

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

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

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Абрамян Георгий Оникович

Москва – 2025

Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	9
1.1. Дефекты отделки перегонных тоннелей.....	14
1.2. Контроль за дефектами конструкций перегонных тоннелей.....	17
1.3. Особенности выполнения работ по визуальному контролю	25
1.4. Зарубежный опыт выполнения контроля за дефектами конструкций перегонных тоннелей.....	27
Выводы по главе.....	37
Глава 2. СБОР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ	40
2.1. Сбор исходной цифровой информации внутренней поверхности перегонного тоннеля с использованием цифрового фотоаппарата	43
2.2. Разработка и испытание специального технического средства	46
2.3. Опорные точки для выполнения фотограмметрических работ в перегонном тоннеле	51
2.4. Сбор пространственных данных на тестовом участке перегонного тоннеля	55
2.5. Способы сбора исходных пространственных данных перегонного тоннеля с использованием ПТФС	59
Выводы по главе.....	62
Глава 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ.....	63
3.1. Подготовка пространственных данных	65
3.2. Создание ЦМТ	76
3.3. Построение ЦКТ	94
3.4. Распознавание образов дефектов на ЦКТ с использованием нейронных сетей	101
Выводы по главе.....	124
Глава 4. Апробация предложенного метода на экспериментальном участке перегонного тоннеля	126
4.1. Установка опорных знаков.....	127

4.2. Сбор пространственных данных.....	130
4.3. Построение ЦМТ криволинейных участков перегонного тоннеля .	131
4.4. Построение ЦКТ криволинейных участков перегонного тоннеля ..	134
Выводы по главе.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
Список использованных источников	141
Приложение	155

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЦМТ – цифровая модель тоннеля

ЦКТ – цифровая карта тоннеля

ПТФС – передвижная тоннельная фотостанция

ЦММ – цифровая модель местности

МЛС – мобильное лазерное сканирование

ПО – программное обеспечение

ГИС – геоинформационная система

ВСП – верхнее строение пути

СФГМ – связующая фотограмметрическая марка

ТПВ – тоннельный полигонометрический визир

ПЗ – полигонометрический знак

ПЛК – передняя линия контура фотоизображения

ЗЛК – задняя линия контура фотоизображения

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.

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.

Глава 1. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

Подземные линейные сооружения, в частности перегонные тоннели Московского метрополитена, находятся в эксплуатации начиная с 15 мая 1935 года. В течение всего времени существования подземной транспортной сети, протяжённость существующих линий и станций увеличивается. Особенно в последние десятилетия метростроение вышло на новый технический и технологический уровень, благодаря внедрению различных автоматизирующих систем, позволяющих эффективнее выполнять как горно-строительные, так эксплуатационные работы.

В период эксплуатации Московского метрополитена несущие конструкции перегонных тоннелей испытывают высокие нагрузки, связанные с увеличением народонаселения, что неизбежно влечет за собой большую загруженность линий. Количество пассажиров, одновременно находящихся в поездах, растет, интервал между поездами сокращается и т.д.

Одновременно с непосредственной нагрузкой на верхнее строение пути перегонных тоннелей, происходит увеличение горного давления на обделку. Этот процесс вызван увеличением темпов строительства жилых, промышленных и административных зданий и сооружений на земной поверхности, увеличением автомобильного и железнодорожного трафика.

Все вышеописанные процессы влияют на текущее техническое состояние перегонных тоннелей, эксплуатация которых в требуемом режиме зависит от своевременности, достоверности и полноты информации о деформационных процессах, возникающих в обделке тоннеля и проявляющиеся в виде различных дефектов. Периодический контроль за изменением вышеописанных дефектов решает задачу отслеживания их динамики, анализ которой позволяет прогнозировать и предупреждать возможные аварийные ситуации [1-5].

Выход из строя эксплуатируемых подземных конструкций, даже временный, влечет за собой снижение эффективности транспортных

мощностей, поэтому перед научным и техническим сообществами стоит важная задача – обеспечение их работоспособности. В настоящее время эксплуатируемые подземные транспортные конструкции рассчитаны на срок службы не более 100–120 лет, и для обеспечения их безопасного использования требуются периодические проверки, которые выполняются для обнаружения, наблюдения и измерения их повреждений – дефектов, к которым относятся водопроявления, выщелачивание, трещины, сколы бетона и оголения арматуры. Трещины являются признаком разрушения бетонных конструкций, а проникающая через них вода ускоряет процесс деформаций. Выщелачивание встречается в конструкциях с внешним давлением водоносных горизонтов и представляет собой медленный процесс, а наличие трещин его ускоряет [4,5].

На современном этапе развития транспортной инфраструктуры крупных мировых городов, на примере г. Москвы, возникает потребность в полноте и достоверности пространственных данных – возникающих дефектов в обделке перегонных тоннелей. Для оперативного принятия технических решений по ремонтно-восстановительным работам в ограниченных временных рамках, необходимы автоматизированные технологии сбора и обработки пространственных данных конструкций перегонных тоннелей, которые в настоящее время являются неудовлетворительными.

В конструкциях перегонных тоннелей широко распространены следы износа, являющиеся следствием постоянно действующих на них нагрузок. Регулярный осмотр и своевременное техническое обслуживание представляют собой жизненно важную процедуру, обеспечивающей структурную целостность на протяжении всего срока эксплуатации [2-5].

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. В качестве инструмента специалисты используют фонари, молотки и специальные приборы для измерения ширины трещин. Результаты наблюдений заносятся в журнал с записей мест расположения дефектов обделки тоннелей. Дефекты, располагающиеся ниже оси перегонного тоннеля, подвергаются более точному определению ввиду возможности непосредственного измерения. Для фиксации дефектов, находящихся выше оси тоннеля, должны использоваться подъемные механизмы, что в значительной степени снижает производительность работ [1-3].

Учитывая площадь исследуемой внутренней поверхности перегонных тоннелей, в сочетании со сложными условиями труда и ограниченным временем, детальный осмотр конструкций крайне затруднен. На одном и том же участке перегонного пути контроль за его техническим состоянием осуществляют разные специалисты, поэтому информация о дефектах передается между ними посредством журналов, заметок и фотографий [2-5].

Повышение эффективности контроля технического состояния перегонных тоннелей можно добиться за счет использования методов пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей, включающие в себя следующие основные понятия:

- исходная пространственная информация – координированные данные о геопространстве перегонных тоннелей и объектах инфраструктуры в цифровой компьютерно-воспринимаемой форме;
- технические средства для сбора пространственной информации;
- геопространственные отношения – совокупность размещения объектов инфраструктуры относительно конструкций обделки перегонных тоннелей;
- пространственные явления – координированные дефекты на обделке перегонного тоннеля с изменяющимися во времени геометрическими параметрами;
- цифровая пространственная модель – дискретная модель пространственных объектов (конструкции обделки перегонных тоннелей, путей и объектов инфраструктуры);
- цифровая карта – цифровая модель исследуемых конструкций, созданная путём оцифровки картографических источников, фотограмметрической обработки исходных пространственных данных.

Общая структурная схема пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей приведена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Структура пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей для отслеживания технического состояния перегонных тоннелей метрополитена (по материалам [1])

Главной задачей моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей метрополитена является выявление и фиксация пространственных отношений между объектами, явлениями и процессами, возникающими в конструкциях обделки. Данная задача решается использованием цифровой карты тоннеля (ЦКТ), методов классификаций, координатных систем и распознавания образов на основе нейронных сетей [1].

Для формирования структуры отслеживания технического состояния перегонных тоннелей метрополитена на основе пространственного моделирования их внутренней поверхности, требуется выделение видов пространственных явлений – дефектов обделки перегонных тоннелей с разделением их на классы.

Одним из методов создания пространственных моделей местности (цифровая модель местности – ЦММ), наилучшим образом ориентированный на визуальное представление пространственных данных, является фотограмметрический. Наибольшее распространение данный метод получил при выполнении топографических съемок земной поверхности, где пространственная привязка модели осуществляется при помощи спутниковых технологий.

Выполнение фотограмметрических работ в подземном пространстве, в частности в перегонных тоннелях метрополитена, осложняется следующими факторами:

- слабая освещенность;
- отсутствие связи со спутниками;
- малая ширина тоннеля (5,6 м);
- большая протяженность (в среднем 1,7 км);
- наличие криволинейных и наклонных участков;
- большая кривизна снимаемой поверхности обделки ($k=1/2.8 \text{ м}^{-1}$);
- ограниченное время работы в «технологическое окно»;
- отсутствие научно-обоснованной методики использования фотограмметрических методов в подземных условиях.

Несмотря на вышеописанные сложности, технологии фотограмметрических работ в перегонных тоннелях позволяют выполнять сбор пространственной информации, однако требуется использование различного дополнительного оборудования. В настоящее время отсутствует нормативно-техническая база, регламентирующая фотограмметрические работы в подземном пространстве.

1.1. Дефекты обделки перегонных тоннелей

Конструкции перегонных тоннелей представляют собой сложные геопропространственные объекты, располагающиеся в изменяющейся геологической среде, возводящиеся из следующих материалов:

- чугунные тубинговые кольца;
- железобетонные тубинговые кольца;
- сборные железобетонные элементы;
- монолитные железобетонные конструкции.

В мировой тоннелестроительной практике основным материалом несущих конструкций перегонных тоннелей является железобетон. Однако в России, для строительства линий метрополитена используются все вышеописанные виды обделки [1-3].

Для каждого материала обделки тоннеля характерны как индивидуальные, так и общие виды дефектов. К индивидуальным относят такие дефекты, которые не могут быть зафиксированы на всех видах обделки.

Каждый дефект, возникающий на поверхности обделки тоннеля, представляет собой пространственное явление, за которым требуются регулярный контроль. По изменению пространственно-геометрических характеристик дефектов участка перегонного тоннеля, производится оценка его технического состояния.

Ниже приведены основные виды дефектов, встречающиеся в конструкциях обделки перегонных тоннелей, выполненных из различных материалов [6-9].

Протечки в перегонных тоннелях глубокого заложения наблюдаются в местах нарушения гидроизоляционного слоя и дефектов защитной бетонной рубашки, а также при наличии зазора между рубашкой и конструкциями обделки. В тоннелях мелкого заложения протечки наблюдаются в деформационных (температурно-осадочных) швах [1].

Выщелачивание бетона (с образованием сталактитов и сталагмитов), т.н. «высолы», наблюдаются из-за нарушения гидроизоляции и обводнения техногенными водами. Отличаются от протечек наличием характерного белого цвета [1].

Протечки и выщелачивание бетона характерны для **всех типов обделки**.

Трещины, обнаруженные при осмотре, не всегда указывают на снижение прочностных характеристик, однако со временем их влияние на несущую способность транспортных тоннелей может измениться. Наблюдения за трещинами на ранней стадии их появления и наблюдения за возможным развитием, предоставляет возможность оценить ее влияние на структурную безопасность. Влияние трещины на несущую способность конструкций тоннелей зависит от их пространственно-ориентированного расположения [1].

Сколы бетона характерны для тоннелей, обделка которых выполнена из железобетонных тюбингов. Возникают обычно в слабоармированных местах, в результате коррозии арматуры из волосяных трещин. Степень влияния на несущие способности тоннельных конструкций определяется расчетом [1].

Оголение арматуры возникает после разрушения защитного слоя бетона. Коррозия арматурных стержней происходит более интенсивно, а невыполнение ремонтных работ повлечет за собой дальнейшее разрушение конструкций [1].

Такие дефекты, как трещины, сколы бетона и оголение арматуры, характерны для обделки, выполненной из железобетона (тюбинговые кольца, сборные элементы и монолитные конструкции) [1].

Со временем давление воды в сочетании с трещинами может привести к внутренней эрозии, что тесно связано с уменьшением прочности конструкций. 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 [1].

1.2. Контроль за дефектами конструкций перегонных тоннелей

Исходя из описания дефектов и способов фиксации, их можно разделить на две основные группы: визуально-определяемым и инструментально-определяемым (Рисунок 1.2).

К визуально-определяемым дефектам относятся те, которые находятся непосредственно на контролируемой поверхности (внутренняя поверхность тоннельной обделки и верхнее строение пути). Их фиксацию осуществляют специалисты, занимающиеся визуальным мониторингом и/или обследованием. Пространственные характеристики (геометрические размеры, направление и ширина трещин) таких дефектов определяются условно, путем зарисовки на плане или записи в журнале [8,9].

К инструментально-определяемым дефектам относятся те из них, фиксацию которых можно выполнить только с использованием измерительного оборудования. К таким дефектам относятся: изменение геометрии тоннеля, вертикальные перемещения тоннельных конструкций (маркшейдерские измерения), контакт вмещающих пород с тоннельной обделкой (геофизические исследования) и пр. [8-19].

Существует ряд дефектов, появление и развитие которых могут снизить прочностные характеристики несущих конструкций перегонного тоннеля, к которым относятся:

- течи подземных вод и вызванные ими просадки;
- деформации и смещения тоннельной обделки;
- трещины в тоннельной обделке;
- коррозионные повреждения.



Рисунок 1.2 - Структура контроля дефектов тоннельной обделки

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.

Своевременная фиксация и наблюдение за развитием протечек повысит оперативность выполнения локальных инструментальных и ремонтно-восстановительных мероприятий для повышения безопасности эксплуатации перегонных тоннелей [10,20-27].

Применимо к подземным линейным сооружениям, течью считается определенное место на обделке тоннеля, в котором находится течение воды, заметное для глаза. Причем мокрые пятна также относятся к протечкам.

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

- специалисты подразделений ГУП «Московский метрополитен» (далее внутренний контроль) [2,3];
- специализированные организации, имеющие допуск на выполнение работ по обследованию (мониторингу) подземных сооружений Московского метрополитена (далее внешний контроль) [4,5].

1.2.1. Внутренний контроль за проявлениями дефектов

Внутренний контроль за состоянием искусственных сооружений Московского метрополитена выполняется сотрудниками Дистанции Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры.

При организации работ по содержанию искусственных сооружений должны строго выполняться «Правила технической эксплуатации метрополитена в городе Москве» и иные руководящие документы метрополитена.

Наиболее важными дефектами, за которыми выполняется постоянный визуальный контроль внутренними силами метрополитена, являются протечки и выщелачивания бетона [2-5].

В общем случае процесс сбора информации о следах водопроявлений в тоннелях выглядит следующим образом:

1. Сбор визуальной информации с «привязкой» к номеру кольца или его пикетажному значению;
2. Указание места дефекта на кольце;
3. Запись в журнале.

В инструкции по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов, в разделе 3, представлена процедура надзора за состоянием искусственных сооружений. Под надзором понимается комплекс работ, состоящий из осмотров, наблюдений и обследований, целью которых

является фиксация дефектов, проявляющихся как на отдельных конструкциях, так и на сооружении в целом [2].

Надзор за состоянием искусственных сооружений включает в себя осмотры и наблюдения: постоянные, периодические и специальные. В таблице 1.1 приведены виды работ с разделением по ответственным лицам. Таблица 1.1 – Периодичность осмотров конструкций перегонных тоннелем при выполнении внутреннего контроля

Виды работ	Должность сотрудника	Периодичность	Фиксация результатов осмотров
Осмотры и наблюдения	Старший мастер	1 р/квартал	Записи в книгах формы МУс-8 и Мус-3
	Мастер	1 р/месяц	Записи в книгах формы МУс-8 и Мус-3
	Обходчик	2 р/месяц	Записи в книге формы МУс-8

Периодические и выборочные осмотры конструкций выполняют руководители дистанций служб и Управления метрополитена по утвержденным планам и годовым графикам.

Одними из основных целей выборочных осмотров являются: выявление дефектов, оценка корректности выполненных ремонтных работ по устранению дефектов, проверка количества течей и многое другое.

Периодические осмотры выполняются мастером или помощником мастера околотка П ДИ (служба пути Дирекции инфраструктуры) один раз в месяц. В ходе этих осмотров ведется учет течей с обязательной записью в ведомости учета течей [2].

В тех случаях, когда сложно определить количество протечек на конструкциях перегонного тоннеля, а также когда наблюдается сплошная обводненность, то пользуются указанным в таблице 1.2 критерием для подсчета количества течей.

При проведении фиксации визуальных водопроявлений, протечкам присваивается категория. Все течи должны быть учтены в соответствии с

действующим классификатором, который включает в себя три категории (Таблица 1.3) [2].

Таблица 1.2 – Правила подсчета количества течей при высокой обводненности тоннеля

Тип обделки перегонного тоннеля	Обводненность	Критерии подсчета количества течей
Чугунные и железобетонные кольца	Сплошная, на протяжении нескольких колец	Условно равно количеству горизонтальных и вертикальных стыков
Монолитная обделка		Условно 10 течей на 1 метр
Сборная железобетонная обделка прямоугольного сечения		Условно по 5 течей на каждый вертикальный стык тоннеля по периметру
Цельно-секционная железобетонная обделка		Условно по 2 течи на каждый горизонтальный стык в пределах стенового блока

Течи, относящиеся к первой категории, наиболее важные, устранение которых должно быть незамедлительным, т.к. они угрожают безопасности пассажиров и движению поездов.

Течи, относящиеся ко второй категории, при длительном воздействии могут нарушать целостность искусственных сооружений и влиять на работу оборудования и устройств.

Течи, относящиеся к третьей категории, при длительном воздействии (более одного месяца) создают угрозу коррозии.

Фиксация выявленных протечек заносится специалистом в специальную ведомость, пример которой приведен на рисунке 1.3. Результаты осмотров за отчетный период вносятся в сводную ведомость.

К недостатку данного способа фиксации стоит отнести сложности с выполнением анализа динамики развития протечек в качественном и количественном аспектах.

1.2.2. Внешний контроль за проявлениями дефектов

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 [4,5].

На первом этапе контроля выполняют визуальный осмотр (предварительное обследование) несущих конструкций перегонных тоннелей, по результатам которого дается предварительная оценка технического состояния по внешним (визуальным) признакам. Также определяется необходимость выполнения инструментального обследования [4,5].

В качестве основных инструментов используются фотоаппараты, рулетки, бинокли и пр. При выполнении визуального обследования, фиксации подлежат все видимые дефекты на поверхности отделки. Особое внимание уделяется следам водопроявлений – течи, мокрые пятна, выщелачивания бетона (высолы), выносы грунта внутрь сооружения.

По результатам визуального обследования составляются дефектовочные схемы – карты дефектов (Рисунок 1.4), а также ведомости дефектов и повреждений (Рисунок 1.5), в которых отражены примерные места дефектов с привязкой к элементам тубингового кольца (чугунного или бетонного).

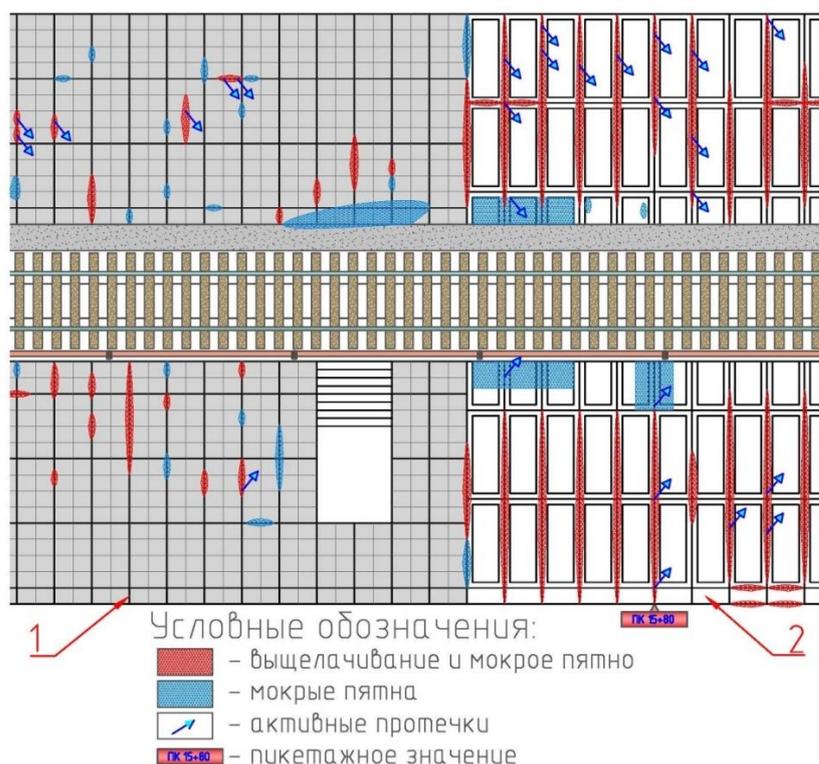


Рисунок 1.4 - Дефектовочная схема (карта дефектов) участка перегонного тоннеля:
1 – с чугунными тубингами; 2. – с железобетонными тубингами

Номер кольца	Вид дефекта	
	Сторона контактного рельса	Противоположная сторона от контактного рельса
1	высолы, активные протечки, мокрые пятна	мокрые пятна
2	высолы, активные протечки, мокрые пятна	активные протечки, мокрые пятна
3	высолы, активные протечки, мокрые пятна	высолы, активные протечки, мокрые пятна
4	высолы, мокрые пятна	высолы, активные протечки, мокрые пятна
5	мокрые пятна	активные протечки, мокрые пятна
6	активные протечки	высолы, активные протечки, мокрые пятна
7	высолы, мокрые пятна	высолы, активные протечки, мокрые пятна
8	высолы, активные протечки, мокрые пятна	высолы, мокрые пятна
9	активные протечки, мокрые пятна	высолы, активные протечки, мокрые пятна

Рисунок 1.5 - Ведомость дефектов и повреждений тубинговой обделки

Проявления деформационных процессов (дефекты), возникающие и развивающиеся в конструкциях перегонных тоннелей, по их пространственному расположению на тубинговом кольце, можно разделить на две основные группы:

- находящиеся в пространстве от лотка до оси тоннеля. К ним имеется доступ для их непосредственного измерения (в случае необходимости);

- находящиеся в пространстве от оси тоннеля до свода. Для определения их геометрических размеров, длины, ширины и прочих характеристик, необходимо использовать вспомогательное оборудование (лестницы, стремянки и др.).

После обработки полевых измерений подготавливаются следующие отчетные документы:

- схема конструктивных элементов обследуемых сооружений;
- схемы и ведомости дефектов и повреждений;
- описания, фотографии дефектных участков и т.д. [4,5].

Зафиксированная картина дефектов и повреждений для различных типов строительных конструкций позволяет выявить причины их происхождения и может быть достаточной для оценки технического состояния конструкций. Если результатов визуального обследования недостаточно для решения поставленных задач, то проводят детальное (инструментальное) обследование [4,5].

1.3. Особенности выполнения работ по визуальному контролю

В нормативных документах, касающихся контроля технического состояния подземных сооружений метрополитена [2-5], наибольшее внимание уделяется традиционным маркшейдерско-геодезическим и геофизическим измерениям, а вопросам визуального контроля подземных конструкций уделяется меньшее внимание. Также не рассматриваются возможности использования новых (альтернативных) технологий, в т.ч. основанных на методах лазерного сканирования и фотограмметрии.

В таблице 1.4 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

Таблица 1.4 – 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	-

На этапе выполнения регулярных работ по визуальному обследованию (мониторингу), специалистами выполняется сплошной визуальный осмотр конструкций. В качестве исходных данных для определения мест расположения и размеров дефектов служат дефектовочные схемы (карты дефектов), построенные по результатам предыдущего цикла наблюдений.

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 (мокрое пятно, выщелачивание, протечка, вынос грунта, скол бетона, оголение арматуры и пр.);
- 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).

1.4. Зарубежный опыт выполнения контроля за дефектами конструкций перегонных тоннелей

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.

Пространственные модели подземных сооружений используются для решения различных задач в области проектирования, эксплуатации и мониторинга геотехнических систем метрополитена.

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 [28-44].

Характерной особенностью зарубежных авторов является то, что выбор их исследований направлен на автоматизацию процесса обнаружения дефектов в следующей последовательности:

- сбор исходной геопространственной информации;
- обработка информации (3D и 2D планы);
- поиск дефектов с использованием нейронных сетей;

- определение геометрических размеров дефектов (параметров);
- подготовка отчета о выполненных работах.

1.4.1. Сбор исходной геопространственной информации

На первом этапе работ по исследованию внутренней поверхности перегонных тоннелей на предмет присутствия дефектов выполняется сбор исходной геопространственной информации. Технология сбора информации включает в себя использование методов фотограмметрии, лазерного сканирования, специальных ИК-камер. Для возможности сопоставить данные, полученные в разные промежутки времени, необходимо применять принцип единства измерений.

В качестве инструмента, выполняющим сбор информации в тоннельных сооружениях, выступают различные стационарные и передвижные комплексы, оснащённые различным оборудованием.

Современные технологические решения, базирующиеся на использовании специальных технических средств сбора пространственных данных, дают возможность применять роботизированные и мобильные платформы для изучения внутренней поверхности перегонных тоннелей метрополитена. Данные технические средства представляют собой рельсовую передвижную раму с закрепленным оборудованием [1].

1.4.2. Использование камер линейного сканирования

Авторами [32,33,39-41,44] были разработаны и испытаны системы линейного сканирования поверхности перегонных тоннелей с использованием камер линейного сканирования (CCD line-scan camera), отличительной особенностью которых является установленный за объективом плоский массив светочувствительных элементов, который оцифровывает сразу все изображение [1]. Выбор авторов обуславливается возможностью использования такого типа камер для непрерывных съемок с высокой скоростью сканирования и высоким разрешением.

Камеры линейного сканирования закрепляются на передвижных колесных платформах, такие как МТИ-100[39], МТИ-200а[39] и МТСИС[33] (Автоматическая система контроля поверхности тоннелей метро (Рисунок 1.6), которые разработаны для выполнения инспекции перегонных тоннелей диаметром 5,5 м [1]. Вышеописанные колесные платформы оснащаются шестью ССД камерами, что позволяет сканировать поверхность тоннеля с обзором примерно 290° (охват поверхности тоннеля без верхнего строения пути) [32,33,35,39,40,41,44].

Данные передвижные платформы позволяют выполнять непрерывное сканирование тоннелей. Для производства работ в условиях плохой освещенности используются светодиодные источники света. Во время производства работ мобильные платформы перемещаются вдоль оси тоннеля, линейные сенсорные камеры синхронно сканируют поверхность обделки построчно по сигналам, поступающим от энкодера. Благодаря непрерывной работе каждая камера получает цельные продольные изображения, имеющие зону перекрытия для возможности осуществления дальнейшей сшивки изображений в единую ЦКТ. Для удобства камеральной обработки полученных пространственных данных изображение с каждой камеры разделяется на меньшие по размеру [1,33,39].

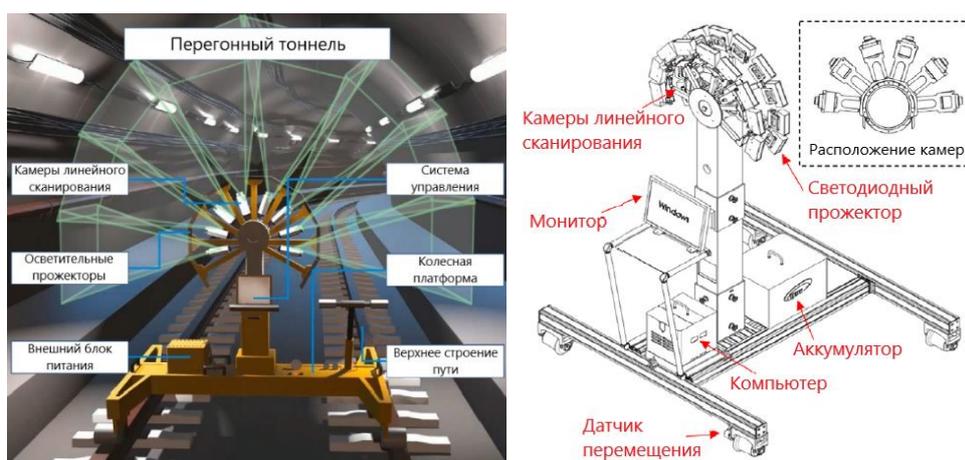


Рисунок 1.6 - Структура передвижной платформы МТСИС (слева) и МТИ-100, МТИ-200а (справа) (по материалам [33,39])

1.4.3. Использование LiDAR и MLS

Авторами [28,29,34,36,38,42,43] предлагается использование передвижных рельсовых платформ с закрепленным сканирующим и вспомогательным оборудованием. В качестве инструментария для сбора пространственных данных, исследователями используются лазерные сканеры производства фирм Faro, South, Leica и пр. На рисунке 1.7 показана мобильная сканирующая система Faro Focus X330, разработанная SGIDI (Шанхайский институт геотехнических исследований и проектирования) Engineering Consulting (Group) Co. Ltd [34].

Данные таких систем позволяют выполнять автоматический сбор пространственных данных. Датчик перемещения, закрепленный на мобильной платформе, определяет пройденное продольное расстояние. Для синхронизации лазерного сканера и датчика перемещения используется система управления [1,34].

Скорость передвижения мобильной платформы составляет 1,8 км/ч. Во время движения лазерный сканер производит съемку перпендикулярно направлению движения. Таким образом пространственная ориентация облака точек, следующая: ось Y направлена вдоль оси сооружения (значение координаты Y приближенно к нулю), координаты X и Z являются точками разреза тоннеля. Реконструкция пространственных измерений выполняется на основе данных о положении сканера и платформы [1,34].

Для определения пространственного положения мест водопроявления, авторами [28,29,34,36,38,42,43] предлагается использование данных облака точек, полученных с помощью мобильного лазерного сканирования [1,34].



Рисунок 1.7 - Структура мобильной сканирующей системы (слева) и процесс выполнения работ (справа) (по материалам [34])

1.4.4. Цифровые фотокамеры

Авторами [10] предложен метод 3D-реконструкции поверхности перегонного тоннеля с использованием методов фотограмметрии. Для реализации этого метода использовались цифровые фотоаппараты в тоннеле, обделка которого выполнена из железобетонных тубингов длиной 1,2 м. Съемка выполнялась каждый 1 метр в продольном направлении (Рисунок 1.8) [1,10].

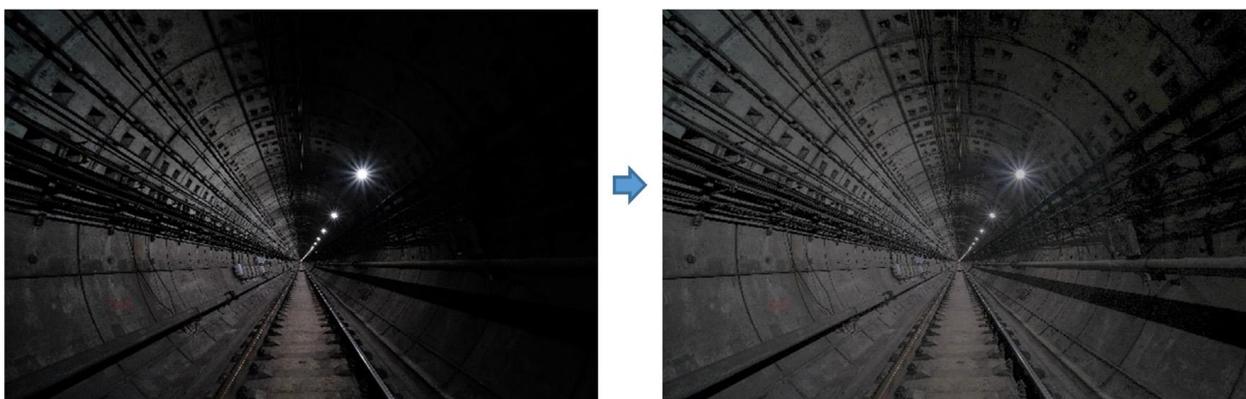


Рисунок 1.8 - Слева – фотоизображение перегонного тоннеля, полученное по результатам работ, справа – улучшенное фотоизображение в Lightroom Classic 10.1 [10]

В ходе исследований дополнительные осветительные приборы не использовались, что привело к различной степени освещенности тоннеля на фотоизображениях. Данная проблема решалась на этапе камеральной обработки результатов съемки. Программный комплекс Lightroom Classic 10.1 применялся для пакетного улучшения изображений. Готовые

изображения последовательно обрабатывались в ПО Agisoft Metashape: выравнивание снимков (получение облака связующих точек), построение плотного облака точек, полигональной модели и пространственной модели исследуемого участка (Рисунок 1.9) [1,10].

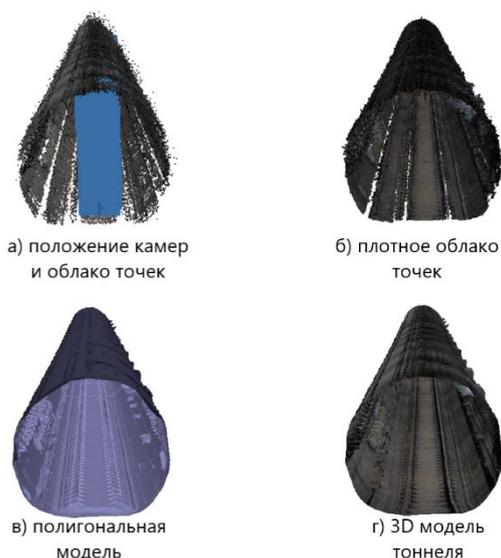


Рисунок 1.9 - Последовательность работ по обработке данных фотограмметрических работ в тоннеле (по материалам [10])

1.4.5. Использование гиперболической отражательной системы панорамной визуализации

Авторами [37] предложено использование гиперболоидной катадиоптрической панорамной системы визуализации на инспекционной платформе для получения большого поля зрения. Данная система включает в себя промышленную камеру Daheng Crystal с фокусным расстоянием 16 мм, 2/3-дюймовой CMOS-матрицей, размером пикселя 3,45 мкм и разрешением 2448×2048 . Камера калибруется с результирующими параметрами $R_{min} = 3,57$ мм и $f = 16,15$ мм. Вертикальный угол обзора $\theta_{max} = 90^\circ$, параметры гиперболического зеркала определены как $a = 64,31$ мм, $b = 47,58$ мм, фокусное расстояние = 160 мм и толщина = 15,69 мм. Поверхность зеркала покрыта светоотражающим слоем серебра/золота, а диаметр его отверстия установлен на уровне 80 мм [1,37].

Структура системы катадиоптрической панорамной визуализации (Рисунок 1.10) относительно проста благодаря низкими потерями световой

энергии. Данная система использует коническое зеркало для отражения окружающих объектов на 360° на датчик изображения, таким образом, получая панорамный вид горизонтального поля обзора в реальном времени. По сравнению с традиционными системами панорамной визуализации со сшивкой нескольких камер и системами панорамной визуализации, использующими объективы «рыбий глаз», катадиоптрическая система панорамной визуализации имеет преимущества в размере системы, структурной сложности и реалистичности изображения [1,37].



Рисунок 1.10 - Гиперboloидная катадиоптрическая панорамная система визуализации: 1 – инспекционная платформа; 2 – промышленная камера; 3 – гиперболическое зеркало [37]

На рисунке 1.11 показана принципиальная схема системы катадиоптрической панорамной визуализации, экранирующей яркий свет на выходе из тоннеля. Задняя сторона гиперболического зеркала обращена к выходу из тоннеля, а CMOS-датчик в данной системе производит сбор пространственных данных, отраженных от основной поверхности зеркала. Гиперболическое зеркало устроено таким образом, что свет через него не проходит, благодаря чему физически устраняются высокочастотные явления, с которыми сталкиваются обычные промышленные камеры или объективы типа «рыбий глаз» в тоннелях. Мощные осветительные приборы

освещают внутреннюю поверхность тоннеля позволяют добиться четкого панорамного изображения.

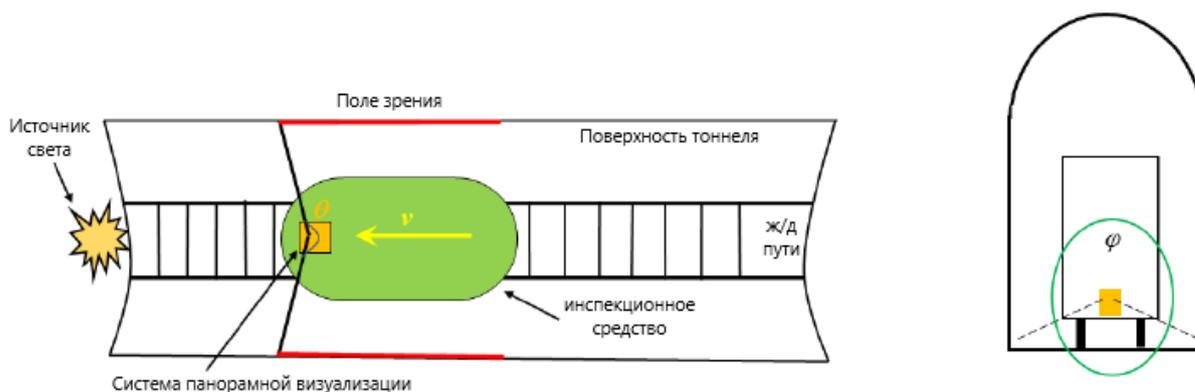


Рисунок 1.11 - Принципиальная схема катадиоптрической системы визуализации: φ – горизонтальный угол поля зрения более 180° ; θ - вертикальный угол поля зрения 360° [37]

1.4.6. Обработка информации

После сбора пространственных данных перегонного тоннеля они подвергаются камеральной обработке для дальнейшей подготовки их использования нейронными сетями. Конечным результатом работ в тоннелях, вне зависимости от выбранного технического средства для сбора пространственных данных, является виртуальное геоизображение внутренней поверхности перегонного тоннеля – цифровая карта тоннеля (ЦКТ). Поскольку внутренняя поверхность линейного сооружения имеет цилиндрическую форму она «разворачивается» на горизонтальную плоскость для удобства дальнейшей работы с ней (Рисунок 1.12) [1,41,42].

Обработка визуальной информации, полученной по результатам фотографирования как обычными камерами, так и камерами линейного сканирования выполняется в специальном программном обеспечении ПО Agisoft Metashape и аналогичные ему. Данные программные комплексы позволяют выполнить построение пространственной модели участка перегонного тоннеля, которая представляет собой плотное облако точек.

Дальнейшая обработка пространственной модели подразумевает трансформацию полученного облака точек в ЦКТ для дальнейшей возможности работы с пространственными данными. Полученная ЦКТ

используется для детектирования на ней визуальных дефектов (Рисунок 1.12) [41,42].

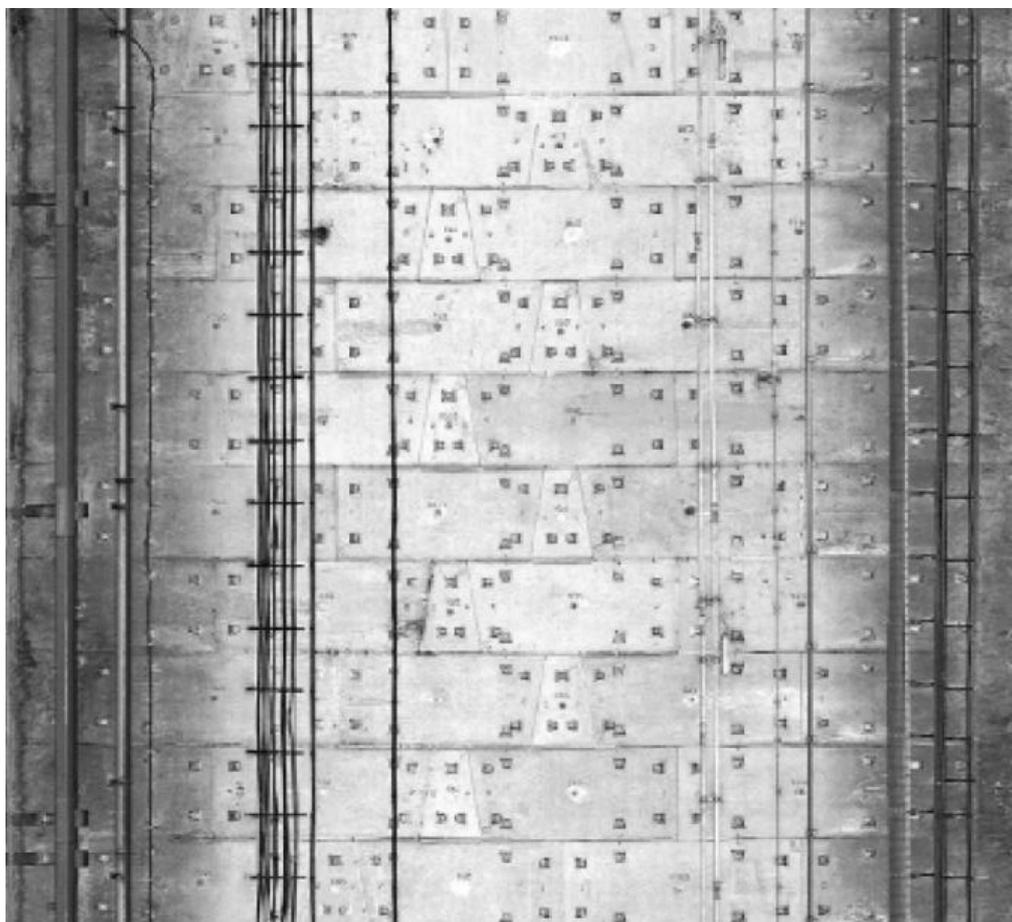


Рисунок 1.12 - Фрагмент ЦКТ перегонного тоннеля [41,42]

На рисунке 1.13 (x', y', z') – координаты в декартовой системе координат; (H, W) – оси условной системы координат развертки тоннеля [41].

$$x' = \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) * R \quad (1.1)$$

$$y' = y = H \quad (1.2)$$

$$z' = R \quad (1.3)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\left(W - \frac{P}{2}\right) * A}{R} \quad (1.4)$$

где P – общее количество пикселей изображения в направлении W ;

A – точность пикселя (0,3 мм/пиксель в исследовании [41]);

R – внутренний радиус обделки тоннеля [41].

Эти уравнения построены исходя из формы тоннеля, близкой к цилиндру.

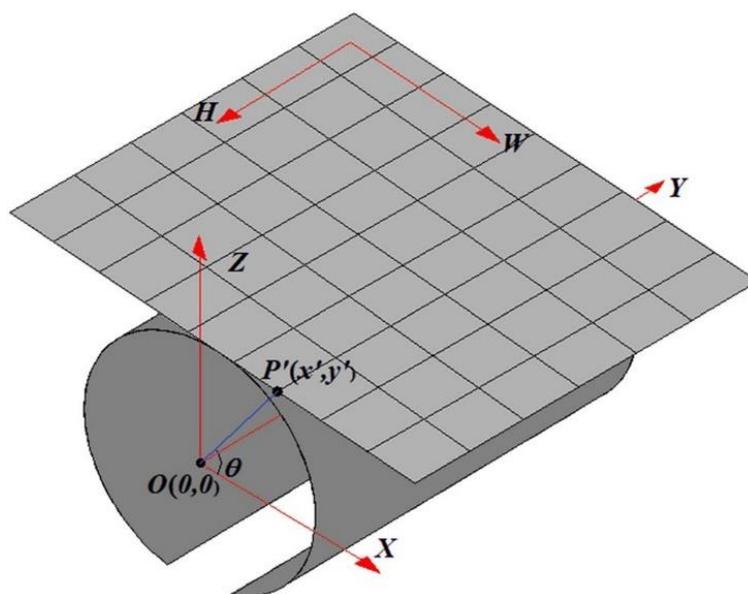


Рисунок 1.13 - Развертывание облака точек [41]

Процесс развертывания облака точек, полученных с применением мобильных лазерных систем аналогичен вышеописанной последовательности работ.

1.4.7. Автоматизация идентификации визуальных дефектов

Для повышения эффективности поиска и идентификации дефектов, проявляющихся на внутренней поверхности перегонных тоннелей, авторами [28-30,31-44] предлагается применение нейронных сетей. В качестве исходной информации для которых используется подготовленная ЦКТ [1].

Исследования в области использования методов глубокого обучения (Deep learning), особенно свёрточных нейронных сетей (CNN), в сочетании с другими методами обработки изображений, дают возможность автоматически обнаруживать дефекты, определять их геометрические

размеры и классифицировать по заранее заданным критериям. В настоящее время существует более 400 нейронных сетей, разработанных для задач классификации [1].

Выводы по главе

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- в настоящее время контроль за техническим состоянием перегонных тоннелей метрополитена в России выполняется без использования методов пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей;
- для сбора пространственных данных зарубежными исследователями используются специальные технические средства, в которых инструментарием для сбора пространственных данных являются системы лазерного сканирования и ССD-камеры;
- на основе полученных пространственных данных создаётся ЦКТ и выявляются на ней дефекты с использованием нейросетевых технологий.

К недостаткам использования *систем лазерного сканирования* стоит отнести ошибки, возникающие при съемке обводненных участков:

- поглощение и рассеивание лазерного луча водой приводит к снижению интенсивности отраженного сигнала;
- влияние отражения от обводненной поверхности;
- зависимость качества получаемых данных от прозрачности протечки;
- сложное и дорогостоящее производство.

Недостатками применения *промышленных ССD-камер* являются:

- высокое энергопотребление, что снижает автономность их использования;
- ограниченный динамический диапазон, из-за которого возникают сложности с передачей деталей затемненных и осветленных участков

исследуемой поверхности перегонного тоннеля. Полученные данные недостаточно контрастные;

- наличие «шума» при высоких значениях светочувствительности ISO влечет за собой снижение качества получаемых пространственных данных;
- сложное и дорогостоящее производство;
- сложность реализации функций автофокуса;
- отсутствие возможности стабилизации камеры влечет за собой искажения и снижение качества получаемых данных.

Также к недостаткам исследований зарубежных авторов [28-44] следует отнести отсутствие координатной привязки получаемых пространственных данных. Не рассмотрены исследования криволинейных участков перегонных тоннелей. Отсутствует методология зонирования ЦКТ всего перегонного тоннеля.

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 отделки 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.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что разработка новых методов выполнения работ по визуальному обследованию действующих перегонных тоннелей является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить безопасность эксплуатации перегонных тоннелей, увеличит производительность и полноту предоставляемой информации о текущем техническом состоянии подземных конструкций [45].

Следовательно, для решения этой задачи необходимо:

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.

Глава 2. СБОР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ

Сбор пространственных данных, на основе которых будет выполняться пространственное моделирование внутренней поверхности перегонного тоннеля, является важным и ответственным аспектом любой информационной системы, т.к. в ней содержится вся интересующая исследователей информация. Использование специальных технических средств повышает оперативность получения исходных пространственных данных требуемого качества и необходимой полноты.

В том случае, когда необходимо получить исходную информацию о наземном объекте (например, карьера), в качестве специальных технических средств используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с закрепленными на них различным оборудованием. В качестве исходных пунктов выступают закрепленные на поверхности опорные знаки, пространственная привязка которых осуществляется традиционными средствами геодезических или маркшейдерских измерений, а также спутниковыми определениями. Результатом работ является построенная цифровая модель исследуемой местности и её ортофотоплан, используемые в различных геоинформационных системах (ГИС) [46-49].

В нашем случае, объектами исследований являются перегонные тоннели Московского метрополитена, где отсутствуют сигналы со спутников. Поскольку фиксация дефектов обделки перегонных тоннелей выполняется на основе визуального поиска, то наилучшим методом автоматизации такого вида работ является фотограмметрический. Это обосновывается форматом исходных данных, представляющих собой цифровое графическое отображение внутренней поверхности перегонного тоннеля в момент выполнения съемочных работ. Итогом выполнения фотограмметрических работ является виртуальное цифровое геоизображение (ЦКТ), изучение которого будет схоже с работой в тоннеле, только в более комфортных условиях.

В отличие от наземных работ, в случае съёмок в подземных условиях, инженеры-фотограмметристы сталкиваются со следующими проблемами:

- линейность подземных сооружений;
- сбор пространственных данных в стесненных условиях;
- слабая освещенность;
- передвигающаяся по тоннелю техника;
- продольные искривления (спуски, подъемы и повороты различного радиуса).

К преимуществам выполнения работ в тоннеле можно отнести независимость от внешних погодных условий, таких как снег, дождь и пр.

Вышеописанные проблемы решаются использованием фотокамеры и дополнительного освещения, однако для достижения приемлемого качества ЦКТ, требуется соблюдение постоянства положения камеры, равномерную освещенность поверхности и пр.

Исходя из вышеизложенных требований, наиболее подходящим способом для сбора пространственных данных внутренней поверхности перегонного тоннеля, содержащих дефекты, является использование специального технического средства и методов наземной (ближней) фотограмметрии.

Эффективность использования фотограмметрических методов в тоннеле напрямую зависит от последовательности выполнения подготовительных работ и сбора пространственных данных:

1. **Подготовительный этап.** Уточнение участка работ. Получение допуска к конструкциям. Подготовка оборудования к работе. Выполнение калибровки камеры.
2. **Настройка оборудования** в тоннеле. Выполнение серии пробных фотоснимков для уточнения введенных характеристик фотографирования.

3. **Сбор пространственных данных.** Сплошная съемка исследуемого участка с соблюдением перекрытия смежных снимков.

4. **Предварительная обработка данных.** Подготовка и сортировка отснятого материала.

Для определения оптимального метода сбора пространственных данных в тоннеле были выбраны следующие критерии: качество, скорость и полнота съемки тоннеля.

Под качеством сбора пространственных данных понимается такая исходная информация, которая позволяет однозначно идентифицировать дефекты на обделке тоннеля, а также возможность выполнять точные пространственно-геометрические измерения.

Скорость фотограмметрических работ в тоннеле характеризуется возможностью использования данного метода не только на строящихся линиях, но и на действующих линиях метрополитена в ночное время, в период «технологического окна».

Полнота выполненных фотограмметрических работ должна включать в себя сбор пространственных данных всей исследуемой поверхности обделки тоннеля включая верхнее строение пути.

Конечным результатом фотограмметрических работ в тоннеле должна быть цифровая карта тоннеля (ЦКТ), которая является цифровым отображением внутренней поверхности перегонного тоннеля на горизонтальной плоскости, выполненным в текущий момент времени и содержащим в себе все имеющиеся дефекты [1].

Качество ЦКТ оценивают по следующим показателям [50]:

1. полнота – полнота объектного состава:

$$V_k = \frac{k_1 + k_2}{N} \times 100 \quad (2.1)$$

где: k_1 – абсолютное количество избыточно введенных объектов;

k_2 – абсолютное количество пропущенных объектов;

N – общее количество объектов в данной секции ЦКТ.

2. точность – точность положения объектов ЦКТ относительно МСК;
3. достоверность – правильность идентификации объектов;
4. топологическая корректность – характеристика векторных данных.

Для сбора пространственных данных внутренней поверхности перегонного тоннеля были апробированы три инструментария:

1. цифровой фотоаппарат;
2. панорамная фотокамера;
3. панорамная видеокамера.

Для выполнения 2 и 3 пунктов требуется разработка специального технического средства.

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.

2.1. Сбор исходной цифровой информации внутренней поверхности перегонного тоннеля с использованием цифрового фотоаппарата

Для проведения опытных испытаний, Московским метрополитеном был выделен участок построенного, но не введенного в эксплуатацию, перегонного тоннеля с внутренним диаметром $d=5400$ мм, длина участка исследований составила 120 метров. Верхнее строение пути, на момент исследований, не было обустроено.

Для определения участков, подверженным проявлениям таких деформаций, как протечка и выщелачивание, был выполнен визуальный осмотр конструкций. В связи с плохим освещением в тоннеле использовались осветительные приборы – фонарь с направленным лучом

света и переносной аккумуляторный прожектор для освещения большей по площади поверхности.

По результатам осмотра внутренней поверхности перегонного тоннеля выявлены и выбраны опытные участки со следами водопроявлений и выщелачивания.

При проведении фотограмметрических работ использовался следующий инструментарий:

- зеркальный фотоаппарат Canon 90D в комплекте со штативом;
- широкоугольный объектив с фиксированной диафрагмой Canon EF-S 17-55mm f/2.8 IS USM;
- внешняя вспышка TRIPOD TR-988.

Перед началом производства фотограмметрических работ в тоннеле были выполнены следующие настройки фотоаппаратуры:

- максимальное разрешение;
- минимальное значение ISO для снижения появления шумов на фотоизображениях;
- максимальные размеры диафрагмы для достижения максимальной глубины резкости;
- использование широкоугольного объектива (зафиксированное фокусное расстояние $f = 17$ мм, что соответствует углу обзора примерно в 100°);
- соблюдалось постоянство размеров и геометрия кадров.

Съемка отдельных участков перегонного тоннеля со следами водопроявлений выполнялась с одной точки стояния штатива (в продольном сечении выдерживалась середина длины тубинга, в поперечном сечении – над дренажным лотком). Съемка выполнялась в поперечной плоскости тубингового кольца (Рисунок 2.1). На каждое кольцо было сделано от 10 до 15 снимков. Центр фотографирования располагался ниже оси тоннеля, таким

образом, съемочные расстояния R от камеры до каждой исследуемой поверхности были различными.

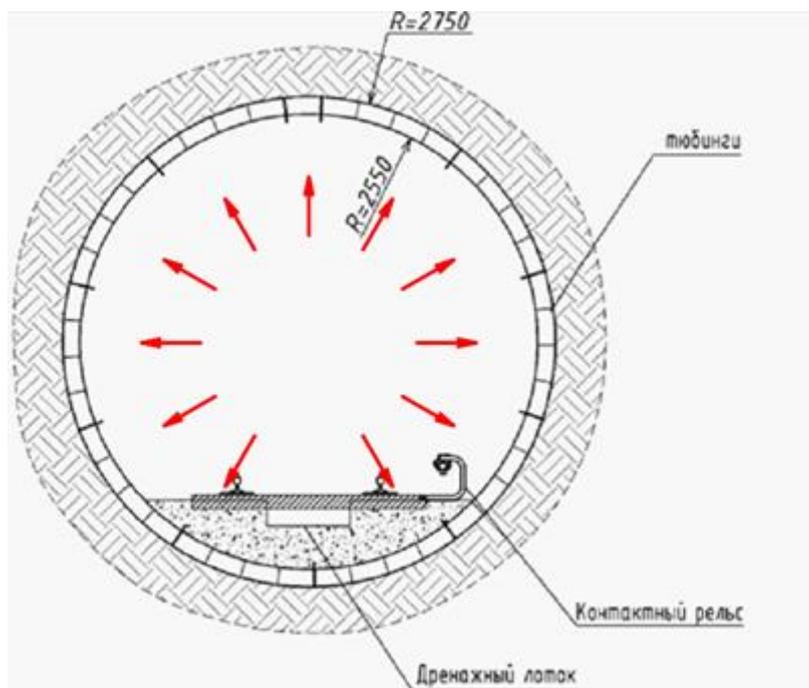


Рисунок 2.1 – Направления съемки поверхности тубинга с одной станции фотографирования

Ниже приведена формула вычисления съемочного расстояния:

$$R = \frac{(r + f)^2}{r} + e = \frac{f(M + 1)^2}{M} + e \quad (2.2)$$

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{r}{f} \quad (2.3)$$

где: f – фокусное расстояние;

r – величина удлинения;

e – интервал главной точки;

R – съемочное расстояние;

y – размер объекта;

y' – размер объекта на плоскости пленки;

M – увеличение.

Принципиальная схема указанных соотношений приведена на рисунке 2.2.

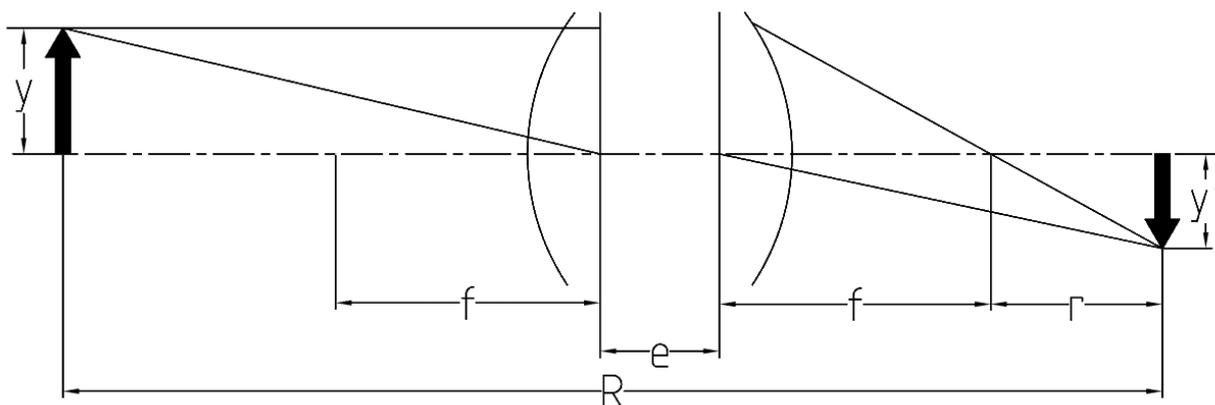


Рисунок 2.2 - Соотношение между фокусным расстоянием, величиной удлинения (общим удлинением) и увеличением

Время, необходимое на выполнение серии фотографий одного кольца и перехода к следующему, составляет:

$$t_{\text{сф}} = t_{\text{ф}} + t_{\text{пер.}} \quad (2.4)$$

где $t_{\text{ф}}$ – время съемки одного тубингового кольца,

$t_{\text{пер.}}$ – переход к следующей станции фотографирования.

На одно тубинговое кольцо, шириной 1.4 м, затрачивается не более 2 минут.

Построенный, но не введенный в эксплуатацию перегонный тоннель длиной один километр может быть отснят за 24 часа (!). Выполнение фотограмметрических работ с использованием цифрового фотоаппарата, ввиду больших трудозатрат, актуально только на локальных участках перегонного тоннеля. К недостаткам данного метода стоит отнести отсутствие пространственной привязки снимков и большие временные затраты.

2.2. Разработка и испытание специального технического средства

Для повышения производительности сбора пространственных данных в перегонном тоннеле метрополитена, требовалась разработка специального технического средства, которое должно отвечать следующим требованиям:

- конструкция на колесной раме для передвижения по рельсам;
- съемочный инструментарий должен закрепляться на оси тоннеля;

- наличие постоянных осветительных приборов;
- возможность съемки не только поверхности тубинговых колец, но и верхнего строения пути (ВСП);
- удобство монтажа-демонтажа;
- скорость съемки не менее 700 м/час.

Выполнив анализ поставленных требований, была разработана и сконструирована передвижная тоннельная фотостанция (ПТФС), которая позволяет выполнять сбор пространственных данных перегонного тоннеля с использованием панорамного инструментария [45].

Принцип работы ПТФС основан на использовании панорамных фотоизображений и методов наземной фотограмметрии. ПТФС с указанием компонентов представлена на рисунке 2.3 [45].

Основным инструментарием сбора пространственных данных в ПТФС является панорамная фотокамера, центр фотографирования которой располагается на оси тоннеля, благодаря чему достигается равенство съемочных расстояний до исследуемой обделки тоннеля [45].

После выполнения анализа представленных на рынке цифровых панорамных фотокамер и изучения их параметров [51-59], наиболее сбалансированной по цене и качеству съемки являются камеры производства фирмы Insta360 [60].

В исследованиях использовалась панорамная камера Insta360 X3 [60] (Рисунок 2.4), контроллером для которой может выступать iPhone/iPad и Android-смартфоны (камера управляется по Wi-Fi) с установленным приложением Insta360. Управление также может осуществляться при помощи кнопок и сенсорного дисплея на камере. Разрешение фото: Режим 360° – 6080 x 3040 (18 Мп); видео - Режим 360° – 5760×2880 (5.7К, 30/25/24fps). Вес камеры составляет 180 г [45].

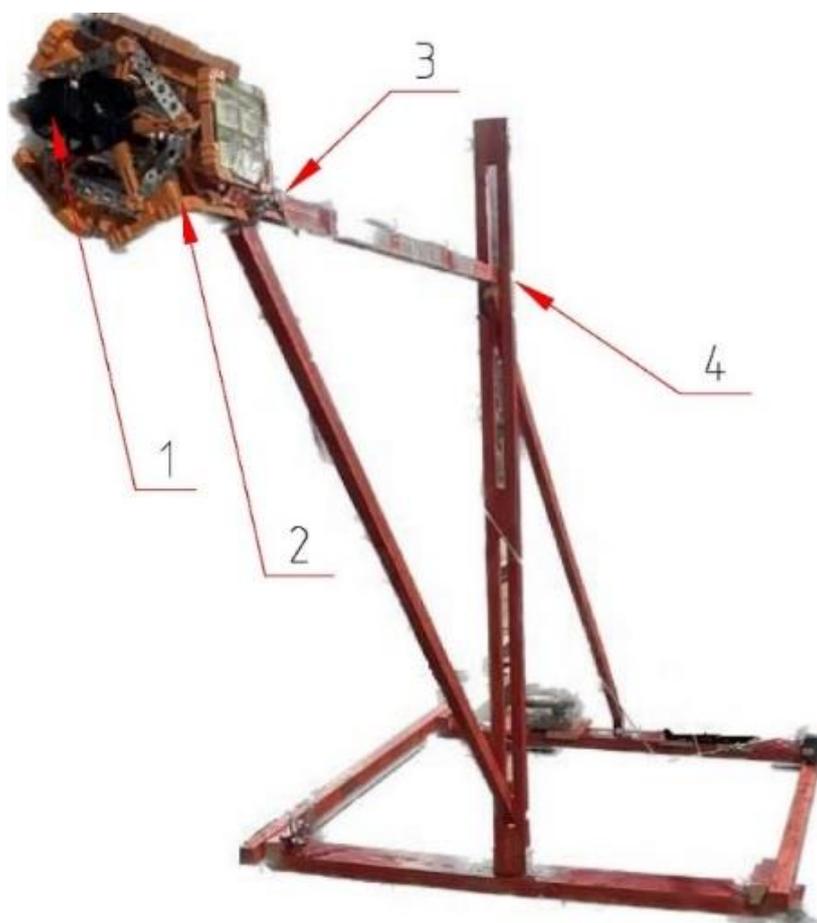


Рисунок 2.3 - Компоненты МРТС: 1 – панорамная фотокамера; 2 – светодиодные прожекторы; 3 – аккумулятор для питания осветительных приборов; 4 – опорная колесная рама



Рисунок 2.4 - Общий вид панорамной камеры Insta360 X3

Перемещение ПТФС осуществляется техническим специалистом, выполняющим сбор пространственных данных.

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. Вибрации, возникающие при передвижении ПТФС по рельсам, не влияют на качество съемки [45]. Благодаря современным технологиям отслеживания положения камеры в пространстве стабилизация работает плавно и без искажений исходных данных. Использование данной технологии позволяет не использовать дополнительные средства стабилизации. В режиме панорамной видеосъемки стабилизация применяется на этапе постобработки [60].

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. Осветительные элементы закреплены равноудаленно друг от друга. Угол рассеивания каждого прожектора составляет 120 градусов, что позволяет освещать поверхность тубинговых колец без теневых зон. В продольном сечении освещается поверхность 4-5 тубинговых колец (Рисунок 2.5), что соответствует участку тоннеля, длиной от 4 до 6 метров вдоль оси тоннеля в зависимости от загрязненности тубинговых колец (Рисунок 2.6) [45].

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 [45].

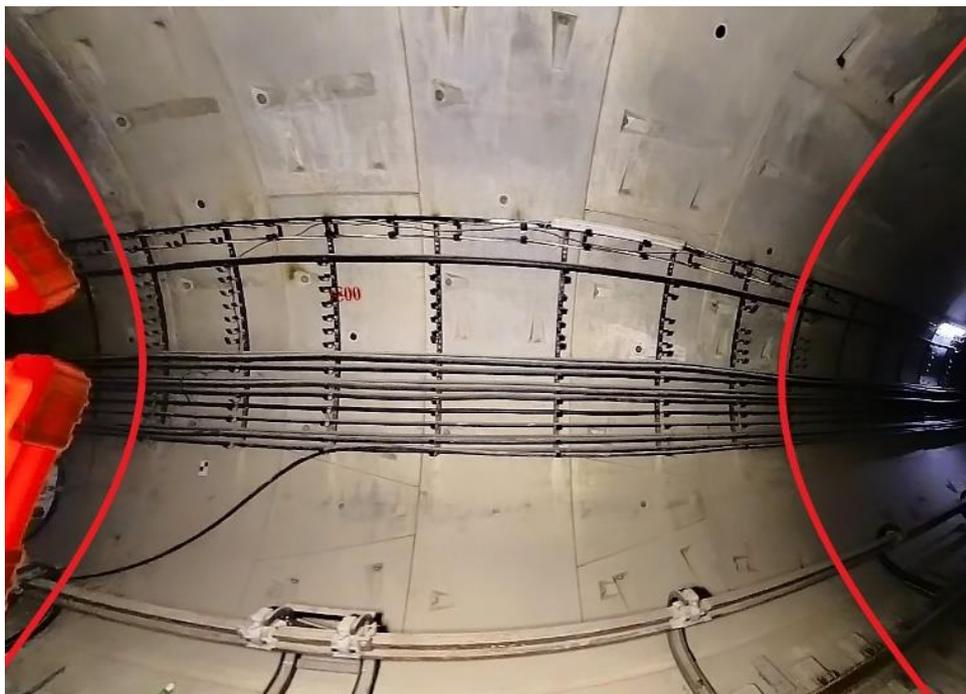


Рисунок 2.5 - Освещенный прожекторами ПТФС участок перегонного тоннеля с указанными светотеневыми границами (красные линии) [45]

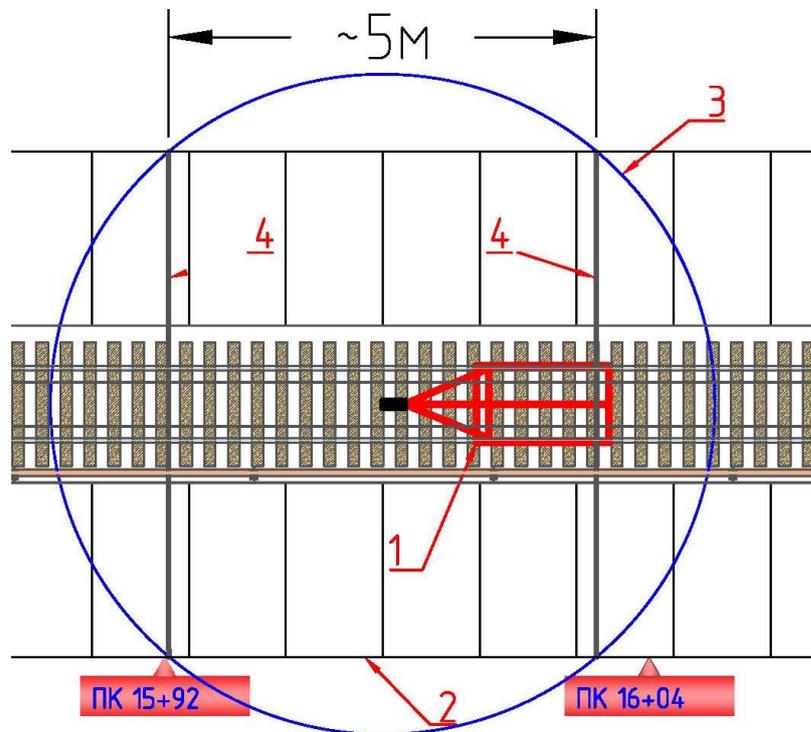


Рисунок 2.6 - Схема размещения специального технического средства в перегонном тоннеле: 1 – ПТФС; 2. – тубинговые кольца; 3 – радиус освещения; 4 – светотеневые границы [45]

Для обеспечения жесткости конструкции и минимизации продольного и бокового качения элементы рамы стянуты растяжками. На монтаж-демонтаж ПТФС затрачивается не более 10 минут, который можно выполнить на платформе станции метрополитена. ПТФС в транспортировочном положении занимает габаритное место размером 2,40*0,40*0,30м и весом около 20 кг [45].

2.3. Опорные точки для выполнения фотограмметрических работ в перегонном тоннеле

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 [61,62].

Координаты точек объекта и их изображений на снимке связаны векторным уравнением коллинеарности:

$$\bar{R} = \bar{R}_S + \bar{R} \quad (2.5)$$

или в координатной форме:

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'} \quad (2.6)$$

$$Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'} \quad (2.7)$$

где: X, Y, Z - координаты точки M в системе координат объекта;

X_S, Y_S, Z_S - координаты центра проекции S в системе координат объекта;

X', Y', Z' - координаты вектора r в системе координат объекта, которые определяются по формуле:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

где A - матрица преобразования координат (матрица направляющих косинусов), элементы c_{ij} которой определяются по значениям угловых элементов внешнего ориентирования снимка ω , α , κ [61,62].

С учетом последнего выражения уравнение коллинеарности примет вид [61,62]:

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{C_{11}(x - x_0) + C_{12}(y - y_0) - c_{13}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \quad (2.9)$$

$$Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{C_{21}(x - x_0) + C_{22}(y - y_0) - c_{23}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \quad (2.10)$$

Если известны элементы внешнего ориентирования снимка X_S , Y_S , Z_S , ω , α , κ и высоты точек Z , то можно определить координаты точек объекта [61,62].

Элементы внешнего ориентирования могут быть определены в результате фотограмметрической обработки снимков по опорным знакам, закрепленным на исследуемом объекте [61,62].

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 2.7). Матовый оттенок был выбран исходя из условий съемки, т.к. на глянцевой основе, при определенном угле обзора, отражаются осветительные приборы. На каждой СФГМ указывается его уникальный номер таким образом, чтобы

он был читаемым при определении его пространственного положения и на этапе камеральных работ.

В случае использования данных знаков в действующих тоннелях, на подготовку поверхности будет затрачиваться большее количество времени, т.к. во время его эксплуатации слой загрязнений постоянно увеличивается.

При выполнении регулярных фотограмметрических работ в перегонном тоннеле требуется установка СФГМ, выполненных в жестком и влагозащищенном исполнении (полимерные соединения), маркировку рекомендуется наносить лазерной гравировкой, монтаж осуществлять на химический анкер для низких нагрузок.

Размеры устанавливаемых знаков и общий вид закрепленной СФГМ на обделке тоннеля представлен на рисунке 2.7 [45].



Рисунок 2.7 - Установленная СФГМ на обделке тоннеля (слева) и её габаритные размеры (справа) [45]

Вторым видом используемого опорного знака является ТПВ, который устанавливается на уравненный пункт подземной маркшейдерской сети (Рисунок 2.8) [45].

Использование имеющихся пунктов, пространственное положение которых известно, в тоннеле целесообразно с точки зрения повышения производительности фотограмметрических работ. Однако в условиях плохой освещённости, запыленности и неизбежного загрязнения как самих пунктов

подземной маркшейдерской сети, так и их центров, их использование в качестве опорного знака при фотограмметрических работах затруднительно.

Поэтому при разработке ТПВ учитывались следующие требования для установки его на пунктах маркшейдерской сети: однотипность, вертикальность, видимость, контрастность с конструкциями верхнего строения пути и многоразовое использование.

Форма и размеры разработанного ТПВ отвечают необходимым требованиям: высота верхней точки, по отношению к основанию у всех ТПВ постоянна и составляет +50 мм, яркий цвет контрастирует с цветом конструкций перегонного тоннеля, после установки ТПВ на пункт подземной полигонометрии, его верхняя точка находится на отвесной линии, проходящий через центр пункта [45].

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 [45].

Ниже приведена последовательность приведения ТПВ в рабочее положение:

- центр полигонометрического знака (ПЗ) очищается от грязи и пыли (Рисунок 2.8, а);
- острое подпружиненного шпинделя-центрира упирается в углубление центра ПЗ (Рисунок 2.8, в);
- при помощи нижнего магнитного блока происходит закрепление ТПВ на ПЗ (Рисунок 2.8, г);
- при помощи накладного круглого уровня ТПВ приводится в рабочее вертикальное положение (Рисунок 2.8, д) [45].

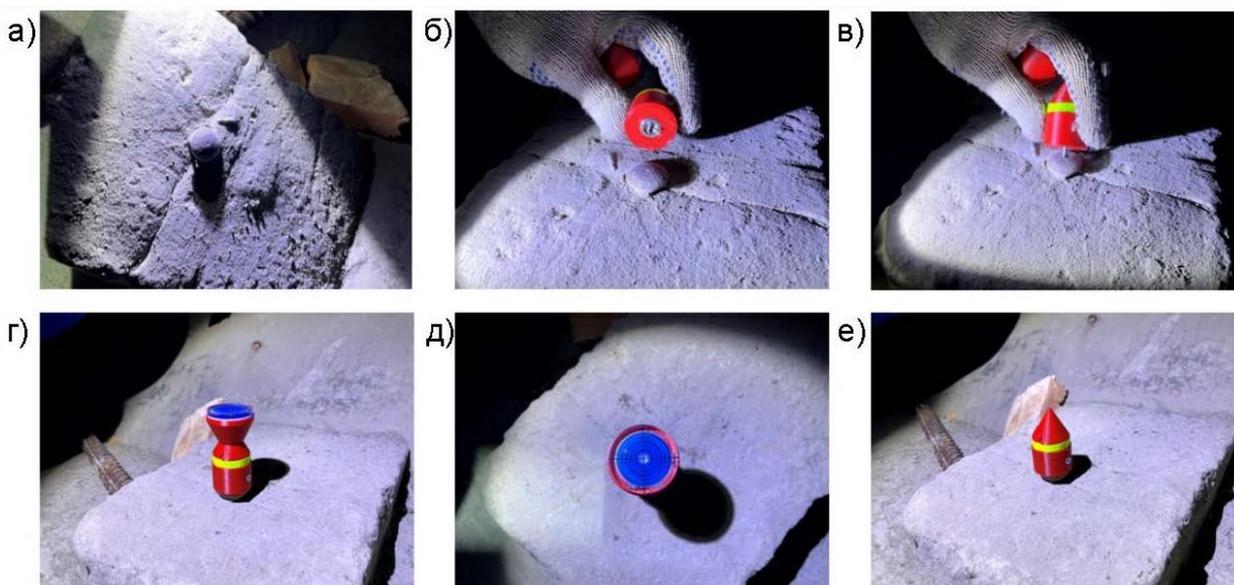


Рисунок 2.8 - Схема установленного ТПВ на пункте подземной полигонометрии: а) общий вид на центр полигонометрического знака; б) нижний магнитный блок ТПВ; в) подпружиненный шпатель-центрир; г) установка накладного круглого уровня; д) установка ТПВ в вертикальное положение по круглому уровню; е) общий вид установленного ТПВ [45]

2.4. Сбор пространственных данных на тестовом участке перегонного тоннеля

Опорные знаки служат для задания пространственно-ориентированного положения цифровой модели исследуемых конструкций перегонного тоннеля, для чего их планово-высотные координаты должны быть известны. Допускается использование местной или условной системы координат. Работы по координированию СФГМ и ТПВ допускается выполнять как до начала съёмочных работ в тоннеле, так и после их завершения [45].

В качестве инструментария для пространственной привязки опорных знаков рекомендуется использовать электронные тахеометры с точностью угловых измерений не более 2”.

Перед началом работ по сбору пространственных данных внутренней поверхности перегонного тоннеля с использованием ПТФС необходимо выполнить подготовительный комплекс мероприятий, заключающийся в

закреплении СФГМ и ТПВ при условии их видимости с расстояния не менее 5 метров [45].

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 конструкциях перегонного тоннеля [45].

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 [45].

Для определения необходимого и оптимального расстояния между связующими знаками, а также их количества в зависимости от длины тоннеля, выполнены измерения на построенном, но не введенном в эксплуатацию, участке перегонного тоннеля [45].

Для выполнения исследований в области применения фотограмметрических работ в перегонных тоннелях ГУП «Московский метрополитен» был выделен участок перегонного тоннеля Люблинско-Дмитровской линии между построенными, но не введенными в эксплуатацию станциями «Лианозово» и «Яхромская», со следующими параметрами:

- проектный внутренний диаметр $d_{\text{проектн.}} = 5.400$ м;
- тип отделки – сборная железобетонная;
- длина тубинговых колец – 1.2 м;
- состояние готовности тоннеля на момент выполнения работ – более 95%;
- круговые кривые отсутствуют;
- отрицательный уклон составляет 3‰.

Для исследований был взят участок, 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 2.9). На каждом кольце устанавливались СФГМ с двух сторон: одна со стороны дорожки для прохода персонала (Рисунок 2.10, а), вторая со стороны контактного рельса (Рисунок 2.10, б). Для удобства измерений и безопасного монтажа, были выбраны места под кабельными консолями. Монтаж СФГМ в этих местах позволит обеспечить требуемую видимость знаков и удобство работ [45].

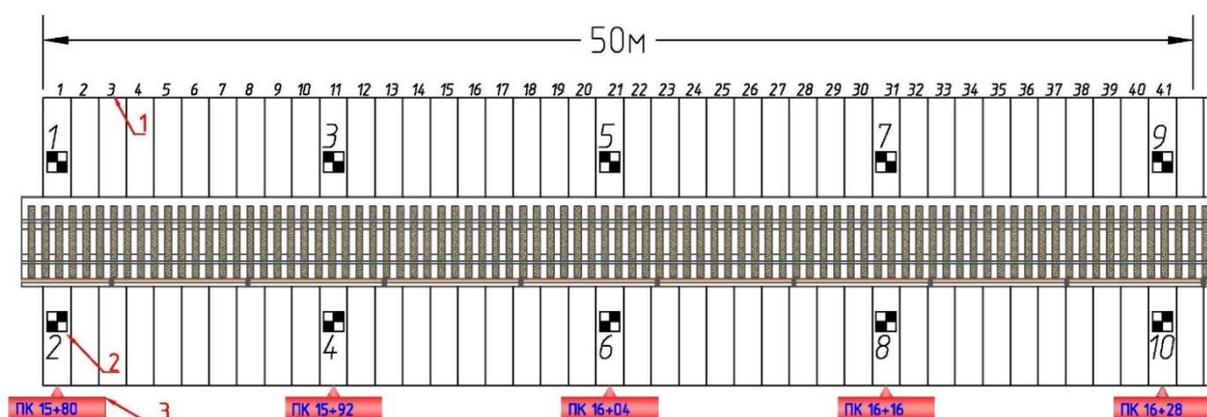


Рисунок 2.9 - Фрагмент установленных СФГМ на 50-метровом участке перегонного тоннеля: 1 – номер кольца исследуемого участка; 2 – СФГМ и её номер, 3 – пикетажное значение тюбингового кольца [45]

Пространственное положение СФГМ определялись в местной системе координат от урвненных пунктов маркшейдерской подземной сети путем проложения хода полигонометрии. Для измерений использовался электронный тахеометр Leica TS07 с точностью угловых измерений 1" и точностью линейных измерений – до 1 мм ± 1,5 ppm [45].

Координаты каждого опорного знака определялись дважды с разных станций стояния электронного тахеометра. После завершения линейно-угловых измерений они были урвнены в ПО Credo DAT.



Рисунок 2.10 - Места установки СФГМ на тубинговом кольце (обведены окружностями): а) со стороны дорожки для прохода персонала; б) со стороны контактного рельса [45]

Уравненные координаты всех СФГМ и ТПВ сохранялись в текстовом формате для дальнейшего импорта в ПО Agisoft Metashape и использовании при камеральной обработке в качестве точек пространственной привязки [45].

Суммарно на исследуемом участке предварительно было установлено 11 пар СФГМ и три ТПВ. Однако на практике работать с таким большим количеством опорных знаков трудоёмко. Требовалось определение минимального количества опорных знаков и их пространственное размещение на конструкциях тоннеля [45].

В ходе исследований учитывались требования как к полевым, так и к камеральным работам: минимизация трудозатрат, отсутствие искажений, удобство хранения и систематизация ЦКТ в соответствии с пикетажем тоннеля [45].

Процесс определения минимального и достаточного количества опорных знаков, закрепленных на конструкциях тоннеля, представлен в третьей главе.

2.5. Способы сбора исходных пространственных данных перегонного тоннеля с использованием ПТФС

Съемочным инструментарием, выполняющим сбор пространственных данных в ПТФС, является цифровая панорамная камера, работающая в двух основных режимах: фотосъемка (ПТФС-Ф) и видеосъемка (ПТФС-В).

Использование панорамных фотографий каждого тубингового кольца и ПТФС (ПТФС-Ф)

Съемочный инструментарий настраивался следующим образом: выбор режима фотографирования, настройка выдержки, диафрагмы и чувствительности камеры к свету (ISO) в зависимости от текущей освещенности перегонного тоннеля [63].

В виду того, что исследуемым объектом являются тубинговые кольца, то за станцию фотографирования был принят центр кольца в продольном и поперечном сечениях (Рисунок 2.11). В этом случае поверхность тубинга будет максимально приближена к оптической плоскости в момент экспонирования. Продольная ось фотографирования лежит на оси тоннеля, а поперечная по центру кольца.

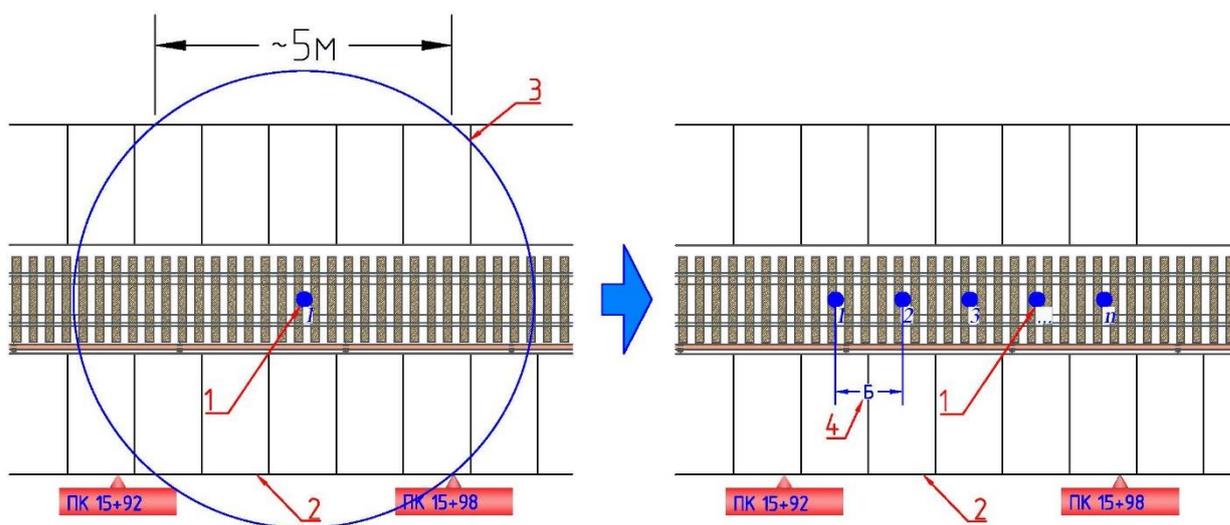


Рисунок 2.11 - Сбор пространственной информации внутренней поверхности перегонного тоннеля с использованием ПТФС-Ф: 1 – центр фотографирования и его номер; 2 – поверхность перегонного тоннеля; 3 – светотеневая граница; 4 – базис фотографирования

Взаимное перекрытие двух панорамных фотоснимков рассчитывается по формуле:

$$p_{x\Phi} = \frac{l_x * 100\%}{l} \quad (2.11)$$

где l_x – размер перекрывающихся частей снимка;

l – длина стороны снимка по направлению съемки [64].

Базис фотографирования соответствует продольной длине тубингового кольца. В зависимости от этой длины продольное перекрытие снимков будет соответствовать значениям, представленным в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Величины продольных перекрытий, в зависимости от длины тубингового кольца

Длина тубинга, l_T	Продольное перекрытие, p_x
1.0 м	≈ 87%
1.2 м	≈ 84%
1.4 м	≈ 81%

На съемку одного тубингового кольца, включая перемещение ПТФС к следующей станции фотографирования, затрачивается около 30 секунд. При выполнении непрерывных фотограмметрических работ, построенный, но введенный в эксплуатацию перегонный тоннель длиной 1.0 км, в зависимости от длины тубинга, может быть отснят за различные промежутки времени, представленные в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Затрачиваемое время на съемку 1 км трассы метрополитена, в зависимости от длины тубингового кольца

Длина тубинга, l_T	Затрачиваемое время работ в тоннеле, час
1.0 м	≈ 8.3
1.2 м	≈ 6.9
1.4 м	≈ 5.9

Полученные временные показатели говорят о больших трудозатратах при выполнении фотограмметрических работ в перегонном тоннеле, что делает затруднительным применение данного метода на действующих линиях метрополитена в период ночного «технологического окна».

Использование панорамных фотографий из видеоряда и ПТФС (ПТСФ-В)

Следующим этапом эксперимента являлось использование панорамного видеоряда в качестве исходных пространственных данных. Перед началом работ, как и в случае использования панорамных фотоизображений, требуется настройка параметров видеосъемки.

В данном режиме съемка выполняется непрерывно, скорость перемещения ПТФС составляет от 1 до 3 км/ч. Поддержание постоянной скорости не является обязательным условием выполнения сбора пространственных данных. Благодаря колесной рельсовой базе ПТФС плавно перемещается вдоль исследуемого участка перегонного тоннеля.

Базис фотографирования зависит от частоты разбиения видеоряда на отдельные фотоизображения в процессе камеральной обработки. Если в момент сбора пространственных данных скорость была высокой, то разбиение следует выполнять большим количеством кадров в секунду (например, 5 или 10 к/с) и наоборот. Базис фотографирования может составлять от 0.1 м до 0.3 м. Взаимное перекрытие отдельных панорамных фотоснимков, полученных из видеоряда, будет составлять от 96% до 99%.

На съемку 120-метрового участка перегонного тоннеля при скорости 1.5 км/ч было затрачено 5 минут. В случае набора скорости до 3 км/ч, данный участок может быть отснят за 2.5 минуты.

Исходя из полученной скорости и времени работ в перегонном тоннеле можно сделать вывод, что на 1 км ориентировочно будет затрачено 0.5 часа, что в условиях выполнения работ в период ночного «технологического окна» является наиболее подходящим с точки зрения оперативности и полноты получаемых пространственных данных.

Выводы по главе

Выполнение работ в построенных, но не введенных в эксплуатацию перегонных тоннелях не ограничивает специалистов во времени, однако на действующих линиях Московского метрополитена работы можно выполнять исключительно в ночное время – период технологического окна.

В Московском метрополитене средняя длина перегона между станциями составляет 1.77 км. В настоящее время самым длинным перегонном является участок между станциями «Крылатское» и «Строгино» - около 6.5 км [65,66].

При скорости 3 км/ч и продолжительности технологического окна 2.5 часа, использование ПТФС-В позволит выполнить съемку самого длинного перегона в Москве.

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

Глава 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ

Современные подходы к созданию цифровых карт внутренней поверхности перегонных тоннелей выполняются на основе пространственного моделирования.

В общем случае, пространственное моделирование – это процесс создания и использования компьютерных моделей для анализа и прогнозирования развития пространственных явлений, который базируется на использовании геоданных [68-72].

Цифровая карта местности (ЦКМ) – это электронная модель земной поверхности, которая содержит информацию о рельефе, гидрографии, растительности, населенных пунктах и других объектах. Она широко используется во многих сферах деятельности благодаря своей точности и удобству использования [73-78].

В картографии цифровая карта играет ключевую роль как основа для создания, хранения, обработки и визуализации геопространственных данных. Цифровые карты отличаются от традиционных бумажных тем, что они позволяют работать с большим объемом информации, легко обновлять данные и предоставлять интерактивный доступ к различным слоям информации [50,75-78].

Основные аспекты применения цифровой карты в картографии является создание и обновление карт, а также использование в различных ГИС.

Создание и обновление карт. Цифровое картографирование позволяет создавать карты высокой детализации и точности. Данные могут быть получены различными способами, включая спутниковые снимки, аэрофотосъемку, лидарную съемку и другие методы дистанционного зондирования Земли. Это дает возможность оперативно обновлять карты по мере изменения ландшафта, строительства новых объектов или изменения границ.

Геоинформационные системы. Цифровые карты являются основой для работы ГИС, которые позволяют объединять различные слои информации (например, рельеф, дороги, населенные пункты, экологические зоны), что делает их мощным инструментом для анализа и принятия решений.

В настоящее время цифровая карта стала неотъемлемой частью современной картографии, предоставляя мощные инструменты для сбора, анализа и представления геопространственной информации. Ее преимущества включают высокую точность, гибкость, интерактивность и удобство использования, что делает ее незаменимой в самых разнообразных приложениях – от планирования городских районов до управления природными ресурсами.

Отличием и осложняющим фактором построения ЦКТ метрополитена 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.

При выполнении камеральной обработки протяженного участка перегонного тоннеля возникают сложности, связанные с постоянной пространственной изменчивостью конструкций тубинговой обделки. При построении единой ЦКТ всего перегонного тоннеля (в среднем 1.77 км), полученный результат будет содержать ошибки и искажения, что затруднит её дальнейшее использование.

Для обеспечения возможности построения ЦКТ всего перегонного тоннеля необходимо выполнение следующих условий:

- возможность применения метода сбора пространственных данных на действующих линиях метрополитена (в период «технологического окна»);
- оптимальное использование существующих пунктов планово-высотного обоснования в тоннеле (путевые репера);

- на ЦКТ не должны присутствовать линейные и площадные искажения;
- определение критериев разделения ЦКТ на отдельные интервалы;
- удобство хранения и систематизация интервалов ЦКТ в соответствии с пикетажем тоннеля;
- определение минимального и достаточного количества опорных знаков;
- качество получаемой ЦКТ должно обеспечивать возможность её всестороннего изучения различными специалистами ГУП «Московский метрополитен».

Для выполнения этих условий в данной главе рассматриваются выбор оптимального метода пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей, которая включает в себя подготовку пространственных данных, создание ЦМТ и ЦКТ, а также применение нейронных сетей для распознавания образов визуальных дефектов на ЦКТ.

3.1. Подготовка пространственных данных

Во второй главе рассмотрен процесс сбора пространственных данных с использованием цифровой кадровой камеры и ПТФС на тестовом прямолинейном участке длиной 120 метров, включающий установку и использование опорных знаков, уравненные координаты которых определены в местной системе координат.

Цифровые данные, полученные техническими средствами, обладают различным качеством изображения поверхности обделки перегонного тоннеля. Фотоизображения плохого качества будут негативно влиять на все последующие камеральные работы, поэтому перед камеральной обработкой материалов съемки требуется проверить их фотограмметрическое качество, выполняемое по следующим критериям:

- оценивание резкости изображений, отсутствие деформированных (смазанных) областей;

- продольные и поперечные перекрытия должны быть не менее 70%;
- маршрут съемки должен быть проложен по оси тоннеля с отклонениями не более 0.1 м.

Различные инструментарии располагают функцией автоматической оценки качества, при которой фотоизображения с параметром качества меньше 0.5 (см. формулу 2.1) будут рекомендовано заблокировать. Оценка качества основана на сравнении параметров текущего фотоизображения с соответствующими параметрами других фотоизображений в загруженном наборе [79].

В случае соответствия материалов съемки предъявленным требованиям приступают к их подготовке для построения цифровой модели тоннеля (ЦМТ) и далее ЦКТ, скорость и качество камеральных работ напрямую зависят от корректно подготовленных материалов фотограмметрических работ.

Камеральная обработка пространственных данных подразумевает использование специализированных программных комплексов, в которые загружаются подготовленные исходные данные. Для обеспечения единообразной обработки пространственных данных требуется выбор и обоснование программного обеспечения, а также определить алгоритм подготовки как плоских, так и панорамных фотоизображений для построения ЦМТ.

3.1.1. Выбор и обоснование инструментария для камеральной обработки пространственных данных

При выборе программного обеспечения, в котором будет выполняться построение ЦКТ, внимание уделялось его возможностям использования форматов исходных данных, которые были получены в ходе сбора пространственных данных в перегонном тоннеле: плоские и панорамные фотоизображения.

В настоящее время разработано достаточно большое количество программных продуктов, выполняющих камеральную обработку пространственных данных, полученных при выполнении фотограмметрических работ. Наиболее популярными являются ПО Agisoft Metashape (Россия), Pix4D (Швейцария), ТИМ КРЕДО 3D СКАН и ФОТОГРАММЕТРИЯ (Белоруссия), RealityCapture (Словакия); ContextCapture (США), Photomodeler Scanner (Канада), DatuGram3D (Израиль) и др. В ходе анализа представленных программных продуктов установлено, что единственным профессиональным программным обеспечением, поддерживающим вышеописанные фотоизображения в качестве источника входных данных, является ПО Agisoft Metashape [80-95].

Для камеральной обработки полученных пространственных данных использовалось ПО Agisoft Metashape. В общем случае, вне зависимости от типа фотоизображений, камеральная обработка в данном ПО выполняется в следующей последовательности:

- загрузка фотографий (для каждого участка создается отдельная папка);
- просмотр и проверка загруженных фотографий, в случае необходимости, удаление невостребованных кадров;
- импорт уравненных координат опорных точек;
- размещение на фотоизображениях проекций опорных точек;
- построение облака связующих точек;
- удаление ошибочно выявленных связующих точек;
- построение плотного облака точек;
- удаление ошибочно построенных участков;
- построение трехмерной полигональной модели;
- построение цифровой пространственной модели;
- построение ЦКТ;
- экспорт результатов в формате jpg [79].

Перед началом камеральных работ необходимо выполнить калибровку объектива камеры, которая позволяет рассчитать полную калибровочную матрицу, включая коэффициенты тангенциальной дисторсии [79].

Калибровка камеры – один из этапов создания пространственной модели, на котором определяются внутренние и внешние параметры, влияющие на ошибку в определении местоположения исследуемых объектов. Калибровка важна, так как позволяет связать параметры фотокамеры (кадровой или панорамной) с параметрами перегонного тоннеля в пространстве. Кроме того, связь между измерениями камеры (пикселями) и значениями фактических конструкций (метрами) очень важна при восстановлении структуры трехмерной модели [79].

ПО Agisoft Metashape поддерживает автоматическую калибровку объектива, которая может гарантировать, что возникшая из-за действия оптической системы линз объектива дисторсия качественно описывается моделью камеры, внесенной в алгоритм программного обеспечения. В качестве целевой калибровочной таблицы в ПО Agisoft Metashape используется рисунок в виде шахматной доски на ЖК-экране (Рисунок 3.1), также можно использовать напечатанный рисунок шахматной доски, при условии, что он плоский и все его ячейки квадратные. Процедура калибровки объектива обеспечивает полную оценку параметров матрицы камеры, включая коэффициенты нелинейных искажений [96,97].

В виду того, что при выполнении сбора пространственных данных в перегонном тоннеле, съемочные расстояния не превышают 6 метров, то рекомендуется использовать данный способ калибровки. Для вычисления наилучших показателей рекомендуется соблюдать съемочные расстояния до калибровочной таблицы такие же, как и до исследуемой поверхности перегонного тоннеля. В этом случае для кадровой фотокамеры принимаются расстояния от 2 до 4 метров, а для панорамной фотокамеры - от 2 до 6м.



Рисунок 3.1 - Калибровочная таблица, представленная на ЖК-экране [96]

При выполнении снимков калибровочной таблицы соблюдалось требуемое расстояние, и для каждого фокусного расстояния было выполнено не менее трёх снимков.

ПО Agisoft Metashape поддерживает несколько моделей дисторсии объективов. Перед началом обработки следует выбрать модель, наилучшим образом аппроксимирующую реальную дисторсию. Все модели действуют для камеры с центральной проекцией. Для описания нелинейных дисторсий кадровой камеры применяется модель Брауна [79].

Модель дисторсии описывает трансформацию координат точки в локальной системе координат камеры в координаты в пикселях кадра (сенсора). Начало координат локальной системы координат камеры находится в центре проецирования камеры. Ось Z указывает в направлении взгляда, ось X направлена вправо, ось Y – вниз [79].

Начало системы координат кадра (сенсора) находится в верхнем левом пикселе кадра, координаты центра которого $(0.5, 0.5$ пикс). Ось X направлена вправо, ось Y – вниз (Рисунок 3.2). Координаты кадра измеряются в пикселях [79].

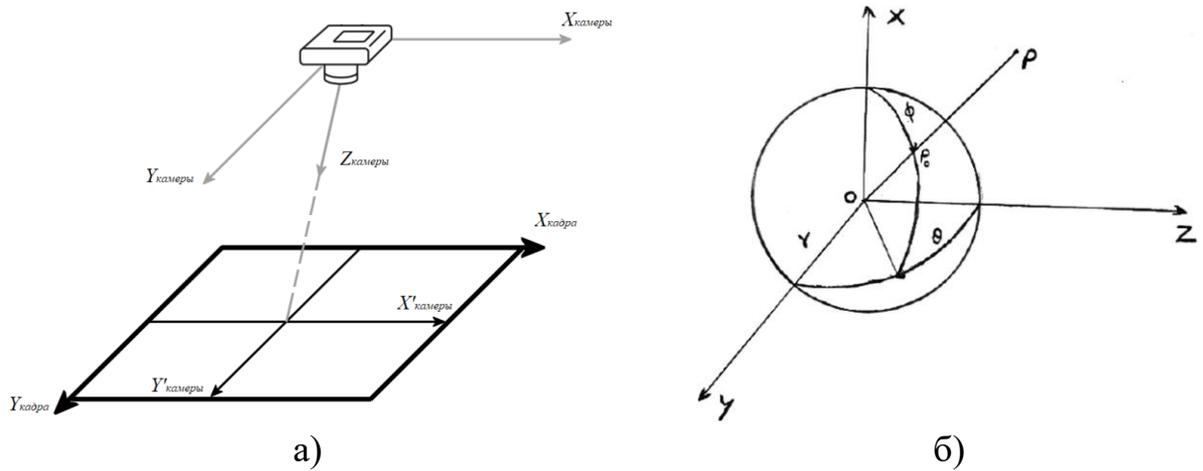


Рисунок 3.2 - Системы координат камеры и сенсора (кадра): а) кадровая камера; б) панорамная камера (по материалам [79])

Для расчета проекций точек локальной системы координат камеры на плоскость кадра для каждой из поддерживаемых моделей дисторсии используются следующие уравнения [79]:

Для кадровой камеры

$$x = \frac{X}{Z}, \quad y = \frac{Y}{Z}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.1)$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy) \quad (3.2)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy) \quad (3.3)$$

$$u = w * 0.5 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2 \quad (3.4)$$

$$v = h * 0.5 + c_y + y'f \quad (3.5)$$

Для панорамной сферической камеры (равнопромежуточная проекция)

$$u = w * 0.5 + f * tg^{-1} \frac{X}{Z}, \quad (3.6)$$

$$v = h * 0.5 + f * tg^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \right), \quad (3.7)$$

$$f = \frac{w}{2\pi}, \quad (3.8)$$

где (X, Y, Z) - координаты точки в локальной системе координат камеры;

(u, v) - координаты точки, в проекции на плоскость кадра (в пикселях);

f - фокусное расстояние (в пикселях);

c_x, c_y - смещение кардинальной точки (в пикселях);

K_1, K_2, K_3, K_4 - коэффициенты радиальной дисторсии (безразмерные величины);

P_1, P_2 - коэффициенты тангенциальной дисторсии (безразмерные величины);

B_1, B_2 - коэффициенты аффинитета и неортогональности (в пикселях);

w - ширина кадра в пикселях;

h - высота кадра в пикселях [79].

Снимки калибровочного изображения должны быть загружены в ПО Agisoft Metashape перед запуском процедуры калибровки объектива [79].

Благодаря встроенному в ПО Agisoft Metashape инструментарию, позволяющему рассчитывать параметры калибровки автоматически на этапе выравнивания фотографий, то процедура калибровки объектива не всегда является обязательной, что служит дополнительным удобством при камеральной обработке [79].

Выбор типа камеры «сферическая» (равнопромежуточная проекция) является достаточным условием для того, чтобы программа рассчитала элементы ориентирования снимков [79].

3.1.2. Подготовка пространственных данных, полученных при помощи кадровой цифровой фотокамеры

В исследованиях с использованием кадровой цифровой фотокамеры были получены плоские фотоизображения обделки перегонного тоннеля. Работы на исследуемом участке тоннеля подразумевали последовательную съемку нескольких колец (от 3 до 5) со следами водопроявлений.

Подготовка собранных пространственных данных, полученных при помощи кадровой цифровой фотокамеры, заключается в сортировке отснятого материала по принадлежности к тюбинговым кольцам.

В отличие от других способов сбора пространственных данных (которые представлены ниже) и дальнейшей обработки, при использовании кадровой цифровой фотокамеры они не подвергаются дополнительным трансформациям, так как они уже представлены в требуемом формате для загрузки в ПО Agisoft Metashape.

3.1.3. Подготовка пространственных данных, полученных при помощи панорамной фотокамеры

Перед началом камеральной обработки полученных фотоизображений необходимо перенести собранные данные на ПК и выполнить предварительную подготовку для загрузки их в ПО Agisoft Metashape.

В зависимости от способа сбора пространственных данных исходные «сырые» файлы имеют различный формат:

- ПТФС-Ф – панорамные изображения формата «.insp»;
- ПТФС-В – панорамный видеоряд формата «.insv».

Без обработки панорамные фотоизображения и видеоряд представляют собой отснятый участок перегонного тоннеля двумя объективами «рыбий глаз» (Рисунок 3.3, а) [98].

ПО Agisoft Metashape поддерживает панорамные фотоизображения в качестве исходных данных, формат которых должен быть трансформирован в эквидистантную (равнопромежуточную) проекцию [98].

Эквидистантная проекция корректно отражает расстояния от центра проекции (станции фотографирования) до любой точки на обделке тоннеля и позволяет выполнять точные измерения расстояний. Горизонтальное растяжение, как следствие, увеличивается от центра проекции к краям панорамы (к своду и лотку тоннеля), так что эти области оказываются растянуты на всю верхнюю и нижнюю границы плоской сетки, соответственно (Рисунок 3.4) [98-100].

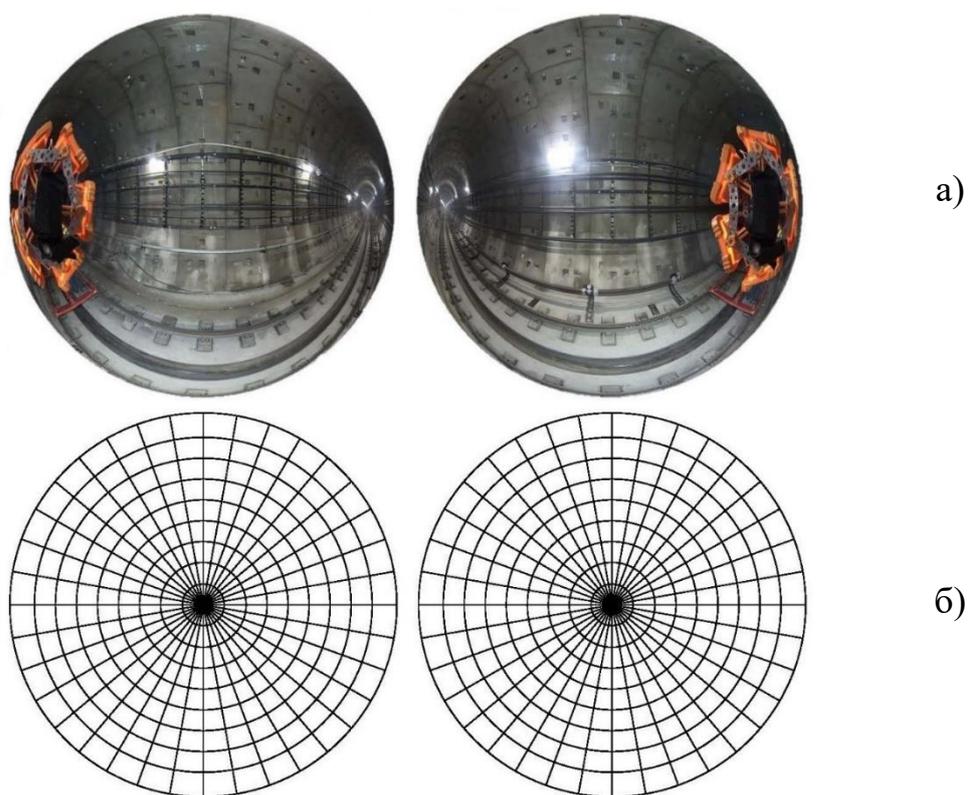


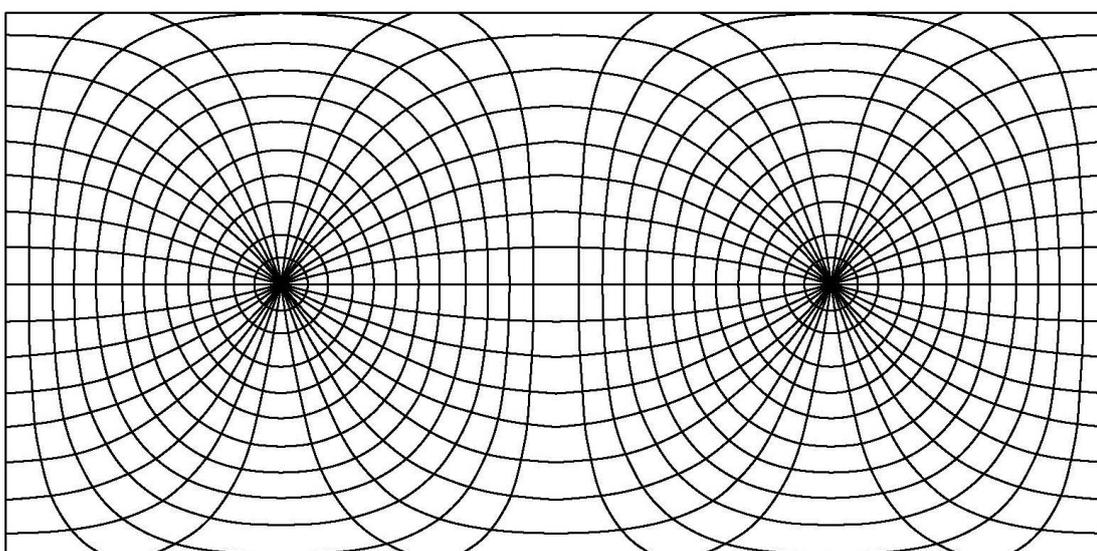
Рисунок 3.3 – Исходные данные: а) необработанная пара фотоизображений «рыбий глаз»; б) геометрическое отображение видимой части объективов [98]

Трансформирование исходных данных выполняется в программе Insta360 Studio, которая позволяет сохранять данные форматов панорамных фотоснимков «.insp» и панорамного видеоряда «.insv» в эквидистантной проекции (Рисунок 3.4) [101, 98].

В инструментарии Adobe Premiere Pro панорамный видеоряд в эквидистантной проекции разделяется на отдельные кадры [102,103]. В зависимости от скорости перемещения ПТФС в тоннеле, частоту разбиения рекомендуется устанавливать от 1 до 10 кадров в секунду. Полученные панорамные фотоизображения будут идентичны тем, которые были получены в ходе одиночного панорамного фотографирования [98].



а)



б)

Рисунок 3.4 - Трансформированные исходные данные:

- а) фотоизображение перегонного тоннеля, подготовленное в эквидистантной проекции;
- б) геометрическое отображение эквидистантной проекции [98]

После подготовки всех исходных данных они загружаются в ПО Agisoft Metashape для построения ЦМТ и ЦКТ. Последовательность выполнения трансформации исходных пространственных данных приведена на рисунке 3.5 [98].

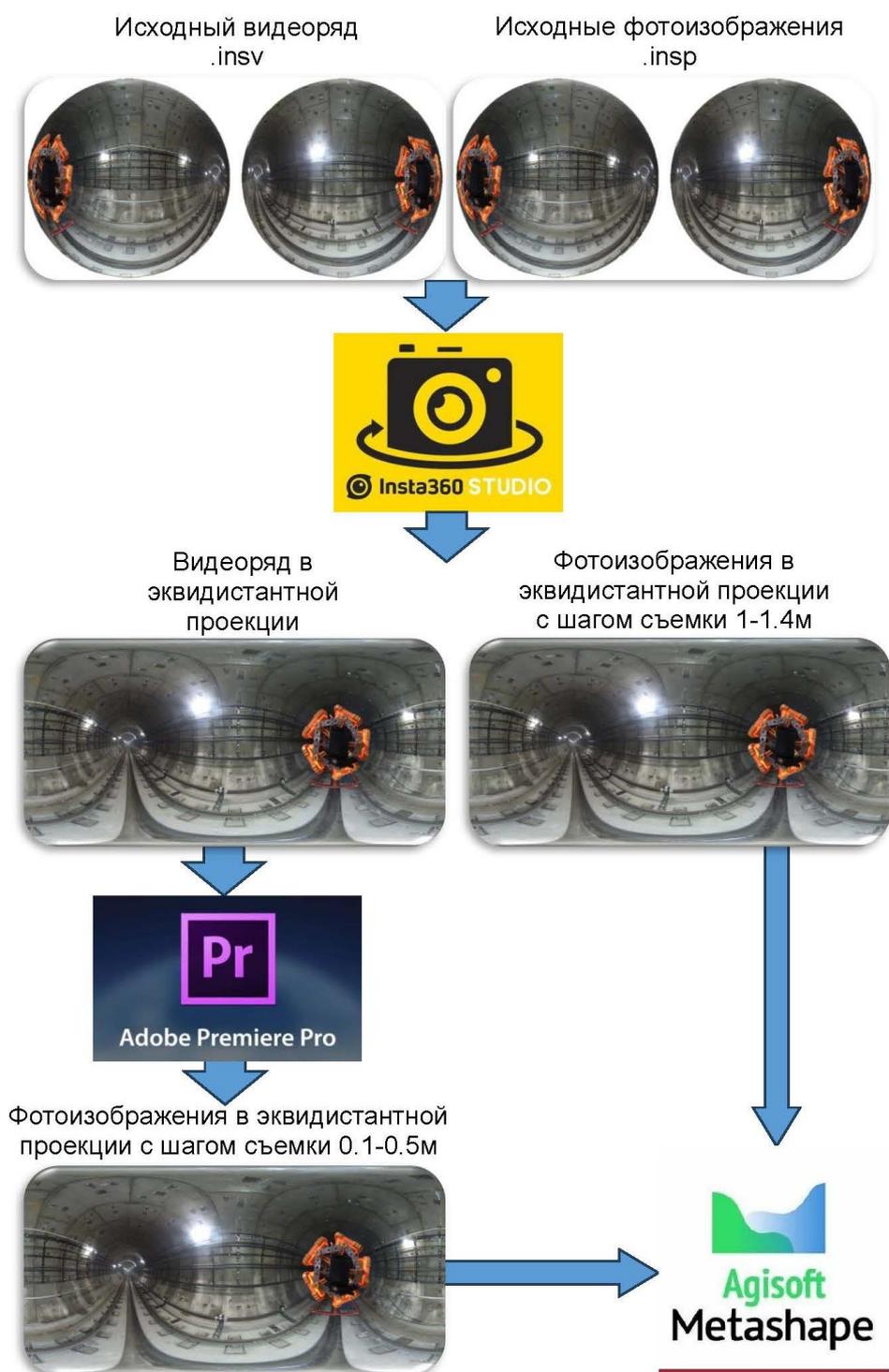


Рисунок 3.5 - Последовательность трансформации исходных пространственных данных

[98]

3.2. Создание ЦМТ

После подготовки пространственных данных они загружаются в ПО Agisoft Metashape для последующей обработки и построения ЦМТ и ЦКТ (Рисунок 3.6) [98].

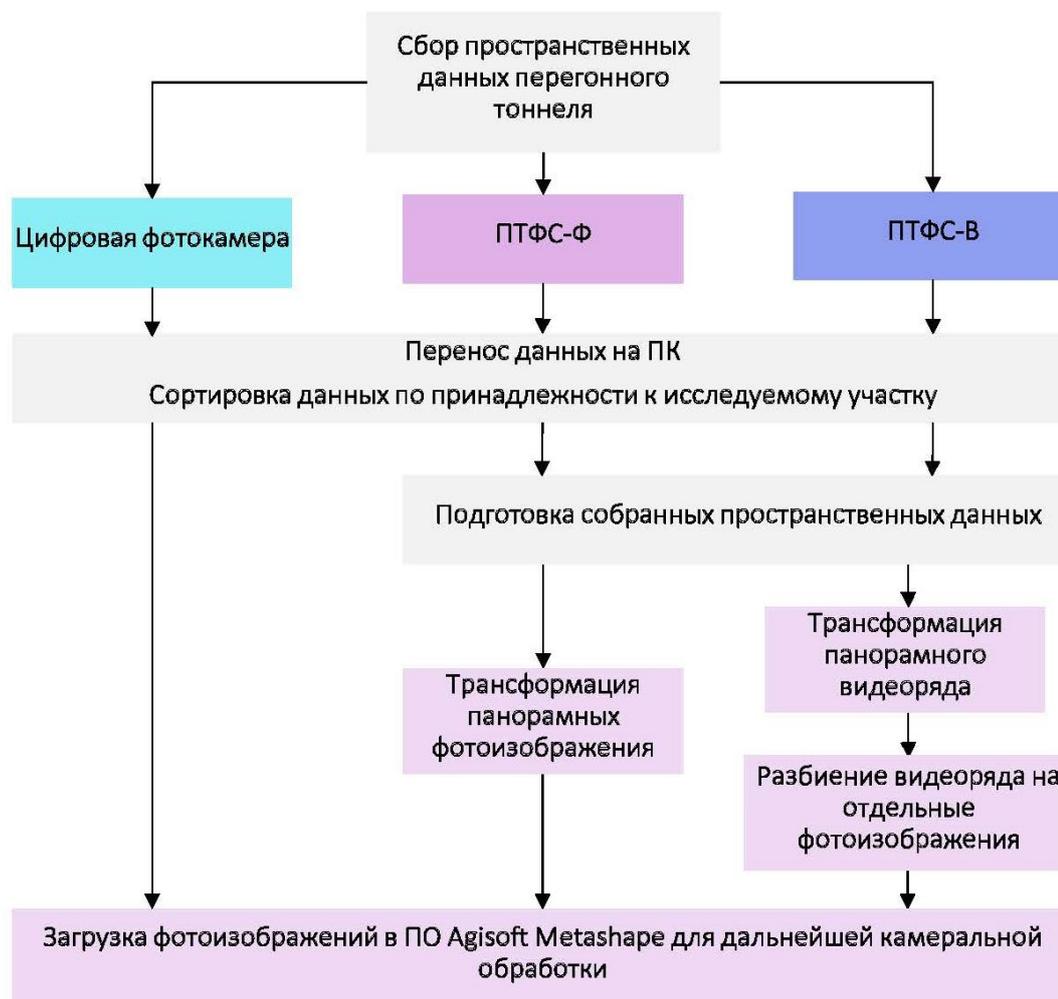


Рисунок 3.6 - Схема выполнения сбора и подготовки пространственных данных перегонного тоннеля (по материалам [98])

3.2.1. Построение ЦМТ на основе плоских фотоизображений

При загрузке всех плоских фотоизображений исследуемого участка одновременно в ПО Agisoft Metashape и запуска команды выравнивания камер, возникнет неопределенность «сшивки» снимков – программа не корректно распознает связующие точки на соседних снимках (Рисунок 3.7, а).

Эта проблема решается путем разделения фотоизображений – исходные данные по каждому тубинговому кольцу помещаются в отдельную папку, имя которой соответствует номеру кольца. Далее каждой такой папке задается параметр «Станция». Таким образом, ПО Agisoft Metashape идентифицирует каждую папку как станцию фотографирования – (Рисунок 3.7, б).

Для повышения качества поиска связующих точек при выравнивании снимков, необходимо на фотоизображениях разместить связующие маркеры, а их проекции отметить на двух и более соседних фотоизображениях. В качестве мест размещения маркеров могут использоваться характерные точки на обделке тоннеля, которые однозначно идентифицируются на соседних фотоизображениях. Благодаря этому ПО Agisoft Metashape будет учитывать эти точки как верно определенные.

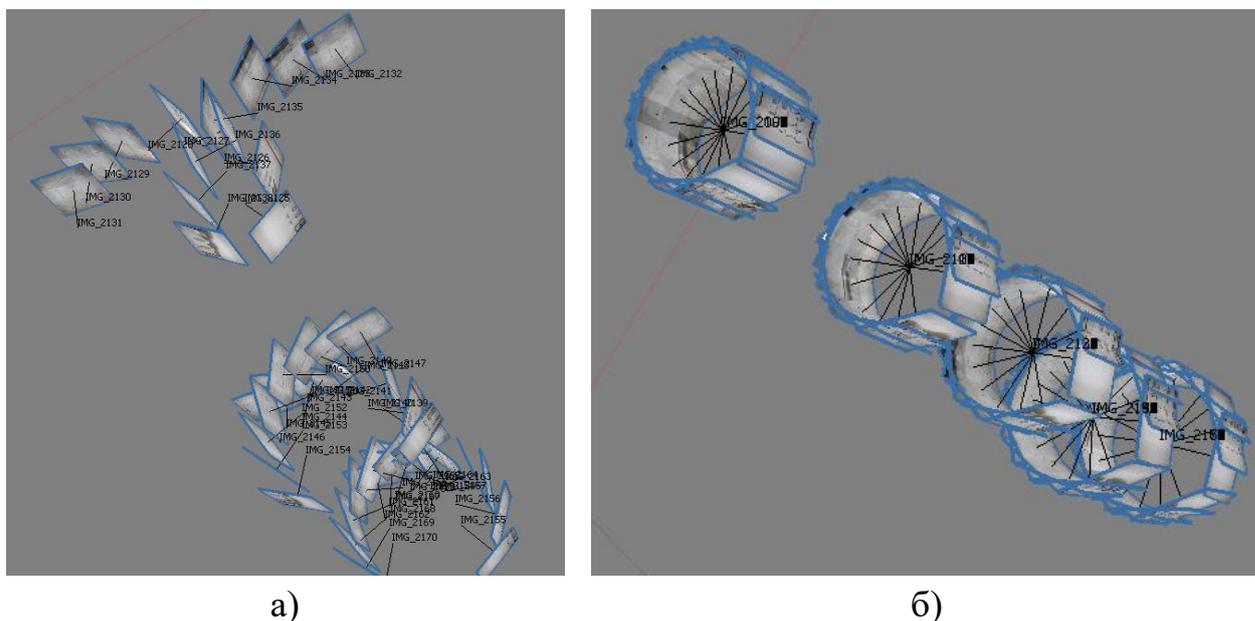


Рисунок 3.7 – Пространственное ориентирование исходных фотоизображений:

а) неопределенность со станцией фотографирования; б) станции фотографирования после присвоения группам камер «Тип группы» - «Станция»

Задав свойства станций и разместив маркеры, повторно запускается команда выравнивания снимков, в процессе которой происходит поиск

связующих точек, определяемых из соответствий, найденных на снимках (Рисунок 3.8). На этом этапе ПО Agisoft Metashape также определяет все параметры камер: пространственное положение станций фотографирования, ориентацию и внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т.п.) [79].

Из рисунка 3.8 видно, что из общего количества связующих точек не более 50% являются ошибочно определёнными.

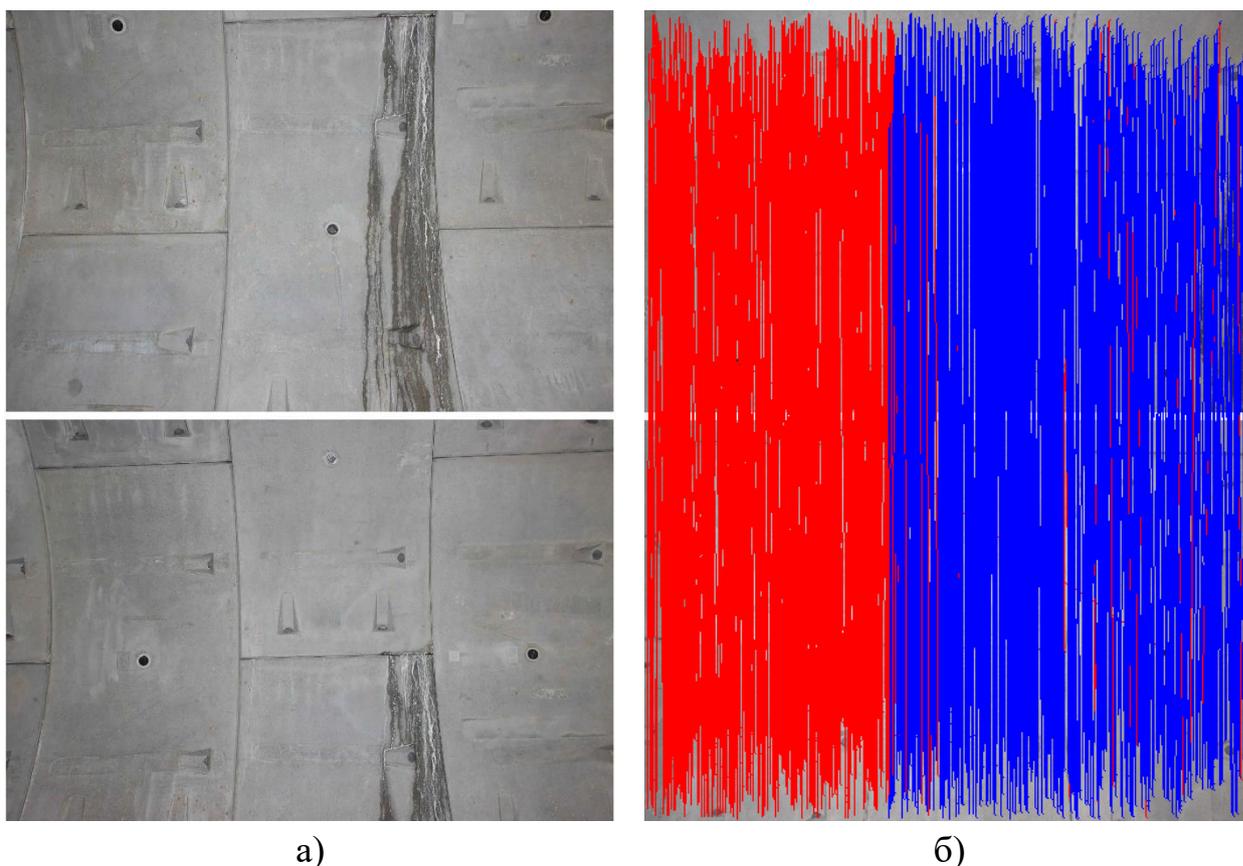


Рисунок 3.8 - Примеры отождествления связующих точек на двух смежных фотоизображениях

- а) исходные смежные фотоизображения,
б) линии связующих точек 54% верных (синий цвет) и 46% ошибочных (красный цвет)

Построение облака точек выполняется в два этапа: сперва строится разреженное облако точек, после чего – плотное облако точек [79].

Разреженное облако точек представляет собой пространственно-визуальную информацию о связующих точках (Рисунок 3.9, а) и служит для

визуальной оценки качества выравнивания фотоизображений. На этом этапе также определяются ориентация камер и их положение, которые будут использоваться на всех дальнейших этапах камеральной обработки пространственных данных [79].

Построение плотного облака точек базируется на рассчитанных положениях камер, что позволяет ПО Agisoft Metashape выполнить вычисление карты глубины для каждой камеры [79].

Под картой глубины в ПО Agisoft Metashape понимается фотоизображение, в каждом пикселе которого содержится значение расстояния от точки на местности, соответствующей данному пикселю, до центральной точки фотографирования. Программа строит карты глубины для каждого фотоизображения на основе предполагаемых положений фотокамеры.

В ходе исследований было установлено, что вне зависимости от применяемых настроек построение плотного облака точек происходит с некоторыми погрешностями, возникающими вследствие наличия точек «шума», которые лежат вне исследуемой плоскости тубинговой обделки (Рисунок 3.9, б). Это продиктовано высокими значениями ошибок репроецирования, указывающие на плохую точность локализации проекций точки на этапе поиска соответствий. Удаление таких точек улучшает точность последующей оптимизации выравнивания [79].



Рисунок 3.9 – Этапы построений при камеральной обработке: а) разреженное облако точек; б) плотное облако точек.

Создание пространственной модели – ЦМТ возможно на основе плотного облака точек или данных карт глубины. Производитель ПО Agisoft Metashape рекомендует использовать карты глубины, так как данный процесс поддерживает использование ускорения графического процессора и дает лучшие результаты (Рисунок 3.10).

Полученная ЦМТ может быть экспортирована в различные форматы, что позволит использовать полученную модель в таких платформах, как DMapper, PointBox, Pointscene, Sketchfab и пр.



Рисунок 3.10 - ЦМТ исследуемого участка перегонного тоннеля, построенная на основе плотного облака точек после удаления точек «шума»

3.2.2. Построение ЦМТ на основе панорамных фотоизображений

Результатом выполнения фотограмметрических работ на тестовом 120-метровом участке тоннеля с использованием ПТФС являются панорамные фотоизображения, собранные двумя способами: одиночное фотографирование (ПТФС-Ф) и полученные из видеоряда (ПТФС-В).

После подготовки исходных данных первого 50-метрового прямолинейного тестового участка перегонного тоннеля они были загружены в ПО Agisoft Metashape.

Каждое панорамное фотоизображение включает в себя освещенную и не освещенную поверхность тубинговой обделки, разделенные светотеневыми границами (Рисунок 3.11), которые являются передней и задней линиями контура фотоизображения (ПЛК и ЗЛК) относительно направления сбора пространственных данных [45, 98].

Требуется выполнить условие взаимного перекрытия фотоизображений на всем исследуемом участке. Для этого необходимо, чтобы ПЛК фотоизображения располагалась на расстоянии не менее 1 м до исследуемого участка по направлению съемки. В свою очередь ЗЛК фотоизображения должна находиться на расстоянии не менее 1 м после исследуемого участка по направлению съемки [98].

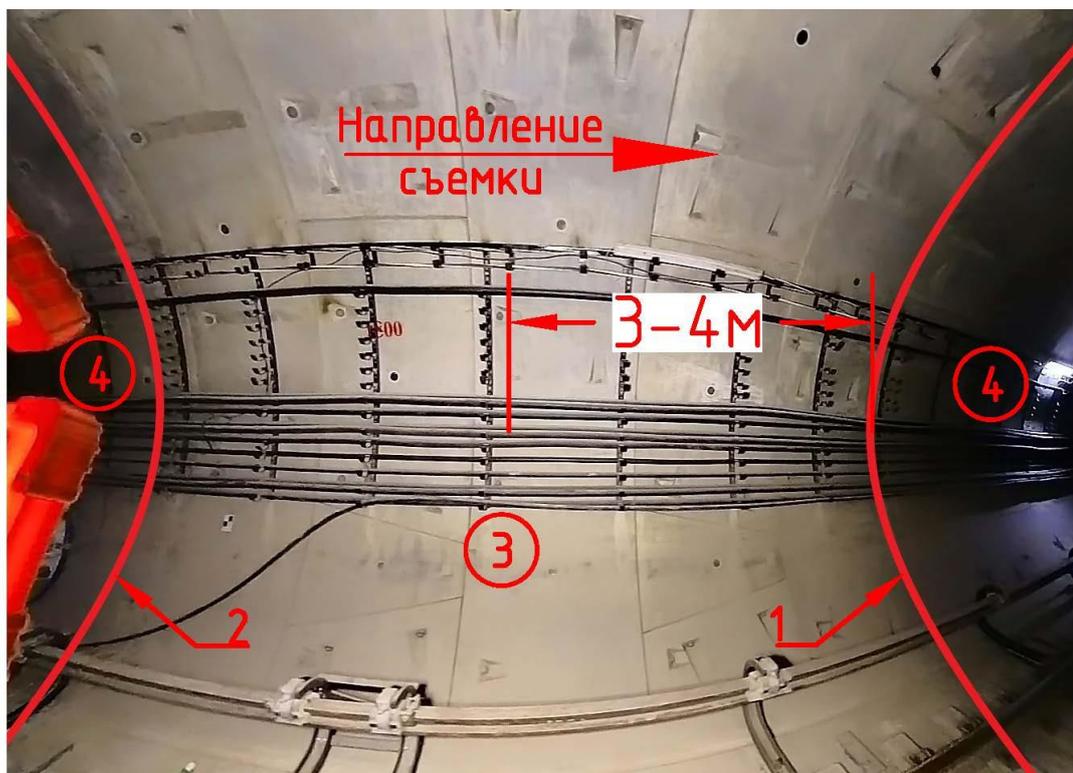


Рисунок 3.11 - Положение камеры при выполнении сбора пространственных данных секции фотографирования: 1 – передняя линия перекрытия; 2 – задняя светотеневая граница съемки; 3 – освещенная ПТФС поверхность тубинговой обделки; 4 – неосвещенная часть тубинговой обделки [45]

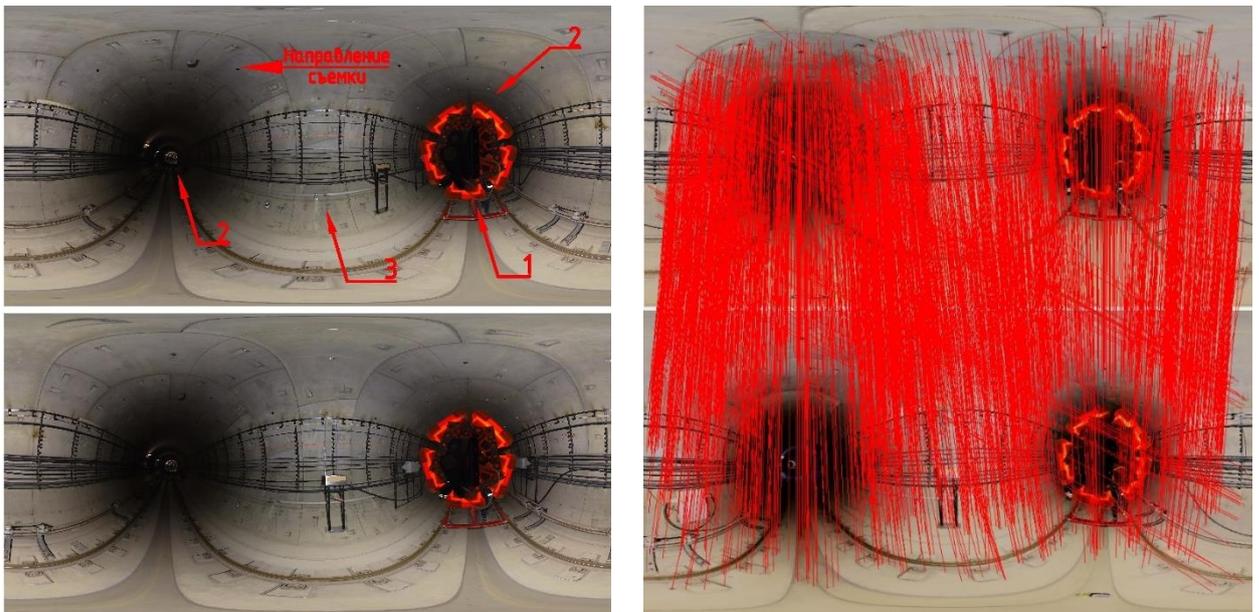
Это требование обуславливается особенностями построения модели – крайние участки которой, ввиду недостаточного перекрытия фотоизображений, получаются искаженными (Рисунок 3.12) и в дальнейшем подлежат удалению [45].



Рисунок 3.12 - Искраженная область ЦКТ: 1 – начало исследуемого участка

После выполнения вышеописанных требований и загрузки фотоизображений, запускается процесс выравнивания снимков, при котором происходит выявление соответствий и поиск характерных точек. Композиция каждого панорамного снимка помимо освещенной и неосвещенной поверхности перегонного тоннеля, также содержит элементы конструкции ПТФС [98].

Однако, как видно из рисунка 3.13, 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 фотоизображении – элементы ПТФС и неосвещенная часть тоннеля. Это приведет к ошибочным результатам: нарушению определения связующих точек пространственной модели; некорректному построению разреженного облака точек с наличием большого количества точек «шума». Использовать построенное облако точек с данными нарушениями не рекомендуется, т.к. итоговый результат будет сильно искаженным (Рисунок 3.14) [45, 98].



а)

б)

Рисунок 3.13 - Примеры отождествления связующих точек на смежных панорамных фотоизображениях до разделения композиции на освещенную поверхность (3), неосвещенную поверхность обделки (2) и ПТФС (1):

- а) исходные панорамные фотоизображения с базисом равным длине тьюбингового кольца;
- б) отсутствие верно определённых связующих точек на фотоизображениях

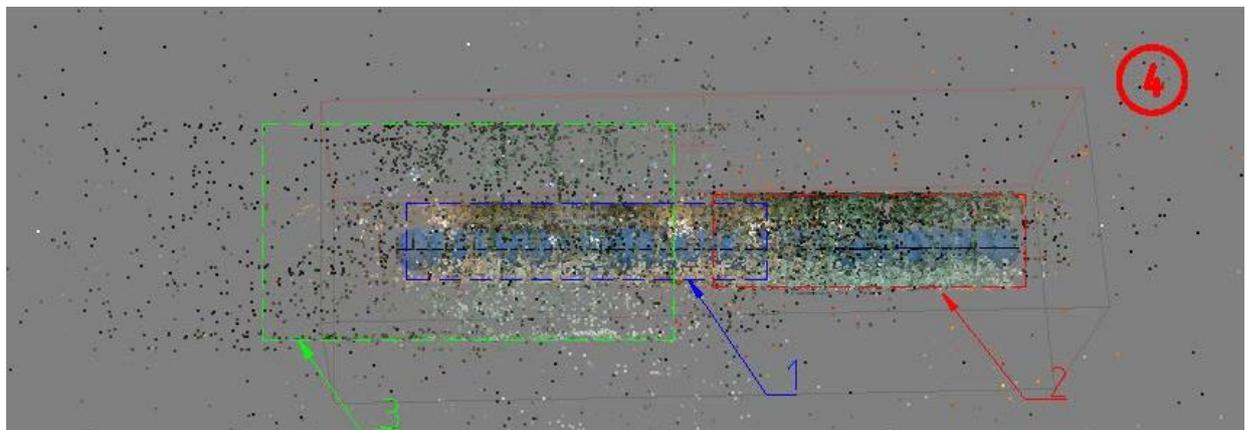


Рисунок 3.14 - Нарушения в определении пространственных связующих точек смежных снимков: 1 – участок перегонного тоннеля, с корректно построенным облаком связующих точек; 2 и 3 – ложно определенные связующие точки; 4 – множественные точки «шума»

[45]

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, а объекты под ними не будут учитываться при определении положения панорамной фотокамеры (Рисунок 3.15).

Необходимо учитывать, что при изменении разрешения фотоснимков требуется установка новых масок.

Благодаря использованию жестко зафиксированной панорамной фотокамеры композиция на всех фотоизображениях будет единообразна. На первом этапе задается контур будущих масок на одном из панорамных фотоизображений (Рисунок 3.15, п.5), загруженном в ПО Agisoft Metashape. Далее требуется выполнить экспорт маски в отдельный файл. Для использования этих масок на всех снимках, данный файл с маской импортируется с применением ко всем снимкам. Таким образом, контуры масок будут располагаться на всех загруженных фотоизображениях [45].

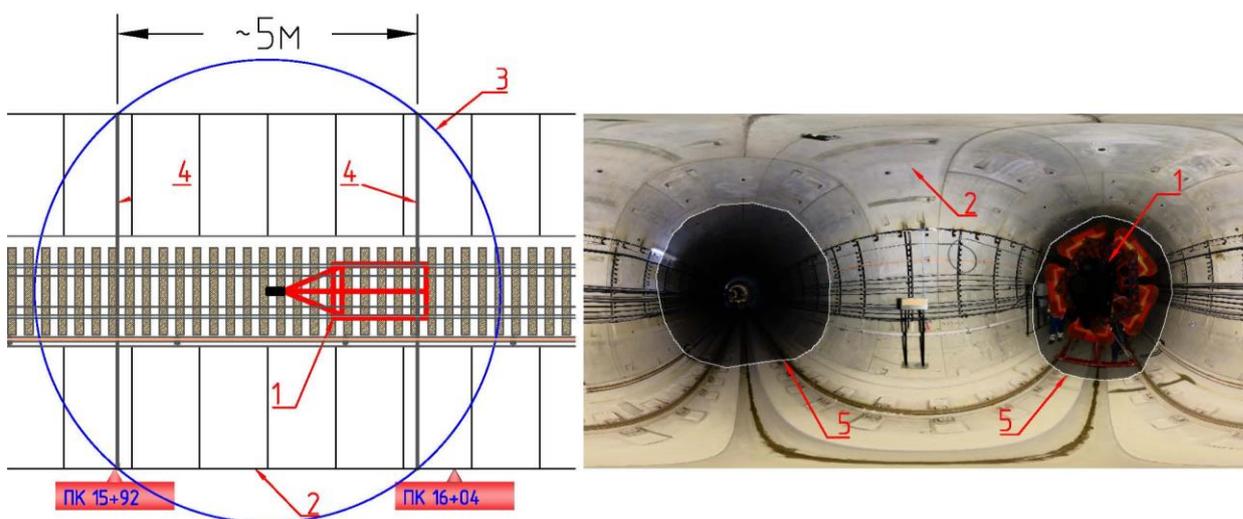


Рисунок 3.15 - Схема установки масок по отношению к ПТФС: 1 – ПТФС; 2 – поверхность перегонного тоннеля; 3 – светотеневая граница; 4 – устанавливаемые маски, 5 – контуры масок [45]

После загрузки масок и сбрасывания текущего (некорректного) выравнивания фотоизображений, были загружены уравненные координаты 22 СФГМ и указаны их проекции на соответствующих фотоизображениях

всего тестового участка – расставлены соответствующие маркеры. Чем больше будет указано проекций одной опорной точки, тем точность их позиционирования будет выше. Корректно сориентированная система координат ЦМТ сможет быть задана только при условии определения не менее трёх опорных точек.

Использование точек с известными координатами оптимизирует выравнивание фотоизображений и устанавливает корректный масштаб, что в дальнейшем позволит выполнять необходимые измерения.

Задав на каждое фотоизображение ограничивающую область (маски), запускается процесс выравнивания и поиск связующих точек на смежных фотоизображениях. Встроенный инструментарий ПО Agisoft Metashape позволяет выполнить оптимизацию – пересчет координат точек и параметров панорамных фотокамер, минимизируя сумму ошибок проецирования и ошибок выравнивания по координатам опорных знаков [79].

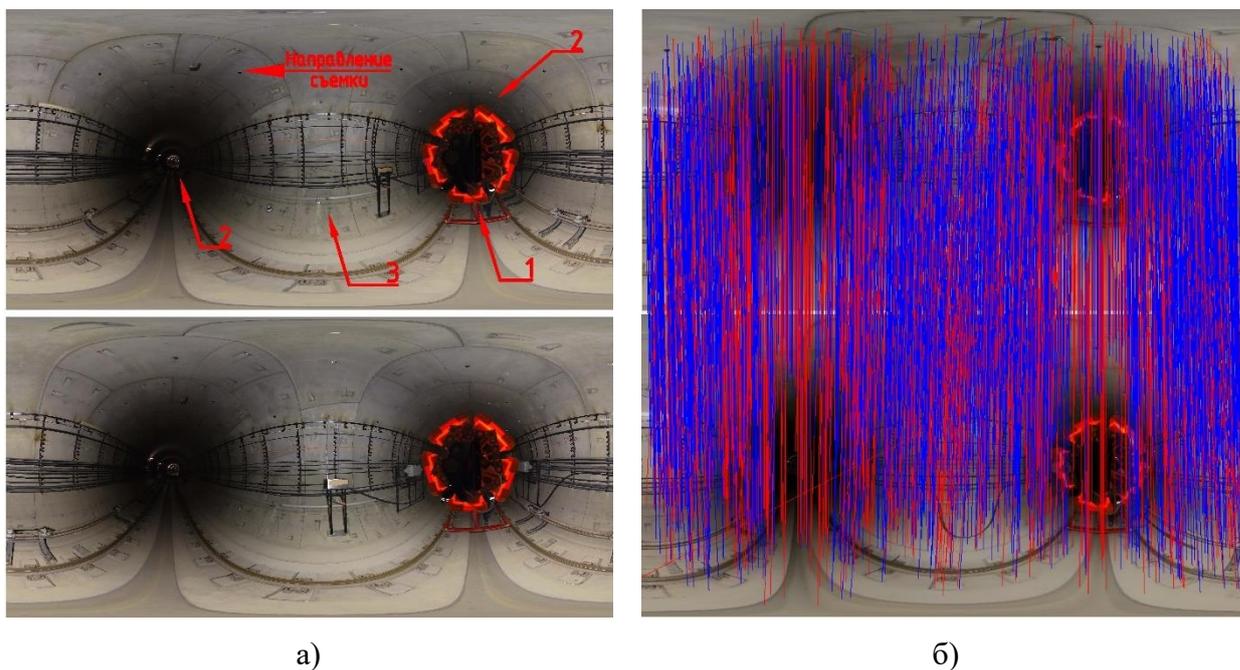


Рисунок 3.16 - Примеры отождествления связующих точек на панорамных фотоизображениях:

- а) исходные панорамные фотоизображения с базисом равным длине тубингового кольца,
- б) после применения «масок» – 68% верных (синие линии) и 36% ошибочных (красные линии) связующих точек

Для достижения качественных результатов оптимизации требуется выполнить редактирование разреженного облака точек – удалив заведомо неверные точки. Полученный результат представлен на рисунке 3.17.

Координаты точек смежных фотоизображений можно преобразовать сразу в систему координат исследуемого участка перегонного тоннеля OXYZ, если известны с достаточной точностью элементы внешнего ориентирования снимков, определяющие их положения в пространстве координат объекта [62].



Рисунок 3.17 - Визуализация связующих точек 50-метрового прямолинейного участка перегонного тоннеля:

- а) размещение двух СФГМ и одного ТПВ на разрезе интервала разреженного облака;
- б) опорные знаки на разреженном облаке точек

Так как в качестве внешнего ориентирования используются опорные знаки, закрепленные на конструкциях обделки тоннеля и верхнем строении пути (пункты подземной полигонометрии), то координаты панорамных фотокамер будут вычислены в местной системе координат. На рисунке 3.18 представлены ошибки проекций опорных знаков на ЦМТ в том случае, когда все они используются как «Опорные точки».

Маркеры ^	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №1	-0.009944	0.023027	-0.000368	0.025085	6	1.766
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №2	0.011359	-0.011609	0.001840	0.016346	7	1.178
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №3	-0.009763	-0.020000	-0.011706	0.025147	5	1.814
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №4	0.001722	0.006266	0.010104	0.012013	5	1.332
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №5	0.011439	-0.026324	-0.013192	0.031589	6	1.949
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №6	0.000139	0.022635	0.012885	0.026046	6	1.387
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №7	0.014604	0.014305	-0.003695	0.020774	6	1.586
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №8	-0.024606	-0.015968	0.004504	0.029677	6	2.019
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №9	-0.002118	-0.030858	-0.026762	0.040901	6	2.080
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №10	-0.011239	0.040590	0.023970	0.048461	6	2.241
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №11	0.003959	-0.017766	0.056677	0.059528	6	2.383
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №12	0.014448	0.015704	-0.054258	0.058303	6	2.269
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 1						
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 2						
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 3						
<input checked="" type="checkbox"/> PZ18396	0.129280	0.066058	-0.006077	0.145306	9	6.800
<input checked="" type="checkbox"/> PZ18448	0.128779	0.080269	-0.111840	0.188508	5	42.582
<input type="checkbox"/> point 2	0.017940	0.014247	-0.008330	0.024377	8	1.307
Общая ошибка						
Опорные точки	0.049949	0.034577	0.038367	0.071851		10.700
Контрольные точки	0.017940	0.014247	0.008330	0.024377		1.307

Рисунок 3.18 - Ошибки проекций опорных знаков при использовании пространственных данных, сбор которых осуществлялся ПТФС-Ф

При сравнении двух способов сбора пространственных (ПТФС-Ф и ПТФС-В), обязательным условием являлось использование для исследований одного и того же участка перегонного тоннеля с закрепленными на нём опорными знаками. Это позволит в полной мере оценить качество получаемых данных на этапе камеральной обработки.

В случае использования пространственных данных, собранных с использованием ПТФС-В, на этапе выравнивания фотоизображений

наблюдается снижение величин ошибок репроецирования. Данные изменения отражают улучшение качества всех последующих построений, что объясняется увеличением продольного перекрытия смежных фотоизображений.

На рисунке 3.19 представлены полученные ошибки проекций опорных знаков.

Маркеры	Ошибка, X (м)	Ошибка, Y (м)	Ошибка, Z (м)	Ошибка (м)	Проекция	Ошибка (пикс)
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №1	-0.007192	0.001915	0.002041	0.007717	19	3.195
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №2	0.002903	-0.023614	-0.000269	0.023793	23	4.373
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №3	-0.001412	-0.008943	-0.001082	0.009118	13	2.211
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №4	-0.001263	0.008993	0.003481	0.009725	13	3.923
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №5	0.000098	-0.007140	-0.002208	0.007474	13	2.017
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №6	0.000726	0.006150	0.002010	0.006511	12	1.800
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №7	0.001154	0.001705	0.001802	0.002736	12	0.915
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №8	-0.001257	-0.002216	-0.000506	0.002597	10	1.085
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №9	-0.001380	-0.004320	-0.005129	0.006846	11	2.091
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №10	-0.001264	0.006016	0.005284	0.008106	11	2.363
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №11	0.001123	-0.003227	0.006831	0.007638	13	1.945
<input checked="" type="checkbox"/> СФГМ №12	0.002727	0.002584	-0.006485	0.007494	13	1.887
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 1						
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 2						
<input type="checkbox"/> ось тоннеля 3						
<input checked="" type="checkbox"/> PZ18396	0.090975	0.066499	0.014313	0.113593	12	30.384
<input checked="" type="checkbox"/> PZ18448	0.013478	0.018234	-0.005060	0.023232	10	6.155
<input type="checkbox"/> point 2						
Общая ошибка						
Опорные точки	0.024695	0.020081	0.005368	0.032278		8.277
Контрольные точки						

Рисунок 3.19 - Ошибки проекций опорных знаков при использовании пространственных данных, сбор которых осуществлялся ПТФС-В

Построения пространственной модели и плотного облака точек выполнялись после запуска команды выравнивания фотоизображений, в процессе которой были вычислены ошибки репроецирования для всех опорных точек на всех снимках (Рисунок 3.18) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_{i,изв} - X_{i,выч}, & \Delta Y &= Y_{i,изв} - Y_{i,выч}, \\ \Delta Z &= Z_{i,изв} - Z_{i,выч}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\Delta_{\text{СКО}} = \pm \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}, \quad (3.10)$$

$$\Delta_{\text{общ}} = \pm \sqrt{\frac{\sum(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)}{n}}, \quad (3.11)$$

где ΔX – расстояние по оси X между известным положением опорной точки и его вычисленным значением на пространственной модели («Ошибка, X (м)» на рисунке 3.18);

ΔY – расстояние по оси Y между известным положением опорной точки и его вычисленным значением на пространственной модели («Ошибка, Y (м)» на рисунке 3.18);

ΔZ – расстояние по оси Z между известным положением опорной точки и его вычисленным значением на пространственной модели («Ошибка, Z (м)» на рисунке 3.18);

$X_{i,\text{изв}}, Y_{i,\text{изв}}, Z_{i,\text{изв}}$ – значения координат X, Y и Z для i -ого положения опорной точки в местной системе координат;

$X_{i,\text{выч}}, Y_{i,\text{выч}}, Z_{i,\text{выч}}$ – вычисленные значения координат X, Y и Z для i -ого положения опорной точки на пространственной модели;

$\Delta_{\text{СКО}}$ – среднеквадратичная ошибка каждого опорного знака («Ошибка (м)» на рисунке 3.18);

$\Delta_{\text{общ}}$ – общая ошибка для всех опорных точек;

n – количество опорных точек [79].

Следующим этапом является построение плотного облака точек. Опираясь на вычисленное пространственное положение камер, ПО Agisoft Metashape вычисляет карты глубины для каждой камеры и на их основе строит плотное облако точек, схожее с облаком точек, полученным по данным лазерного сканирования (Рисунок 3.20). Карты глубины рассчитываются благодаря алгоритму плотной стереорекострукции. Для каждого снимка при помощи фототриангуляции методом независимых

связок определяются элементы внешнего и внутреннего ориентирования. Затем по этим данным для пар перекрывающихся снимков рассчитываются карты глубины. Поскольку один снимок перекрывается сразу с несколькими соседними, то таким образом для каждого снимка рассчитывается несколько карт глубины. Итоговая карта глубины для конкретного снимка объединяет в себе информацию, полученную при попарном расчете. Дополнительные данные в области множественного перекрытия снимков используются для фильтрации ошибок [79].

Облако точек получается путем объединения частичных облаков, полученных из карт глубины, с применением дополнительной фильтрации в областях перекрытия. Нормали в частичных облаках точек определяются методом аппроксимирующей плоскости для окрестностей пикселя в полной (комбинированной) карте глубины для конкретного снимка. Цвет пикселя определяется на основании данных изображения [79].

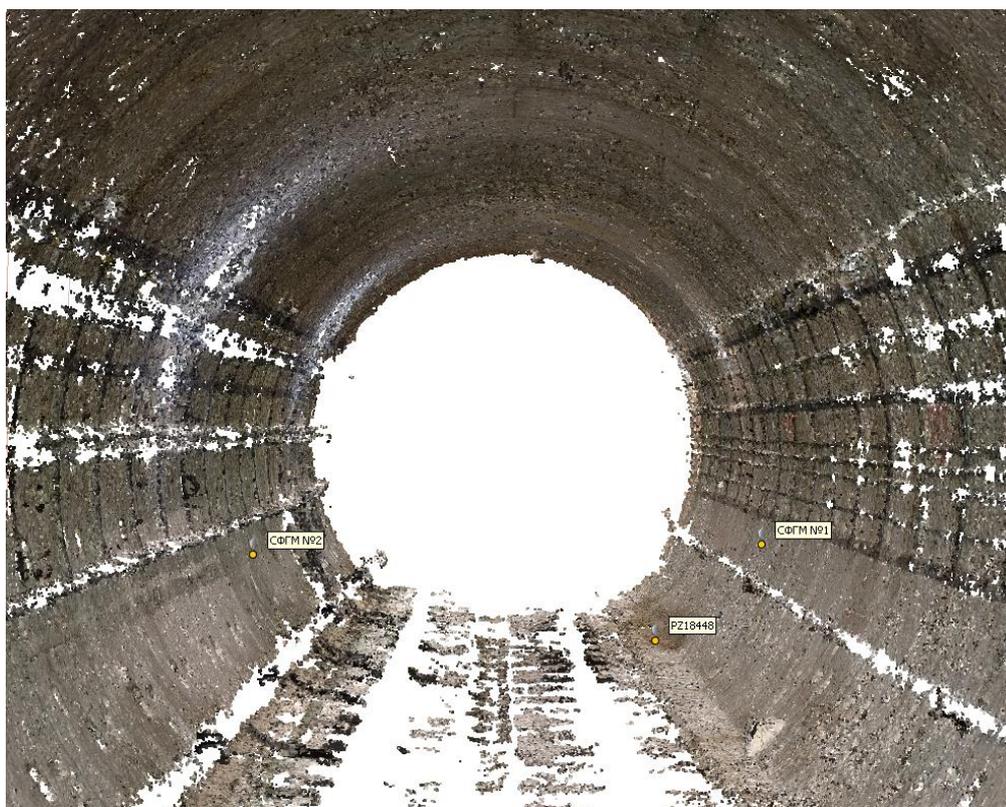


Рисунок 3.20 – Фрагмент плотного облака точек 50-метрового тестового прямолинейного участка перегонного тоннеля

Вследствие того, что геометрия сцены реконструкции перегонного тоннеля сложная и включает в себя многочисленные мелкие детали на переднем плане, то при построении плотного облака точек рекомендуется использовать мягкую фильтрацию карт глубины, чтобы не были удалены важные детали.

Для задания параметров достоверности плотного облака точек, перед запуском команды построений необходимо указать, что требуется рассчитать достоверность точек. После завершения построения облака точек и задания требуемых параметров достоверности точки «шума» будут удалены [42].

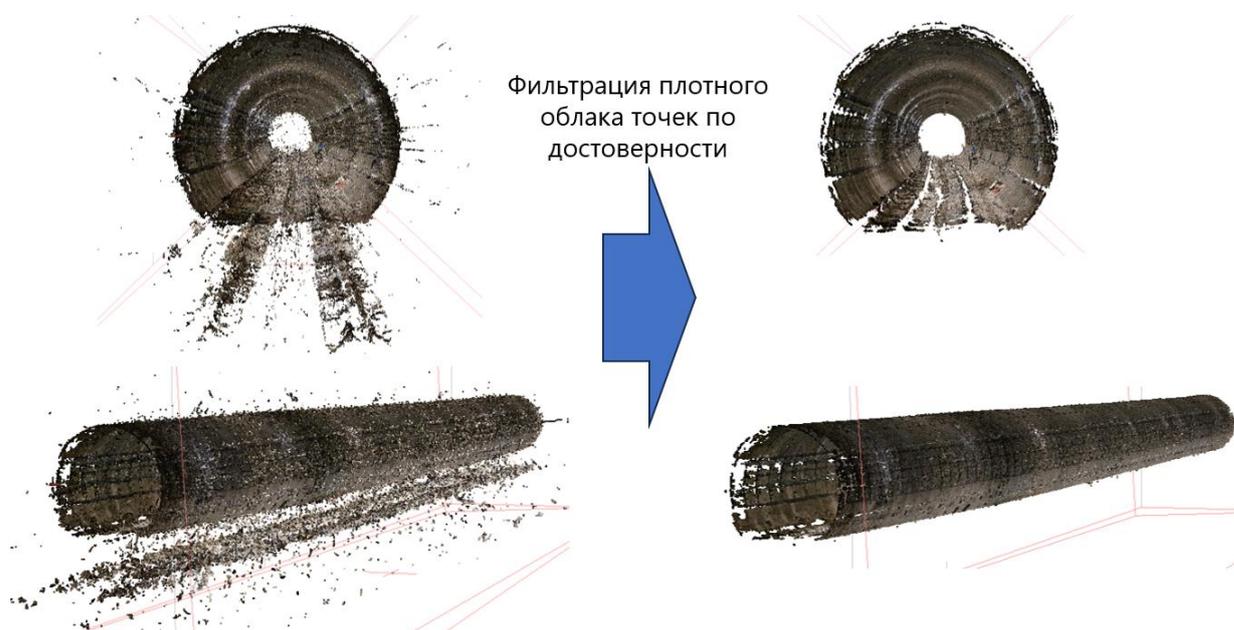


Рисунок 3.21 – Результат фильтрации плотного облака точек по достоверности

На основе построенного облака точек или карт глубины ПО Agisoft Metashape позволяет выполнить построение трехмерной полигональной модели – ЦМТ, которая описывает форму перегонного тоннеля (Рисунок 3.22). Если карты глубины были построены и сохранены в проекте на предыдущем этапе, то рекомендуется активировать параметр «Использовать текущие карты глубины» [79].



Рисунок 3.22 - Фрагмент ЦМТ 50-метрового тестового участка перегонного тоннеля, построенного на основе плотного облака точек

3.2.3. *Определение оптимального количества опорных знаков*

Для повышения эффективности выполняемых работ требуется определение оптимального количества опорных точек, необходимых для создания ЦМТ и ЦКТ с минимальными потерями качества, пространственных ошибок точности определения модели и минимальным количеством опорных и контрольных точек.

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 [45].

При увеличении количества знаков (4 и более), используемых при обработке панорамных фотоизображений, качество построенной модели существенно не улучшается.

Схема размещения трех СФГМ на исследуемом 50-метровом участке может быть различной. Путем перебора всех возможных вариантов, наилучшим, с точки зрения удобства производства работ и пространственного размещения опорных знаков являются два варианта:

- две марки на одном тубинговом кольце в начале исследуемого участка (№1 и №2) и одна в конце (№10) – схема прямоугольного треугольника (Рисунок 3.23);
- марки в начале (№2), посередине (№5) и в конце участка (№10) – схема равнобедренного треугольника (Рисунок 3.24) [45].

Для повышения производительности работ в перегонном тоннеле при выполнении сбора пространственных данных, требуется замена опорных знаков СФГМ №2 и 10 на ТПВ, установленных на знаки подземной полигонометрии. В этом случае будет обеспечена требуемая точность с минимальным количеством устанавливаемых опорных знаков.

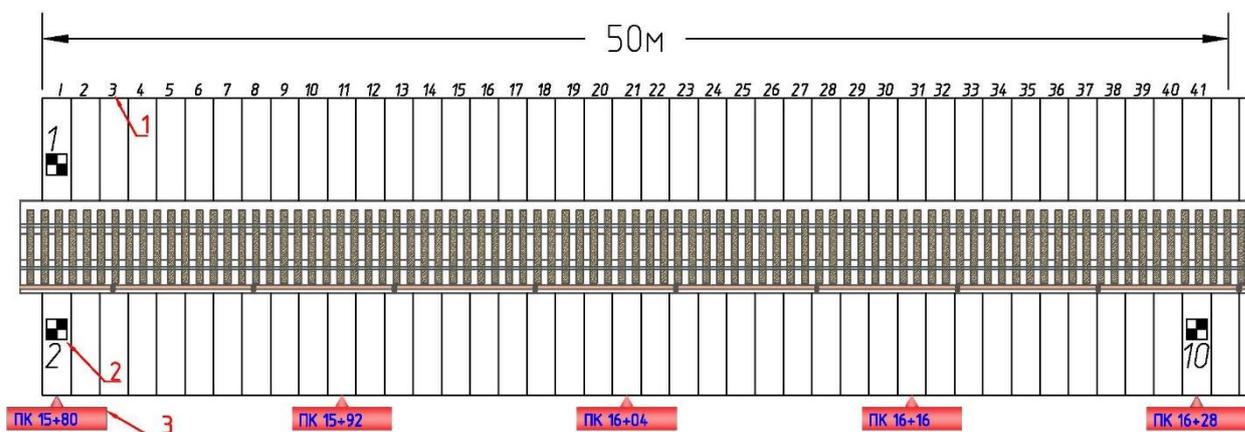


Рисунок 3.23 - Схема первого варианта (прямоугольный треугольник) размещения необходимого количества СФГМ на 50-метровом участке перегонного тоннеля для построения ЦКТ: 1 – номер кольца исследуемого участка; 2 – СФГМ и её номер, 3 – пикетажное значение тубингового кольца [45]

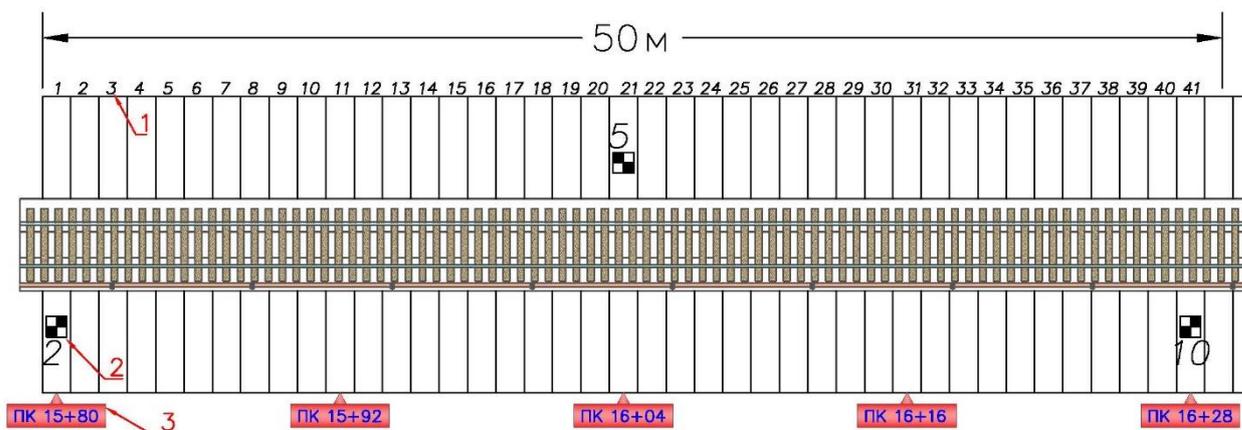


Рисунок 3.24 - Схема второго варианта (равнобедренный треугольник) размещения необходимого количества СФГМ на 50-метровом участке перегонного тоннеля для построения ЦКТ: 1 – номер кольца исследуемого участка; 2 – СФГМ и её номер, 3 – пикетажное значение тубингового кольца [45]

3.3. Построение ЦКТ

Цифровая карта тоннеля является моделью внутренней поверхности перегонного тоннеля, все объекты которой записаны в цифровом виде по определенным правилам: отображение объектов с известными топологическими связями (точки, линии, полигоны и пр.) и их разделение согласно классификатору (тубинговые кольца, верхнее строение пути, кабельные линии и пр.) [62]. ЦКТ является основным продуктом для реализации дистанционного и всестороннего изучения поверхности перегонного тоннеля. Ниже приведены способы построения ЦКТ на основе пространственных данных, собранных различным способом.

3.3.1. Построение ЦКТ на основе плоских фотоизображений

Процесс построения ЦКТ базируется на использовании исходных фотоизображений и пространственной полигональной модели, созданной на основе плотного облака точек.

Исследуемые перегонные тоннели конструктивно представляют собой протяженные по длине конструкции, близкие к цилиндрической форме. Для проецирования полученной пространственной поверхности на горизонтальную плоскость требуется использование цилиндрической проекции, для чего необходимо знать элементы цилиндра: ось, радиус, нулевая плоскость и нулевая линия.

Обязательным условием построения ЦКТ, в случае использования плоских фотоизображений, является выбор опции «Вид изнутри», что позволит задать внутреннюю поверхность цилиндра поверхностью проецирования [79].

В ПО Agisoft Metashape реализовано 4 различных способа проецирования на цилиндрическую поверхность:

- Текущая область;
- Текущий вид;
- Маркеры;

- X/Y/Z.

Так как при выполнении фотограмметрических работ в тоннеле не использовались опорные знаки с известными координатами, то способом построения ЦКТ выбран X/Y/Z. Были установлены следующие настройки: проекция цилиндрическая, ориентация цилиндра по оси X, вид изнутри (Рисунок 3.25) [79].

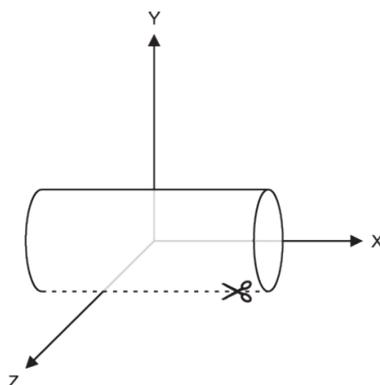


Рисунок 3.25 - Схема линий реза поверхности цилиндра вдоль оси X [79]

Полученная ЦКТ (Рисунок 3.26) характеризуется наличием искажений:

- отсутствие прямолинейности мест сопряжения двух тубинговых колец;
- наличие «пустых» областей;
- наличие светотеневых погрешностей.



Рисунок 3.26 - ЦКТ участка перегонного тоннеля со следами водопроявлений

Преимущества и недостатки построения ЦКТ на основе плоских фотоизображений

Преимуществами использования вышеописанного метода являются локальность выполняемых работ – съемке подлежит участок, содержащий визуальные дефекты (от трех до пяти колец), использованием профессиональной фототехники с настройками для работы в темном помещении достигается высокое качество фотоизображений.

К недостаткам относится отсутствие плано-высотной привязки, получаемой ЦМТ, вследствие чего дальнейшее построение ЦКТ выполняется вне масштаба. Для приведения построенной ЦМТ исследуемого участка к фактическим размерам требуется выполнить её масштабирование, что приводит к недопустимым неточностям измерений на ЦКТ. Съемке подлежит только поверхность тубинговых колец, в поперечном сечении составляет около 293 градусов. Верхнее строение пути не попадает на ЦКТ (Рисунок 3.27). Станции фотографирования смещены относительно проектной оси как в продольном, так и в поперечном сечениях, что влечет за собой различные фокусные расстояния на каждом фотоизображении.

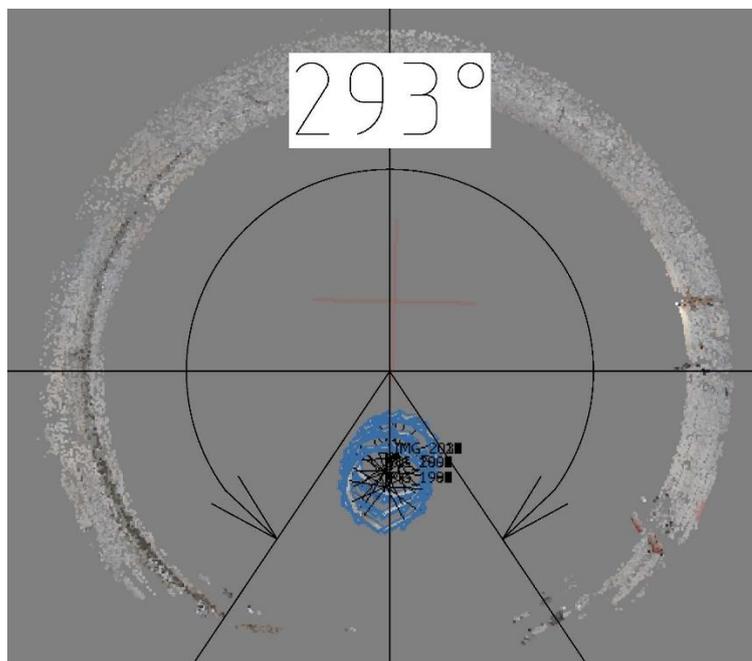


Рисунок 3.27 - Зона съемки в поперечном сечении тоннеля

3.3.2. Построение ЦКТ на основе панорамных фотоизображений

Процесс создания ЦКТ заключается в проецировании внутренней поверхности на цилиндр с последующей развёрткой на горизонтальную плоскость. В качестве основы могут использоваться ЦМТ или плотное облако точек. В случае построения ЦКТ на основе ЦМТ наблюдаются наименьшие визуальные искажения [98].

Для корректных построений ЦКТ требуется выбрать метод проецирования по маркерам, при котором задаются три маркера с известными координатами:

- два маркера должны располагаться по оси тоннеля – координаты фотокамер в начале (m_1) и в конце (m_2) исследуемого участка (Рисунок 3.28);
- 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, проекция которого должна быть указана не менее чем на 3 фотоизображениях (Рисунок 3.29) [98].

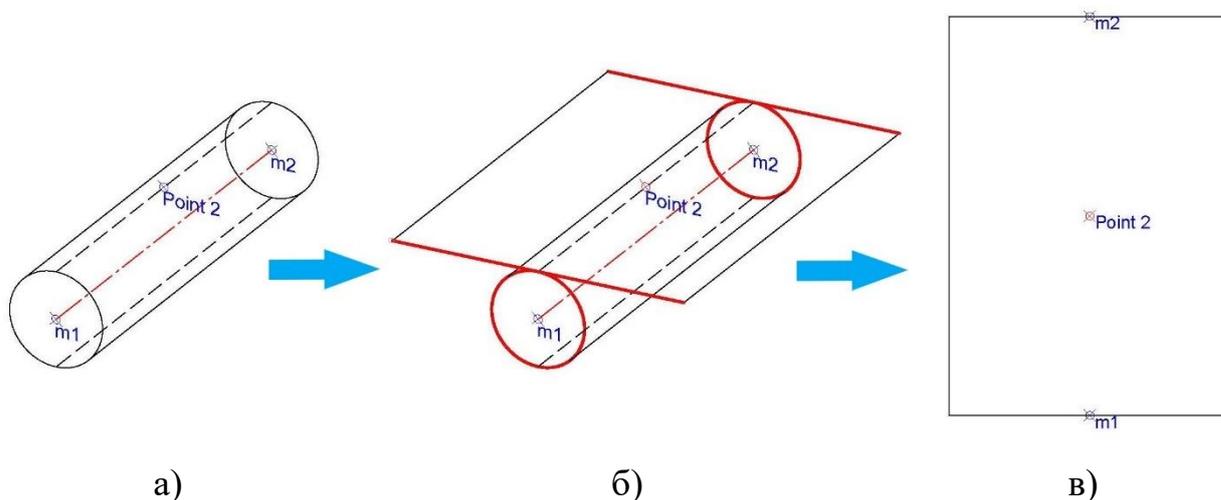


Рисунок 3.28 - Последовательность создания ЦКТ:

- а) расположение маркеров на исследуемом участке;
- б) развёртка поверхности цилиндра на горизонтальную плоскость;
- в) границы построения ЦКТ



Рисунок 3.29 - Схема размещения маркера на своде тоннеля (Point 2)

На полученной ЦКТ (Рисунок 3.30) отсутствуют линейные и площадные искажения, что позволит выполнять различные измерения и всестороннее изучение различными специалистами ГУП «Московский метрополитен», что отвечает поставленным условиям в начале данной главы.

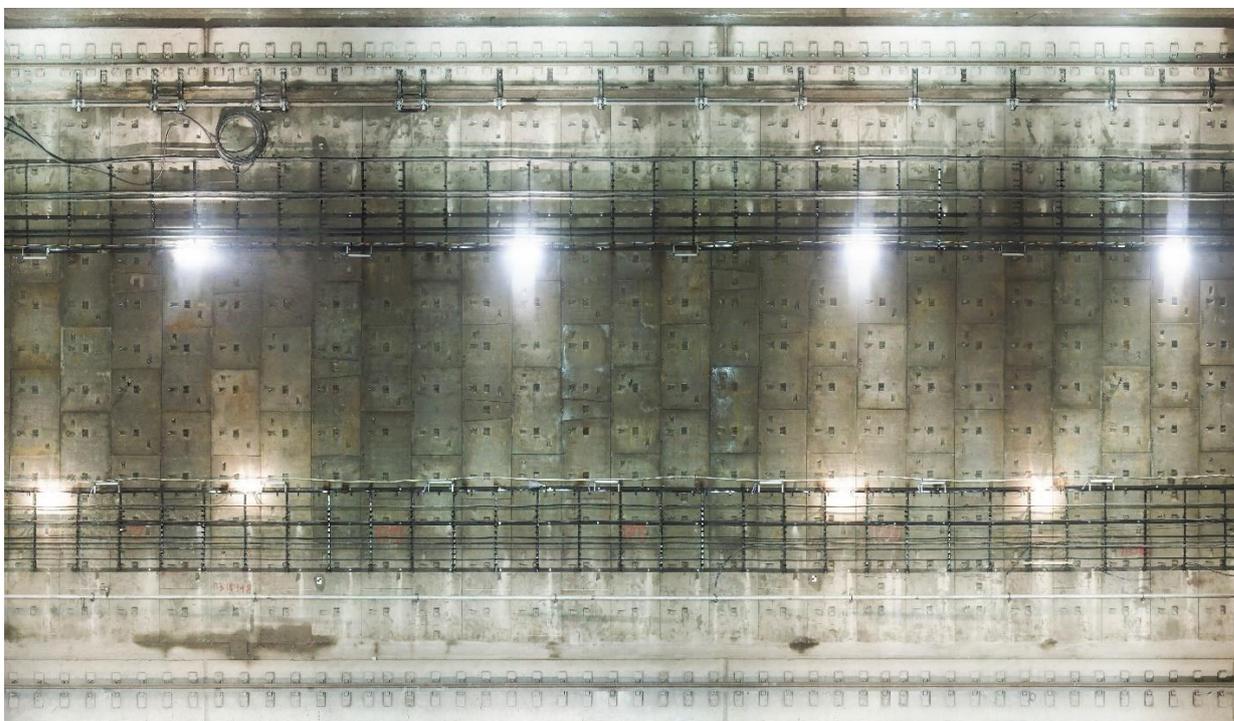


Рисунок 3.30 - Построенная ЦКТ 50-метрового участка перегонного тоннеля

Следует заметить, что построение ЦКТ возможно выполнить двумя способами:

- на основе одиночных панорамных фотоизображений, при котором центр камеры располагается в центре тубингового кольца. Базис фотографирования зависит от длины кольца и составляет от 1.0 м до 1.4 м, с продольным перекрытием от 81% до 87% (ПТФС-Ф);
- на основе панорамных фотоизображений, полученных из видеоряда, с базисом фотографирования 0.2 м и продольным перекрытием 96.8% (ПТФС-В).

В первом способе на ЦКТ присутствовали ошибки, проявляющиеся в искажениях и размытых участках, что снижает качество получаемой цифровой карты.

Во втором случае на ЦКТ не наблюдались ошибки, однако цветовая гамма, по сравнению с первым способом, стала темнее, что объясняется особенностями выполнения сбора пространственных данных при помощи видеосъемки. В случаях, когда яркость построенной ЦКТ недостаточна, или наоборот требуется её уменьшение, достаточно воспользоваться внутренним инструментарием ПО Agisoft Metashape или специализированным программным обеспечением, например, Adobe Photoshop и пр.

Полученная в ходе экспериментальных исследований в тоннеле ЦКТ сохраняет геометрические параметры и физические атрибуты, такие как параллельность и прямолинейность линий. На основе данной ЦКТ у специалистов, занимающихся отслеживанием технического состояния перегонных тоннелей, появляется возможность выполнять по ней измерения как линейные, так и площадные.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование ПТФС-В наилучшим образом отвечает требованиям, поставленным в начале данной главы.

3.3.3. Определение параметров зонирования ЦКТ

Зонирование цифровой карты представляет собой процесс разделения исследуемой территории на отдельные участки – зоны, используемые для анализа, управления и планирования развития.

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.

Поэтому использован принцип построения цифровой карты перегонного тоннеля, разделенного на зоны. При определении пространственных параметров каждой зоны необходимо учитывать следующие требования:

- каждая зона должна представлять собой целостную единицу, которая имеет четкие границы и однородный характер внутри неё – начало и конец каждой зоны должны иметь однотипную продольную длину и пикетажные значения;
- зоны должны быть компактными и иметь оптимальную площадь с сохранением функциональных возможностей – использование формата jpg в максимальном разрешении;
- ЦКТ должна быть гибкой и адаптивной, позволяя вносить изменения – обеспечение пополнения актуализированной графической и визуальной информацией;
- границы зон должны опираться на такие объекты инфраструктуры перегонного тоннеля, характерные для всех типов обделки;

- подход к определению параметров зон криволинейных участков должен основываться на радиусе поворота [98].

Учитывая вышеизложенные требования и выполненную камеральную обработку пространственных данных перегонного тоннеля установлено, что наилучшим образом за внешние границы зоны стоит принимать места расположения известных маркшейдерских пунктов. Для этого требуется разделить всю длину исследуемого тоннеля (от одной станции метрополитена до другой) на отдельные интервалы заданной длины [98].

Для разработки единого метода построения ЦКТ как для строящихся, так и для эксплуатируемых перегонных тоннелей целесообразнее исходить от максимального расстояния между маркшейдерскими пунктами, а именно 50 метров. Однако на криволинейных участках этого расстояния может быть недостаточно [98].

Пространственная привязка каждой зоны будет осуществляться к пунктам подземной полигонометрии и путевым реперам, которые расположены на расстоянии 50-60 метров друг от друга. На эксплуатируемых линиях, построенных более 20 лет назад, расстояние между путевыми реперами на криволинейных участках достигает 25 метров и менее [98].

Таким образом, длина каждой зоны будет составлять 50-60 метров и обеспечена минимум тремя опорными знаками [98]. Создание ЦМТ криволинейных участков будет отличаться от прямолинейного участка количеством опорных знаков. Процесс создания ЦМТ и ЦКТ криволинейных участков перегонного тоннеля представлен в 4 главе.

3.4. Распознавание образов дефектов на ЦКТ с использованием нейронных сетей

Для автоматизации любого технологического процесса требуется задействование различных ресурсов, такие как продвинутое вычислительные устройства, которые за короткий промежуток времени могут обрабатывать

большой объем информации. Эти ресурсы в первую очередь необходимы для работы искусственных нейронных сетей.

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.

3.4.1. Структура искусственных нейронных сетей

Нейронные сети — это алгоритмы, созданные для цифрового моделирования биологических нейронных сетей. Идея их создания заключалась в создании искусственной системы, которая функционирует подобно человеческому мозгу. Нейронные сети основаны на взаимосвязанных нейронах в зависимости от типа сети.

Существующие нейронные сети, используемые для распознавания образов, обобщенно можно разделить на три класса:

- Полностью связанные нейронные сети;
- Рекуррентные нейронные сети;
- Свёрточные нейронные сети.

Основное различие между ними заключается в типах нейронов, и в том, как информация проходит через сеть.

Полностью связанная нейронная сеть представляет собой простую и базовую архитектуру для искусственных нейронных сетей. Особенностью такой архитектуры является то, что каждый нейрон одного слоя соединен со всеми нейронами следующего слоя.

Все нейроны одного слоя имеют связи со всеми нейронами следующего слоя – веса, которые определяют силу влияния каждого нейрона на следующий слой. Каждый нейрон имеет свой собственный набор весов, который он использует для обработки входного сигнала от предыдущего

слоя. Веса могут быть обучены через алгоритмы обратного распространения ошибки. Полностью связанные сети обычно содержат несколько скрытых слоев между входным и выходным слоями. Скрытые слои позволяют сети изучать сложные функции и находить паттерны в данных.

Паттерн в контексте нейронных сетей представляет собой схему-образ, действующий как посредствующее представление или чувственное понятие, благодаря которому выявляются закономерности, существующие в природе и обществе. Он понимается как повторяющийся шаблон или образец, элементы которого повторяются предсказуемо.

После умножения входных сигналов на веса применяется активационная функция, которая определяет выходной сигнал нейрона. Популярные активации включают ReLU, sigmoid и tanh.

Обучение таких сетей происходит путем минимизации функции потерь. Для этого используется градиентный спуск и метод обратного распространения ошибки.

Полностью связанные сети широко используются в задачах классификации, регрессии и распознавания образов. Они являются основой многих современных моделей машинного обучения и глубокого обучения. В то же самое время полностью связанные нейронные сети характеризуются недостаточной эффективностью при работе с изображениями и сложными структурами данных.

Рекуррентные нейронные сети (RNN, Recurrent Neural Networks) — это тип нейронных сетей, специально разработанный для работы с последовательными данными, такими как временные ряды, тексты, аудио и видео. Основная особенность RNN заключается в том, что они способны сохранять информацию о предыдущих шагах последовательности и использовать ее для прогнозирования будущих шагов [104].

К проблемам рекуррентных нейронных сетей стоит отнести то, что при глубоком обучении возникает проблема затухания градиентов, когда ошибка, распространяемая назад во времени, становится слишком маленькой, что

затрудняет обучение ранних слоев сети, а также противоположная проблема – когда градиенты становятся слишком большими, что приводит к нестабильной работе сети. Для решения этих проблем разрабатываются улучшенные архитектуры.

Свёрточные нейронные сети (CNN, Convolutional Neural Networks) представляют собой особый класс нейронных сетей, которые особенно эффективны для работы с данными, имеющими пространственную структуру, такими как изображения, видео и аудиосигналы. Свёрточные сети получили широкое распространение благодаря своей способности автоматически выявлять признаки на разных уровнях абстракции, что делает их незаменимыми в задачах компьютерного зрения, обработки изображений и речи [104].

Появление свёрточных нейронных сетей обусловлено развитием таких архитектур, как когнитрон и неокогнитрон. Наибольшее распространение получила модель R-CNN (Region Based Convolutional Neural Networks), использующие в своей работе ограничивающие рамки.

Свёрточные нейронные сети наилучшим образом подходят для работ, связанных с распознаванием образов дефектов на ЦКТ. На рисунке 3.31 представлены алгоритмы работы различных свёрточных нейронных сетей [105].

Для обнаружения визуальных дефектов, авторами [28-44] используются различные нейронные сети (R-CNN, Mask R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, FCN, YOLO, CUDA, ResNet-101, PANet, DeepLabV3+ и многие другие), а также их совокупности. Большинство из них относятся к свёрточным нейронным сетям [98].

Процесс распознавания образов дефектов на ЦКТ включает в себя использование свёрточных нейронных сетей, платформ для построения моделей и методов компьютерного зрения, включающих библиотеки для обработки и анализа фотоизображений (Рисунок 3.31).

Компьютерное зрение — это теория и технология получения информации из изображений. Причем изображение может быть, как отдельной фотографией, так и последовательностью кадров (видео), полученной из видеофайла или с видеокamеры в режиме реального времени [106].

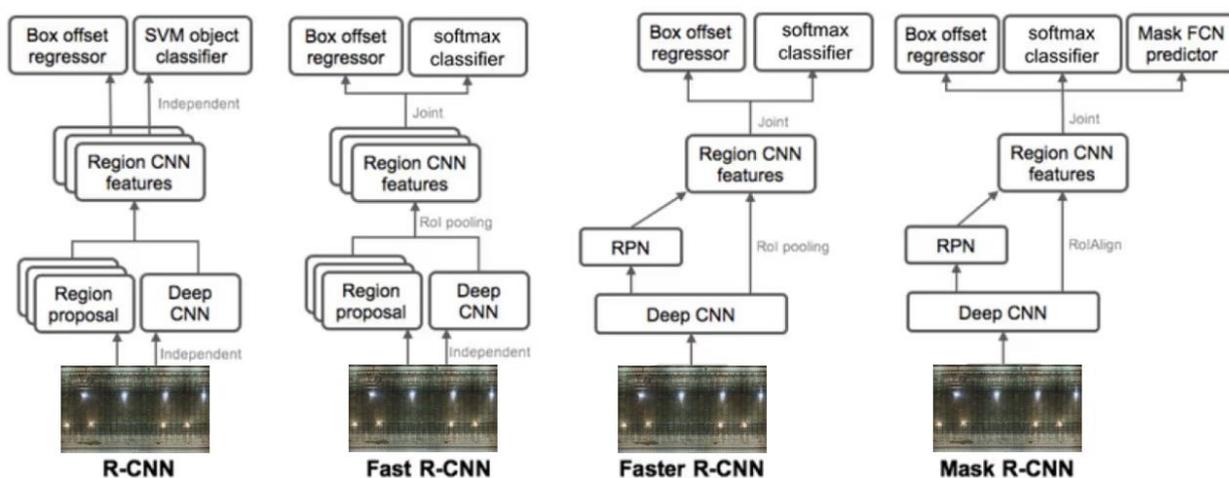


Рисунок 3.31 - Алгоритмы обработки информации моделями R-CNN
(по материалам [105])

Задачей компьютерного зрения является обнаружение, отслеживание и классификация различных объектов, запечатлённых на фотографии. Цель обнаружения – поиск на изображении объекта, для чего используются границы (контуры), особые точки, информация о цвете и т.д. [106, 98].

В настоящее время для распознавания объектов используются глубокие сверточные нейронные сети. Поддержка таких сетей реализована в OpenCV, которая является стандартом в области компьютерного зрения [106, 98].

OpenCV (от англ. Open Source Computer Vision Library) — это библиотека алгоритмов компьютерного зрения с открытым исходным кодом. Библиотека распространяется по лицензии BSD, следовательно, она может свободно использоваться в академических и коммерческих целях [106].

Перед тем, как запускать алгоритм компьютерного зрения, необходимо выполнить обработку изображений, которая включает в себя изменение размеров, выполнение выравнивания гистограммы, сглаживание для избавления от цифрового шума. Многие алгоритмы чувствительны к шумам, и их наличие может привести к не корректному нахождению границ объекта или ложным точкам [106].

Цифровое изображение представляет собой набор пикселей, каждый из которых имеет цвет, выраженный числовыми значениями, которых в полноцветных изображениях три: первое число задает количество красного цвета, второе – зеленого и третье – синего (цветовая модель RGB) [106].

3.4.2. Выбор архитектуры нейронной сети

В ходе выполненного анализа существующих свёрточных нейронных сетей [107-115] установлено, что архитектура YOLO является оптимальной для распознавания образов дефектов на ЦКТ.

YOLO (You Only Look Once) – это архитектура нейронной сети для обнаружения объектов в реальном времени. Версия YOLO v11 является последней на данный момент и была представлена в октябре 2024 года. В этой версии значительно улучшена производительность и точность по сравнению с предыдущими итерациями, а также добавлены новые возможности, такие как поддержка различных типов данных и улучшенные алгоритмы обучения [116-125].

Архитектура нейронной сети YOLO состоит из 24 конволюционных слоев, за которыми следует 2 полностью связанных слоя. В качестве модулей приема используются 11 редукционных слоев, за которыми следуют 33 конволюционных слоя (Рисунок 3.32) [116].

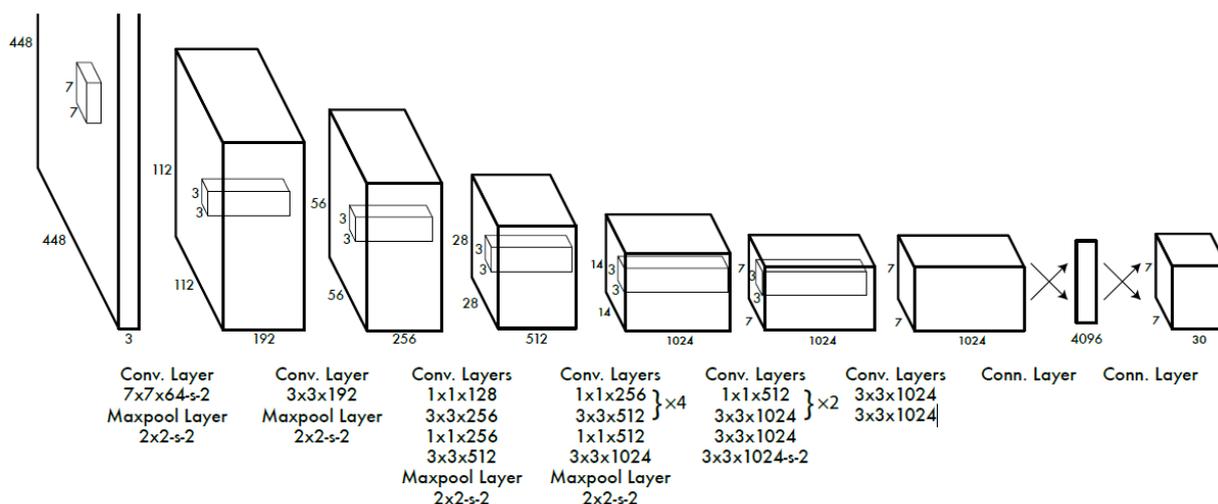


Рисунок 3.32 – Архитектура нейронной сети YOLO [116]

Основные улучшения YOLO v11 включают:

1. Использование обновленной архитектуры модели позволяет лучше обрабатывать сложные сценарии и увеличивать точность детектирования объектов;
2. Поддержка различных типов данных, включая видео и 3D-данные, что делает её более универсальной для различных задач компьютерного зрения;
3. Новые методы оптимизации и регуляризации помогают улучшить качество обучения моделей и снизить вероятность переобучения;
4. Оптимизация кода и улучшение вычислительных процессов позволяют YOLO v11 работать быстрее без потери точности;
5. YOLO v11 легко интегрируется с популярными фреймворками машинного обучения, такими как PyTorch и TensorFlow, что упрощает использование модели в реальных проектах.

YOLO v11 имеет несколько ключевых преимуществ перед своими конкурентами, такими как Faster R-CNN, SSD и другие современные архитектуры для обнаружения объектов, заключающиеся в высокой скорости работы, простоте и эффективности архитектуры, универсальности, высокой точности, удобстве интеграции и доступности (открытый исходный код).

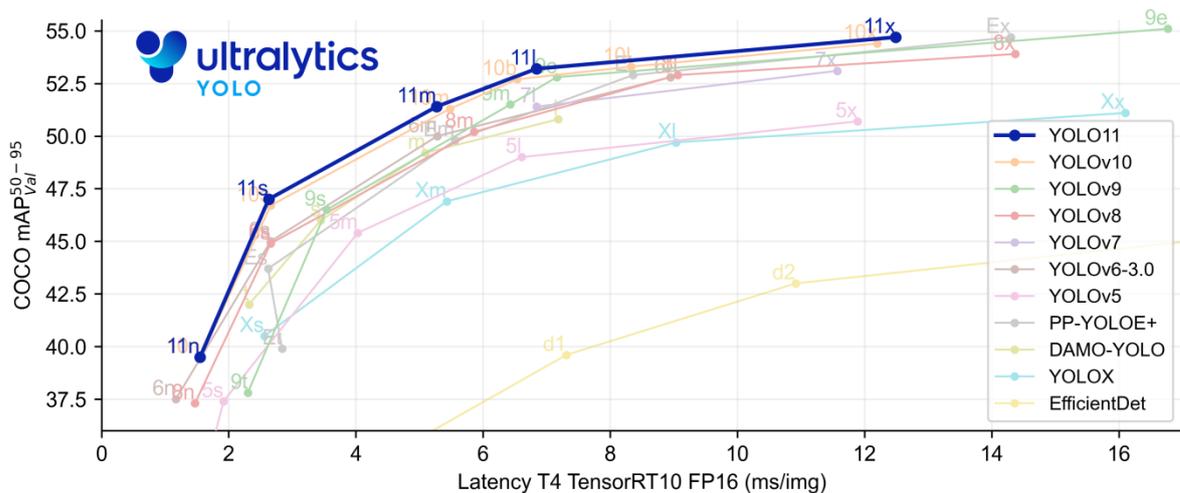


Рисунок 3.33 – Графики производительности моделей YOLO [117]

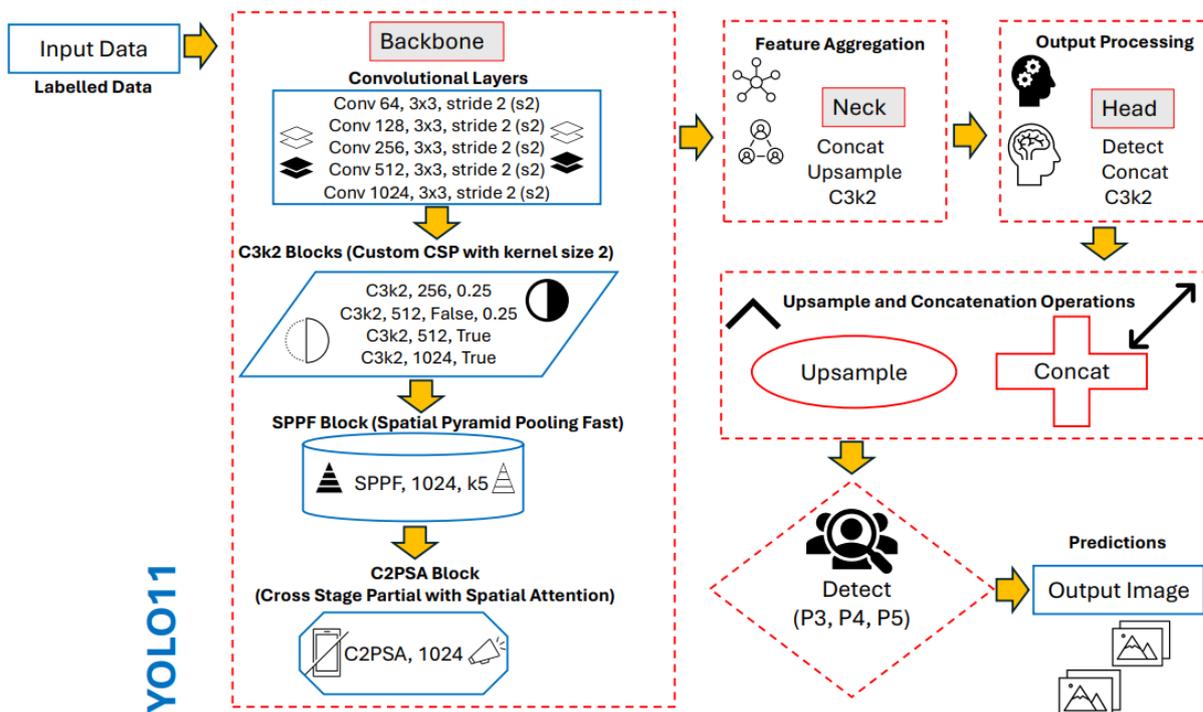


Рисунок 3.34 – Архитектура нейронной сети YOLO v11 [118]

Опираясь на вышесказанное, в данной работе использовалась архитектура YOLO v11 для распознавания образов дефектов на ЦКТ.

Неотъемлемой частью обучения нейронной сети на основе собственных исходных данных является выбор инструментария их аннотирования.

3.4.3. Выбор инструментария для аннотирования

Для того, чтобы нейронная сеть могла распознавать дефекты на ЦКТ, ее необходимо обучить. Этот процесс осуществляется на основе подготовленных данных: выборка изображений, содержащих присвоенные метки для каждого вида дефекта на вводимой ЦКТ. Метка, которая выводит сеть, будет соответствовать заранее определенному классу. Если существует всего только один класс, то применяется термин «распознавание», тогда как задача распознавания нескольких классов часто называется «классификацией» [1].

Присвоение метки определенной области фотоизображения называется аннотированием, при которой происходит разметка данных определенными тегами (характеристик, признаков, атрибутов), по которым искусственный интеллект будет учиться определять, где именно находится дефект [1].

Для аннотирования фотоизображений используются инструменты с открытым исходным кодом, такие как LabelMe, Microsoft COCO, VoTT, Diffgram, CVAT, Label Studio и пр. [126-134]. В открытом доступе представлены наборы данных цифровых изображений с аннотациями, которые постоянно пополняются, свободны в использовании и открыты для общественного пользования. Однако в открытых базах данных отсутствуют фотоизображения дефектов перегонных тоннелей метрополитена [1].

Аннотирование фотоизображений конструкций перегонного тоннеля, содержащие дефекты, выполняется в следующей последовательности:

- определение типов дефектов, поиск которых необходимо выполнить в дальнейшем;
- создание классов, соответствующих каждому типу дефектов;
- загрузка фотоизображений, содержащих требуемые дефекты;

- выполнение аннотирования на каждом фотоизображении – создание полигона для каждого дефекта с присвоением соответствующего класса;
- сохранение и экспорт созданного набора данных (Dataset) для дальнейшей семантической сегментации.

Полученный набор данных (Dataset) необходим для обучения нейронной сети и включает в себя три выборки:

- тренировочная выборка (**Training set**): используется для обучения модели. Эта часть составляет основную массу данных (~70–80%);
- валидационная выборка (**Validation set**): применяется для оценки качества модели во время процесса обучения. Она помогает избежать переобучения и выбрать оптимальные гиперпараметры (~10–20%);
- тестовая выборка (**Test set**): служит для финальной проверки производительности уже обученной модели. Важно, чтобы тестовые данные были абсолютно новыми для модели (~10–20%).

Выбор CVAT, как инструментария аннотирования, обусловлен следующими критериями:

- автоматическая маркировка, которая ускоряет процесс аннотирования до 10 раз;
- возможность экспортировать набор данных аннотирования в различные форматы;
- использование платформы управления наборами данных (Datumago) совместно с CVAT позволяет создавать, преобразовывать и анализировать наборы данных;
- улучшенная SSO (Single Sign-On – система единого входа);
- улучшенный LDAP (Lightweight Directory Access Protocol – облегченный протокол доступа к каталогам);

- интеграция с Roboflow и HuggingFace;
- круглосуточная корпоративная поддержка по SLA (Service Level Agreement – соглашение об уровне обслуживания);
- созданы готовые образы Docker, позволяющие работать в CVAT локально – использование собственного корпоративного сервера с возможностью подключения к нему пользователей;
- большинство нейронных сетей могут использовать наборы данных, подготовленные в CVAT.

Возможность использования инструментария аннотирования в локальном режиме играет важную роль, так как все объекты ГУП «Московский метрополитен» являются стратегически важными. При использовании локальной версии основным местом хранения материалов будет являться корпоративный сервер, обслуживание которого осуществляется системным администратором. Специалисты могут подключаться к серверу и выполнять аннотирование новых фотоизображений в существующем или новом проекте. Все результаты работ будут храниться в одном месте.

3.4.4. Создание набора данных для обучения нейронной сети

Применение нейронной сети для поиска дефектов на ЦКТ требует её предварительного обучения на собственных исходных данных, которые представляют собой подготовленные определенным образом графические и текстовые файлы заданного формата, которые используются в YOLO v11.

Процесс автоматизации поиска и обнаружения визуальных дефектов конструкций перегонных тоннелей включает в себя следующие этапы:

- Создание выборки, на основе построенной ЦКТ;
- Аннотирование обучающей выборки;
- Автоматическое обнаружение визуальных дефектов с помощью свёрточной нейронной сети;

- Визуализация и количественная оценка зафиксированных дефектов.

Построенная ЦКТ отображает текущее визуальное состояние внутренней поверхности конструкций перегонного тоннеля. Запечатленные на ней дефекты будут выступать в качестве входной исходной информации, для чего требуется извлечение каждого дефекта из ЦКТ в отдельное фотоизображение. Набор таких фотоизображений формирует обучающую выборку.

Полученная в ходе исследований на тестовом 120-метровом участке ЦКТ содержит два вида дефектов: мокрые пятна и следы выщелачивания (Рисунок 3.35). Для обучения нейронной сети, в неё необходимо подавать аннотированные изображения небольшого размера, а полученная ЦКТ имеет размер 5360 на 8912 пикселей.

Для лучшего и более точного обучения нейронной сети необходимо также загружать фотоизображения, которые однозначно не содержат дефекты. Это позволит компьютерному зрению лучше различать различные виды дефекты на ЦКТ.

Набор данных является наиболее важной составляющей машинного обучения. Исследуемый участок перегонного тоннеля содержит небольшое количество дефектов, которые состоят из 53 следов водопроявлений и 20 следов выщелачивания. Таким образом, обучающая выборка будет состоять из 73 фотоизображений, что крайне мало. Высокого качества обучения в этом случае добиться будет очень сложно.

Проблема малого количества исходных данных решается генерированием новых данных на основе имеющихся – аугментация данных, при помощи которого увеличивается обучающая выборка изображений.

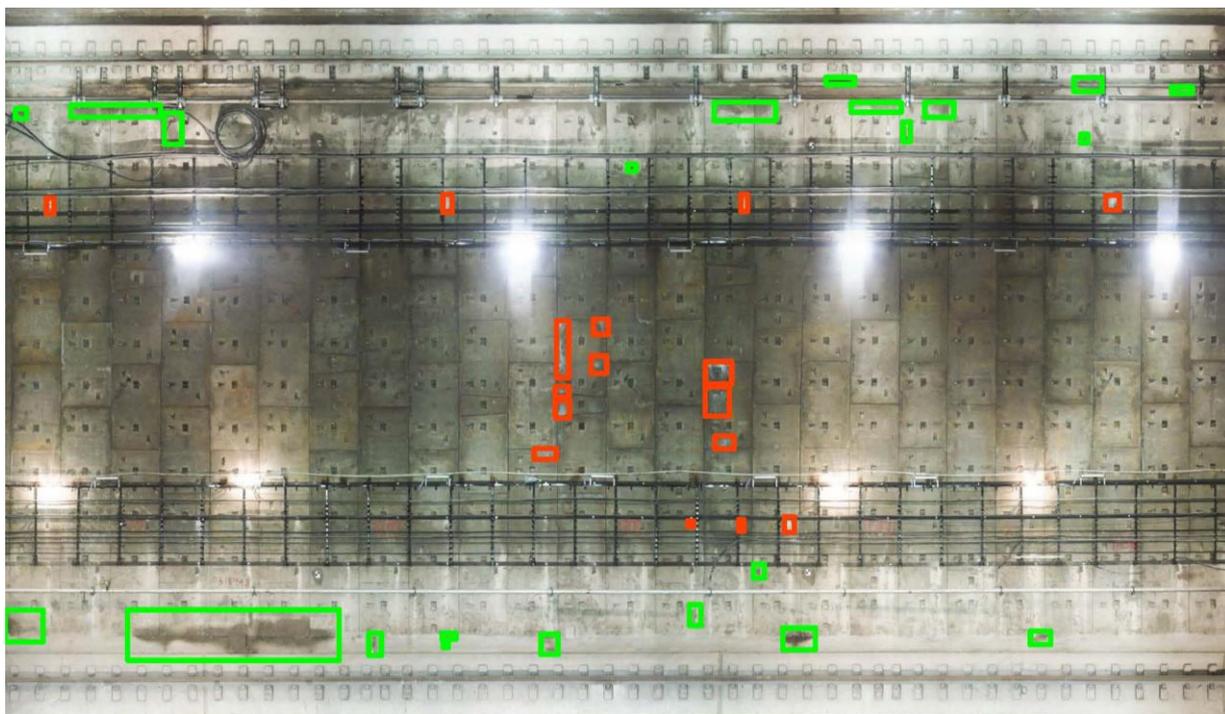


Рисунок 3.35 - Участок ЦКТ с имеющимися дефектами: красным цветом выделены следы водопроявления – мокрые пятна, зеленым – следы выщелачивания

Аугментация, как метод обработки изображений, позволяет изменять условия съемки, деформировать объекты, переворачивать, менять тон и добавлять иные искажения, которые хорошо имитируются. За счет моделирования разнонаправленных деформаций увеличивается качество модели с увеличенной устойчивостью к различным шумам во входных данных [135].

Использование аугментации осуществляется двумя способами: единожды перед обучением и встраиванием в процесс обучения (аугментация на лету). Так как аугментация на лету не предусматривает предварительное аннотирование, то данный способ не подходит для использования в исследованиях детектирования визуальных дефектов в перегонных тоннелях.

Существуют различные типы аугментации: геометрические, яркостные, аддитивные и зашумления. В случаях, когда требуется изменение только геометрических размеров с продольными и поперечными искажениями, применяются следующие способы аугментации: горизонтальное и

вертикальное отражение, кадрирование, масштабирование и изменение цвета. Также используются различные комбинации вышеописанных способов [135].

Для аугментации имеющихся фотоизображений дефектов были использованы следующие методы:

- переверот по вертикали и по горизонтали;
- поворот на заданный угол;
- произвольная обрезка в различных пропорциях и положениях;
- произвольное масштабирование в большую и меньшую стороны;
- изменение яркости и/или контрастности.

Аугментация фотоизображений выполнялась с использованием PyTorch – открытый фреймворк для глубокого обучения, созданный Facebook's AI Research lab (FAIR). Он написан на языке Python и предназначен для облегчения разработки и обучения нейронных сетей [136].

Запуск библиотеки «torchvision.transforms» позволяет выполнять преобразования изображений. Пример кода представлен на рисунке 3.36. По результатам аугментации в PyTorch из 73 имеющихся фрагментов дефектов было сгенерировано 762 фотоизображения, которые в дальнейшем будут использоваться в качестве Базы Данных (Dataset).

Примеры аугментированных фотоизображений представлены на рисунке 3.37.

```

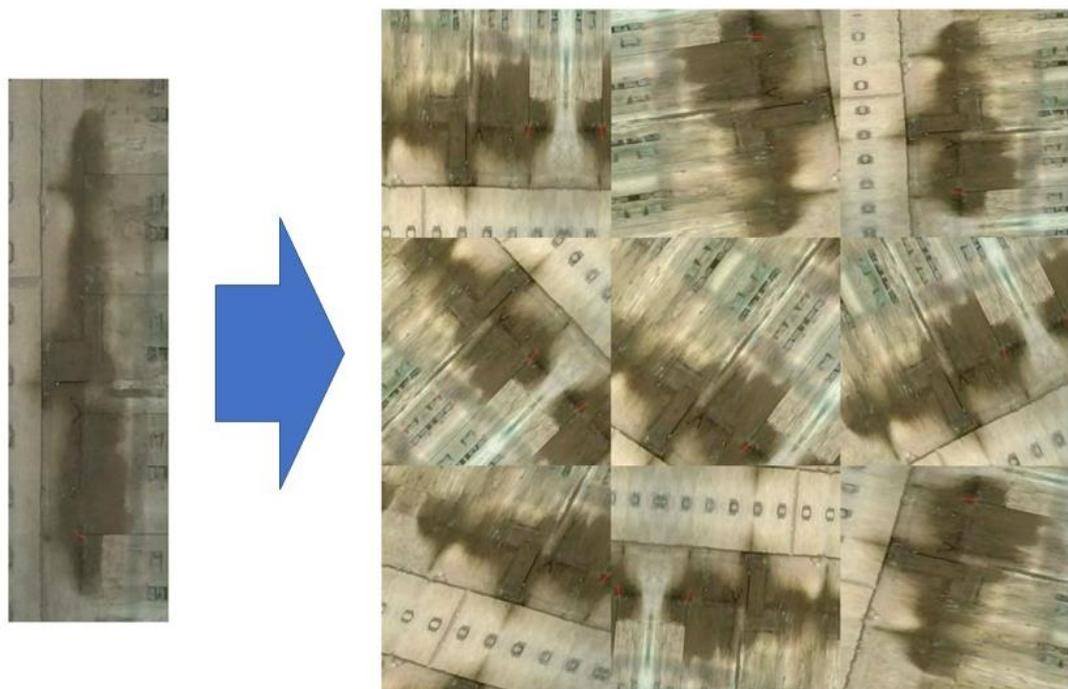
import torch
from torchvision.transforms import v2

H, W = 32, 32
img = torch.randint(0, 256, size=(3, H, W), dtype=torch.uint8)

transform = v2.Compose([
    # Поворот изображения по горизонтали
    v2.RandomHorizontalFlip(),
    # Поворот изображения по вертикали
    v2.RandomVerticalFlip(),
    # Поворот изображения на заданный угол
    v2.RandomRotation(20),
    # Обрезка случайной части изображения с масштабированием исходного размера
    v2.RandomResizedCrop(180),
    #
    v2.Normalize(mean=[0.485, 0.456, 0.406], std=[0.229, 0.224, 0.225])
])
# Применение преобразований к изображению
augmented_image = transforms(img)

```

Рисунок 3.36 - Пример использования библиотеки «torchvision.transforms»



а)

б)

Рисунок 3.37 – Пример аугментации фотоизображения, содержащего следы водопроявления: а) полученные из ЦКТ; б) после использования аугментации

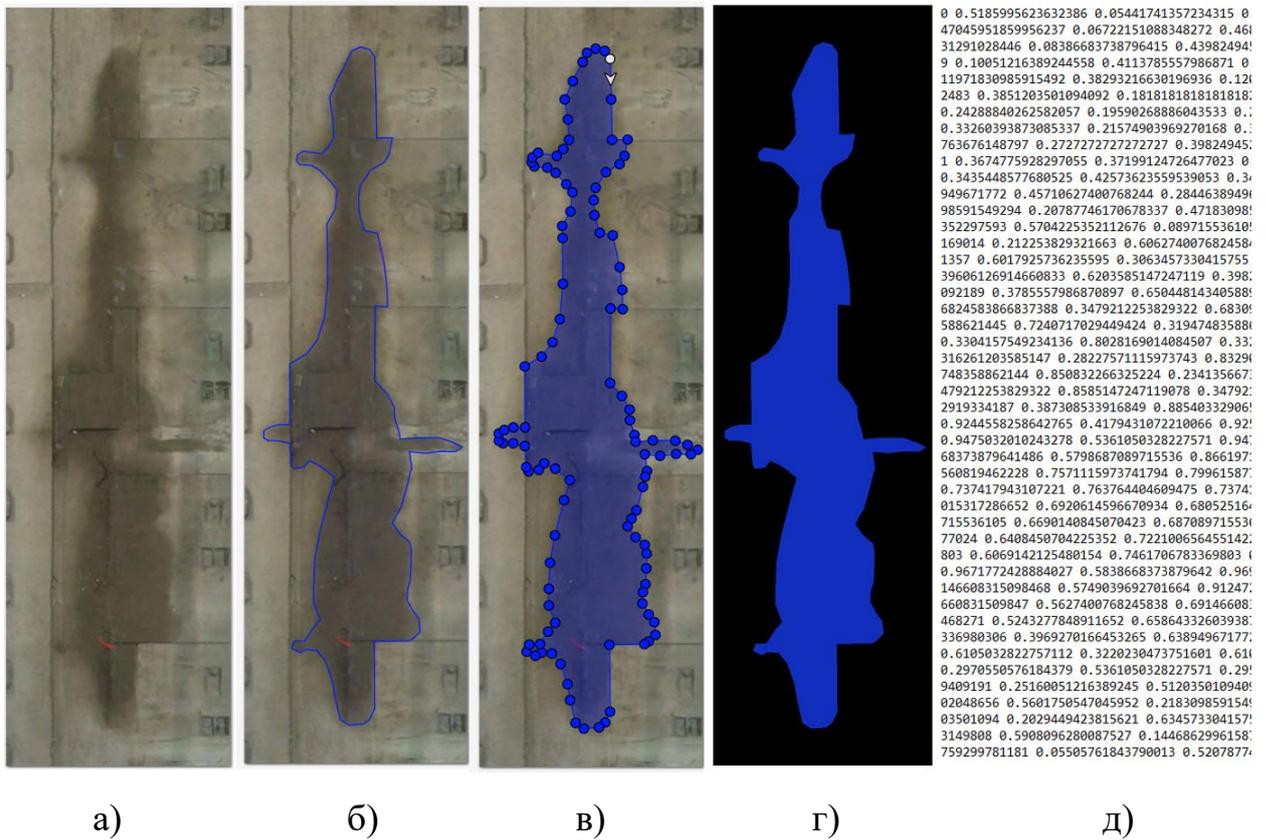
3.4.5. Аннотирование фотоизображений из набора данных

Аннотированию подлежат все фотоизображения, полученные после аугментации. На исследуемых конструкциях присутствовали следы протечек (мокрые пятна) и выщелачивания, отсюда разметке на изображениях подлежат два класса.

Перед началом аннотирования необходимо все изображения разделить на две папки, соответствующие обучающей и тестовой выборкам. Для обучения (train) задействуется 80% от общего количества фотоизображений в наборе данных, а оставшиеся 20% используются для тестирования (validation) нейронной сети.

В ходе аннотирования на фотоизображениях полигонами (Рисунок 3.38, в) отмечаются области, которым присваивается соответствующий класс и создается маска дефекта отдельным файлом (Рисунок 3.38, г), содержащим в себе бинарную информацию: 1 – в этом месте имеется дефект (синий цвет), 0 – дефекта нет (черный цвет) (Рисунок 3.38, д). Эти два файла связаны между собой и должны использоваться только совместно [1].

В соответствии с требованиями к обучению нейронным сетям, аннотированные данные преобразуются в специальный формат набора данных, таких как Microsoft COCO и пр. [1].



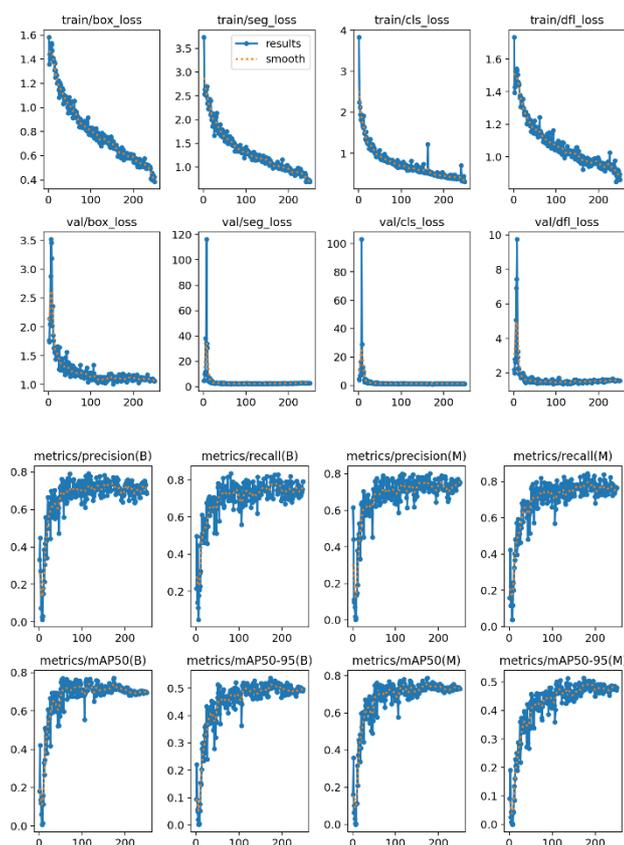
а) б) в) г) д)

Рисунок 3.38 - Последовательность создания графических аннотаций следов водопроявления в перегонном тоннеле: а) мокрое пятно (далее дефект) на стыке тубинговой обделки и верхнего строения пути; б) контур дефекта; в) очерченный полигон по контуру дефекта; г) маска дефекта; д) бинарный вид маски

Следующим этапом исследований являлось обучение нейронной сети, выполняемое на основе подготовленного набора данных, который содержит в себе дефекты, нахождение которых достоверно, и они классифицированы.

3.4.6. Обучение нейронной сети

Для обучения нейронной сети использовалась созданная База Данных (Dataset) дефектов с их масками, разделенная на тренировочную и валидационную выборки. По этим входным данным была обучена 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 3.39) [1].



a)

b)

Рисунок 3.39 - Результаты обучения нейронной сети YOLO v11: а) потери обучающей и валидационной выборок; б) точность полученных данных обучения

Графики потерь (Loss) показывают меру ошибки, которую делает модель при прогнозировании на этапе обучения. Чем меньше значение потерь, тем точнее прогнозы модели на тренировочных данных. По мере увеличения числа эпох обучения, потери должны постепенно снижаться. Это указывает на то, что модель учится и становится всё точнее. Если потери перестают уменьшаться после определённого момента, это может указывать на достижение локального минимума или того, что текущая архитектура модели достигла своего предела. Возможно, потребуется изменить архитектуру модели или увеличить объём данных. В тех случаях, когда потери начинают расти, это признак того, что модель начинает переобучаться. Переобучение означает, что модель хорошо работает на тренировочном наборе, но теряет способность обобщать новые данные [137].

Базовая функция потерь для модели YOLO представлена в формуле [116]:

$$\begin{aligned}
& \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2] \\
& + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} [(\sqrt{\omega_i} - |\sqrt{\hat{\omega}_i}|)^2 + (\sqrt{h_i} - |\sqrt{\hat{h}_i}|)^2] \\
& + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_i)^2 + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{noobj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \\
& + \sum_{i=0}^{S^2} \mathbb{1}_i^{obj} \sum_{c \in classes} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2
\end{aligned} \tag{3.12}$$

В формуле выше $\mathbb{1}_i^{obj}$ свидетельствует о появлении объекта в ячейке i и $\mathbb{1}_{ij}^{obj}$ обозначает, что j -й предсказатель границы в ячейке i «ответственен» за это предсказание [116].

Графики «box_loss» является функцией потерь при регрессии ограничивающей рамки идентифицируемого визуального дефекта. Чем меньше это значение, тем точнее прогнозируемые ограничивающие рамки.

Графики «seg_loss» — это потери при обучении для сегментации выявленного визуального дефекта. Используется для оценки качества выполняемой сегментации.

Графики «cls_loss» — это потери при классификации, которые измеряют ошибку в прогнозируемых вероятностях классов для каждого визуального дефекта на ЦКТ по сравнению с истинными значениями. Чем меньше это значение, тем точнее модель предсказывает какой дефект зафиксирован – следы протечек или выщелачивание.

Графики «dfl_loss» — это потери в деформируемых слоях свёртки (особенность архитектуры YOLOv11), которые потери измеряют ошибки, предназначенные для улучшения способности модели распознавать объекты с различными масштабами и соотношениями сторон. Минимальные значения данных потерь указывают на то, что модель лучше справляется с деформациями объектов и изменениями их внешнего вида.

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.

Среднее пересечение над объединением (Mean Intersection over Union, MIOU) — эта метрика используется для оценки качества сегментации изображений и является важным показателем качества работы алгоритма сегментации изображений. Она рассчитывается как среднее значение IoU (Intersection over Union) для всех классов на тестовом наборе данных по формуле:

$$IoU = \frac{TP}{TP + FN + FP} \quad (3.13)$$

Precision (точность) определяется как точность положительных предсказаний [121]:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.14)$$

Recall (полнота) определяет способность модели обнаруживать все фактические положительные результаты [121]:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.15)$$

где: TP (True Positive) — количество пикселей, правильно отнесенных к данному классу.

FN (False Negative) — количество пикселей данного класса, неправильно отнесенных к другим классам.

FP (False Positive) — количество пикселей других классов, ошибочно отнесенных к данному классу.

После вычисленного значения IoU для каждого класса, MIoU определяется как среднее арифметическое этих значений:

$$MIoU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IoU_i \quad (3.16)$$

где N – общее количество классов.

Средняя точность (Average Precision, **AP**) — эта метрика используется для оценки качества работы алгоритмов обнаружения объектов. Высокое значение AP указывает на хорошую способность модели точно и полно обнаруживать объекты на изображениях. Она рассчитывается на основе кривой PR (Precision-Recall) и отражает среднее значение точности (precision) при различных значениях полноты (recall) по формуле:

$$AP = \int_0^1 P(r) dr \quad (3.17)$$

где $P(r)$ – точность (precision) при заданном уровне полноты (recall) r .

Высокое значение AP указывает на хорошую способность модели правильно обнаруживать объекты и избегать ложноположительных срабатываний. Низкое значение AP свидетельствует о том, что модель либо пропускает многие объекты (низкий recall), либо выдает много ложных положительных результатов (низкая precision).

Средняя точность (mean Average Precision, **mAP**) — это метрика, используемая для оценки качества работы алгоритмов обнаружения объектов. Она рассчитывается на основе средних значений точности (average precision, AP) для каждого класса объектов в наборе данных по формуле:

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad (3.18)$$

где N – общее количество классов;

AP_i – средняя точность для класса i , рассчитываемая на основе кривой PR (Precision-Recall).

Оценка точности выполняется аналогично средней точности (AP).

Метрики «mAP50» являются отображением средней точности, рассчитанной при пороге, равном 0,50, учитывающий только простые обнаружения [117].

Метрики «mAP50-95» являются средним значением средней точности, рассчитанной при различных пороговых значениях в диапазоне от 0,50 до 0,95. Данные метрики дают полное представление о работе модели на различных уровнях сложности [117].

Средняя запоминаемость (mean Average Recall, mAR) — эта метрика используется для оценки качества работы алгоритмов обнаружения объектов, которая рассчитывается на основе средних значений полноты (recall) для каждого класса объектов в наборе данных по формуле:

$$mAR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (3.19)$$

Где N – общее количество классов;

R_i – полнота (recall) для класса i , рассчитываемая на основе кривой PR (Precision-Recall).

Высокое значение mAR указывает на хорошую способность модели находить большинство объектов различных классов на изображениях.

F1-score — это метрика, которая используется для оценки качества бинарной классификации, включая задачи обнаружения объектов. Она сочетает в себе показатели точности (precision) и полноты (recall) и считается гармоническим средним этих величин.

$$F1\text{-score} = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (3.20)$$

где: precision – доля правильных положительных предсказаний среди всех положительных предсказаний;

recall – доля найденных положительных примеров среди всех действительных положительных примеров.

В общем случае наилучшим считается такой сценарий, при котором точность увеличивается вместе с уменьшением потерь. Модель становится всё более точной и способна правильно распознавать примеры. Когда точность перестает увеличиваться, несмотря на уменьшение потерь, возможно, модель достигла своего максимума. Это также может свидетельствовать о недостатке данных или необходимости изменения архитектуры. Падение точности на валидационном наборе при одновременном росте точности на тренировочном наборе является признаком переобучения. Модель начинает запоминать особенности тренировочного набора вместо того, чтобы научиться обобщать.

Анализ тренировочных и валидационных кривых позволяет понять, насколько эффективно проходит процесс обучения модели. Они помогают выявить проблемы, такие как переобучение или недообучение, и принять меры для улучшения модели.

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. Примеры сегментации показаны рисунке 3.40 [1].

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.

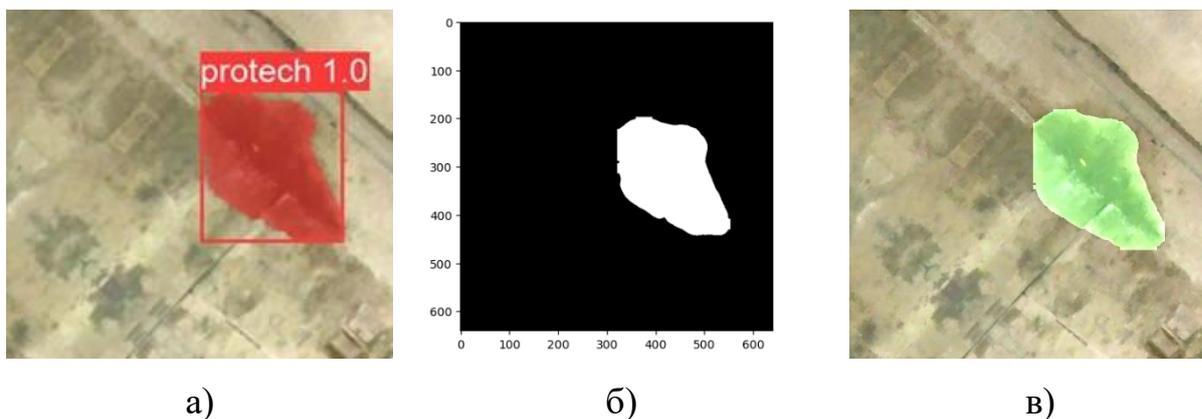


Рисунок 3.40 - Результаты детекции и сегментирования следов протечки:

а) геоизображение на выходе из нейронной сети с присвоением класса и вероятностью идентификации; б) бинарная маска сегментированного дефекта; в) наложение маски на дефект.

Маска сегментированного дефекта на рисунке 3.40 состоит из 38481 пикселя, таким образом площадь данного дефекта будет равна:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{дефекта}} &= \sum \text{pixels on mask} \times S_{\text{pixel}} = 38481 \times 0.0029^2 \\
 &= 0.3236 \text{ м}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Выводы по главе

По завершению опытных испытаний предложенного технического средства и метода пространственного моделирования внутренней поверхности обделки перегонных тоннелей установлено следующее:

- разработан алгоритм подготовки пространственных данных;
- определено требуемое количество опорных знаков, закрепляемых на конструкциях обделки прямолинейных участков перегонного тоннеля;
- экспериментально определены и доказаны параметры зонирования и построения ЦКТ для прямолинейных участков перегонных тоннелей, выполненных из сборной железобетонной обделки;

- обоснован выбор архитектуры нейронной сети и средства аннотирования.

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. Таким образом, повышение точности контроля за развитием деформационных процессов, в части визуальных дефектов, позволит повысить эксплуатационную надежность и безопасность пассажирских перевозок.

Глава 4. Апробация предложенного метода на экспериментальном участке перегонного тоннеля

Тестовый участок, описанный в 3 главе, с точки зрения пространственного расположения конструкций является прямолинейным. Для апробации предложенного метода выполнения фотограмметрических работ в тоннеле с использованием специального технического средства, камеральной обработки и построения ЦКТ требовался перегонный тоннель, содержащий в себе не только прямолинейные участки с положительными и отрицательными уклонами, но и поворотами различных радиусов [98].

ГУП «Московский метрополитен» для экспериментальных исследований был выделен участок перегонного тоннеля Троицкой линии между построенными, но не введенными в эксплуатацию станциями «Генерала Тюленева» (ранее – «Улица Генерала Тюленева») и «Университет Дружбы Народов» (ранее – «Улица Академика Опарина»), длина которого составляет 2.674 км.

Данный перегонный тоннель имеет следующие характеристики:

- проектный внутренний диаметр $d_{\text{проектн.}} = 5.400$ м;
- тип обделки – сборная железобетонная;
- длина тубинговых колец – 1.4 метра;
- состояние готовности тоннеля на момент выполнения работ – более 90%;
- круговые кривые в плане имеют радиусы закруглений от 350 до 3000 метров;
- круговые кривые в профиле имеют радиусы закруглений от 3000 до 5000 метров;
- протяженность криволинейных участков составляет от 60 до 540 метров;
- отрицательные уклоны находятся в диапазоне от 3 до 30%;
- положительные уклоны находятся в диапазоне от 3 до 36% [98].

Исследования на данном участке позволили рассмотреть возможность применения предложенного метода построения цифровых карт перегонных тоннелей, описанной в 3 Главе данной работы, на криволинейных участках различного радиуса поворота.

4.1. Установка опорных знаков

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:

- на прямолинейных участках два ТПВ через 50-60 метров (Рисунок 4.1, п.4) и одна СФГМ (Рисунок 4.1, п.3) напротив полигонометрического пункта подземной маркшейдерской сети;
- на криволинейных участках два ТПВ через 50-60 метров (Рисунок 4.2, п.4) и две СФГМ: напротив полигонометрического пункта подземной маркшейдерской сети и посередине зоны (Рисунок 4.2, п.4 [98]).

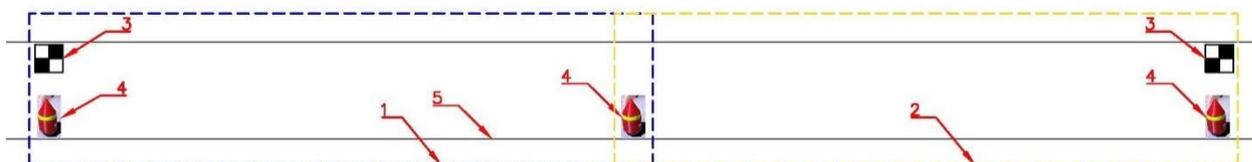


Рисунок 4.1 - Схема расположения опорных знаков на прямолинейных участках перегонного тоннеля: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тубинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля [98]

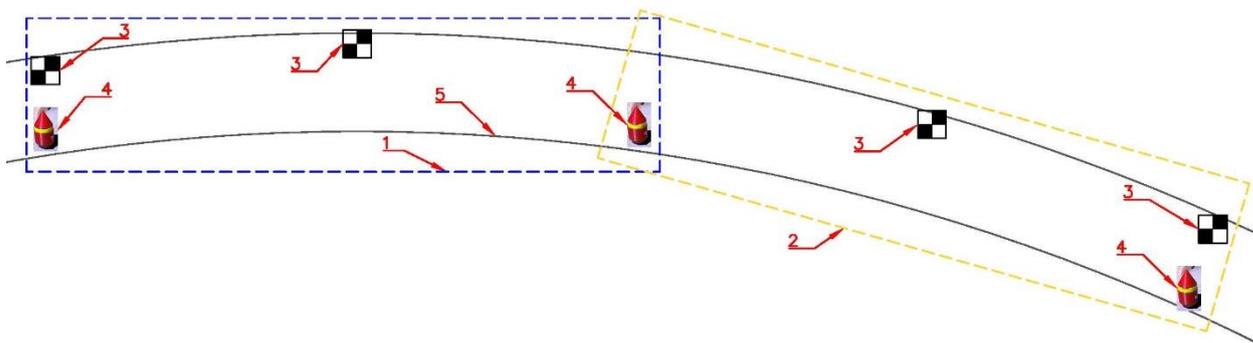


Рисунок 4.2 - Схема расположения опорных знаков на криволинейных участках перегонного тоннеля: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тубинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля [98]

На момент выполнения работ по сбору пространственных данных перегонный тоннель не находился в эксплуатации, однако на его внутренней поверхности образовался грязе-пылевой слой, что обусловлено выполнением строительно-монтажных работ. Для надежного закрепления СФГМ поверхность тубингов предварительно очищалась от крупных частиц пыли ветошью, а мелкие сдувались сжатым воздухом из бытового баллона. Для лучшей адгезии клеевого слоя СФГМ и тубингового кольца, на его поверхность наносился тонкий слой акрилового полимерного клея. На установку всех марок было затрачено около двух часов.

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. На исследуемом участке было зафиксировано два таких места. Пример расположения опорных знаков в таких случаях представлен на рисунке 4.3 [45].

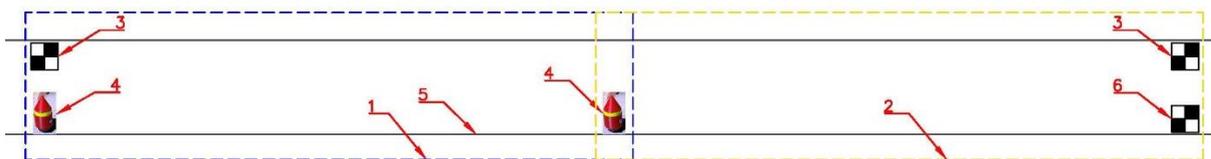


Рисунок 4.3 - Схема расположения опорных знаков в перегонном тоннеле в случае недоступности полигонометрического знака: 1 и 2 – смежные 50-метровые зоны построения ЦМТ; 3 – закрепленные СФГМ на тубинговой обделке; 4 – установленные ТПВ на полигонометрических знаках; 5 – конструкции перегонного тоннеля; 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. Общая длина участка исследований составила 2674 метра [45].

Координирование СФГМ выполнялось после завершения работ по сбору пространственных данных в перегонном тоннеле. Для определения пространственного расположения закрепленных опорных знаков использовался высокоточный электронный тахеометр Leica TS07, с точностью угловых измерений 1" и точностью измерения расстояний 2мм + 2ppm. В качестве исходного планово-высотного обоснования выступали уравненные пункты подземной полигонометрии, установленные каждые 50-60 метров на протяжении всего перегонного тоннеля [98].

Конструктивно пункты подземной полигонометрии представляют собой часть верхнего строения пути, центры которых располагаются преимущественно со стороны дорожки для прохода персонала, однако на круговых кривых, для удобства выполнения маркшейдерских измерений, они были смещены на сторону контактного рельса (Рисунок 4.4).

Для выполнения работ в тоннеле требуется три сотрудника: инженер и два помощника. Инженер отвечает за работу оборудования и перемещение ПТФС по тоннелю, один помощник идёт впереди по направлению съемки и устанавливает ТПВ на полигонометрические знаки, второй – позади ПТФС и демонтирует ТПВ.

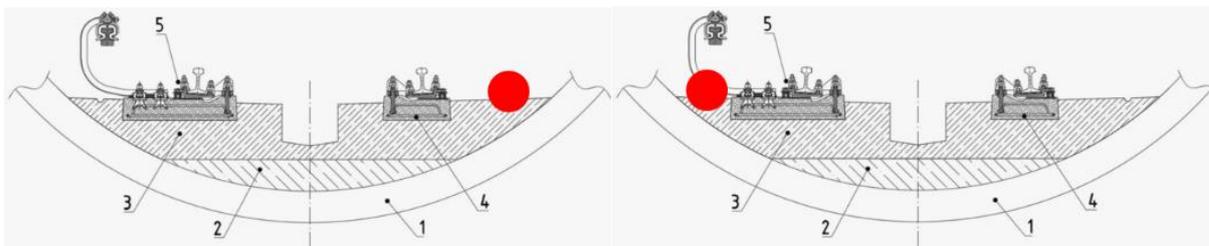


Рисунок 4.4 - Схемы расположения пунктов подземной полигонометрии в тоннеле: слева – со стороны дорожки для прохода персонала; справа – со стороны контактного рельса; 1 – тубинговая обделка; 2 – бетонное основание; 3 – путевой бетон; 4 – полушпала бетонная; 5 – рельсовое крепление

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, в зависимости от удаленности пунктов подземной полигонометрии друг от друга. Для удобства дальнейшей работы с исходными данными, такой участок был принят за интервал съемки.

Разбиение длины перегонного тоннеля на интервалы съемки длиной 500-600 метров позволит выполнять камеральную обработку собранных пространственных данных несколькими исполнителями одновременно.

4.2. Сбор пространственных данных

После установки ТПВ на полигонометрические знаки, был выполнен сбор пространственных данных первого интервала с использованием ПТФС-В. Длина интервала составила 560 метров, затраченное время – 18 минут. По завершению работ на первом интервале, ТПВ устанавливались на следующий интервал, и съемка продолжалась [98].

Суммарно произведена съемка пяти интервалов, общей протяженностью 2674 метра. 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 [98].

По завершению сбора пространственных данных с панорамной камеры были скачаны все полевые материалы для их дальнейшей камеральной обработки [98].

4.3. Построение ЦМТ криволинейных участков перегонного тоннеля

Важная часть исследований по построению ЦМТ относится к изучению возможности использования предложенного метода пространственного моделирования внутренней поверхности перегонных тоннелей, описанной в 3 Главе, на круговых кривых различного радиуса [98].

Экспериментальный участок длиной 2674 м включает в себя круговые кривые со характеристиками, представленными в таблице 4.1 [98].

Таблица 4.1 – Характеристики круговых кривых

Радиус поворота, м	Длина кривой, м	Тангенс, м	Вершина угла	Уклон, ‰	Наличие кривой в профиле	Радиус кривой в профиле, м	Длина кривой в профиле, м
R=350	538,207	338,615	88°06'20.4"	30	ДА	5000	125,000
R=500	314,334	162,556	36°01'12.1"	30	ДА	5000	98,201
R=500	232,313	118,292	26°37'15.9"	3	НЕТ	-	-
R=1000	195,548	98,087	11°12'14.7"	3	НЕТ	-	-
R=3000	59,976	29,989	1°08'43.6"	36	НЕТ	-	-

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 0.11 м до 0.14 м, который позволил достичь величины продольного перекрытия от 97 до 99% [98].

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 (Рисунок 4.5) [79, 98].

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 4.5 - Ошибки репроецирования, полученные для опорных знаков на 50-метровых криволинейных участках с радиусами 350, 500, 1000 и 3000м [98]

Также были получены координаты центров каждого панорамного фотоизображения, которые в дальнейшем будут использованы для построения ЦКТ [98].

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.

На всех исследуемых криволинейных участках использовались следующие типы опорных знаков: две СФГМ и два ТПВ, установленные на пункты подземной полигонометрии.

В таблице 4.2 представлены номера и типы используемых опорных знаков на криволинейных участках.

Таблица 4.2 – Номера опорных точек на криволинейных участках перегонного тоннеля

Радиус поворота, м	Название пункта подземной полигонометрии, на котором установлен ТПВ	Номера СФГМ, используемые для построений	Продольное расстояние между пунктами подземной полигонометрии
R=350	PZ6313 и PZ6369	6 и 7	56,5 м
R=500	PZ5667 и PZ5611	28 и 29	56,2 м
R=1000	PZ4867 и PZ4921	54 и 55	56,2 м
R=3000	PZ4363 и PZ4419	65 и 66	56,1 м

По результатам камеральной фотограмметрической обработки в ПО Agisoft Metashape были построены ЦМТ для каждой зоны рассматриваемых криволинейных участков (Рисунок 4.6) [98].

Как видно из рисунка 4.6, пространственные характеристики перегонного тоннеля полностью сохранены и отсутствуют искажения. Полигональная модель в точности повторяет фактическое пространственное положение конструкций перегонного тоннеля, что подтверждают выполненные контрольные измерения [98].

Таким образом, подтверждено, что наилучшей длиной зоны построения ЦМТ криволинейных участков перегонного тоннеля является 50-60 метров для радиусов 350, 500, 1000 и 3000 метров [98].



Рисунок 4.6 - Построенные ЦМТ 50-метровых участков перегонного тоннеля с опорными знаками: а) $R=350$ м; б) $R=500$ м; в) $R=1000$ м; г) $R=3000$ м [98]

4.4. Построение ЦКТ криволинейных участков перегонного тоннеля

На основе созданной ЦМТ криволинейных участков различного радиуса создаются ЦКТ. Как описывалось в 3 Главе, для построения ЦКТ

требуется три маркера: два маркера характеризуют ось цилиндра и один – центр будущей проекции.

В качестве точек, расположенных на оси цилиндра, используются вычисленные координаты камер, импортированные как маркеры. Центр будущей проекции представляет собой точку, нанесенной на уже подготовленную пространственную модель. Требуется указать места расположения точки центра проекции не менее, чем на двух фотоизображениях (количество проекций в исследованиях было более 12).

Качество построенных ЦКТ зон криволинейных участков перегонного тоннеля 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. На рисунках 4.7 и 4.8 приведены ЦКТ 50-метровых зон, построенные для различных радиусов [98].

Для обеспечения отображения поверхности перегонного тоннеля без искажений требуется определение минимального продольного расстояния, необходимого для построения ЦКТ с минимальными искажениями [98].

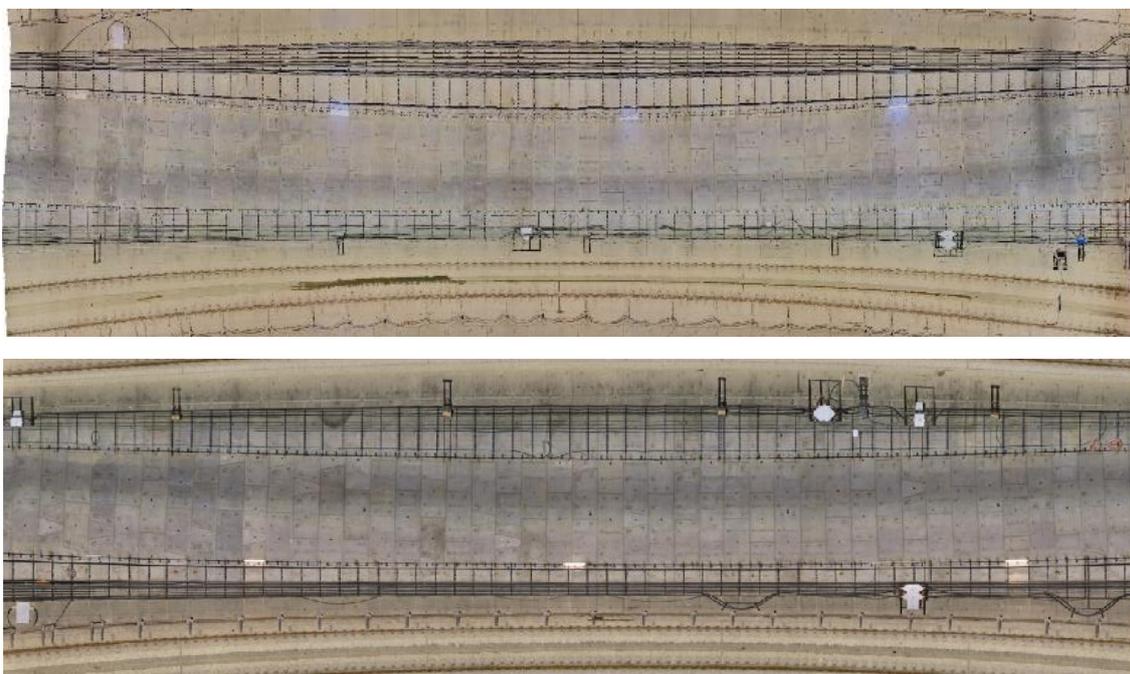


Рисунок 4.7 - ЦКТ 50-метровой зоны криволинейного участка с радиусом поворота:

а) $R=350$ м; б) $R=500$ м



Рисунок 4.8 - ЦКТ 50-метровой зоны криволинейного участка с радиусом поворота:

а) $R=1000$ м; б) $R=3000$ м

Для удовлетворения вышеописанного требования, было выполнено последовательное равномерное уменьшение продольного расстояния построения ЦКТ с шагом 5 метров, с 50 до 5 метров для каждого исследуемого радиуса поворота [98].].

Установлено, что для оптимального построения ЦКТ зон криволинейных участков, требуется разбиение зоны на участки меньшей длины – секции. В таблице 4.3 представлены длины секций зон криволинейных участков, в зависимости от радиуса поворота трассы метрополитена [98].

Таблица 4.3 – Оптимальные длины секции [98]

Радиус поворота, м	350	500	1000	3000
Длина секции, м	12,5	20,0	25,0	50,0

Круговые кривые с радиусом поворота 3000м и более, с точки зрения камеральной обработки и построений ЦМТ и ЦКТ, будут обрабатываться по аналогии с прямолинейными участками [98].

На рисунке 4.9 показан пример разделения 50-метрового участка перегонного тоннеля с радиусом поворота $R=350\text{м}$ на 12,5 -метровые секции ЦКТ.

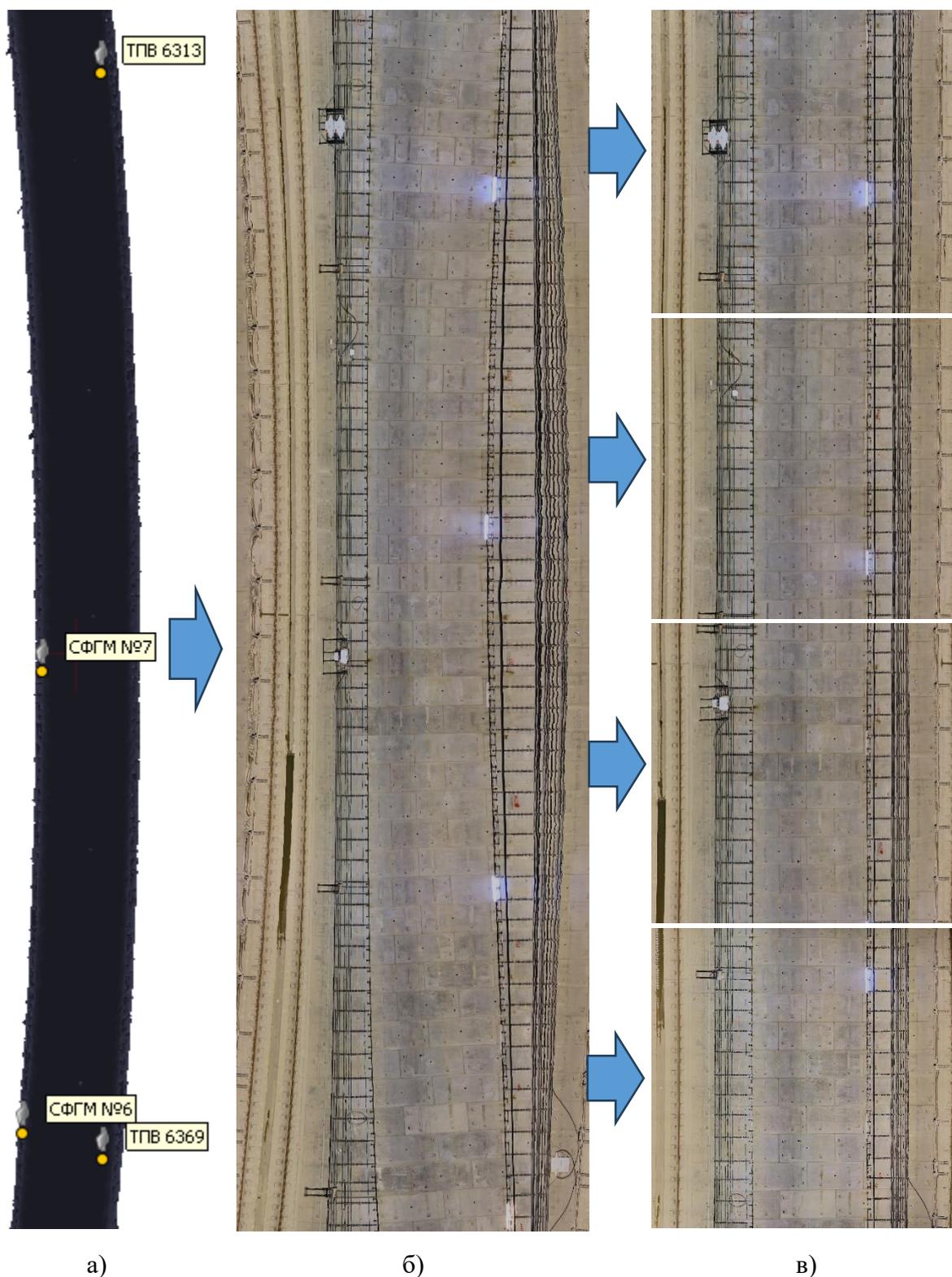


Рисунок 4.9 – Разбиение 50-метровой зоны криволинейного участка с радиусом поворота $R=350\text{м}$ на секции: а) ЦМТ; б) ЦКТ с искажениями; в) 12.5-метровые секции ЦКТ без искажений

Выводы по главе

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.

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.

Список использованных источников

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. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов. М.: ЦентрМАГ, 2025. 265 с.
3. Инструкция по текущему содержанию искусственных сооружений метрополитенов. М.: Транспорт, 2025. 75 с.
4. ГОСТ-57208-2016 Тоннели и метрополитены правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации.
5. ГОСТ 31937-2011 Правила обследования и мониторинга технического состояния.
6. Куликов Ю. Н. Дефекты несущих конструкций подземных сооружений / Ю. Н. Куликов, Е. Ю. Куликова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1998. – № 1. – С. 175-180. – EDN NBWYTF.
7. Куликова Е. Ю. Анализ возможных дефектов несущих конструкций городских подземных сооружений / Е. Ю. Куликова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 3. – С. 5-12. – EDN RGRAOP.
8. Жуков С. А. Обоснование критериев и оценка экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена / С. А. Жуков // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 16-28. – DOI 10.23947/2541-9129-2024-8-4-16-28.
9. Жуков С. А. Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска / С. А. Жуков // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 283-291. – DOI 10.17073/2500-0632-2024-04-259.
10. Куликова Е. Ю. Определение фильтрационным характеристик бетонным конструкций подземным сооружений на основе данным мониторинга / Е. Ю. Куликова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 1. – С. 77-81. – EDN VSUIWP.
11. Лебедев М.О., Романевич К.В. Инженерно-геофизические исследования при реконструкции подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 97–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110.
12. Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации / С. В. Андрианов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 5. – С. 124-132. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.
13. Шилин А. А. Обоснование стратегии эксплуатации и разработка конформативных технологий ремонта конструкций подземных

- сооружений: специальность 25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шилин Андрей Александрович. – Москва, 2002. – 256 с. – EDN QDPIFR.
14. Набатов В. В. Локация течей с помощью георадаров при строительстве и эксплуатации подземных сооружений / В. В. Набатов, Р. М. Гайсин, П. В. Николенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 7. – С. 161-167. – EDN YTSRTR.
 15. Кузнецов Е. В. Мониторинг технического состояния Лефортовского туннеля / Е. В. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № S10. – С. 323-328. – EDN KXUTYX.
 16. Баловцев С. В. Автоматизированный деформационный мониторинг состояния тоннелей метрополитенов / С. В. Баловцев, Р. В. Шевчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 23-28. – EDN YMHNLR.
 17. Шевченко А. А. Опыт применения автоматизированных систем мониторинга для тоннелей метрополитенов / А. А. Шевченко, А. Д. Кобецкий, А. О. Боев // Транспортное строительство. – 2019. – № 2. – С. 26-28. – EDN TEQGOH.
 18. Гарбер В. А. Обследование и мониторинг сооружений метрополитена / В. А. Гарбер // Метро и тоннели. – 2023. – № 3. – С. 26-27. – EDN NNKCHH.
 19. Космин В. В. Сканирующая система для геометрических измерений в тоннеле / В. В. Космин // Метро и тоннели. – 2018. – № 4. – С. 27. – EDN YOZDKP.
 20. Лукинский О. А. О надежности герметизации в метрополитене / О. А. Лукинский // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – № 12. – С. 31-34. – EDN VCYTCL.
 21. Пестрякова Е. А. Эффективные способы ликвидации водопроявлений при эксплуатации подземных сооружений / Е. А. Пестрякова, И. Я. Харченко, А. А. Пискунов [и др.] // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 32. – EDN GXASAD.
 22. Закоршменный И. М. Водопроявления в тоннелях с высокоточной железобетонной обделкой и способы их устранения / И. М. Закоршменный, А. И. Закоршменный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 17-32. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_4_0_17.
 23. Wang F. Численное моделирование поведения горных пород при протечках в глубоком тоннеле / Wang F., Fan Y., Guo C. [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 2. – С. 17. – EDN ОСУВКХ.
 24. Желтышева О. Д. Применение технологии лазерного сканирования для мониторинга деформаций зданий вдоль трассы метро / О. Д.

- Желтышева, А. А. Панжин // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений, Екатеринбург, 21–22 мая 2013 года / Ответственный за выпуск Корнилов Михаил Викторович - заведующий кафедрой шахтного строительства УГГУ, профессор, д-р техн. наук. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2013. – С. 57-60. – EDN RCMZDF.
- 25.Ильичев В. А. Обеспечение конструктивной безопасности объектов с подземной частью путем преобразования свойств грунтов (на примере Алабяно-балтийского тоннеля в Москве) / В. А. Ильичев, Н. С. Никифорова, Ю. А. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 2. – С. 35-39. – EDN ZBHIAХ.
- 26.Полищук С. С. Исследования и оценка обводненности железнодорожного тоннеля / С. С. Полищук, Е. В. Каимов, С. А. Исаев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 1. – С. 516-520. – EDN YYBBFR.
- 27.Конюхов Д. С. Основные проблемы реконструкции длительно эксплуатируемых подземных сооружений / Д. С. Конюхов // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 1. – С. 20-26. – DOI: 10.33622/0869-7019.2024.01.20-26.
- 28.Sjölander Andreas, Belloni Valeria, Ravanelli Roberta, Gao K, Nascetti Andrea. TACK – an autonomous inspection system for tunnels. ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 47th General Assembly Bella Center, Copenhagen. 2022. – С. 7.
- 29.Sjölander Andreas, Belloni Valeria, Ansell Anders, Nordström Erik. Towards Automated Inspections of Tunnels: A Review of Optical Inspections and Autonomous Assessment of Concrete Tunnel Linings. Sensors. 23. 2023. – С. 20. DOI: 10.3390/s23063189.
- 30.Xue Yadong, Shi Peizhe, Jia Fei, Huang H. 3D reconstruction and automatic leakage defect quantification of metro tunnel based on SfM-Deep learning method. Underground Space. 7. – С. 12. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.08.004.
- 31.Xu Zhefan, Chen Baihan, Zhan Xiaoyang, Xiu Yumeng, Suzuki Christopher, Shimada Kenji. A vision-based autonomous UAV inspection framework for unknown tunnel construction sites with dynamic obstacles. IEEE Robotics and automation letters. Preprint version. 2023. – С. 9.
- 32.Alidoost Fatemeh, Austen, Gerrit, Hahn, Michael. A Multi-camera Mobile System for Tunnel Inspection. 2023. – С. 211-224. DOI: 10.1007/978-3-030-92096-8_13.
- 33.Li Dawei, Xie Qian, Gong Xiaoxi, Yu Zhenghao, Xu Jinxuan, Sun Yangxing, Wang Jun. Automatic defect detection of metro tunnel surfaces using a vision-based inspection system. Advanced Engineering Informatics. 47. 101206. 2021. – С. 12. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101206.
- 34.Cheng Xiaolong, Hu Xuhang, Tan Kai, Wang Lingwen, Yang Lingjing. Automatic Detection of Shield Tunnel Leakages Based on Terrestrial

- Mobile LiDAR Intensity Images Using Deep Learning. IEEE Access. PP. 1-1. 2021. – C. 12. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3070813.
35. Vasheghani Farahani, Behzad. (2019). Innovative Methodology for Railway Tunnel Inspection. 2019. – C. 2.
36. Liu Shuang, Sun Haili, Zhang Zhenxin, Li Yuqi, Zhong Ruofei, Li Jincheng, Chen Siyun. A Multiscale Deep Feature for the Instance Segmentation of Water Leakages in Tunnel Using MLS Point Cloud Intensity Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 60. 1-1. 2022. – C. 19. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3158660.
37. Duan Yixin, Qiu Su, Jin Weiqi, Lu Taoran, Li Xingsheng. High-Speed Rail Tunnel Panoramic Inspection Image Recognition Technology Based on Improved YOLOv5. Sensors (Basel, Switzerland). 23. 2023. – C. 20. DOI: 10.3390/s23135986.
38. Yin Ziren, Lei Zhanzhan, Zheng Ao, Zhu Jiasong, Liu Xiao-Zhou. Automatic Detection and Association Analysis of Multiple Surface Defects on Shield Subway Tunnels. Sensors. 23. 7106. 2023. – C. 18. DOI: 10.3390/s23167106.
39. Huang H., Li Qing-tong, Zhang Dong-ming. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology. 77. 2018. – C. 166-176. DOI: 10.1016/j.tust.2018.04.002.
40. Liu Ke-Qiang, Zhong Shi-Sheng, Zhao Kun, Song Yang. Motion control and positioning system of multi-sensor tunnel defect inspection robot: from methodology to application. Scientific Reports. 13. 2023. – C. 14. DOI: 10.1038/s41598-023-27402-z.
41. Zhao Shuai, Shadab Far Mahdi, Zhang Dongming, Chen Jiayao, Huang, H. Deep learning-based classification and instance segmentation of leakage-area and scaling images of shield tunnel linings. Structural Control and Health Monitoring. 28. 2021. – C. 22. DOI: 10.1002/stc.2732.
42. Huang H., Cheng Wen, Zhou Mingliang, Chen Jiayao, Zhao Shuai. Towards Automated 3D Inspection of Water Leakages in Shield Tunnel Linings Using Mobile Laser Scanning Data. Sensors. 23. 2020. – C. 23. DOI: 10.3390/s20226669.
43. Wang Kaitian, Li Panshan, Yang Liu, Li Hu, Men Yanqing, Huang Yongliang. Research on the Present Situation and Development Trend of Subway Tunnel Inspection Vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1203. 022126. 2021. – C. 9. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/2/022126.
44. Xu Yingying, Li Dawei, Xie Qian, Wu Qiaoyun, Wang Jun. Automatic defect detection and segmentation of tunnel surface using modified Mask R-CNN. Measurement. 178. 109316. 2021. – C. 13. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109316.
45. 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.
46. Охунов Ш. Р. Информационно-технологическое обеспечение маркшейдерских работ на карьерах с использованием БПЛА / Ш. Р. Охунов, Б. Н. Олзоев // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): Материалы конференции Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 26 ноября 2021 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 112-121. – EDN CGPLZX.
47. Литвиненко Н. В. О выборе методики детальной съемки бортов карьеров при помощи БПЛА для оценки их трещиноватости / Н. В. Литвиненко, И. Д. Маврин, А. Ф. Идрисов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2024. – Т. 15, № 1. – С. 12-15. – EDN DHTYKB.
48. Кротенок А. Ю. Обоснование оптимальных параметров аэрофотосъемки с БПЛА для расчёта линейных характеристик поверхности карьера / А. Ю. Кротенок // Актуальные проблемы недропользования - 2020: Материалы Международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 18 декабря 2020 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2021. – С. 147-154. – EDN SVMMYF.
49. Гуца Д. И. Опыт применения БПЛА для выполнения структурного картирования откосов карьеров и сравнения с результатами полученными другими методами / Д. И. Гуца, И. Ю. Боос, Н. В. Еретнов // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений: Материалы международной научно-практической конференции, Кемерово, 13–14 апреля 2022 года / Под редакцией Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 303.1-303.8. – EDN KPCNOR.
50. ГОСТ 68–3.4.1-03 Карты цифровые. Оценка качества данных. Основные положения. Москва. ЦНИИГАиК 2003.
51. Liu F. Analysis of The Problem of Low Sales of Insta360 Panoramic Cameras / F. Liu // BCP Business & Management. – 2023. – Vol. 39. – P. 469-474. – DOI 10.54691/bcpbm.v39i.4260.
52. Журавлев Д. К. Техническое устройство и принцип работы экшн-камеры 360 градусов «Insta360 One X3» / Д. К. Журавлев // Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий: Материалы VII Международной научно-технической конференции, посвященной 130-летию со дня рождения изобретателя первого в мире видеомэганитофона А.М. Понятова, Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2022 года / Редакционная

- коллегия: В.М. Пестриков (ответственный редактор) [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, 2023. – С. 153-159. – EDN MMUDUM.
53. Barazzetti, L. 3D modeling with 5k 360° videos / L. Barazzetti, M. Previtali, F. Roncoroni // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2022. – Vol. XLVI-2/W1-2022. – P. 65-71. – DOI 10.5194/isprs-archives-xlvi-2-w1-2022-65-2022.
54. Федоров, С. Л. Построение виртуального пространства при помощи камер 360 градусов / С. Л. Федоров, Н. И. Чернявский // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020)* : IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сборник научных статей, Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 года. Том 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2020. – С. 382-386. – EDN FOJUCK.
55. Quin, C. Reviews - Consumer Technology. Gadgets: Nexar Beam; LG InstaView Door-in-Door; Insta360 Go 2; Urbanista Los Angeles; Raleigh Stride; Timekettle WT2 Edge / C. Quin // *Engineering & Technology*. – 2021. – Vol. 16, No. 9. – P. 68-69. – DOI 10.1049/et.2021.0922.
56. Игнатенко, Я. П. Анализ преимущества увеличения количества объективов в камере для съемки видео 360 / Я. П. Игнатенко, А. А. Смолин // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 31 января – 03 2018 года. Том 2.* – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО", 2018. – С. 308-311. – EDN ZOLMLW.
57. Параметры камеры просмотра видео 360 градусов / М. В. Михайлюк, Д. В. Омельченко, Д. А. Кононов, Д. М. Логинов // *Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук.* – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 26-32. – DOI 10.25682/NISI.2020.4.0004.
58. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615190 Российская Федерация. Программная подсистема обработки видеопотока распределенного массива камер для создания видео 360 градусов : № 2019613780 : заявл. 09.04.2019 : опубл. 19.04.2019 / И. А. Измайлов, Е. А. Бахтенко ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Новатех». – EDN UBMLZB.
59. Девятьяров, Р. И. Разработка сферической камеры для создания видео и фотоконтента в формате 360 градусов / Р. И. Девятьяров, А. А. Яйлеткан // *Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)* : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 24 ноября 2016 года. – Тюмень:

- Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 103-106. – EDN YKNOXP.
- 60.Производитель панорамных камер Insta360 : официальный сайт. – Шэньчжэнь, Китай. – URL: <https://www.insta360.com> (дата обращения:15.08.2024).
- 61.Козин Е. В. Фотограмметрия / Е. В. Козин, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – 142 с. – EDN WDSKNK.
- 62.Краснопевцев Б.В., Курков В.М. Методическое пособие, программы и контрольная работа по курсу "фотограмметрия". –М.: МИИГАиК, 2012
- 63.Лимонов А. Н. Прикладная фотограмметрия : Учебник для вузов / А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – Москва : Академический проект, 2016. – 256 с. – ISBN 978-5-8291-1919-5.
- 64.N. L. Aung and V. D. Koldaev, "The Algorithm of Stitching Aerial Images Frames in Video Surveillance Systems," 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2018, pp. 1-5, DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501731
- 65.Градостроительный комплекс Москвы, 2024 : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://stroj.mos.ru/metro> (дата обращения:19.08.2024).
- 66.Блог Александра Гончарова «Я шагаю по метро»: [сайт.] – Москва, 2015 – . – URL: <https://alexeygoncharov.livejournal.com/49291.html> (дата обращения:19.08.2024).
- 67.Господинов С. Г. Основы прикладной геоинформатики / С. Г. Господинов. – Saarbrucken : LAP LAMBERT, 2024. – 213 с. – ISBN 5978620460489.
- 68.Лотоцкий В. Л. Пространственное информационное моделирование / В. Л. Лотоцкий // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 3(15). – С. 114-122. – DOI 10.21777/2312-5500-2016-3-114-122.
- 69.Деменьшин Р. А. Моделирование пространственных задач для создания географических информационных систем / Р. А. Деменьшин, А. П. Татарчук // Землеустройство и земледелие: технологии и полевые опыты: сборник тезисов, подготовленный в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Землеустройство и земледелие», Екатеринбург, 01–02 декабря 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2021. – С. 21-23. – EDN HPLPFP.
- 70.Цветков В. Я. Информационное пространственное моделирование / В. Я. Цветков, И. И. Лонский, С. В. Булгаков. – Москва : ООО "МАКС Пресс", 2022. – 248 с. – ISBN 978-5-317-06758-8. – EDN PEUQFV.
- 71.Соловьев И. В. Информационное пространственное моделирование / И. В. Соловьев // Славянский форум. – 2015. – № 4(10). – С. 306-315. – EDN VCYGCT.

- 72.ГОСТ Р 52440-2005. Модели местности цифровые. Общие требования. Москва, Стандартинформ, 2006.
- 73.Коробочкин Д. М. Построение трехмерной цифровой модели местности на основе нерегулярных данных о высотах цифровой карты местности / Д. М. Коробочкин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 3. – С. 131-138. – EDN WZISUL.
- 74.Патент № 2452000 С1 Российская Федерация, МПК G06F 17/30. Способ использования топогеодезической информации на основе цифровых карт местности (ЦКМ) : № 2011128476/08 : заявл. 08.07.2011 : опубл. 27.05.2012 / В. В. Громов, В. Ю. Егоров, Д. Л. Липсман [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Завод им. В.А. Дегтярева". – EDN PUWDEL.
- 75.Головнин О. К. Автоматизированная система построения цифровых карт местности высокой точности на основе анализа видеозаписей / О. К. Головнин, Д. В. Рыбников // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2020) : Труды Международной научно-технической конференции, Самара, 21–22 апреля 2020 года / Под редакцией С.А. Прохорова. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2020. – С. 30-33. – EDN HJPBWM.
- 76.Каргашин Л.Е. Основы цифровой картографии: Учебное пособие для бакалавров / П. Е. Каргашин. — 2-е изд., доп. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2020.
- 77.ГОСТ Р 51605–2023. КАРТЫ ЦИФРОВЫЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ. Общие требования. Москва, Российский институт стандартизации, 2023.
- 78.Поздышева О. Н. Анализ методов использования карт / О. Н. Поздышева // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 78-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 19–23 апреля 2021 года / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 318-324. – EDN YGTLKG.
- 79.Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 2.1, Agisoft LLC, 2024. 262 с.
- 80.Молоко А.С. Исследование возможностей фотограмметрической обработки изображений в Agisoft Metashape, Pix4D и Bentley ContextCapture / А. С. Молоко, К. В. Колюк, Е. С. Шабалина, В. Ю. Ширшова // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование : Сборник материалов III всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 06–08 ноября 2019 года / Научный редактор О.А. Лазебник. – Санкт-Петербург: Российский

- государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2019. – С. 42-48. – EDN VOBQZN.
81. Berber M. Kinematic GNSS positioning results compared against Agisoft Metashape and Pix4dmapper results produced in the San Joaquin experimental range in Fresno County, California / M. Berber, R. Munjy, J. Lopez // Journal of Geodetic Science. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 48-57. – DOI: 10.1515/jogs-2020-0122.
82. Федоров П. А. Особенности и проблемные вопросы построения цифровых моделей рельефа в ЦФС "Agisoft Metashape" / П. А. Федоров, Л. А. Пластинин // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): Материалы конференции Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 26 ноября 2021 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 145-159. – EDN VBUXGH.
83. Харьковская Ю. С. Анализ программного продукта Agisoft Metashape / Ю. С. Харьковская // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : национальная конференция с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 20. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 275-281. – EDN ERTBPU.
84. Серафимович Г. В. Сравнение программных продуктов КРЕДО 3D СКАН и КРЕДО ФОТОГРАММЕТРИЯ / Г. В. Серафимович, Д. В. Грохольский, И. С. Кукареко // Геоинфо. – 2022. – № 5. – С. 46-51. – EDN OSDGEX.
85. Тенюго Л. В. Современные технологии КРЕДО в арсенале маркшейдера / Л. В. Тенюго, А. В. Маткин, Л. С. Ломако // Горная промышленность. – 2022. – № 4. – С. 50-53. – EDN CBVGDJ.
86. Михайлова Л. В. Комплексная обработка топогеодезических данных для единой цифровой модели местности credo / Л. В. Михайлова // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в российской Федерации: Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций, МОСКВА, 07–09 декабря 2016 года. – МОСКВА: ООО Геомаркетинг, 2016. – С. 135. – EDN ZRODJV.
87. Еремин Р. А. Методика создания трехмерных цифровых моделей дорожных конструкций / Р. А. Еремин, Н. Г. Пудова, Ф. А. Гришин // Георадар 2023 : Сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 22–24 марта 2023 года. – Москва: ООО "Издательский дом "Академия естествознания", 2023. – С. 81-87. – EDN CRYPYP.
88. Гущина М. В. К вопросу о классификации геодезического программного обеспечения для решения прикладных задач в сфере обороны, землеустройства и инженерных изысканий / М. В. Гущина, А.

- Ю. Одинцов // Наука и образование сегодня. – 2022. – № 4(73). – С. 95-103. – EDN RZZWRC.
89. Horizontal and Vertical Geometric Accuracy of Agisoft Photoscan and Pix4D Mapper Softwares at Kebun Raya Universitas Mulawarman in Samarinda, East Kalimantan, Indonesia / S. Endayani, R. Sadono, A. Kusumandari [et al.] // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – P. 2132. – DOI: 10.18517/ijaseit.12.5.16362.
90. Завтур А. Трёхмерная фотограмметрия, или От фотографии к 3D-модели / А. Завтур, Н. Гришина, Ю. Чалый // САПР и графика. – 2016. – № 2(232). – С. 58-61. – EDN YGJMRV.
91. Клеблеев Ш. А. Программное обеспечение для 3D-моделирования / Ш. А. Клеблеев // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. – 2021. – № 4(34). – С. 94-102. – EDN VKEWFF.
92. Юсупов А. Г. Создание 3D-модели методом фотограмметрии / А. Г. Юсупов // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 2783-2788. – EDN ZXIOET.
93. Holuša V. Utilization of Augmented and Virtual Reality in Geoscience / V. Holuša, F. Beneš, M. Vaněk // GeoScience Engineering. – 2022. – Vol. 68, No. 1. – P. 22-32. – DOI: 10.35180/gse-2022-0066.
94. Круглова П. А. Опыт использования программного продукта DATUGRAM™3D в геодезическо-маркшейдерских работах / П. А. Круглова // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 3(106). – С. 35-39. – EDN UBVTNB.
95. Джарроуш Д. Цифровая камера как практический геодезический инструмент: проблемы и решения / Д. Джарроуш // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1(2). – С. 52-56. – EDN SEHFSR.
96. Agisoft Metashape, Agisoft LLC – Россия. – URL: <https://metashape.ru/docs/kalibrovka-obektiva-na-osnove-kalibrovochnoj-tabliczy-v-metashape/> (дата обращения: 15.07.2024).
97. Krutikova Olga, Sisojevs Aleksandrs, Kovalovs Mihails. Creation of a Depth Map from Stereo Images of Faces for 3D Model Reconstruction. Procedia Computer Science. 104. – 2017. 452-459. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.159.
98. 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

99. Крутиков А. А. Особенности эквидистантной проекции / А. А. Крутиков // Молодая наука - 2020: материалы конференции, Могилев, 22 апреля 2020 года. – Могилев: Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, 2020. – С. 130-131. – EDN IVNAJM.
100. Железов М. С. Выбор лучшей проекции для видео 360° / М. С. Железов, Е. В. Ляпустин, А. В. Москаленко [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2022. – № 79. – С. 1-9. – DOI 10.20948/prepr-2022-79.
101. Производитель панорамных камер Insta360. ПО Insta360 Studio : официальный сайт. – Шэньчжэнь, Китай. – URL: https://www.insta360.com/ru/support/supportcourse?post_id=20605 (дата обращения: 15.08.2024).
102. Adobe® Premiere® Pro : Официальный учебный курс : [Пер. с англ.]. – Москва : Триумф, 2004. – 510 с. – (Серия "Официальный учебный курс"). – ISBN 5-89392-090-2.
103. Дурмагамбетова А. Г. Реализация возможностей программы Adobe Premiere Pro / А. Г. Дурмагамбетова, Л. С. Фазылова // Роль технических наук в развитии общества: сборник материалов III Международной научно-практической очной конференции, Кемерово, 15 марта 2018 года. Том Выпуск 3. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью "Западно-Сибирский научный центр", 2018. – С. 69-71. – EDN YTCJQD.
104. Джейд Картер. Нейросети. Обработка аудиоданных. – Издательство SelfPub, 2023.
105. IT-компания Ultralytics. Свёрточные нейронные сети : официальный сайт. – США. – URL: <https://www.ultralytics.com/ru/blog/what-is-r-cnn-a-quick-overview> (дата обращения: 15.12.2024).
106. OpenCV и Java. Обработка изображений и компьютерное зрение. — СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 320 с.
107. Деменкова Т. А. Построение моделей сверточной нейронной сети для решения задач распознавания образов / Т. А. Деменкова, Е. В. Шпиева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 5. – С. 76-79. – EDN PUNKRI.
108. Круглов Д. Э. Исследование и разработка искусственной нейронной сети для распознавания образов / Д. Э. Круглов, О. С. Волуева // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых : Сборник научных трудов XXIV международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в рамках Международного Научного форума Донецкой Народной Республики). К 90-летию кафедры "Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова", Донецк, 28 мая 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 118-122. – EDN VKLAYT.

109. Никитин К. В. Применение импульсных рекуррентных нейронных сетей для решения задачи распознавания динамических образов: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Никитин Кирилл Вячеславович. – Санкт-Петербург, 2013. – 21 с. – EDN ZOUOMT.
110. Тормозов В. С. Настройка, обучение и тестирование нейронной сети долгой краткосрочной памяти для задачи распознавания образов / В. С. Тормозов, А. Л. Золкин, К. А. Василенко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 3. – С. 52-57. – DOI 10.25791/asu.3.2020.1171.
111. Бабич Н. А. Анализ эффективности применения интерференционной нейронной сети для решения задачи распознавания образов / Н. А. Бабич // Вестник современных исследований. – 2019. – № 2.3(29). – С. 5-8. – EDN VVIZIV.
112. Вербицкая Е. А. Свёрточные нейронные сети и их применение для задач классификации и распознавания пространственных образов / Е. А. Вербицкая // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 6. – С. 80-83. – EDN UMZVLP.
113. Титов А. Д. Использование нейронных сетей для распознавания образов / А. Д. Титов // Сборник трудов приуроченных к 74-й Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 200-летию со дня рождения П.А.Ильенкова, Москва, 01 января – 31 2021 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 50-53. – EDN SIRZRI.
114. Сякина В.В. Применение нейронных сетей для распознавания образов / В. В. Сякина, А. Г. Исавнин, А. Н. Карамышев [и др.]. – Набережные Челны : Издательско-полиграфический центр "Мир печати", 2020. – 98 с. – EDN TLJOAO.
115. Окунев С. В. Рассмотрение способов формирования наборов данных для обучения нейронных сетей / С. В. Окунев // Вестник науки и образования. – 2020. – № 2-3(80). – С. 16-19. – EDN BWVYSQ.
116. Redmon Joseph, Divvala Santosh, Girshick Ross, Farhadi Ali. (2015). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 10.48550/arXiv.1506.02640.
117. IT-компания Ultralytics. YOLO11: официальный сайт. – США. – URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolo11/#performance-metrics> (дата обращения: 15.12.2024).
118. LearnOpenCV обучение компьютерному зрению: официальный сайт. – США. – URL: <https://learnopencv.com/yolo11/> (дата обращения: 15.12.2024).

119. Jegham Nidhal, Koh Chan Young, Abdelatti Marwan, Hendawi Abdeltawab. Evaluating the Evolution of YOLO (You Only Look Once) Models: A Comprehensive Benchmark Study of YOLO11 and Its Predecessors. 2024. – P. 20. DOI: 10.48550/arXiv.2411.00201.
120. Sapkota Ranjan, Ahmed Dawood, Karkee Manoj. Comparing YOLOv8 and Mask RCNN for object segmentation in complex orchard environments. 2023. – P. 20. DOI: 10.1016/j.aiaa.2024.07.001.
121. Sapkota Ranjan, Karkee Manoj. Comparing YOLO11 and YOLOv8 for instance segmentation of occluded and non-occluded immature green fruits in complex orchard environment. 2024. – P. 16. DOI: 10.48550/arXiv.2410.19869.
122. Sapkota Ranjan, Karkee Manoj. Integrating YOLO11 and Convolution Block Attention Module for Multi-Season Segmentation of Tree Trunks and Branches in Commercial Apple Orchards. 2024. – P. 19. DOI: 10.48550/arXiv.2412.05728.
123. Huang Yiyang, Wang Di, Wu Boxuan, An Daoxiang. NST-YOLO11: ViT Merged Model with Neuron Attention for Arbitrary-Oriented Ship Detection in SAR Images. Remote Sensing. 16. 4760. 2024. – P. 19. DOI: 10.3390/rs16244760.
124. Sapkota Ranjan, Meng Zhichao, Churuvija Martin, Du Xiaoqiang, Ma Zenghong, Karkee Manoj. Comprehensive Performance Evaluation of YOLO11, YOLOv10, YOLOv9 and YOLOv8 on Detecting and Counting Fruitlet in Complex Orchard Environments. 2024. – P. 27. DOI: 10.36227/techrxiv.172954111.18265256/v1.
125. Wei Jinfan, Ni Lingyun, Luo Lan, Chen Mengchao, You Minghui, Sun Yu, Hu Tianli. GFS-YOLO11: A Maturity Detection Model for Multi-Variety Tomato. Agronomy. 14. 2644. 2024. – P. 21. DOI: 10.3390/agronomy14112644.
126. Torralba A. LabelMe: Online image annotation and applications / A. Torralba, J. Yuen, B. C. Russell // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, No. 8. – P. 1467-1484. – DOI 10.1109/JPROC.2010.2050290.
127. Проект лаборатории компьютерных наук и искусственного интеллекта Массачусетского технологического института: официальный сайт. – США. – URL: <https://www.labelme.io/> (дата обращения: 17.12.2024).
128. Фролов Е. А. Исследование возможностей инструмента CVAT для разметки данных / Е. А. Фролов, И. Е. Михайлец // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург, 09 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 349-351. – EDN PKAKOY.

129. Инструмент для аннотирования изображений и видео CVAT : официальный сайт. – США. – URL: <https://www.cvat.ai/> (дата обращения:17.11.2024).
130. Lin Tsung-Yi, Maire Michael, Belongie Serge, Hays James, Perona Pietro, Ramanan Deva, Dollár,Piotr, Zitnick C. Microsoft COCO: Common Objects in Context. 2014. P. 740-755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
131. Инструмент для аннотирования изображений и видео Microsoft: официальный сайт. – США. – URL: <https://cocodataset.org/#home> (дата обращения:17.11.2024).
132. Инструмент для аннотирования изображений и видео VoTT : официальный сайт. – США. – URL: <https://github.com/conscienceli/VoTT-label-export> (дата обращения: 17.11.2024).
133. Инструмент для аннотирования изображений и видео Diffgram : официальный сайт. – США. – URL: <https://www.diffgram.com/> (дата обращения: 17.11.2024).
134. Инструмент для аннотирования изображений и видео LabelStudio : официальный сайт. – США. – URL: <https://labelstud.io/> (дата обращения: 17.11.2024).
135. Окунев С. В. Применение аугментации и генеративно-состязательной нейронной сети для увеличения наборов данных / С. В. Окунев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах, Красноярск, 13–17 апреля 2020 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том 2. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2020. – С. 162-164. – EDN ONLVLX.
136. Бербасов В. Д. Сравнительный обзор библиотек нейронных сетей Keras и Pytorch / В. Д. Бербасов // Экономика и социум. – 2023. – № 8(111). – С. 423-426. – EDN JSJTBL.
137. IT-компания Ultralytics. Показатели производительности YOLO11 : официальный сайт. – США. – URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/#class-wise-metrics> (дата обращения: 12.12.2024).



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ИНЖТОННЕЛЬГЕОДЕЗИЯ»

119634, г. Москва, ул. Скульптора Мухомовой, д.7 тел (499)124-87-86 email: itg2002@vandex.ru

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования С.С. Парамонова

В рамках научно-исследовательских и производственных работ компанией ООО «Инжтоннельгеодезия» были внедрены и успешно апробированы результаты диссертационного исследования С.С. Парамонова на тему **«Разработка метода построения цифровых карт перегонных тоннелей метрополитена для выявления визуальных дефектов с помощью нейронных сетей»**.

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».

Генеральный директор
ООО «Инжтоннельгеодезия»

А.А. Макаров

подпись, печать

