

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Парамонов Сергей Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ КАРТ ПЕРЕГОННЫХ
ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ
С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 2.8.3
«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское
дело и геометрия недр»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Абрамян Георгий Оникович

Москва – 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия наблюдается урбанизация крупнейших мегаполисов, из-за чего использование инфраструктуры подземных линейных сооружений метрополитена стало играть лидирующее место среди всех видов городского транспорта. Строительство новых линий и станций метрополитена более привлекательная альтернатива наземному городскому транспорту, поскольку они не нарушают внешний облик городов и их возведение в меньшей мере зависит от существующих зданий и сооружений.

Наиболее ответственным видом городского транспорта является метрополитен, безопасность и эффективность работы которого напрямую зависит от его технического состояния. В настоящее время данный контроль, заключающийся в отслеживании за развитием визуальных дефектов обделки перегонных тоннелей, осуществляется различными специалистами и службами, которые сталкиваются с множеством сложностей, связанных с ограниченным временем и тяжелыми условиями труда.

Решение вышеописанных проблем возможно на основе автоматизированных подходов, включающих использование современных технических средств, методов сбора и обработки пространственных данных для построения цифровых карт внутренней поверхности перегонных тоннелей, позволяющие выявлять существующие дефекты обделки трассы метрополитена. Такой подход позволит оперативно принимать технические решения для выполнения ремонтно-восстановительных работ, что повысит эксплуатационную устойчивость перегонных тоннелей метрополитена и уровень безопасности пассажирских перевозок.

Поэтому **разработка метода выявления визуальных дефектов перегонных тоннелей метрополитена на основе построения цифровых карт** является актуальной научной задачей.

Цель диссертации – разработка метода построения цифровых моделей и карт (ЦМТ и ЦКТ) перегонных тоннелей метрополитена для выявления визуальных дефектов тубинговой обделки.

Идея работы заключается в разработке технического средства для сбора пространственных данных и применении цифровых карт тубинговой обделки при выявлении и прослеживании визуальных дефектов с использованием методологии самообучающихся нейронных сетей для повышения эксплуатационной устойчивости перегонных тоннелей метрополитена и уровня безопасности пассажирских перевозок.

Задачи диссертационного исследования:

1. провести анализ современных технологий сбора и обработки пространственных данных обделки перегонных тоннелей;
2. разработать техническое средство и обосновать выбор инструментария для сбора пространственных данных обделки перегонного тоннеля, позволяющие выполнять работы на действующих линиях метрополитена в период «технологического окна» в автоматизированном режиме;
3. разработать метод формирования ЦМТ и ЦКТ обделки перегонного тоннеля;
4. сформировать базу данных для идентификации визуальных дефектов на ЦКТ;
5. провести верификацию метода построения цифровых карт перегонных тоннелей метрополитена с целью выявления визуальных дефектов на базе нейронных сетей на тестовом участке;
6. провести апробацию предложенного метода в перегонном тоннеле длиной не менее 2 км.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что использование панорамных цифровых фото- и видеоматериалов, полученных с помощью разработанного автоматизированного технического средства, позволяет на порядок повысить производительность сбора пространственных данных тубинговой обделки перегонных тоннелей метрополитена.
2. Предложена схема пространственного размещения опорных знаков в перегонном тоннеле метрополитена с различными геометрическими характеристиками, определяющая их минимально необходимое количество для обработки пространственных данных при построении цифровой модели внутренней поверхности тубинговой обделки.
3. Обоснованы оптимальные размеры секций криволинейных участков перегонного тоннеля в зависимости от радиуса поворота трассы метрополитена, обеспечивающие построение их цифровых карт и надежную идентификацию визуальных дефектов поверхности тубинговой обделки.

Научная новизна результатов исследования:

1. разработан алгоритм технологии сбора пространственных данных тубинговой обделки перегонного тоннеля метрополитена, позволяющий повысить производительность выполняемых работ по визуальному контролю;

2. определено оптимальное количество опорных знаков и схемы их пространственного размещения в перегонном тоннеле с различными геометрическими характеристиками, обеспечивающие обработку пространственных данных для построения цифровой модели тоннеля;
3. установлены оптимальные параметры разбиения длины перегонного тоннеля на зоны, позволяющие выполнять построения цифровой модели тоннеля и цифровой карты тоннеля;
4. разработан инструментарий анализа цифровой карты тоннеля с использованием нейронных сетей и методов компьютерного зрения, позволяющие выполнять оперативный поиск, распознавание и фиксацию визуальных дефектов.

Научное значение диссертации в развитии методов маркшейдерского обеспечения эксплуатации перегонных тоннелей метрополитена на основе построения цифровых карт тубинговой обделки, используемых для отслеживания технического состояния конструкций.

Практическое значение диссертации состоит в разработке и создании автоматизированного технического средства получения панорамных цифровых фото- и видеоматериалов в период ночного «технологического окна» с необходимой достоверностью, полнотой и точностью, а также надежного алгоритма обнаружения дефектов тубинговой обделки перегонных тоннелей метрополитена.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается:

- использованием различных общепризнанных методов исследования в области распознавания пространственных объектов;
- применением современных программных комплексов в обработке пространственных данных для построений цифровой модели и цифровой карты тоннеля;
- удовлетворительными результатами полученных цифровых материалов, обеспечивающими полные и достоверные характеристики визуальных дефектов внутренней поверхности обделки перегонного тоннеля.

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

- Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2022» (2022г.) Парамонов С.С. (НИТУ МИСИС), Быкова А.А. (РУДН) «Комплексный мониторинг строящихся и действующих тоннелей метрополитена»;

- Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2023» (2023г.) Парамонов С.С. (НИТУ МИСИС), Быкова А.А. (РУДН) «Совершенствование методов визуального обследования/мониторинга перегонных тоннелей метрополитена»;
- Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2024» (2024г.) Парамонов С.С. (НИТУ МИСИС), Шоков И.В. (АО «Мосинжпроект») «Применение ПТФС для построения развертки внутренней поверхности перегонного тоннеля и поиск визуальных дефектов с использованием нейронных сетей».

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 научных статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 137 наименований и приложения, содержит 73 рисунка и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность кафедре «Геологии и маркшейдерского дела» Горного института НИТУ МИСИС, научному руководителю доценту Г. О. Абрамяну и техническим специалистам АО «Мосинжпроект» и ГУП «Московский метрополитен» за помощь и консультации при написании работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализирован отечественный и международный опыт выполнения контроля технического состояния конструкций перегонных тоннелей метрополитена.

Существенный вклад в исследования в области контроля за техническим состоянием конструкций перегонных тоннелей метрополитена внесли известные ученые Андрианов С.В., Баловцев С.В., Гарбер В.А., Жуков С. А., Закоршменный А.И., Закоршменный И.М., Космин В.В., Куликов Ю.Н., Куликова Е.Ю., Кузнецов Е.В., Лебедев М.О., Лукинский О.А., Набатов В.В., Пестрякова Е. А., Пискунов А. А., Романевич К.В, Харченко И. Я., Шевченко А.А., Шилин А.А., Wang F., Fan Y., Guo C., Sjölander Andreas, Belloni Valeria, Ansell Anders, Nordström Erik, Xue Yadong, Shi Peizhe, Li Dawei, Cheng Xiaolong, Hu Xuhang, Liu Ke-Qiang, Cheng Wen, Vasheghani Farahani, Alidoost Fatemeh, Austen Gerrit, Hahn Michael и др.

В настоящее время осмотр конструкций перегонных тоннелей осуществляется сотрудниками служб эксплуатирующей организации в ночное время, в т.н. «технологическое окно». Данный вид работ представляет собой трудоёмкий процесс, выполняемый в неблагоприятных условиях: слабая освещенность, повышенный стресс, ограниченное время, большая протяженность исследуемых конструкций, влажность, запыленность. Результаты проверок на прямую зависят от опыта обслуживающего персонала, что неизбежно может повлечь снижение качества и в некоторых случаях к ложной фиксации дефектов. Результаты наблюдений заносятся в журнал с записей мест расположения дефектов обделки тоннелей.

Наиболее часто встречающийся вид визуального дефекта, не зависящий от типа обделки – это протечки и их следы (мокрые пятна и выщелачивания). Необходимость фиксации данного дефекта объясняется тем, что протечки появляются, как правило, в местах деформаций конструкций обделки и/или нарушении гидроизоляционного слоя. Они являются своего рода «индикаторами» проявлений других видов дефектов, что подчеркивает первостепенную важность выполнения контроля за их развитием. Вышеописанные дефекты могут быть признаком, а в некоторых случаях и началом, изменения несущей способности конструкций перегонных тоннелей, которая в свою очередь будет влиять на безопасность их эксплуатации.

В настоящее время работы по визуальному обследованию (мониторингу) перегонных тоннелей Московского метрополитена осуществляют:

- специалисты подразделений ГУП «Московский метрополитен» (далее внутренний контроль);

- специализированные организации, имеющие допуск на выполнение работ по обследованию (мониторингу) подземных сооружений Московского метрополитена (далее внешний контроль).

Внутренний контроль за состоянием искусственных сооружений Московского метрополитена выполняется сотрудниками Дистанции Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры. При проведении фиксации визуальных водопроявлений, протечкам присваивается категория. Все течи должны быть учтены в соответствии с действующим классификатором, который включает в себя три категории. Фиксация выявленных протечек заносится специалистом в специальную ведомость. К недостатку данного способа фиксации стоит отнести сложности с выполнением анализа динамики развития протечек в качественном и количественном аспектах.

В случаях, когда в зоне влияния нового строительства (наземного или подземного) располагаются эксплуатируемые конструкции перегонных тоннелей, работы по контролю за техническим состоянием объектов инфраструктуры Московского метрополитена выполняют специализированные организации. По результатам визуального обследования составляются дефектовочные схемы – карты дефектов, а также ведомости дефектов и повреждений, в которых отражены примерные места дефектов с привязкой к элементам тубингового кольца (чугунного или бетонного). Зафиксированная картина дефектов и повреждений для различных типов строительных конструкций позволяет выявить причины их происхождения и может быть достаточной для оценки технического состояния конструкций.

В таблице 1 представлены сложности, с которыми сталкиваются специалисты-обследователи при выполнении как внутреннего, так и внешнего контроля, в ходе выполнения работ по поиску визуальных дефектов в перегонных тоннелях.

В связи с тем, что такие работы проводятся, как правило, не реже одного раза в месяц, то у специалистов, выполняющих обследование/мониторинг, оценка динамики развития деформационных процессов производится по следующим критериям:

- зафиксирован новый дефект;
- зафиксированный ранее (в предыдущем цикле) дефект существенно изменил свои геометрические размеры как в большую, так и в меньшую сторону;
- изменение ширины раскрытия трещины (на железобетонных тубингах при условии использования специальных маяков).

Таблица 1 – Особенности выполнения работ по визуальному обследованию действующих перегонных тоннелей

№ п.п.	Условия, осложняющие выполнение работ по обследованию перегонных тоннелей	Способы решения
1	Слабая освещенность	Использование фонарей
2	Загрязненность	Очистка (при необходимости) ручным и или механическими средствами
3	Расположение дефекта выше оси перегонного тоннеля	- фотофиксация - схематичная зарисовка - использование лестниц и стремянок
4	Время работы на действующих линиях в ночное технологическое «окно» от 2 до 2,5 часов	Увеличение количества выходов
5	Удаленность обследуемого участка от станции	-

Отмеченная выше проблематика зарубежными исследователями решается путём использования технических средств для сбора пространственных данных: ССD-камеры и мобильные лазерные сканеры (МЛС), закрепленные на специальных рельсовых платформах, а также цифровые кадровые фотокамеры и беспилотные воздушные судна. Обработка полученных данных выполняется в различных специализированных программных комплексах. Результатом работ являются пространственные трехмерные модели перегонных тоннелей.

Учеными США, Китая, Индии, Швеции, Бельгии, Германии и других стран разрабатываются специальные технические средства для сбора пространственных данных перегонных тоннелей, рассматриваются возможности использования искусственного интеллекта для автоматизации детектирования протечек, трещин и сколов бетона. Внимание ученых сконцентрировано на исследованиях дефектов бетонной обделки, что продиктовано конструктивными особенностями транспортных тоннелей этих стран. Характерной особенностью зарубежных авторов является то, что выбор их исследований направлен на автоматизацию процесса обнаружения дефектов с использованием нейронных сетей. Однако использование систем лазерного сканирования и промышленных камер линейного сканирования имеет ряд недостатков, в том числе отсутствие пространственной привязки.

Таким образом, анализ опыта исследований методов визуального контроля конструкций перегонных тоннелей метрополитена показал, что имеется ряд научно-

методических задач, решение которых позволит повысить достоверность получаемых пространственных данных об имеющихся дефектах тубинговой обделки.

На основании результатов анализа сформулирована цель и идея диссертационной работы и основные задачи.

Во второй главе рассмотрены способы сбора пространственных данных с использованием фотограмметрических методов, наилучшим образом подходящий для поиска визуальных дефектов. Конечным результатом фотограмметрических работ в тоннеле является цифровая карта тоннеля (ЦКТ), которая представляет собой цифровое отображение внутренней поверхности перегонного тоннеля на горизонтальной плоскости, выполненным в текущий момент времени и содержащим в себе все имеющиеся дефекты.

Для сбора пространственных данных внутренней поверхности перегонного тоннеля были апробированы три инструментария: цифровой фотоаппарат, панорамная фотокамера и панорамная видеокамера. В качестве объектов съемки использовались построенные перегонные тоннели Московского метрополитена, но не введенные в эксплуатацию. На таком участке были выполнены опытные исследования с применением различных настроек, способов и последовательности выполнения фотограмметрических работ.

По результатам выполненных фотограмметрических работ установлено, что использование панорамной фото- видеокамеры является наиболее производительным средством сбора пространственных данных. Однако для его реализации требуется разработка специального технического средства. Выполнив анализ поставленных требований, была разработана и сконструирована передвижная тоннельная фотостанция (ПТФС – Рисунок 1), которая позволяет выполнять сбор пространственных данных перегонного тоннеля с использованием панорамного инструментария, центр фотографирования которой располагается на оси тоннеля, благодаря чему достигается равенство съемочных расстояний до исследуемой обделки тоннеля. В исследованиях использовалась панорамная камера Insta360 X3.

При движении ПТФС по рельсам неизбежны различного рода вибрации, связанные с изменением ширины головок рельсов на поворотных участках, легкости конструкции, а также в случаях работающей системы вентиляции. Наличие цифровой стабилизации FlowState на основе 6-осевого гироскопа позволяет выполнять непрерывный сбор пространственных данных (режим видео) в тоннеле. Для работы в условиях слабой освещенности применяются пять светодиодных прожекторов, расположенных сзади камеры таким образом, что световой поток, испускаемый ими, не попадает в объектив и не влияет на качество съемки (Рисунок 2). Камера и светодиодные прожекторы имеют встроенные Li-Ion аккумуляторы, позволяющие ПТФС автономно работать в течение

одного часа. В случаях, когда на выполнение работ в тоннеле будет затрачиваться большее количество времени, требуется установка дополнительного питания – компактные внешние аккумуляторы большой ёмкости, которые будут поддерживать необходимый уровень заряда.

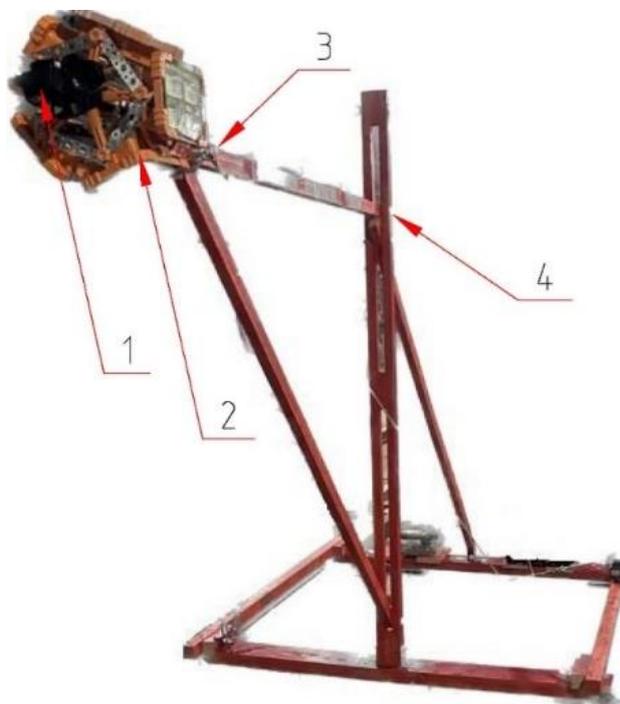


Рисунок 1 - Компоненты ПТФС: 1 – панорамная фотокамера; 2 – светодиодные прожекторы; 3 – аккумулятор для питания осветительных приборов; 4 – опорная колесная рама

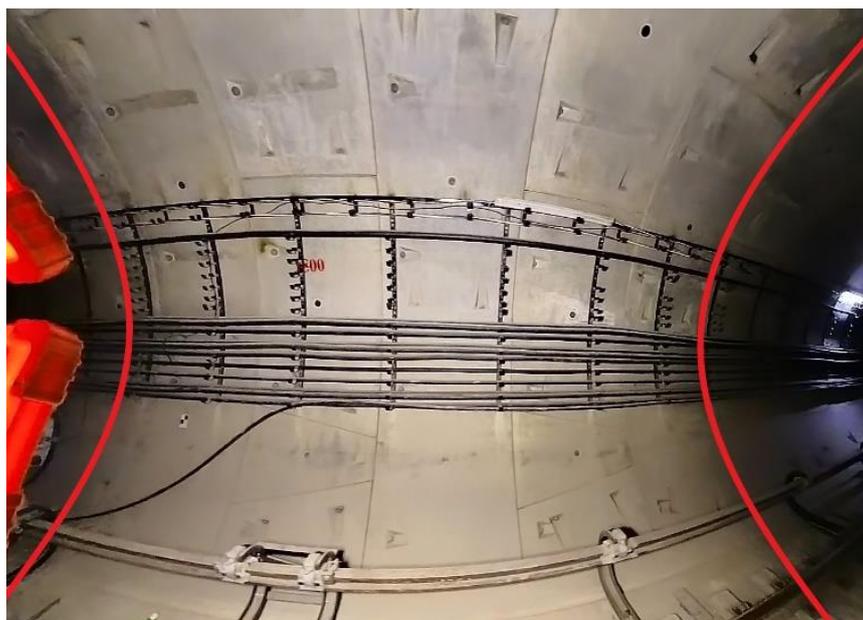


Рисунок 2 - Освещенный прожекторами ПТФС участок перегонного тоннеля с указанными светотеневыми границами (красные линии)

Для решения практических фотограмметрических задач необходимо знать элементы ориентирования панорамного снимка, которые могут быть получены по координатам опорных знаков. Этот процесс называется обратной фотограмметрической засечкой, а математической основой её решения являются прямые или обратные уравнения коллинеарности. Координаты точек объекта и их изображений на снимке связаны векторным уравнением коллинеарности:

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{C_{11}(x - x_0) + C_{12}(y - y_0) - c_{13}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \quad (1)$$

$$Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{C_{21}(x - x_0) + C_{22}(y - y_0) - c_{23}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \quad (2)$$

Элементы внешнего ориентирования могут быть определены в результате фотограмметрической обработки снимков по опорным знакам, закрепленным на исследуемом объекте.

В исследованиях автора использовались следующие виды опорных знаков:

- связующие фотограмметрические марки (СФГМ);
- тоннельные полигонометрические визиры (ТПВ).

Первым видом используемого опорного знака является СФГМ, распечатанная на матовом листе с самоклеящейся стороной (Рисунок 3).



Рисунок 3 - Установленная СФГМ на обделке тоннеля (слева) и её габаритные размеры (справа)

Вторым видом используемого опорного знака является ТПВ, который устанавливается на уравненный пункт подземной маркшейдерской сети (Рисунок 4).

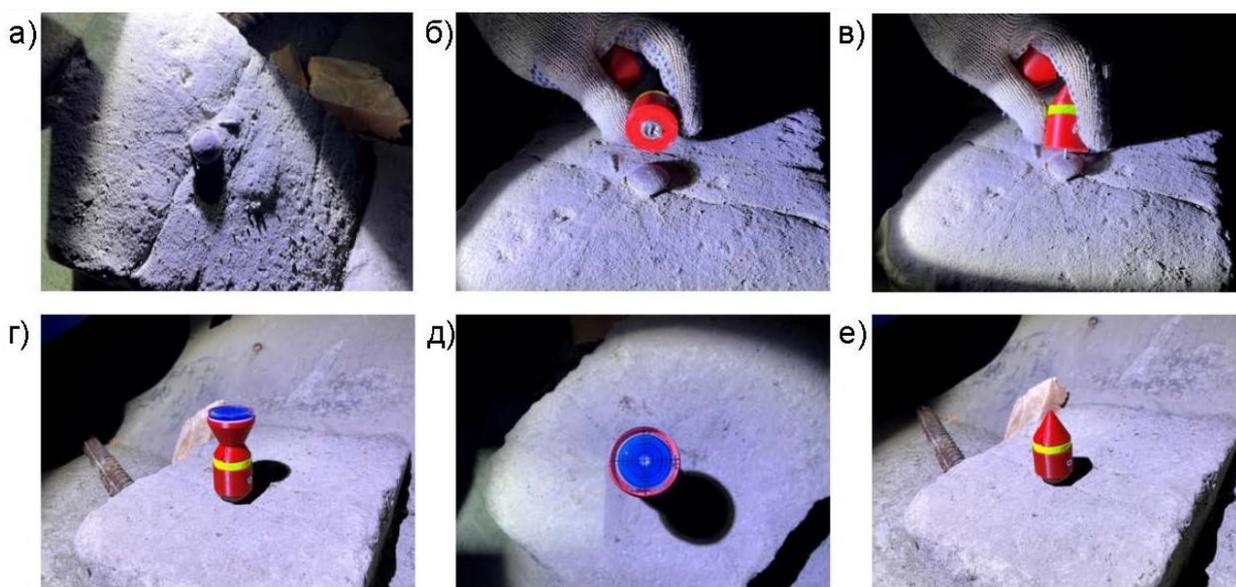


Рисунок 4 - Схема установленного ТПВ на пункте подземной полигонометрии: а) общий вид на центр полигонометрического знака; б) нижний магнитный блок ТПВ; в) подпружиненный шпатель-центрир; г) установка накладного круглого уровня; д) установка ТПВ в вертикальное положение по круглому уровню; е) общий вид установленного ТПВ

Данный тип опорного знака устанавливается на пункт подземной полигонометрии непосредственно перед выполнением фотограмметрических работ и демонтируется сразу после завершения работ на этом участке. Благодаря своей конструкции ТПВ является знаком многоразового использования.

В настоящее время отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие фотограмметрические работы в перегонных тоннелях. Шаг и места установки опорных знаков влияют на затрачиваемое время их монтажа и дальнейшего позиционирования, поэтому требуется определить минимальное и достаточное количество опорных знаков, закрепляемых на конструкция перегонного тоннеля. Целью исследований являлось установление параметров пространственного и количественного размещения опорных знаков (СФГМ и ТПВ), необходимых для построения пространственной модели перегонного тоннеля на основе собранных геоданных. Для исследований был использован участок перегонного тоннеля длиной 100 тюбинговых колец, что составило 120 метров, на котором были установлены опорные знаки СФГМ в избыточном количестве и выполнены фотограмметрические измерения. Установка СФГМ выполнена на каждом 10 тюбинговом кольце, что при длине тюбинга 1.2 метра составляет 12 метров (Рисунок 5). Суммарно на исследуемом участке предварительно было установлено 11 пар СФГМ и три ТПВ. Однако на практике работать с таким большим количеством опорных знаков трудоёмко.

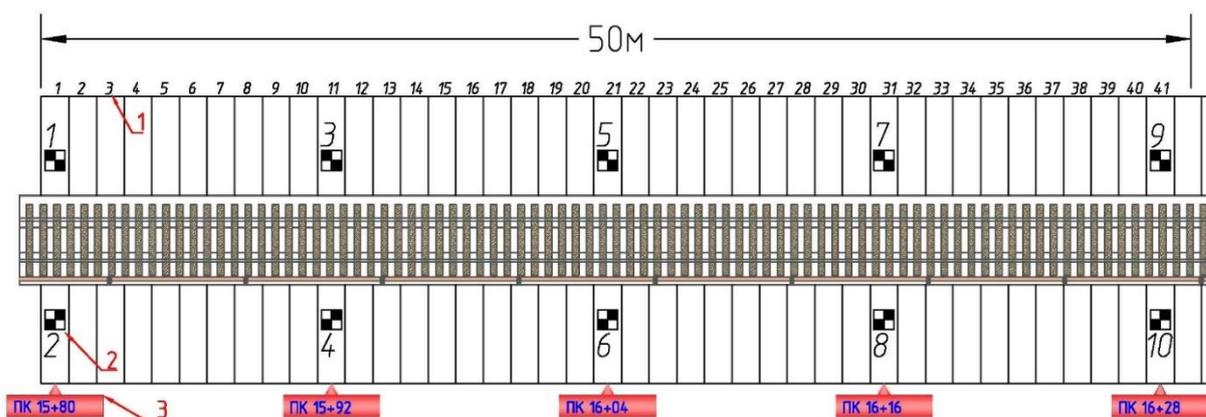


Рисунок 5 - Фрагмент установленных СФГМ на 50-метровом участке перегонного тоннеля: 1 – номер кольца исследуемого участка; 2 – СФГМ и её номер, 3 – пикетажное значение тубингового кольца

В главе рассмотрен сбор пространственных данных с применением ПТФС и панорамной камеры, работающей в двух основных режимах: фотосъемка (ПТФС-Ф) и видеосъемка (ПТФС-В). Для каждого из этих режимов были определены полученный базис фотографирования и время, затрачиваемое на съемку 1 км перегонного тоннеля (Таблица 2). Взаимное перекрытие двух панорамных фотоснимков рассчитывается по формуле:

$$p_{x\Phi} = \frac{l_x * 100\%}{l} \quad (3)$$

где l_x – размер перекрывающихся частей снимка;

l – длина стороны снимка по направлению съемки.

Таблица 2 – Характеристики производительности сбора пространственных данных с использованием ПТФС

Параметры фотограмметрических работ	ПТФС-Ф	ПТФС-В
Базис фотографирования	от 1.0 м до 1.4 м	от 0.1 м до 0.3 м
Продольное перекрытие	от 81% до 87%	от 96% до 99%
Затрачиваемое время на съемку 1 км тоннеля	от 5.9 ч до 8.3 ч	от 0.5 ч до 1.0 ч

Таким образом наиболее эффективным способом сбора пространственных данных внутренней поверхности перегонного тоннеля является ПТФС-В.

Вышесказанное подтверждает первое научное положение.

В третьей главе описаны основные составляющие разработанного метода построения цифровых карт перегонных тоннелей, позволяющие их использовать для поиска и фиксации на ней визуальных дефектов с использованием нейронных сетей.

Осложняющим фактором построения ЦКТ метрополитена, по сравнению с цифровой картой дневной поверхности, является пространственная форма конструкций обделки, близкая к цилиндру на прямолинейных участках и к изогнутому цилиндру на

криволинейных участках. Внутренняя поверхность тубинговой обделки, с точки зрения визуального восприятия, является однообразной и практически не меняющейся.

Для камеральной обработки полученных пространственных данных использовалось ПО Agisoft Metashape, которое поддерживает панорамные фотоизображения в качестве исходных данных, формат которых должен быть трансформирован в эквидистантную (равнопромежуточную) проекцию (Рисунок 6).



Рисунок 6 - Последовательность трансформации исходных пространственных данных

Каждое панорамное фотоизображение включает в себя освещенную и не освещенную поверхность тубинговой обделки, разделенные светотеневыми границами. В процессе обработки возникают сложности с поиском связующих точек на смежных изображениях, вплоть до отсутствия их вовсе. Это объясняется наличием одинаковых и практически не меняющихся объектов на каждом панорамном фотоизображении – элементы ПТФС и неосвещенная часть тоннеля. Для автоматического исключения областей, которые могут привести к ошибочным результатам, ПО Agisoft Metashape использует инструментарий «маски» – очерченные контуры участков фотоизображений. На всех этапах построения пространственной модели, маскируемые области будут исключены из обработки. После применения «масок» и запуска повторного выравнивания фотоснимков, ПО Agisoft Metashape вычисляет ошибки проекций опорных знаков на ЦМТ.

В случае использования пространственных данных, собранных с использованием ПТФС-В, на этапе выравнивания фотоизображений наблюдается снижение величин ошибок ретропроецирования. Данные изменения отражают улучшение качества всех последующих построений, что объясняется увеличением продольного перекрытия смежных фотоизображений.

Камеральная обработка выполняется в следующей последовательности построений: выравнивание фотоизображений, разреженное и плотное облако точек, ЦМТ и ЦКТ.

Путем последовательного исключения различными вариантами количества СФГМ из 10 шт. (50-метровый участок) без потери качества и точности создаваемой пространственной модели, было установлено, что для построения ЦМТ и ЦКТ достаточно трёх опорных знаков, размещенных следующим образом:

- две марки на одном тубинговом кольце в начале исследуемого участка и одна в конце) – схема прямоугольного треугольника;
- марки в начале, посередине и в конце участка – схема равнобедренного треугольника.

Для корректных построений ЦКТ в ПО Agisoft Metashape требуется использовать метод проецирования по маркерам, при котором задаются три маркера с известными координатами:

- два маркера должны располагаться по оси тоннеля – координаты фотокамер в начале (m1) и в конце (m2) исследуемого участка (Рисунок 7);
- третий маркер задаёт начало координат на поверхности, который размещается по центру исследуемого участка на своде тоннеля (Point 2). Такой точкой может выступать стык тубинговых колец (Рисунок 7).

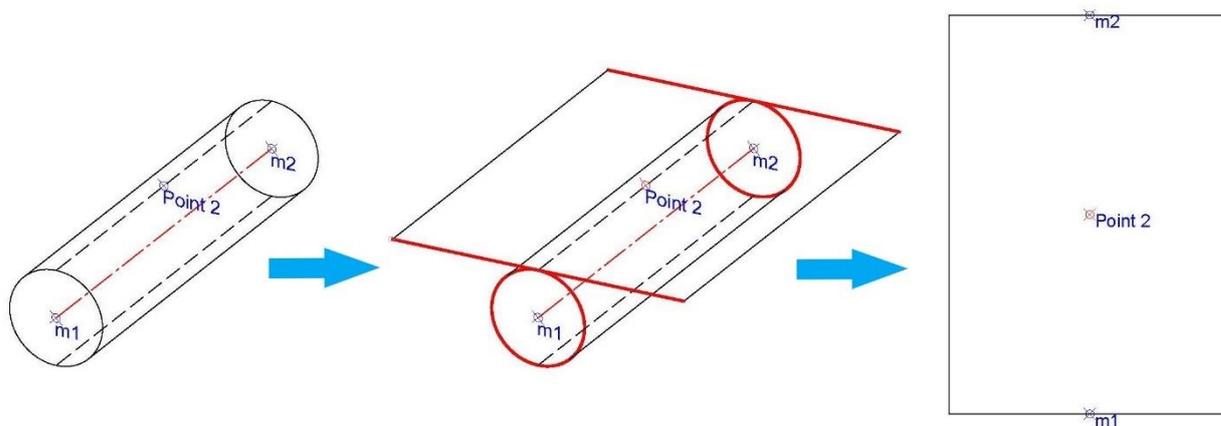


Рисунок 7 - Последовательность создания ЦКТ а) расположение маркеров на исследуемом участке; б) развертка поверхности цилиндра на горизонтальную плоскость; в) границы построения ЦКТ

На полученной ЦКТ (Рисунок 8) отсутствуют линейные и площадные искажения, что позволит выполнять различные измерения и всестороннее изучение различными специалистами ГУП «Московский метрополитен». На основе вышесказанного можно сделать вывод, что использование ПТФС-В наилучшим образом отвечает требованиям.

При выполнении сбора пространственных данных протяженного участка перегонного тоннеля возникает сложность с дальнейшей камеральной обработкой, т.к. исходная информация будет объемной, а единая ЦКТ всего перегона будет плохо читаемой,

что затруднит её дальнейшее использование. Также возникнут сложности при построении ЦКТ криволинейных участков перегонного тоннеля в совокупности с прямолинейными.

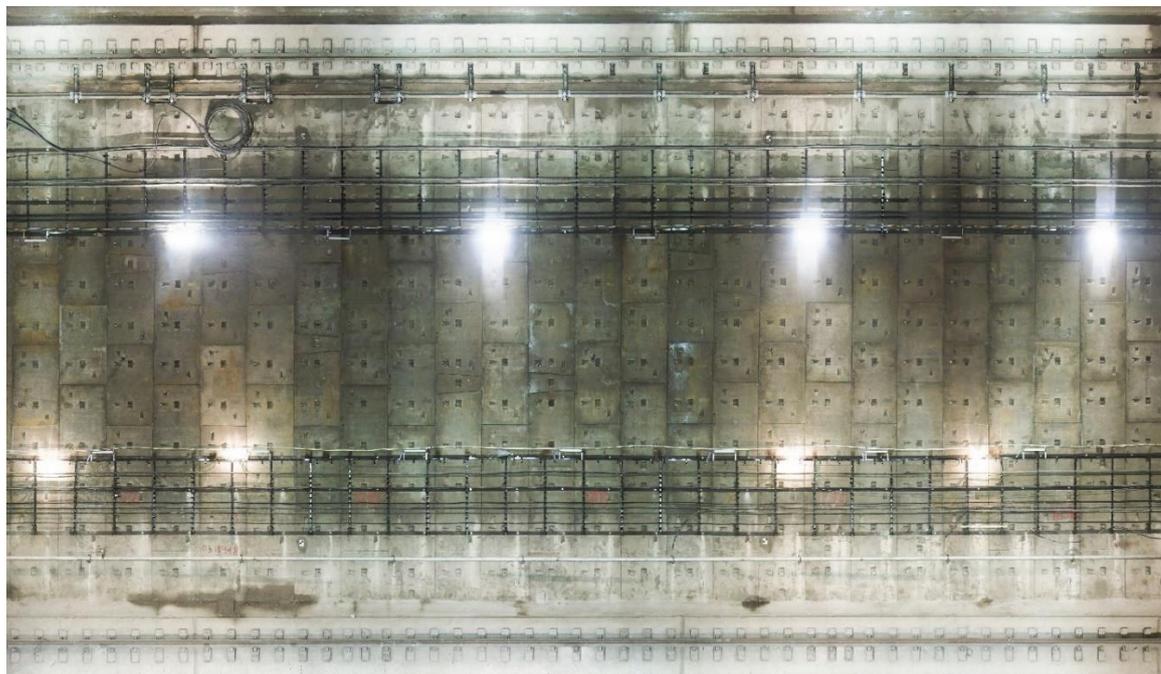


Рисунок 8 - Построенная ЦКТ 50-метрового участка перегонного тоннеля

Поэтому использован принцип построения цифровой карты перегонного тоннеля, разделенного на зоны. Пространственная привязка каждой зоны будет осуществляться к пунктам подземной полигонометрии и путевым реперам, которые расположены на расстоянии 50-60 метров друг от друга. Таким образом, каждая зона обеспечена минимум тремя опорными знаками.

ЦКТ представляет собой цифровое отображение внутренней поверхности перегонного тоннеля со всеми элементами инфраструктуры и дефектами. Использование искусственных нейронных сетей, в совокупности с компьютерным зрением, дает возможность выполнять поиск дефектов не работниками в ночное ограниченное время, а нейронными сетями в любое время. Сверточные нейронные сети наилучшим образом подходят для работ, связанных с распознаванием образов дефектов на ЦКТ. В ходе выполненного анализа существующих свёрточных нейронных сетей установлено, что архитектура новейшей YOLO v11 является оптимальной для распознавания образов дефектов на ЦКТ.

Для аннотирования фотоизображений конструкций перегонного тоннеля, содержащих дефекты, использовался инструментарий CVAT. Проблема малого количества исходных данных решается генерированием новых данных на основе имеющихся – аугментация данных, при помощи которого увеличивается обучающая выборка

изображений. Аугментация фотоизображений выполнялась с использованием PyTorch. Полученные аннотированные фотоизображения были разделены на обучающую и валидационную выборки – База Данных (Dataset), которая использовалась для обучения нейронная сеть YOLO v11 заданным количеством эпох. По завершению обучения имеется возможность увидеть, как она обучилась посредством графиков точности обучения – accuracy и графиков потерь – total loss (Рисунок 9).

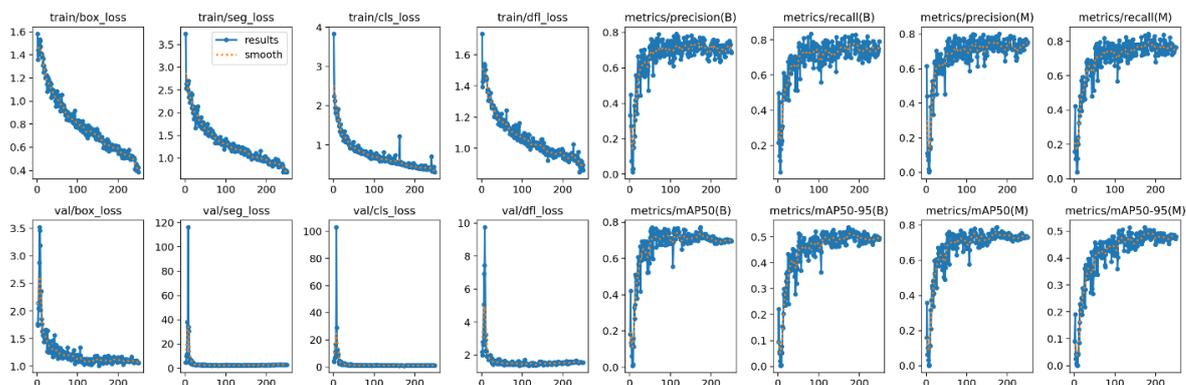


Рисунок 9 - Результаты обучения нейронной сети YOLO v11: а) потери обучающей и валидационной выборок; б) точность полученных данных обучения

Эффективность моделей YOLO v11 оценивается с помощью таких комплексных показателей как среднее пересечение над объединением (MIOU), средняя точность (AP), средняя точность (mAP), средняя запоминаемость (mAR) и F1-score. Показатель MIOU, также известный как индекс Жаккара, оценивает точность сегментации путем сравнения участков перекрытия и объединения предсказанных и реальных целей.

После обучения в модель загружается ЦКТ, на которой нейросеть находит и фиксирует дефекты. Сегментация дефекта на ЦКТ происходит закрашиванием области дефекта с указанием класса дефекта и вероятности идентификации (Рисунок 10).

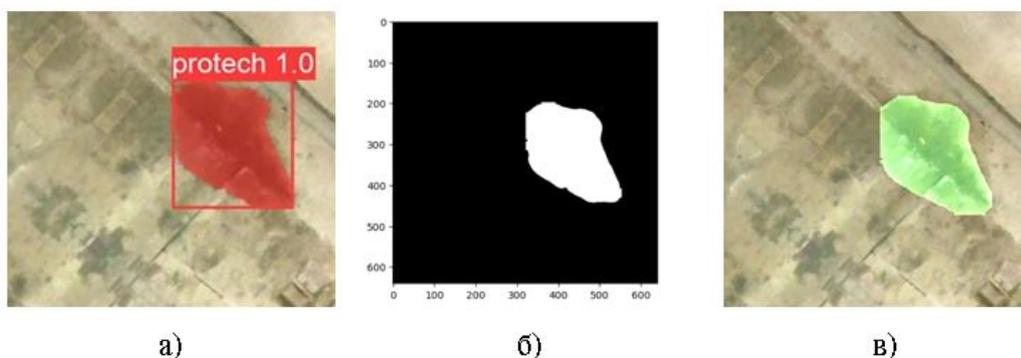


Рисунок 10 - Результаты детекции и сегментирования следов протечки: а) геоизображение на выходе из нейронной сети с присвоением класса и вероятностью идентификации; б) бинарная маска сегментированного дефекта; в) наложение маски на дефект.

Для определения фактической площади визуального дефекта, зафиксированной в текущий момент времени, необходимо умножить количество пикселей маски сегментированного дефекта на геометрическую площадь одного пикселя. Фактически полученные размеры пикселя становятся известны на этапе построения ЦКТ. В вышеописанных исследованиях размер пикселя составил $l_{pixel} = 0.0029$ м.

Маска сегментированного дефекта на рисунке 10 состоит из 38481 пикселя, таким образом площадь данного дефекта будет равна:

$$S_{\text{дефекта}} = \sum \text{pixels on mask} \times S_{\text{pixel}} = 38481 \times 0.0029^2 = 0.3236 \text{ м}^2 \quad (4)$$

При автоматизации вычисления площади визуальных дефектов, зафиксированных на обделке перегонных тоннелей, появляется возможность выполнения пространственно-временного мониторинга за развитием визуальных дефектов, что в настоящее время осуществляется с низкой степенью точности определения изменения геометрических размеров.

Вышесказанное подтверждает второе научное положение.

В четвертой главе представлен результат выполненной апробации предложенного метода построения цифровых карт перегонных тоннелей, включающий сбор и обработку пространственных данных, обработки и построения ЦКТ. Экспериментальный участок перегонного тоннеля длиной 2.674 км включает как прямолинейные, так и криволинейные участки различных радиусов поворота.

Для выполнения работ по сбору пространственных данных в перегонном тоннеле с использованием ПТФС-В, на внутренней поверхности тубинговой обделки и верхнем строении пути в каждой зоне были установлены следующие опорные знаки (см. рисунок 11):

- на прямолинейных участках два ТПВ через 50-60 метров и одна СФГМ напротив полигонометрического пункта подземной маркшейдерской сети;
- на криволинейных участках два ТПВ через 50-60 метров и две СФГМ: напротив полигонометрического пункта подземной маркшейдерской сети и посередине зоны.

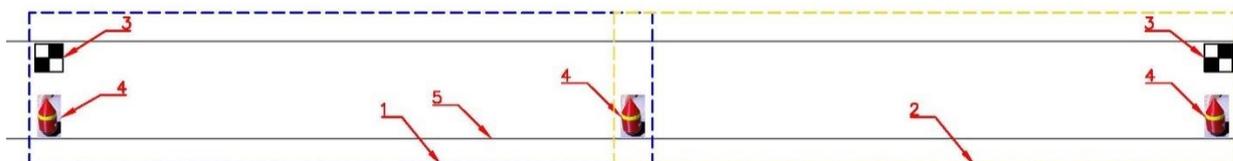


Рисунок 11 - Схема расположения опорных знаков на прямолинейных участках перегонного тоннеля: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тубинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля

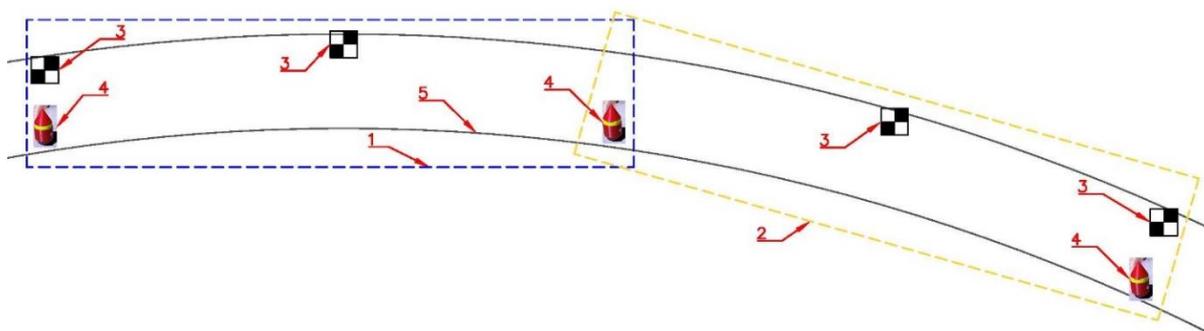


Рисунок 12 - Схема расположения опорных знаков на криволинейных участках перегонного тоннеля: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тьюбинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля

В случаях, когда пункт подземной полигонометрии невозможно использовать для установки на него ТПВ, необходимо закреплять две СФГМ на одном кольце: со стороны контактного рельса и со стороны дорожки для прохода персонала (Рисунок 13). На исследуемом участке было зафиксировано два таких места.

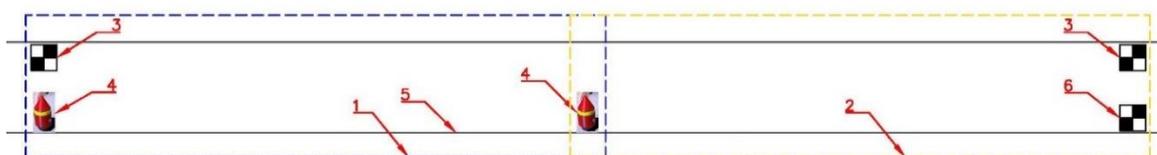


Рисунок 13 - Схема расположения опорных знаков в перегонном тоннеле в случае недоступности полигонометрического знака: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тьюбинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля; 6 – установленная СФГМ вместо ТПВ

На всем протяжении участка было установлено СФГМ в количестве 78 шт., каждой из которых был присвоен уникальный номер для однозначного пространственного определения. Выполнение фотограмметрических работ в тоннеле, с использованием ПТФС-В, осуществлялось тремя сотрудниками: инженер и два помощника. Для выполнения работ по сбору пространственных данных в тоннеле были изготовлены ТПВ в количестве 10 шт. и один накладной круглый уровень, для приведения их в рабочее положение. Данное количество позволяет выполнять непрерывный сбор пространственных данных участка перегонного тоннеля от 500 до 600 метров. Для удобства дальнейшей работы с исходными данными, такой участок был принят за интервал съемки.

Суммарно произведена съемка пяти интервалов. Затраченное время на сбор пространственных данных составило 1 час 45 минут, а также 30 минут на перестановку

ТПВ. Средняя скорость перемещения ПТФС-В в тоннеле составила 1.53 км/ч. Суммарно сбор пространственных данных был выполнен за 2 часа 15 минут.

Экспериментальный участок включал в себя круговые кривые с радиусами поворота R=350м, R=500м, R=1000м и R=3000м. Исходные данные для всех участков были подготовлены по методу, описанному в 3 Главе. Фотоизображения извлечены из видеоряда с частотой 5 кадров в секунду. Базис фотографирования получен в диапазоне от 0.11м до 0.14м, который позволил достичь величины продольного перекрытия от 97 до 99%. Для каждой зоны криволинейных участков был создан отдельный проект в ПО Agisoft Metashape и загружены фотоизображения, после чего на каждое фотоизображение были нанесены проекции опорных точек: СФГМ и ТПВ. По результатам выравнивания снимков были получены ошибки репроецирования, т.е. расстояния между исходной проекцией точки на фотоизображении и проекцией восстановленной трехмерной точки на этом же фотоизображении.

R=350м	Маркеры ^	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №6	0.000613	-0.012158	-0.003607	0.012696	28	0.633
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №7	0.001219	0.000055	0.002627	0.002897	50	0.671
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 6313	0.000320	0.000425	-0.001215	0.001327	18	0.559
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 6369	-0.002153	0.011678	0.002195	0.012076	23	0.598
	Общая ошибка						
	Опорные точки	0.001285	0.008431	0.002560	0.008905		0.633
	Контрольные точки						
R=500м	Маркеры ^	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №28	-0.002002	-0.001775	-0.000156	0.002680	20	0.391
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №29	0.000196	0.000120	0.000587	0.000631	23	0.385
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 5611	-0.000240	0.000094	-0.000352	0.000436	15	0.848
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 5667	0.002046	0.001561	-0.000079	0.002575	13	0.977
	Общая ошибка						
	Опорные точки	0.001440	0.001185	0.000353	0.001897		0.646
	Контрольные точки						
R=1000м	Маркеры ^	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №54	0.000098	-0.000765	-0.000052	0.000773	22	0.185
	<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №55	-0.000034	0.000143	0.000102	0.000179	20	0.212
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 4867	0.000076	-0.000059	-0.000056	0.000111	23	0.320
	<input checked="" type="checkbox"/> ТПВ 4921	-0.000139	0.000680	0.000005	0.000694	21	0.221
	Общая ошибка						
	Опорные точки	0.000095	0.000517	0.000064	0.000530		0.242
	Контрольные точки						
R=3000м	Маркеры ^	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
	<input checked="" type="checkbox"/> сфгм65	0.000534	-0.000043	0.001049	0.001178	22	0.645
	<input checked="" type="checkbox"/> сфгм66	-0.000057	0.000222	-0.001102	0.001126	32	0.520
	<input checked="" type="checkbox"/> PZ4363	0.000045	-0.000186	0.001116	0.001132	30	0.601
	<input checked="" type="checkbox"/> PZ4419	-0.000522	0.000008	-0.001063	0.001184	20	0.685
	Общая ошибка						
	Опорные точки	0.000375	0.000146	0.001083	0.001155		0.604
	Контрольные точки						

Рисунок 14 - Ошибки репроецирования, полученные для опорных знаков на 50-метровых криволинейных участках с радиусами 350, 500, 1000 и 3000м

В отличие от прямолинейного 50-метрового участка, для построения ЦМТ которого достаточно использование трёх опорных знаков, на круговой кривой требуется дополнительно один знак посередине исследуемой зоны. Это обуславливается неоднозначностью создания пространственной модели и неточностями при дальнейших построениях.

По результатам камеральной фотограмметрической обработки в ПО Agisoft Metashape были построены ЦМТ для каждой зоны рассматриваемых криволинейных участков (Рисунок 15).



Рисунок 15 - Построенные ЦМТ 50-метровых участков перегонного тоннеля с опорными знаками: а) $R=350\text{м}$; б) $R=500\text{м}$; в) $R=1000\text{м}$; г) $R=3000\text{м}$

На основе созданной ЦМТ криволинейных участков различного радиуса были созданы их ЦКТ, качество которых получились неудовлетворительным, т.к. по мере удаления от центра проекции возрастают линейные искажения и продольные деформации отображения поверхности тоннеля. Боковые грани тоннеля, вблизи центра проекции, имеют отчетливые визуальные искажения (Рисунок 16).

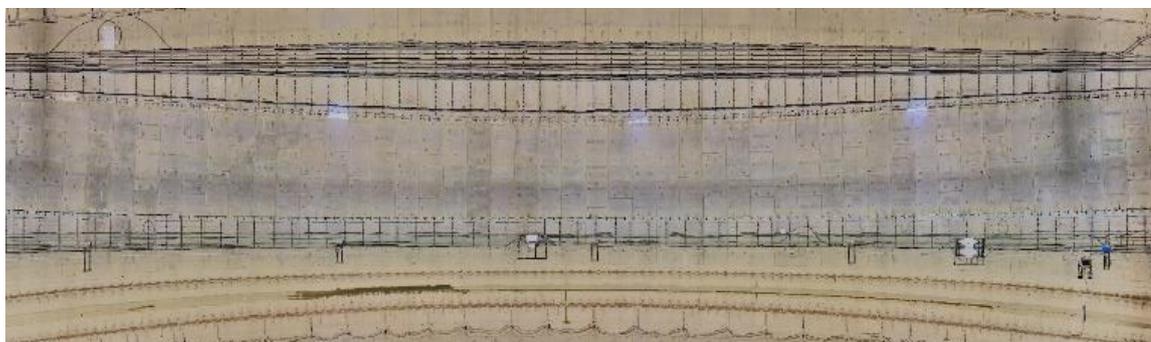


Рисунок 16 - ЦКТ 50-метровой зоны криволинейного участка с радиусом поворота $R=350\text{м}$

Установлено, что для оптимального построения ЦКТ зон криволинейных участков, требуется разбиение зоны на участки меньшей длины – секции. В таблице 3 представлены

длины секций зон криволинейных участков, в зависимости от радиуса поворота трассы метрополитена.

Таблица 3 – Оптимальные длины секции

Радиус поворота, м	350	500	1000	3000
Длина секции, м	12.5	20.0	25.0	50.0

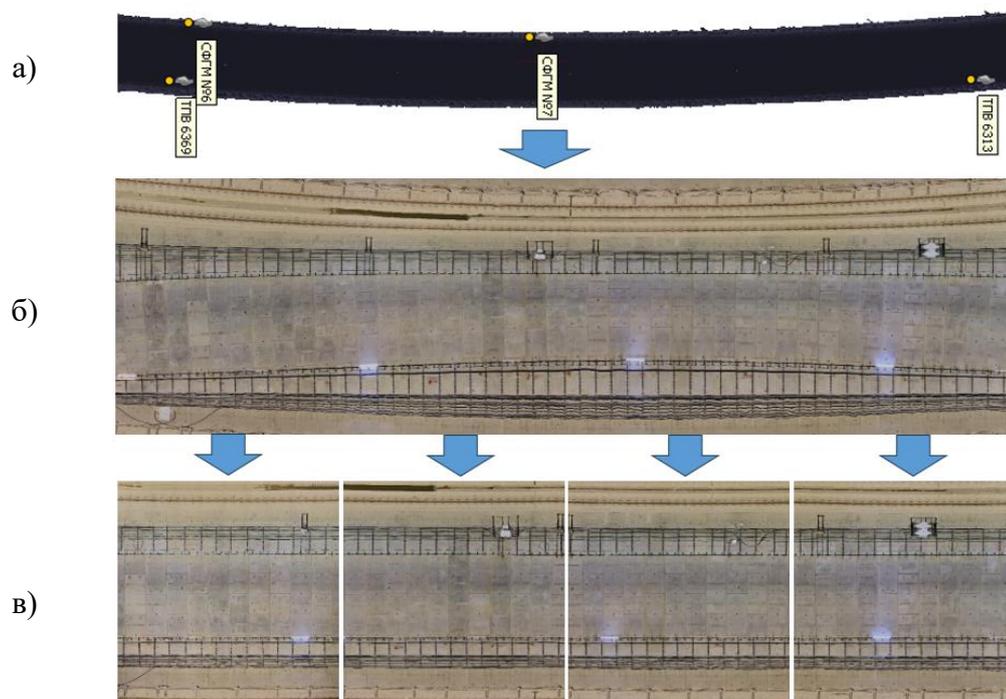


Рисунок 17 - Разбиение 50-метровой зоны криволинейного участка с радиусом поворота $R=350\text{м}$ на секции: а) ЦМТ; б) ЦКТ с искажениями; в) 12.5-метровые секции ЦКТ без искажений

Таким образом в данной главе обоснована возможность применения метода построения цифровых карт перегонных тоннелей для выявления визуальных дефектов с помощью нейронных сетей, заключающаяся в следующем:

- апробирован предложенный метод построения ЦМТ на криволинейных участках перегонного тоннеля различных радиусов;
- обоснована схема и количество размещаемых опорных знаков на криволинейных участках перегонного тоннеля;
- выполнен сбор пространственных данных перегонного тоннеля длиной более 2.5 км за 1 час 45 минут, что позволяет применить предложенный метод на действующих линиях метрополитена в период ночного «технологического окна»;
- обосновано разбиение зоны построения ЦКТ на секции с определением их длины, в зависимости от радиуса поворота криволинейных участков перегонного тоннеля.

Вышесказанное подтверждает третье научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача разработки метода построения цифровых карт перегонных тоннелей метрополитена и их анализа свёрточными нейронными сетями для выявления визуальных дефектов на поверхности тубинговой обделки, что имеет важное значение для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации подземных транспортных сооружений.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Выполнен анализ современных технологий сбора и обработки пространственных данных обделки перегонных тоннелей, показавший, что использование специальных технических средств в отличие от традиционных подходов повышает производительность сбора пространственных данных перегонных тоннелей.
2. Разработано техническое средство и обоснован выбор инструментария для сбора пространственных данных обделки перегонного тоннеля, позволяющие выполнять работы на действующих линиях метрополитена в период «технологического окна» в автоматизированном режиме.
3. Разработан метод формирования цифровой модели тоннеля (ЦМТ) и цифровой карты тоннеля (ЦКТ).
4. Создана база данных для идентификации визуальных дефектов на ЦКТ.
5. Верификация распознанных с помощью созданной базы данных на тестовом участке показала удовлетворительное выявление визуальных дефектов.
6. Обосновано разбиение зоны построения ЦКТ на секции с определением их длин в зависимости от радиуса поворота криволинейных участков перегонного тоннеля.
7. Проведена апробация предложенного метода в перегонном тоннеле длиной 2.6 км с криволинейными участками различного радиуса поворота, выполненная за время, не превышающее периода ночного «технологического» окна.
8. Результаты исследований были внедрены и успешно апробированы ООО «Инжтоннельгеодезия». Разработанный метод позволил выполнить построение цифровых карт перегонных тоннелей, на основе собранных пространственных данных с использованием специального технического средства, на которых были выявлены визуальные дефекты с помощью нейронных сетей. Использование данного метода дает возможность реализовать сбор пространственных данных внутренней поверхности перегонных тоннелей на действующих линиях метрополитена в период ночного «технологического окна».

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. **Парамонов С. С.** Обзор геоинформационных моделей подземных линейных сооружений / С. С. Парамонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № S11. – С. 3-18. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_11_3.
2. **Парамонов С. С.** Создание цифровой карты тоннеля метрополитена с использованием специальных технических средств / С. С. Парамонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 9. – С. 32-46. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_32.
3. **Парамонов С. С.** Построение цифровых моделей и карт криволинейных участков перегонных тоннелей метрополитена для выявления визуальных дефектов с использованием нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 12 (специальный выпуск 23). — С. 3–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_23_3.