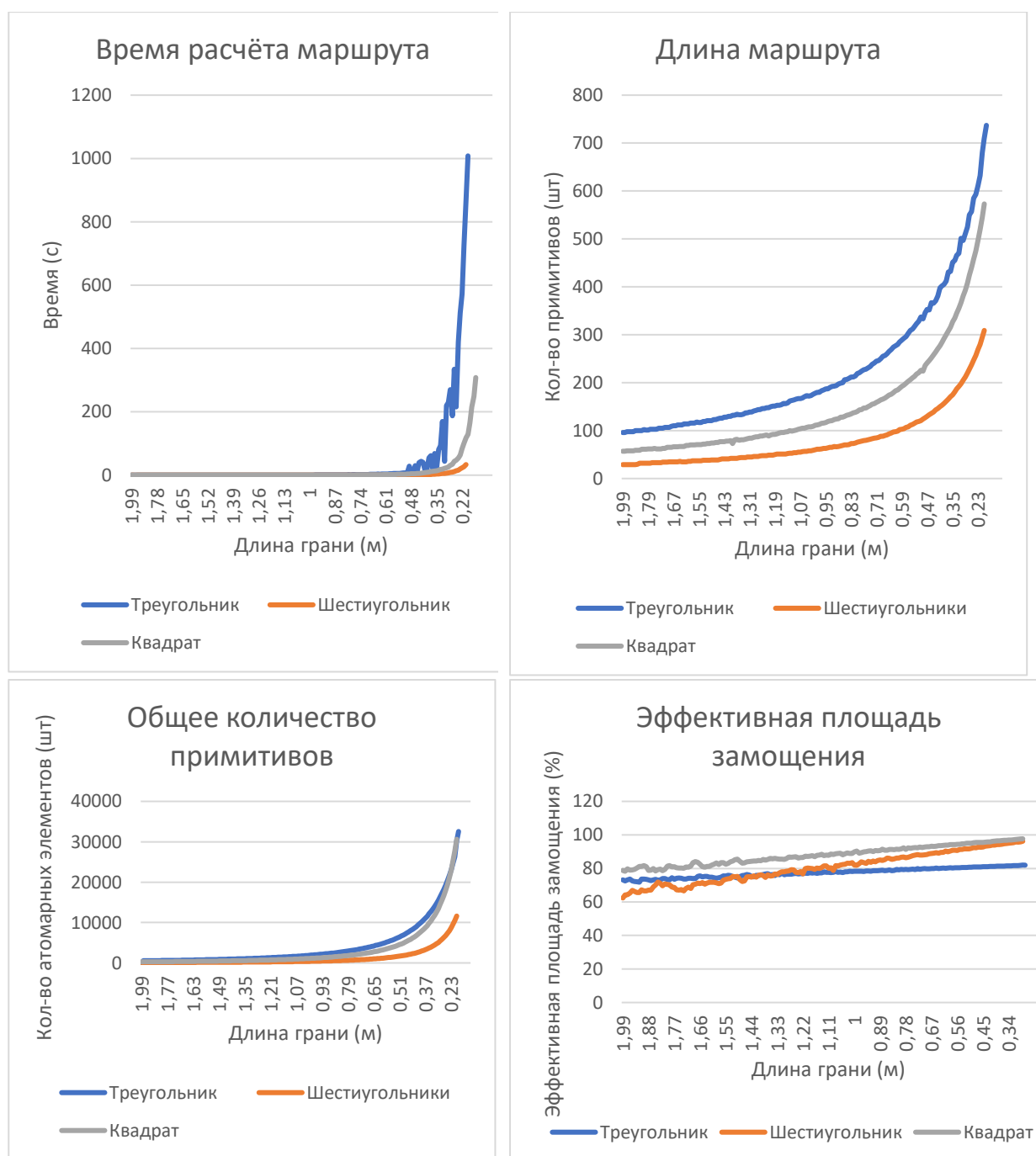


Рисунок 16 – Основные показатели процесса трассировки на основе цифровой модели

Без учета биений, которые связаны с трассировкой при замощении определенными типами атомарных элементов, можно говорить, об экспоненциальном характере таких показателей, как: «Время расчёта маршрута», «Общее количество примитивов», «Длина маршрута» и линейном характере показателя «относительная площадь». Соответственно для данных показателей были построены аппроксимирующие функции, позволяющие проводить оценочные расчеты для подбора требуемой и разумной (соответствующей характеристикам доступных данных) степени детализации при построении цифровой модели транспортно-технологических зон реального карьера.

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 горно-транспортном 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.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора.

В изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России:

1. Конов И.С., Дерябин С.А., Темкин И.О. Построение интерактивной геоинформационной модели технологических зон карьера на основе интеграции гетерогенных пространственных и технологических данных. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S43. С. 3-15.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus/Web of science:

2. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С.: Метод определения состояния технологических дорог карьера при управлении взаимодействием роботизированных элементов горнотранспортного комплекса. Горный журнал, №1, 2018, с. 78-824.
3. Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. (Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S.) Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) (2020 г.)
4. Темкин И.О., Мясков А.В., Дерябин С.А., Конов И.С. О методах построения и функционировании цифровой платформы управления транспортно-технологическими процессами в карьерах. Горный журнал, № 11, 2019, стр.56-64.
5. Igor Temkin, Sergey Deryabin, Iliya Konov, Maxwell Kim: Possible Architecture and Some Neuro-Fuzzy Algorithms of an Intelligent Control System for Open Pit Mines Transport Facilities. Fuzzy Systems and Data Mining V.2019. page 412 – 420 DOI10.3233/FAIA
6. Temkin I., Deryabin S., Konov I.: Soft computing models in an intellectual open-pit mines transport control system. Procedia Computer Science. Elsevier, Vol.120, 2017, p.411-416. (Scopus)
7. Temkin, I., Myaskov, A., Deryabin, S., Konov, I., Ivannikov, A. : Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of tele-metric and geospatial information. Sensors, 2021, 21(18).
8. Temkin, I., Klebanov, D., Deryabin, S., Konov, I. Predictive Analytics in Mining. Dispatch System Is the Core Element of Creating Intelligent Digital Mine. Modern Information Technology and IT Education. стр 365-374

В прочих изданиях.

9. Темкин И.О., Конов И.С., Кубенова А.Л., Зартенова Л.Г. Построение единой архитектуры интеграции производственных данных в горнодобывающей компании. Программные продукты и системы. 2017. № 4. С. 778-784.
10. Темкин И.О., Дерябин С.В., Конов И.С. Нечеткие модели управления взаимодействием мобильных объектов горнотранспортного комплекса (ГТК). В сб. «Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика». Материалы 1-й Международной научно-практической конференции, ГУУ, 2017, с. 246-253.

11. Конов И.С. Построение цифровой модели технологических дорог, на основе «Интеллектуального горного производства». Тезисы докладов 2-ой научно-практической конференции учёных России и Хорватии в дубровнике страница 116.

В авторских свидетельствах и патентах на изобретения:

№ 2019663715 от 22 октября 2019 г. «Программа удаленного ввода-вывода данных телеметрии и команд управления мобильными объектами»

№2019663713 от 22 октября 2019 г. «Программа диспетчеризации потоков данных платформы цифрового дублирования транспортно-технологических процессов при добыче минерального сырья»

Личный вклад соискателя:

Проведено изучение современного состояния проблемной области, включая обзор подходов к управлению ГТК, анализ разнородной информации, используемой в процессе добычи полезного ископаемого открытым способом, и существующих методов ее обработки.

Сформирована методика фильтрации и агрегации разнотипных потоков информации и соответствующих массивов данных.

Разработан и исследован алгоритм выделения границ дорожного полотна на основе разнотипных геоинформационных данных

Разработан алгоритм замощения технологических дорог карьера и проведен сравнительный анализ вариантов замощения для различных конфигураций атомарных элементов и контуров автодорог.

Разработан модифицированный алгоритм A^* для решения задачи построения оптимальной трассы между фиксированными точками.

Построена и использована в задаче трассировки база данных параметров состояния дорожного полотна.