

УДК: 528.021.78

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393

М.А. Алтынцев¹, М.А. Алтынцева²

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕКАЧКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

АННОТАЦИЯ

Лазерное сканирование зарекомендовало себя как высокоточный метод сбора пространственных данных для решения различных производственных задач.

В нефтегазовой сфере это задачи, связанные с:

- исследованием трубопроводов на предмет предотвращения утечки топлива;
- изучением состояния резервуаров и оценкой их деформаций, вследствие различных неблагоприятных факторов;
- своевременным обнаружением механических повреждений объектов нефтегазовой инфраструктуры;
- оценкой состояния защитных сооружений, позволяющей выявить степень их надёжности в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

С целью своевременного выявления большинства возникающих проблем, а также для адекватной оценки возможных последствий, выполняются исследования технологии лазерного сканирования, направленные на повышение степени автоматизации обработки результатов съёмки, их точности, а также на разработку методик сбора данных и создания конечной продукции. В статье рассмотрены данные направления исследований и тенденции дальнейшего развития технологии лазерного сканирования в целях контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов.

В зависимости от положения лазерного сканера, при котором выполняется съёмка, выделяют 3 вида сканирования: наземное, воздушное и мобильное. Обсуждается, при каких ситуациях рекомендуется применять тот или иной его вид. Указываются преимущества применения каждого вида лазерного сканирования при мониторинге различных типов защитных сооружений. В качестве примера приводятся данные наземного и мобильного лазерного сканирования на один участок – территорию нефтегазоконденсатного месторождения. В статье анализируется точность данных лазерного сканирования и причины возможных ошибок их предварительной обработки. Показано, что повторная съёмка позволяет выявить изменения в состоянии различных объектов территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование Земли, лазерное сканирование, защитные сооружения, нефтепродукты, уравнивание, мониторинг деформаций

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail*: mnbcv@mail.ru

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Кафедра картографии и геоинформатики, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail*: als.mm@yandex.ru

Maxim A. Altyntsev¹, Marina A. Altyntseva²

APPLICATION OF LASER SCANNING TECHNOLOGY TO CONTROL THE STATE OF PROTECTIVE CONSTRUCTIONS WHEN TRANSFERRING OIL PRODUCTS

ABSTRACT

Laser scanning technology is actively used in various industries. Laser scanning has proven to be a highly precision method of collecting spatial data to solve various tasks. In the oil and gas industry, these are the tasks associated with the study of pipelines for degradation in order to prevent fuel leakage, study of tank state and assessment of their deformations due to various adverse factors, including soil subsidence, timely detection of mechanical damage to oil and gas infrastructure, assessment of the protective structure health, allowing to identify the degree of their reliability in case of emergencies. In order to use the laser scanning technology to identify most of the issues in a timely manner, as well as to assess their possible consequences, various studies are being carried out to develop data collection techniques, to increase the automation degree of the processing the surveying results and their accuracy, to develop methods of creating the final product, demonstrating the result of the processing in the desired form. These modern research trends in the laser scanning technology in order to control the state of protective constructions when transferring oil products are considered.

Depending on a laser scanner position when surveying, 3 its types are distinguished: terrestrial, airborne and mobile. Recommendations of applying laser scanning types are discussed. The advantages of applying each type of laser scanning when monitoring various types of protective constructions are indicated. As an example, terrestrial and mobile laser scanning data are given for one site – the oil and gas condensate deposit area. Accuracy of laser scanning data and the reasons for possible errors in their pre-processing are analyzed. It is shown that additional surveying allows detecting changes in the state of various territory objects.

KEYWORDS: Earth remote sensing, laser scanning, protective constructions, oil products, adjustment, deformation monitoring

ВВЕДЕНИЕ

Лазерное сканирование – один из наиболее точных методов активного дистанционного зондирования, выполняемый как из стационарного наземного положения, так и в движении. В зависимости от этого выделяют наземное, мобильное и воздушное лазерное сканирование. Каждый из видов находит широкое применение в различных отраслях деятельности человека, одной из которых является нефтегазовая.

В нефтегазовой отрасли сканирование применяется при разведке месторождений нефти и газа, в процессе строительства и эксплуатации сооружений (трубопроводные и кабельные сети, резервуары, их ограждения и пр.), а также в целях мониторинга различных типов сооружений, предназначенных для защиты, хранения и перекачки нефти.

Мобильное и воздушное лазерное сканирование (МЛС и ВЛС) выполняется для построения цифровых моделей рельефа, топографических планов территорий, а также для обнаружения последствий чрезвычайных ситуаций (разливы нефти, утечки газа и т.п.). Данные виды лазерного сканирования предпочтительны для мониторинга земляных защитных сооружений, аварийных амбаров, обвалований.

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia; *e-mail*: mnbcv@mail.ru

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Department of Cartography and Geoinformatics, Plakhotnogo str., 10, 630108, Novosibirsk, Russia; *e-mail*: als.mm@yandex.ru

Для мониторинга инженерных сооружений, таких, как защитное ограждение, подпорная стенка, опоры (когда необходима миллиметровая точность измерений) предпочтительно применять метод наземного лазерного сканирования (НЛС). Если при мониторинге сооружений, расположенных на открытом пространстве, НЛС конкурирует с другим активным методом дистанционного зондирования, радарной интерферометрией, то в случае их расположения внутри нефтяных заводов, баз и нефтеперерабатывающих станций, для мониторинга метод НЛС незаменим [Дедкова, Комиссаров, 2020].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лазерное сканирование прекрасно зарекомендовало себя при решении различных задач в нефтегазовой отрасли. Большое количество публикаций посвящено отраслевым исследованиям данной технологии, охватывающим как полевой этап лазерного сканирования, так и обработку его данных с целью получения единой модели в виде массива точек лазерных отражений (ТЛО) и создания конечной продукции.

Условно, все направления исследований технологии лазерного сканирования можно разделить на 3 группы:

- исследование методик выполнения полевой съёмки;
- исследование методик и алгоритмов предварительной обработки данных для получения единой точечной модели;
- исследования методик и алгоритмов создания конечной продукции.

Методики полевой съёмки с применением технологии лазерного сканирования направлены на ускорение процесса сбора данных с сохранением высокого уровня точности.

При разработке и анализе методик предварительной обработки данных лазерного сканирования основной задачей является повышение степени автоматизации, так как получение единого массива ТЛО зачастую занимает большее время, чем сам процесс съёмки.

Направления исследований, относящиеся к третьей группе, выполняются в зависимости от решаемой задачи, однако повышение степени автоматизации и точности здесь также играет важную роль.

Ниже будет дан общий анализ направлений исследований и рассмотрено частное применение технологии лазерного сканирования в области контроля состояния защитных сооружений на примере съёмки Алинского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного на юго-западе Якутской области в бассейне реки Кадалы. На данную территорию съёмка осуществлялась с интервалом в 1 год. Основной целью сканирования являлось создание топографических планов масштаба 1:500. В 2017 г. выполнялось наземное лазерное сканирование территории дожимной насосной станции (ДНС) площадью 6,8 Га с помощью сканера Leica ScanStation 2, а в 2018 г. – мобильное лазерное сканирование дорог рассматриваемого месторождения с помощью системы Riegl VMX-250. При сканировании дорог осуществлялся подъезд транспортного средства с установленной системой МЛС вплотную к территории ДНС со всех сторон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методики полевой съёмки

Для каждого из трёх видов лазерного сканирования методики полевой съёмки существенно отличаются. Основные методики съёмки методом НЛС заключаются в выборе рационального способа создания съёмочного обоснования, определения местоположения сканерных станций, способа ориентирования лазерного сканера на местности [Середович и др., 2009; Theory and practice..., 2008]. По итогам полевой съёмки выполняется внешнее ориентирование сканов и создание единой точечной модели. Выбор методик зависит от характера застройки объекта, технических характеристик модели

наземного лазерного сканера и опыта специалиста, работающего с лазерным сканером [Алтынцев, Карпик, 2020].

От опыта специалиста существенно зависит итоговая точность и плотность данных лазерного сканирования. Выбор станций выполняется с учётом значений расходимости лазерного луча, максимальной дальности съёмки, разрешения сканирования, точности определения расстояния и выбранного способа внешнего ориентирования сканов. Степень влияния этих параметров на точность данных лазерного сканирования отражена во многих литературных источниках [Середович и др., 2009]. При выборе станций лазерного сканирования также необходимо учитывать угол падения лазерного луча на грани объектов [Soudarissanane et al., 2009].

С целью компенсации недостаточного опыта специалиста при выборе мест установки лазерного сканера, разрабатываются алгоритмы автоматического их определения, обеспечивающие наибольший охват и поиск оптимальных траекторий перемещения оператора от одной станции к другой [Scott et al., 2003]. Работа всех автоматических алгоритмов основана на анализе предварительно полученных картографических материалов. Например, в [Soudarissanane, Lindenbergh, 2011] описан алгоритм поиска оптимальных мест установки лазерного сканера на основе двумерных чертежей зданий. Большей точности автоматического поиска мест расположения сканерных станций возможно добиться при анализе исходной картографической информации в трёхмерном виде. Впервые такой алгоритм был предложен в [Kitada et al., 2015], где в качестве исходной трёхмерной модели использовалась точечная модель, полученная в результате обработки данных наземной фотосъёмки. Недостаток описанного алгоритма (отсутствие связи между углом падения лазерного луча на поверхности и максимальной дальностью сканирования) был устранен в [Wakisaka et al., 2019].

На территории ДНС Алинского месторождения при выборе мест установки лазерного сканера руководствовались космическими снимками из открытых источников. Позиции сканирования окончательно уточнялись на местности. Было принято решение применять методику проложения сканерных ходов при прямом способе внешнего ориентирования сканов, когда сканер устанавливается на предварительно закреплённую точку на местности. Ориентирование на каждой станции выполнялась по двум маркам, которые также центрировались над закреплёнными точками. Марки устанавливались на быстросъёмные штативы. Всего было проложено 4 сканерных хода. Общее число сканерных позиций составило 49. На рис. 1 показана схема создания плано-высотного обоснования (ПВО) и проложения сканерных ходов. Для внешнего ориентирования сканов применялись координаты четырёх опорных точек А1–А4, отмеченных чёрным цветом. Координаты опорных точек измерялись спутниковыми приёмниками Trimble R7 и R8 от постоянно действующей базовой станции, расположенной на территории месторождения. С учётом всех дополнительных работ по измерению координат опорных точек и съёмке подземных коммуникаций, время сканирования составило 5 дней.

В отличие от НЛС съёмка территорий методами мобильного и воздушного лазерного сканирования более автоматизирована. Скорость сбора данных этими методами многократно превышает метод НЛС. После создания съёмочного обоснования, специалисту требуется выполнить планирование маршрута передвижения транспортного средства с установленными системами лазерного сканирования и включения одновременного сбора данных на спутниковых приёмниках, размещённых на базовых станциях и применяемой системе сканирования. Методики полевой съёмки методом МЛС и ВЛС описаны в [Vosselman, Maas, 2010; Medvedev et al., 2007; Kukko, 2013; Scherzinger, Hutton, 2021].

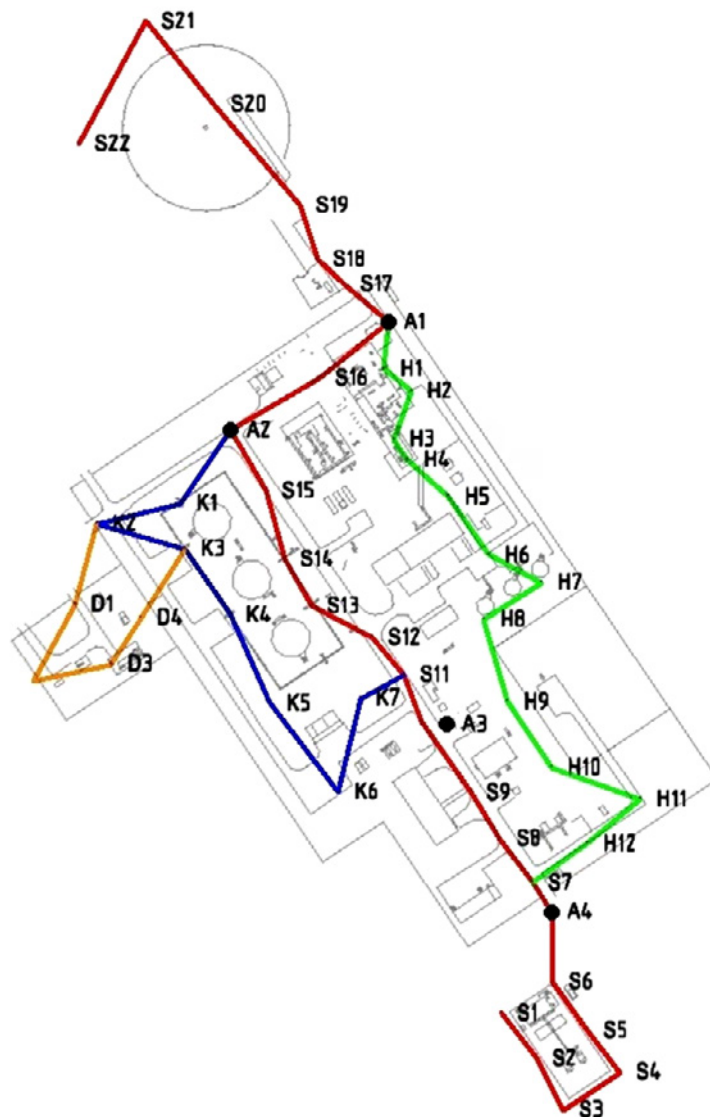


Рис. 1. Схема создания ПВО и проложения сканерных ходов на территории дождевой насосной станции

Fig. 1. The scheme of creating horizontal and vertical control survey network and laying scanning traverse for the booster pipeline pumping station

Мобильное лазерное сканирование дорог Алинского месторождения было выполнено за 1 день. С целью повышения точности и плотности данных МЛС съёмка осуществлялась в прямом и обратном направлениях. На рис. 2 показан фрагмент результатов МЛС на территорию, примыкающую к ДНС. Расчёты траектории движения и генерация массива ТЛО были выполнены от той же самой базовой станции, используемой при НЛС. Полученные результаты МЛС частично наложились на массив ТЛО, полученный методом НЛС.

Немаловажным вопросом выполнения полевого этапа съёмки данными методами является определение необходимого числа опорных точек для привязки результатов лазерного сканирования. При МЛС число опорных точек выбирается в зависимости от требуемой точности, регламентируемой видом создаваемой продукции и качеством спутникового сигнала [Wang et al., 2019].

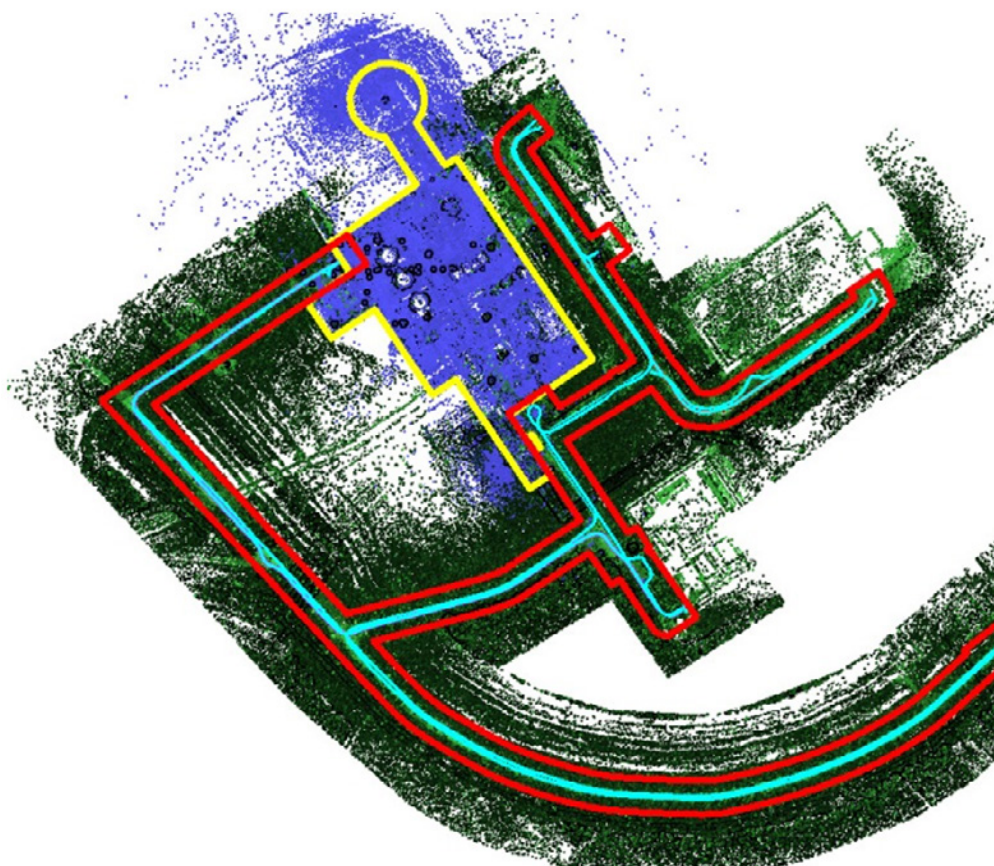


Рис. 2. Результаты наземного и мобильного лазерного сканирования (вид сверху): синий цвет – массив точек НЛС; зелёный цвет – массив точек МЛС; красный цвет – граница съёмки МЛС; бирюзовый цвет – траектория съёмки МЛС

Fig. 2. The results of terrestrial and mobile laser scanning (top view): blue color – TLS point cloud; green color – MLS color; red color – the MLS survey edge; turquoise color – the MLS trajectory

Перспективным направлением исследований также является применение метода ВЛС, где в качестве носителя выступает беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Это позволяет выполнить ВЛС с более низких высот и улучшить точность данных до уровня МЛС [Amon *et al.*, 2014]. В настоящее время актуальным вопросом является разработка малобюджетных сканирующих систем и оценка точности полученных ими данных по сравнению с дорогостоящими и высокоточными системами [Torresan *et al.*, 2018].

Методики и алгоритмы предварительной обработки данных лазерного сканирования

Предварительная обработка данных лазерного сканирования осуществляется с целью получения единого массива ТЛЮ в заданной системе координат. Этот этап заключается в выполнении операций калибровки лазерных сканеров и цифровых камер, фильтрации, уравнивании данных. От его результатов существенно зависит точность и достоверность решения различного рода задач, требующих повышенной точности (например, контроль состояния защитных сооружений). Наиболее подходящий метод выбирается в зависимости от вида защитного сооружения, этапа контроля и требуемой точности. От выбранного метода будет зависеть и применяемая методика обработки данных.

На этапе уравнивания данных лазерного сканирования выполняется их взаимное и внешнее ориентирование. Методы взаимного и внешнего ориентирования хорошо известны и

описаны во многих литературных источниках – при НЛС рассчитываются элементы внешнего и взаимного ориентирования сканов, получаемых с каждой станции лазерного сканирования, а при МЛС и ВЛС – элементы внешнего и взаимного ориентирования строк, так как формирование массива ТЛО производится по строкам, вдоль траектории перемещения съёмочной системы.

Задача взаимного ориентирования массивов ТЛО (МЛС и ВЛС) возникает в случае повторного перемещения транспортного средства с установленной системой лазерного сканирования по той же территории, то есть при наличии межмаршрутного перекрытия. В процессе уравнивания элементы взаимного и внешнего ориентирования определяются для каждой строки массива отдельно.

При уравнивании данных НЛС для взаимного и внешнего ориентирования сканов применяются специальные марки. Количество марок определяется выбранным способом ориентирования: прямым или аналитическим [Vosselman, Maas, 2010]. В качестве марок также могут применяться характерные точки, идентифицируемые в процессе камеральной обработки по массиву ТЛО. При уравнивании данных МЛС и ВЛС применяются только характерные точки, идентифицируемые в массиве ТЛО интерактивно или автоматически в зонах перекрытия соседних маршрутов. Если координаты марок и характерных точек известны, осуществляется внешнее ориентирование данных лазерного сканирования [Алтынцев, Карник, 2020].

Для повышения степени автоматизации обработки данных лазерного сканирования разрабатываются специальные алгоритмы уравнивания. Точность уравнивания зависит от количества, схемы размещения и результатов идентификации марок или характерных точек по массиву ТЛО. Алгоритмы уравнивания можно разделить на 2 группы [Dong et al., 2020]. Первая группа вычисляет приблизительные значения элементов взаимного ориентирования массивов ТЛО [Guo, 2013], вторая – улучшает результаты уравнивания первой. Первая группа алгоритмов применяется только при уравнивании данных НЛС, а вторая – данных лазерного сканирования любого вида. Это связано с тем, что приблизительные значения элементов взаимного ориентирования данных МЛС и ВЛС всегда известны.

Одним из простейших алгоритмов уравнивания данных лазерного сканирования первой группы является алгоритм «сопоставления центров ограничительных рамок» (МВВС). Суть алгоритма заключается в том, что вокруг каждого скана строится рамка, ограничивающая все точки скана, затем определяются центры ограничительных рамок и выполняется перемещение всех сканов таким образом, чтобы центры рамок совпали. При перемещении один из сканов принимается за основной, а для остальных вычисляются матрицы трансформирования размером 4x4, которые позволяют выполнить лишь перемещение сканов без осуществления их вращения. В связи с этим алгоритм МВВС используется только в качестве первого этапа уравнивания данных НЛС. Вращение осуществляется интерактивно или с помощью другого автоматического алгоритма [Fuad, 2018].

Один из первых автоматических алгоритмов уравнивания получил название «Итеративный алгоритм ближайших точек» (ICP) [Besl, McKay, 1992]. Алгоритм принадлежит ко второй группе и для его работы требуется выполнить грубое уравнивание с помощью любого алгоритма первой группы или путём приблизительного размещения трёх соответственных точек в зонах перекрытия сканов. ICP проверяет расстояния между всеми точками массива и рассчитывает параметры трансформирования для достижения минимальной ошибки уравнивания. В настоящее время существует большое количество вариаций данного алгоритма (например, разряженный итерационный алгоритм ближайших точек – ESICP) [Mavridis et al., 2015]. Основным недостатком ICP и многих его модификаций является сильная зависимость от точности предварительно интерактивно размещённых соответственных точек. Эту проблему можно устранить путём включения этапов оценки матрицы угловой ориентации и векторного сдвига [Чибуничев, Велижев, 2008] или уравниванием данных лазерного сканирования

второй группы на основе поверхностей [Gruen, Akca, 2005] – автоматическое вписывание поверхностей в соответствующие участки сканов, определение евклидового расстояния между поверхностями и его минимизация, как в ICP.

Так как при лазерном сканировании территории ДНС использовались специальные марки, по которым выполнялось внешнее ориентирование каждого скана, применять алгоритмы автоматического уравнивания, которые сопоставляют соседние сканерные позиции и ищут соответственные точки и контуры, не требовалось. Средняя ошибка уравнивания по маркам составила 9 мм в плановом положении и 4 мм в высотном, а максимальная – 39 и 18 мм соответственно. Причиной относительно высоких максимальных значений ошибок, по сравнению с техническими характеристиками применяемого лазерного сканера, стали ошибки центрирования марок при использовании быстросъёмных штативов и измерении высот установки марок и прибора.

Для данных МЛС и ВЛС методики и алгоритмы уравнивания более разнообразны, чем для данных НЛС. Это связано с формированием массивов ТЛО в виде строк и возможностью выполнения операции уравнивания не только для ТЛО, но и для траекторий движения транспортного средства с установленной сканерной системой. Сначала рассчитывается точная траектория, применяемая для формирования массивов ТЛО (её точность определяется качеством спутникового сигнала и ошибками определения угловых элементов внешнего ориентирования каждой строки с помощью инерциальной навигационной системы), затем уравниваются массивы ТЛО и рассчитываются поправки к элементам внешнего ориентирования срока каждого маршрута съёмки. Позднее эти поправки могут быть применены для уточнения положения траектории.

Большое количество исследований посвящено анализу точности данных МЛС и ВЛС в зависимости от качества спутникового сигнала, технических характеристик съёмочных систем, особенностей создания съёмочного обоснования, удаления от базовых станций. Задача анализа качества спутникового сигнала играет первостепенную роль для данных МЛС, так как при съёмке застроенных территорий с большим количеством высотных сооружений количество одновременно наблюдаемых спутников может существенно отличаться. В [Schaer, Vallet, 2016] было исследовано влияние спутникового сигнала на точность получаемой траектории с помощью системы МЛС. Было показано, что при отсутствии спутникового сигнала, вследствие перемещения системы лазерного сканирования через тоннели и другие подобные участки, точность расчёта траектории резко падает и достигает минимального значения ровно в центре такого участка, в связи с чем необходимо размещать дополнительные опорные точки в местах отсутствия спутникового сигнала.

При МЛС городских территорий, из-за большого количества высотных объектов, количество одновременно наблюдаемых спутников может резко изменяться и быть недостаточным для достижения высоких значений абсолютной точности привязки данных. Поэтому для задач, требующих высокой точности порядка первых сантиметров, необходимо размещать опорные точки с высокой плотностью в пределах всей территории съёмки [Wang et al., 2019].

На территории Алинского месторождения высотные объекты вблизи с автомобильными дорогами отсутствовали, а высокие деревья располагались на достаточном удалении от них – более 30–50 м. Поэтому размещать большое число опорных точек не требовалось. Расстояния в 1 км между опорными точками было достаточно, чтобы на открытой местности получить точность массива ТЛО, удовлетворяющую требованиям топографической съёмки масштаба 1:500. Сравнение с массивом ТЛО, полученным методом НЛС, позволило сделать окончательный вывод о высокой точности данных МЛС. На рис. 3 показаны фотографии одной из областей перекрытия, сделанные соответственно в процессе НЛС и МЛС. Фотография, сделанная при мобильном сканировании, получена цифровой камерой, входящей в состав системы МЛС. Так как временной интервал между фотографиями

составил 1 год, то можно заметить некоторые изменения, среди которых основным является уложенный асфальт на фрагменте дороги. На рис. 4 показаны данные МЛС и НЛС в области перекрытия с ракурсом из точки фотографирования этой камеры. На участках без изменений максимальная ошибка взаимного положения двух массивов в области перекрытия не превысила 5 см.



а)



б)

Рис. 3. Фотографии главного входа на территорию ДНС:

а) НЛС; б) МЛС

Fig. 3. Digital images of the main entrance to the booster pipeline pumping station area:

а) TLS; б) MLS

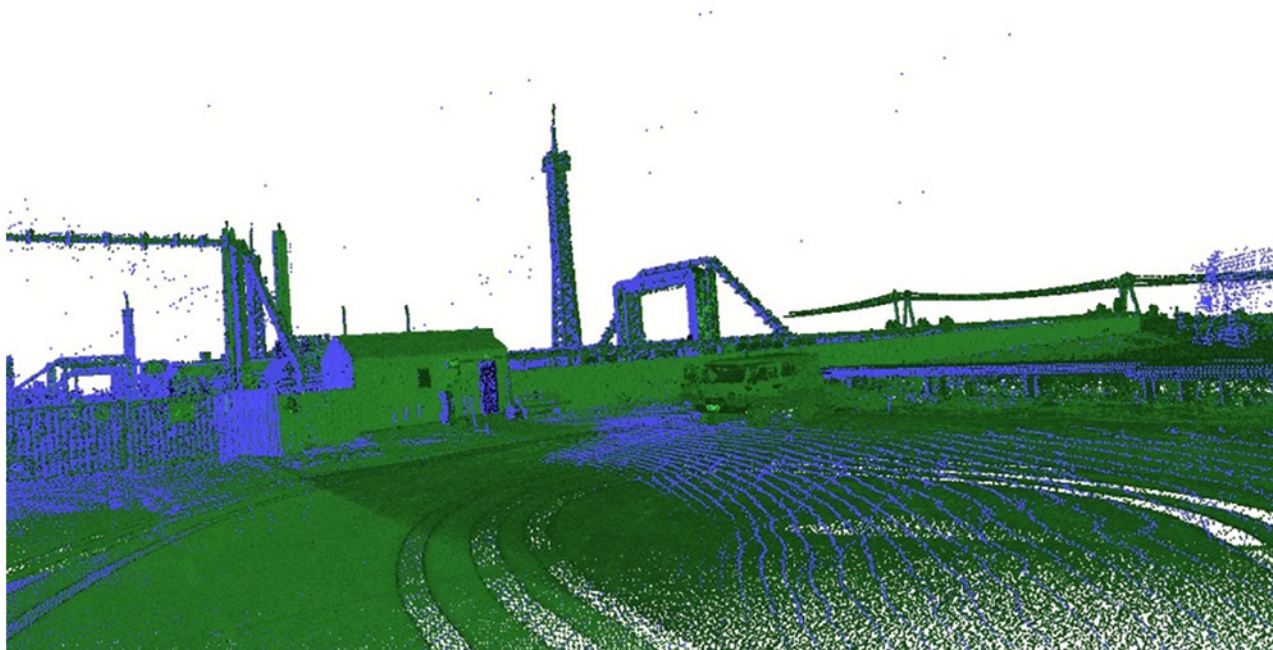


Рис. 4. Результаты наземного и мобильного лазерного сканирования с видом от точки фотографирования камеры системы МЛС:

синий цвет – массив точек НЛС; зелёный цвет – массив точек МЛС

Fig. 4. The results of terrestrial and mobile laser scanning from the viewpoint of a MLS system camera:

blue color – TLS point cloud; green color – MLS color

Известно, что измерение координат большого числа опорных точек с помощью наземных методов является весьма трудоёмкой задачей. Снизить трудоёмкость выполняемых наземных работ позволяет аэрофотосъёмка с помощью БПЛА. Выполнив привязку данных аэрофотосъёмки с помощью наземных методов, их можно использовать в качестве источника дополнительных опорных точек для уравнивания результатов МЛС. В этом случае выполняется поиск соответственных точек между массивом ТЛО и данными аэрофотосъёмки. В качестве данных аэрофотосъёмки может выступать построенная точечная модель или ортофотоплан. Соответственные точки могут быть идентифицированы как интерактивно, так и автоматизированными методами. В [Gao *et al.*, 2015] представлен метод автоматического уравнивания массивов ТЛО с помощью данных БПЛА, в котором автоматический поиск соответственных точек выполнялся по дорожной разметке. В [Hussnain *et al.*, 2018] представлен метод, позволяющий уравнивать не только массивы ТЛО, но и траекторию. В [Hu *et al.*, 2019] для автоматического уравнивания данных МЛС в качестве источника соответственных точек применялась не только дорожная разметка, но и дорожные знаки.

Точность уравнивания данных МЛС и ВЛС с помощью существующих автоматических алгоритмов определяется достоверностью идентификации соответственных точек между маршрутами лазерного сканирования и количеством этих точек, или, в случае уравнивания с помощью данных аэрофотосъёмки, – между её маршрутом и маршрутом лазерного сканирования. При съёмке застроенных территорий с большим количеством контуров, алгоритмы автоматического уравнивания позволяют добиться максимально возможной точности. Снижение точности наблюдается при уменьшении числа контуров (съёмка незастроенных территорий), в этом случае предъявляются повышенные требования к точности идентификации

соответственных точек. Если количества таких точек оказывается недостаточно, применяются интерактивные процедуры [Gao *et al.*, 2015; Hussnain *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2019]. Также это относится и к НЛС. Большинство современных программных комплексов (ПК) позволяет уравнивать данные лазерного сканирования автоматически с помощью рассмотренных в разделе алгоритмов и их модификаций. Но со снижением плотности застройки точность уравнивания сканов резко падает. Поэтому требуется разрабатывать методики и алгоритмы уравнивания данных лазерного сканирования всех видов, позволяющих увеличить количество идентифицируемых соответственных точек.

Методики и алгоритмы создания конечной продукции по данным лазерного сканирования

В зависимости от поставленной задачи, предварительно обработанные данные лазерного сканирования (фильтрованные и уравненные массивы ТЛО) применяются далее для получения законченной и оформленной продукции. Контроль состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов включает решение широкого круга задач, для которых будет достаточно точности и плотности массива ТЛО, получаемого с помощью ВЛС и МЛС, и задач, где возможно применение только метода НЛС.

Массивы ТЛО и ортофотопланы, полученные с помощью системы ВЛС, используются при проектировании любых площадных и линейных объектов, при геотехническом мониторинге в ходе их эксплуатации. Для этого по ТЛО выполняют построение цифровых моделей рельефа (ЦМР), а по ортофотопланам – дешифрирование территории¹. Далее по ЦМР формируется карта уклонов местности с целью выделения местоположения и границ экзогенных геологических процессов (ЭГП), в ходе которых образуются оползни, обвалы, осыпи. Своевременно выявить данные явления помогает повторная съёмка местности. В результате мониторинга территорий с большим количеством промышленных нефтяных объектов (таких, как трубопроводы, резервуары) и их защитных сооружений, можно предпринять необходимые действия в целях предотвращения их разрушения.

Также была предложена методика формирования карты экзогенных процессов, заключающаяся в построении ЦМР автоматизированными способами по уравненным массивам ТЛО, создания карты уклонов на основе ЦМР, выявления и локализации границ ЭГП вдоль объекта контроля на основе ЦМР и ортофотоплана, сравнения границ ЭГП с предварительно сохранёнными эталонами и непосредственного создания карты ЭГП². Описанная методика была усовершенствована за счёт автоматического дешифрирования инженерно-геологических условий и ЭГП, определения их качественных и количественных характеристик, создания баз данных в геоинформационных системах. Это позволило увеличить точность определения динамики развития оползней и осыпей, обнаружения новых обвалов, воздействующих на технические сооружения³. Упомянуется, что в качестве носителя съёмочной аппаратуры могут выступать как пилотируемые летательные аппараты, так и беспилотные. Различия заключаются в скорости сбора данных и высоте съёмки, что влияет на плотность массивов ТЛО и точность

¹ Патент РФ № 2002107884/28, 28.03.2002. Способ формирования цифровой модели рельефа и/или ортофотоплана и система для его осуществления. Патент России № 2216711, 2003. Вислоцкий А.И., Голобородько Н.Н., Медведев Е.М.

² Патент РФ № 2015119783/28, 26.05.2015. Способ построения карты экзогенных геологических процессов местности вдоль трассы магистрального нефтепровода. Патент России № 2591875, 2016. Ревель-Муроз П.А., Чужинин С.Н., Прохоров А.Н., Захаров А.А., Ахметзянов Р.Р., Могильнер Л.Ю., Лободенко И.Ю., Шебунов С.А., Сощенко А.С.

³ Патент РФ № 2017108882, 16.03.2017. Способ проведения геотехнического мониторинга линейных сооружений и площадных объектов на основе воздушного лазерного сканирования. Патент России № 2655956, 2018. Баборыкин М.Ю.

определения координат точек местности. ВЛС с помощью БПЛА позволяет получать карты ЭГП более крупного масштаба.

Для формирования ЦМР, применяемой при геотехническом мониторинге, также возможно использование методов НЛС и МЛС. Данные виды лазерного сканирования становятся актуальны, когда требуется выполнить мониторинг небольших по площади территорий. Повторное лазерное сканирование территории ДНС Алинского месторождения позволяет выявить изменения между циклами сканирования. В частности, выполненное через год мобильное сканирование, позволяет оценить устойчивость насыпей вокруг внешнего ограждения ДНС путём сравнения двух ЦМР.

В представленных методиках не оговариваются конкретные алгоритмы автоматической классификации массивов ТЛО. В процессе классификации массива каждой его точке назначается определенный класс: земля, растительность, здания и другие объекты. Достоверность результата классификации определяется выбранной методикой, применяемыми алгоритмами и тем, использовались ли вспомогательные данные, такие как аэрофотоснимки, топографические карты и планы. В [Джидд, 2019] приведён обзор методов сегментации и классификации массивов ТЛО.

В [Yang, 2020] предложена методика классификации данных ВЛС, согласно которой массив разбивается на классы посредством применения автоматического алгоритма выделения точек земли и полигонов, сформированных с помощью топографической карты и в результате неконтролируемой сегментации ТЛО. По карте автоматически формируются обучающие выборки, а неконтролируемая сегментация применяется для уменьшения уровня шума и улучшения точности формирования обучающих выборок. Итоговым результатом классификации является разделение массива ТЛО на следующие классы: земля, вода, мосты, растительность, здания, неклассифицированные точки.

При классификации данных лазерного сканирования любого вида особое внимание уделяется выбору алгоритма выделения точек земли. В зависимости от плотности массива ТЛО, характера застройки территории, параметров алгоритма классификации и его вида итоговая точность выделения рельефа может существенно различаться. В [Vosselman, Maas, 2010] описаны 4 основные группы алгоритмов классификации: морфологической фильтрации, прогрессивного сгущения, на основе поверхностей, на основе сегментов. Основная суть большинства алгоритмов выделения точек земли заключается в поиске точек с наименьшим значением отметки в пределах некоторого замкнутого пространства заданного пользователем размера при соблюдении некоторых дополнительных ограничивающих критериев.

При контроле технического состояния трубопроводов, резервуаров, их защитных сооружений в виде ограждений и других объектов, когда требуется миллиметровая точность, применяют данные НЛС. Промышленные сооружения на территориях нефтегазодобывающих комплексов подвергаются постоянному мониторингу, в процессе которого можно выявить различные дефекты и недопустимые отклонения от проектных значений, вызывающие деформации. Геодезический мониторинг сооружений призван вовремя обнаружить любые деформации и спрогнозировать их развитие [Васильев и др., 2019].

Для анализа деформаций по массиву ТЛО выполняют построение трёхмерных моделей поверхности сооружений. В [Алтынцев, Карпик, 2020] приведены различные методики построения цифровых трёхмерных моделей объектов с применением НЛС. Поверхности могут быть построены в виде сплайнов или триангуляционных сетей. В зависимости от требуемой точности и вида объекта рассчитывают определённые параметры поверхностей. В [Васильев и др., 2019] рассчитаны оптимальные размеры равносторонних треугольников при построении поверхности стенок резервуаров методом полигональной аппроксимации. Определение размеров выполнялось с целью максимального прореживания массива ТЛО без ущерба для оценки напряжённо-деформированного состояния.

Мониторинг резервуаров может быть осуществлён согласно методике, приведённой в [Котельников, 2016]:

- удаление ТЛО, не принадлежащих поверхности резервуара;
- построение триангуляционной модели поверхности резервуара по фильтрованным ТЛО;
- анализ дефектов поверхности резервуара посредством определения отклонений его формы от цилиндра и их отображение с помощью цветовой шкалы;
- анализ отклонения вертикальных швов резервуара от вертикальной оси;
- анализ наклона окрайки резервуара;
- построение сплайновой модели поверхности резервуара с целью вычисления напряжений и деформаций.

В случае мониторинга сооружений, состоящих из множества структурных элементов, таких, как колонны и опоры, разрабатываются методики, позволяющие автоматически распознать эти элементы в массиве ТЛО и выполнить сравнение с проектными данными. В качестве проектных данных могут выступать трёхмерные информационные модели (ВІМ). В [Maalek et al., 2019] подобным способом выполнялся мониторинг при строительстве несущих колонн здания. После каждого цикла строительства выполнялось лазерное сканирование и автоматически оценивались результаты возведения новых колонн посредством сравнения их положения относительно ВІМ.

Отдельно стоит отметить применение метода МЛС для деформационного анализа. Заявленной абсолютной точности данных МЛС большинства коммерческих систем в несколько сантиметров оказывается недостаточно для оценки деформаций поверхности сооружений. Для повышения точности данных МЛС до уровня нескольких миллиметров разрабатываются специальные методики и частные мобильные комплексы лазерного сканирования. Увеличение точности достигается посредством применения большого числа опорных точек, координаты которых измеряются геодезическими методами, посредством снижения скорости передвижения, применения высокоточных измерительных блоков, входящих в состав съёмочной системы, и разработкой специального программного обеспечения. В [Sun, 2020] приведён пример системы МЛС, обеспечивающей точность определения деформаций порядка 3 мм. При этом движение осуществляется со скоростью порядка 3 км/ч, а с помощью опорных точек выполняется дополнительная привязка траектории системы МЛС к внешней системе координат.

ВЫВОДЫ

Территории нефтегазодобывающих предприятий изобилуют большим количеством сложных инженерных сооружений, среди которых в отдельный класс можно выделить защитные. Для обеспечения непрерывного цикла работы таких предприятий и предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций требуется осуществлять постоянный контроль защитных сооружений. Эта задача может решаться с помощью методов дистанционного зондирования Земли, среди которых наиболее универсальным является лазерное сканирование.

Направления исследований, связанные с технологией лазерного сканирования, весьма обширны. В настоящее время разработано большое количество методик съёмки с применением лазерного сканирования, а также методик и алгоритмов камеральной обработки его данных, позволяющих проконтролировать состояние защитных сооружений. Тип контролируемого защитного сооружения и его расположение оказывают основное влияние на выбор вида лазерного сканирования. Каждое защитное сооружение обладает своими особенностями, которые необходимо учитывать при разработке универсальной методики осуществления лазерного сканирования и обработки его данных с максимальной скоростью и наивысшей точностью.

Выполненный анализ различных применяемых методик и алгоритмов позволяет сформировать комплексное представление о всех направлениях исследований в области лазерного сканирования с целью повышения степени автоматизации различных его этапов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic "Development of the theory and technological solutions for monitoring the state of protective structures during pumping of petroleum products by active remote sensing methods", No. 0807-2020-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алтынцев М.А., Карпик П.А.* Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 2. С. 121–139. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.
2. *Васильев Г.Г., Сальников А.П., Катанов А.А., Лиховцев М.В., Ильин Е.Г.* Оптимизация процесса камеральной обработки результатов наземного лазерного сканирования при оценке напряженно-деформированного состояния резервуаров. Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 32–39. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-8-1-32-39.
3. *Дедкова В.В., Комиссаров А.В.* Анализ методов и средств контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 2. С. 77–84. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-77-84.
4. *Джидид А.Д.* Обзор методов сегментации и классификации облака точек архитектурных объектов. Изв. Вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 1. С. 52–59. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-52-59.
5. *Котельников С. И.* Применение технологии лазерного сканирования для мониторинга нефтеналивных резервуаров. Маркшейдерский вестник. 2016. Т. 111. № 2. С. 36–40.
6. *Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р.* Лазерная локация земли и леса: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.
7. *Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А.* Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.
8. *Чибуничев А.Г., Велижев А.Б.* Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования. Геодезия и аэрофотосъемка, 2008. № 3. С. 112–119.
9. *Amon P., Rieger P., Riegl U., Pfennigbauer M.* Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use Unmanned Aerial Systems (UAS). Proceedings of the FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance. 2014. No. 7074.
10. *Besl P.J., McKay N.D.* Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1992. V. 14. No. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
11. *Dong Z., Liang F., Yang B., Xu Y., Zang Y., Li J., Wang Y., Dai W., Fan H., Hyypä J., Stilla U.* Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. V. 163. P. 327–342. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.
12. *Fuad N.* Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. International Archives of ISPRS. 2018. V. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.

13. *Gao Y., Huang X., Zhang F., Fu Z., Yang C.* Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images. *International Archives of ISPRS*. 2015. V. XL-1/W4. P. 41–46. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.
14. *Gruen A., Akca D.* Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2005. V. 59 (3). P. 151–174. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.02.006.
15. *Guo Y.* Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition. *Int. J. Comput. Vision*. 2013. V. 105 (1). P. 63–86. DOI: 10.1007/s11263-013-0627-y.
16. *Hu H., Sons M., Stiller C.* Accurate Global Trajectory Alignment using Poles and Road Markings. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IV. 2019. DOI: 10.1109/IVS.2019.8814054.
17. *Hussnain Z., Oude Elbernk S., Vosselman G.* An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. *International Archives of ISPRS*. 2018. V. XLII-1. P. 203–209. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-203-2018.
18. *Kitada Y., Dan H., Yasumuro Y.* Optimization scenario for 3D-scanning plans of outdoor constructions based on SFM. *Proceedings of CONVR*. 2015. P. 65–68. DOI: 10.2208/jscejcei.71.I_169.
19. *Kukko A.* Mobile laser scanning – system development, performance and applications. *Juvenes Print, thesis*. 2013. 249 p.
20. *Maalek R., Lichti D.D., Ruwanpura J.Y.* Automatic recognition of common structural elements from point clouds for automated progress monitoring and dimensional quality control in reinforced concrete construction. *Remote Sensing*. 2019. V. 11 (9). No. 1102. DOI: 10.3390/rs11091102.
21. *Mavridis P., Andreadis A., Papaioannou G.* Efficient Sparse ICP. *Computer Aided Geometric Design*. 2015. V. 35. P. 16–26. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.022.
22. *Schaer P., Vallet J.* Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments. *International Archives of ISPRS*, 2016. V. XL-3/W4. P. 61–64. DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-61-2016.
23. *Scherzinger B., Hutton J.* Applanix In-Fusion technology explained. Электронный ресурс: https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (дата обращения: 20.04.2021).
24. *Scott W.R., Roth G., Rivest J.F.* View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2003. V. 35 (1). P. 64. DOI: 10.1145/641865.641868.
25. *Soudarissanane S., Lindenbergh R.* Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up. *International Archives of ISPRS*. 2011. V. XXXVIII-5/W12. P. 127–132.
26. *Soudarissanane S., Lindenbergh R., Menenti M., Teunissen P.* Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. *International Archives of ISPRS*. 2009. V. XXXVIII. No. 3/W8. P. 183–188.
27. *Sun H., Xu Z., Yao L., Zhong R., Du L., Wu H.* Tunnel monitoring and measuring system using mobile laser scanning: Design and deployment. *Remote Sensing*. 2020. V. 12 (4). DOI: 10.3390/rs12040730.
28. *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*. Training material based on practical applications. *Vlaams Leonardo Da Vinci agentschap*, 2008. 241 p.
29. *Torresan C., Berton A., Carotenuto F., Chiavetta U., Miglietta F., Zaldei A., Gioli B.* Development and Performance Assessment of a Low-Cost UAV Laser Scanner System (LasUAV). *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 1094. DOI: 10.3390/rs10071094.
30. *Vosselman G., Maas H-G.* *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press, 2010. 318 p.
31. *Wakisaka E., Kanai S., Date H.* Optimal Laser Scan Planning for As-Built Modeling of Plant Renovations Using Mathematical Programming. *Proceedings of 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0013.
32. *Wang Y., Chen Q., Zhu L., Liu L., Li C., Zheng D.* A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas. *Remote Sensing*. 2019. V. 11 (13). No. 1540. DOI: 10.3390/rs11131540.

33. *Yang Z.* Using training samples retrieved from a topographic map and unsupervised segmentation for the classification of airborne laser scanning data. *Remote Sensing*. 2020. V. 12 (5). No. 877. DOI: doi.org/10.3390/rs12050877.

REFERENCES

1. *Altyntsev M.A. and Karpik P.A.* The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SSUGT*. 2020. V. 25. No. 2. P. 121–139. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139. (in Russian).
2. *Amon P., Rieger P., Riegl U., and Pfennigbauer M.* Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use Unmanned Aerial Systems (UAS). *Proceedings of the FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*. 2014. No. 7074.
3. *Besl P.J. and McKay N.D.* Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1992. V. 14. No. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
4. *Chibunichev A.G. and Veligei A.B.* Automatic comparison of cloud points derived from terrestrial laser scanning using orientation histograms. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2008. No. 3. P. 112–119. (in Russian).
5. *Dedkova V.V. and Komissarov A.V.* Analysis of methods and means of control of main pipelines' protective structures. *Vestnik SSUGT*. 2020. V. 25. No. 2. P. 77–84. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-77-84. (in Russian).
6. *Dong Z., Liang F., Yang B., Xu Y., Zang Y., Li J., Wang Y., Dai W., Fan H., Hyyppäb J., and Stilla U.* Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. V. 163. P. 327–342. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.
7. *Fuad N.* Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *International Archives of ISPRS*. 2018. V. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
8. *Gao Y., Huang X., Zhang F., Fu Z., and Yang C.* Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images. *International Archives of ISPRS*. 2015. V. XL-1/W4. P. 41–46. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.
9. *Gruen A., Akca D.* Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005. V. 59 (3). P. 151–174. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.02.006.
10. *Guo Y.* Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition. *Int. J. Comput. Vision*. 2013. V. 105 (1). P. 63–86. DOI: 10.1007/s11263-013-0627-y.
11. *Hu H., Sons M., and Stiller C.* Accurate Global Trajectory Alignment using Poles and Road Markings. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IV. 2019. DOI: 10.1109/IVS.2019.8814054.
12. *Hussnain Z., Oude Elbernk S., and Vosselman G.* An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. *International Archives of ISPRS*. 2018. V. XLII-1. P. 203–209. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-203-2018.
13. *Jdeed A.J.* Review of point clouds segmentation and classification methods for architectural objects. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2019. V. 63. No. 1. P. 52–59. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-52-59. (in Russian).
14. *Kitada Y., Dan H., and Yasumuro Y.* Optimization scenario for 3D-scanning plans of outdoor constructions based on SFM. *Proceedings of CONVR*. 2015. P. 65–68. DOI: 10.2208/jscejcei.71.I_169.
15. *Kotel'nikov S.I.* Application of technology of laser scanning for monitoring of oil tanks. *Mine Surveying Bulletin*. 2016. Vol. 111. No. 2. P. 36–40. (in Russian).
16. *Kukko A.* Mobile laser scanning – system development, performance and applications. *Juvenes Print, thesis*. 2013. 249 p.

17. *Maalek R., Lichti D.D., and Ruwanpura J.Y.* Automatic recognition of common structural elements from point clouds for automated progress monitoring and dimensional quality control in reinforced concrete construction. *Remote Sensing*. 2019. V. 11 (9). No. 1102. DOI: 10.3390/rs11091102.
 18. *Mavridis P., Andreadis A., and Papaioannou G.* Efficient Sparse ICP. *Computer Aided Geometric Design*. 2015. V. 35. P. 16–26. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.022.
 19. *Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R.* LiDAR of ground and forest. Moscow: Geolidar, Geospace. Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS. 2007. 230 p. (in Russian).
 20. *Schaer P., Vallet J.* Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments. *International Archives of ISPRS*, 2016. V. XL-3/W4. P. 61–64. DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-61-2016.
 21. *Scherzinger B., Hutton J.* Applanix In-Fusion technology explained. Web resource: https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (дата обращения: 20.04.2021).
 22. *Scott W.R., Roth G., Rivest J.F.* View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2003. V. 35 (1). P. 64. DOI: 10.1145/641865.641868.
 23. *Seredovich V.A., Komissarov A.V., Komissarov D.V., and Shirokova T.A.* Terrestrial laser scanning. Novosibirsk, SSGA. 261 p. (in Russian).
 24. *Soudarissanane S., Lindenbergh R.* Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up. *International Archives of ISPRS*. 2011. V. XXXVIII-5/W12. P. 127–132.
 25. *Soudarissanane S., Lindenbergh R., Menenti M., and Teunissen P.* Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. *International Archives of ISPRS*, 2009. V. XXXVIII. No. 3/W8. P. 183–188.
 26. *Sun H., Xu Z., Yao L., Zhong R., Du L., and Wu H.* Tunnel monitoring and measuring system using mobile laser scanning: Design and deployment. *Remote Sensing*. 2020. V. 12 (4). DOI: 10.3390/rs12040730.
 27. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Training material based on practical applications. Vlaams Leonardo Da Vinci agentschap. 2008. 241 p.
 28. *Torresan C., Berton A., Carotenuto F., Chiavetta U., Miglietta F., Zaldei A., Gioli B.* Development and Performance Assessment of a Low-Cost UAV Laser Scanner System (LasUAV). *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 1094. DOI: 10.3390/rs10071094.
 29. *Vasiliev G.G., Salnikov A.P., Katanov A.A., Likhovtsev M.V., and Ilyin E.G.* Optimization of the process of post-processing of the results of surface laser scanning in the evaluation of the stress-strain state of vertical steel tank. *Science & Technologies: Oil and Gas Products Pipeline Transportation*. 2019. V. 9. No. 1. P. 32–39. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-8-1-32-39. (in Russian).
 30. *Vosselman G., Maas H-G.* Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press, 2010. 318 p.
 31. *Wakisaka E., Kanai S., and Date H.* Optimal Laser Scan Planning for As-Built Modeling of Plant Renovations Using Mathematical Programming. *Proceedings of 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0013.
 32. *Wang Y., Chen Q., Zhu L., Liu L., Li C., and Zheng D.* A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas. *Remote Sensing*. 2019. V. 11 (13). No. 1540. DOI: 10.3390/rs11131540.
 33. *Yang Z.* Using training samples retrieved from a topographic map and unsupervised segmentation for the classification of airborne laser scanning data. *Remote Sensing*. 2020. V. 12 (5). No. 877. DOI: doi.org/10.3390/rs12050877.
-