

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «ВНОГЕМ»

кандидат технических наук

Серый С.С.



«10» января 2022г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации «Открытое акционерное общество Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу» на диссертацию Конова Ильи Сергеевича «Разработка цифровой динамической модели транспортной среды карьера на основе телеметрической и гео-пространственной информации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.35 – «Геоинформатика»

Диссертация Конова Ильи Сергеевича посвящена разработке ряда алгоритмов, необходимых для построения динамической цифровой карты транспортно-технологических зон карьера, с целью повышения эффективности и безопасности функционирования роботизированного горно-транспортного комплекса.

Полученные в диссертации результаты направлены на решение актуальной задачи в области цифровизации горных работ и могут способствовать оптимизации характеристик процессов добычи полезных ископаемых открытым способом.

### Актуальность темы диссертации

Создание цифровых технологий добычи полезных ископаемых, является приоритетным направлением в развитии современных горнопромышленных предприятий отраслей производства. Решение этой проблемы базируется на

комплексе задач, связанных с разработкой методов оперативной обработки различных гео-пространственных данных, с построением на их основе моделей описания инфраструктурно-технологической системы карьера и, в конечном итоге, с созданием полноценных цифровых двойников транспортно-технологических процессов в карьерах.

В представленной диссертации автор рассматривает, как уже известные модели дорожного полотна и графа дорог, так и вводит новые абстракции и комбинации элементов модели и источников для её построения.

Основная идея диссертации заключается в использовании комбинации разнотипных потоков геоинформации для построения динамической модели дорожного полотна карьера с целью оптимизации трасс движения мобильных технологических объектов (автосамосвалов) по карьерным дорогам с учетом состояния дорожного полотна. Это способствует повышению работоспособности автотранспорта и безопасности транспортных операций, и обуславливает **актуальность** настоящей диссертации, особенно, с учетом постепенного внедрения в горно-производственные процессы роботов-самосвалов.

### **Структура и содержание диссертации**

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 таблицы, список литературы из 104 наименований.

**Целью**, которая была поставлена в данной диссертационной работе, является разработка и исследование процесса построения цифровых динамических моделей транспортных зон карьера на основе интеграции (комплексирования) разнородных массивов пространственных и телеметрических данных. Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

- Проведен анализ существующих технических средств сбора и передачи данных, а также методов обработки и анализа гео-информации, связанной с функционированием горнотранспортного комплекса (ГТК).



• Разработана структура цифровой модели, включающей основные атрибуты для описания транспортных и транспортно-технологических (например, экскаваторные площадки) зон карьера, и определяющей связи между этими атрибутами.

• Сформулированы правила фрагментации транспортных зон карьера и разработан алгоритм определения граничных точек этих зон (оконтуривание объектов), позволяющий формировать визуальное представление результатов.

• Выполнены экспериментальные исследования, связанные со сравнительным анализом использования различных геометрических примитивов (треугольники, квадраты, многоугольники) в качестве атомарных элементов, составляющих основу динамической цифровой модели карьерных дорог.

• Разработан алгоритм автоматического формирования трасс на основе построенной цифровой модели для перемещения автономных транспортных средств (автосамосвалов-роботов).

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Цифровая модель, которая базируется на использовании атомарных элементов различной геометрической формы, характеризующихся набором параметров, отражающих пространственное расположение и состояние фрагментов участков дорожного полотна; модель отличается возможностью оперативно вычислять и динамически обновлять количественные оценки состояния транспортно-технологических зон карьера с требуемой степенью детализации.

2. Процедура построения цифровой модели, основанная на интеграции разнородной условно-стационарной пространственной (результаты маркшейдерских съемок или космического мониторинга) и оперативной телеметрической геоинформации, отличающейся возможностью идентификации любых фрагментов транспортных зон (технологические дороги, перекрестки, призабойные экскаваторные площадки, площадки перегрузки - разгрузки), и состоящая из двух этапов: - определение граничных точек и восстановление контура моделируемой технологической зоны (оконтуривание); - заполнение замкнутого пространства

атомарными элементами (геометрическими примитивами) с координатной привязкой опорных точек примитивов.

Текст диссертации позволяет достаточно полно оценить объем и сложность проведенного исследования.

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

**В первой главе** рассмотрены основные понятия и принципы технологии открытого способа добычи минерального сырья. Проведён анализ научных работ в по тематике диссертации. В частности, подробно рассматривается история развития методов моделирования работы горно-транспортного комплекса. Обсуждается концепция использования цифровых двойников в рамках АСУ ГТК для повышения эффективности и безопасности ведения работ. Сформулирована идея построения цифровых моделей для описания пространственно-технологической среды карьера и, в частности, цифровой модели транспортно-технологических зон с использованием разнородной гео-информации, в том числе маркшейдерской съёмки, телеметрии мобильных объектов, дистанционного зондирования земли и аэрофотосъёмки.

**Во второй главе** описываются функциональные задачи, которые легли в основу разрабатываемой цифровой модели дорожного полотна. Предложена многоагентная система описания горно-технологических процессов в карьере. Дается классификация цифровых агентов для различных сущностей карьера: гео-пространственной, инфраструктурно-технологической, технической. Описываются принципы построения цифровой модели транспортно-технологических зон карьера, которая задается с помощью двухуровневой схемы данных. Верхний уровень представляет собой классический граф дорог, реализующий традиционный функционал в рамках ГТК, а на нижнем уровне располагается структурированный информационный массив атомарных элементов, которые характеризуют физическое состояние дорожного полотна и в совокупности формируют цифровую динамическую модель транспортной среды карьера. Помимо графа транспортной



сети и набора атомарных элементов, каждый из которых описывается вектором соответствующих атрибутов (в том числе, координаты атомарного элемента, физическое состояние, технологическое назначение), модель включает матрицы смежности атомарных элементов, которые заполняются с учетом ранжирования атомарных элементов дорожного полотна с использованием особенностей дорожной рубашки и правил ПДД. В дальнейшем эти матрицы используются в задаче построения оптимальных трасс движения мобильных объектов.

**В третьей главе** рассмотрены различные варианты предварительной обработки данных, получаемых из различных источников, необходимых для построения модели модели. Рассмотрена проблема единой системы позиционирования всех источников. Детально описана процедура построения динамической цифровой модели транспортно-технологических зон, заключающаяся в решении двух задач:

1. оперативного построения контура транспортно-технологической зоны на основе телеметрии;
2. мозаичного покрытия (замощения) выделенной площади атомарными элементами.

Подробно рассмотрена проблема, возникающая при решении задачи «оконтуривания», связанная с поиском неизбежного компромисса между точностью маркшейдерской и аэрофотосъемки и возможностью оперативно уточнять границы контура по данным телеметрии.

Разработан оригинальный алгоритм определения границ дорожного полотна на основе телеметрических данных, которые базируется на применение теории альфа-форм. Сложность использования алгоритма заключается в зависимости точности оконтуривания от топологии транспортной зоны. Для повышения точности решения задачи оконтуривания предложен вариант комплексного применения подхода альфа-форм для разных участков дорожного полотна с получением оптимальных параметров только на одном из участков.

Также подробно описан и исследован алгоритм замощения правильными многоугольниками «оконтуренных» на первом этапе транспортно-технологических

зон. Проведен комплекс вычислительных экспериментов, посвященных сравнительному анализу вариантов замощения с использованием различных геометрических примитивов (треугольники, квадраты, шестиугольники) для транспортных зон с различной топологией. В рамках экспериментов были использованы различные критерии оценки, в том числе, время расчёта трассы (использован алгоритм  $A^*$ ) между терминальными атомарными элементами. Результаты экспериментов позволили определить оптимальную форму и размер геометрических примитивов - атомарных элементов.

**В четвёртой главе** представлено описание разработанного программного комплекса реализации цифрового двойника дорожного полотна, базирующегося на концепции open-source проекта. Разработана модификация алгоритма  $A^*$ , используемая для постройки трасс между технологическими зонами. Использование модифицированного алгоритма позволило существенно уменьшить время постройки трассы.

В рамках главы представлены результаты исследования, связывающие ключевые показатели модели: время обновления, эффективную площадь замощения, размер сетки атомарных элементов с использованием различных аппроксимирующих функций. Данные функции могут быть использованы для прогнозной оценки скорости и точности решения задачи трассировки в условиях конкретной транспортно-технологической среды карьера.

**В заключении** обобщаются основные результаты, полученные лично автором в ходе решения важной научно-технической задачи, которой посвящена диссертация.

Подводя итоги анализа текста диссертации отметим, что новые научные результаты, имеющие весомое научное и прикладное значение для развития геоинформационных систем в горной промышленности, достаточно хорошо обоснованы.

Все разделы работы характеризуются достаточной полнотой изложения соответствующих вопросов и логически взаимосвязаны между собой, что обеспечивает завершенность и целостность диссертации.



## **Новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций**

Проведенное автором исследование характеризуется новизной как по используемым методам и подходам, так и по полученным результатам, основные из которых заключаются 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 модели.

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

**Практическое значение 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**

Достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обосновывается детальным анализом исходных данных и корректным использованием математического аппарата, подтверждается согласованностью теоретических выводов с результатами вычислительных экспериментов с

использованием разработанных алгоритмов, а также апробацией основных результатов диссертации в печатных трудах и докладах на международных научных специализированных конференциях.

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

**Основные результаты исследований** автора докладывались и обсуждались на форумах и конференциях, опубликованы в десяти публикациях автора, среди которых 8 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ, и 7 статей опубликованы в изданиях, включенных в реферативную базу Scopus.

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

**Автореферат диссертации** полностью отражает ее содержание. Содержание соответствует поставленной цели. Цель и задачи диссертации обусловлены актуальными проблемами науки и потребностями практики. Задачи исследования решены.

Диссертация написана автором самостоятельно и содержит новые научные и практические результаты. Публикации в полной мере отражают содержание работы.

Полученные соискателем научные и практические результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.35 – «Геоинформатика (технические науки)».

**Вместе с тем, по работе имеются замечания:**

1. Автор неоднократно использует в тексте диссертации термин «эффективность». Однако, из текста работы не ясно, как формально может быть рассчитан экономический эффект от внедрения предлагаемой динамической цифровой модели в деятельность горнопромышленных предприятий. Данных о сравнительном анализе эффективности управления горно-транспортных комплексом с без использования и с использованием цифровой модели в работе нет.



2. В работе не хватает примеров, подтверждающих скорость реального изменения транспортно-технологических зон в реальном карьере. В принципе, ясно, что этот процесс, особенно в части призабойных зон (экскаваторных площадок и тд.), имеет место. Однако, отсутствие примеров, иллюстрирующих эти процессы несколько снижает практическую обоснованность внедрения и поддержания актуальности подобных моделей. Было бы целесообразно проиллюстрировать динамические изменения точек загрузки самосвалов для различных типов карьеров.
3. В работе не описан алгоритм интеграции технологических зон между сегментами данных. В рамках примеров, иллюстрирующих работоспособность разработанных автором алгоритмов, эта проблема не выглядит очевидной. Однако, в реальной ситуации решение данной проблемы может существенно сказаться на производительности цифровой модели и, следовательно, на возможности ее использования в оперативном режиме.
4. Автору следовало бы значительно большее внимание при разработке своих алгоритмов уделить данным аэро-космической фотосъемки. Автор использует эти, а также данные маркшейдерской съемки для формирования начальных условий работы алгоритмов, но в дальнейшем использует их только в качестве инструмента сравнительного анализа с результатами обработки телеметрии, ссылаясь на их «неоперативность». На наш взгляд, можно было бы повысить достоверность разработанной модели, если бы в алгоритме оконтуривания использовались данные космических снимков (требуемая оперативность здесь вполне достижима), которые, к сожалению, не задействованы ни в одном из вычислительных экспериментов.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе и носят рекомендательный характер.

## Заключение

На основе анализа содержания диссертации, автореферата, опубликованных автором работ можно сделать следующее заключение: диссертация Конова Ильи Сергеевича на тему «Разработка цифровой динамической модели транспортной среды карьера на основе телеметрической и гео-пространственной информации» по своему теоретическому и экспериментальному уровню, актуальности, объему работы, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой, на основании проведенных автором теоретических и экспериментальных исследований, дано решение актуальной научно-технической задачи.

Конов Илья Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.35 – «Геоинформатика (технические науки)».

Диссертационная работа Конова Ильи Сергеевича «Разработка цифровой динамической модели транспортной среды карьера на основе телеметрической и гео-пространственной информации» заслушана и обсуждена на заседании научно-технического совета (протокол № 1 от 10 января 2022г.).

Отзыв подготовлен:

Ведущий научный сотрудник, к.т.н



С.Г.Кабелко

Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу» (ОАО «ВНПОГЕМ»),

г.Белгород, пр.Б.Хмельницкого, д.86

Телефон: 8 (4722) 26-05-23/26-17-56

E-mail: [info@viogem-sp.ru](mailto:info@viogem-sp.ru),



*С.Г.Кабелко*  
*А.В.Салов*