

Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий

Д. Б. Новоселов^{1}*

¹ ООО «ОК «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Российская Федерация

* e-mail: Novoselob.db@okkshs.ru

Аннотация. В настоящее время при проектировании и строительстве крупных промышленных предприятий внедряются трехмерные BIM-модели зданий и сооружений. В данной статье описано практическое применение наземного лазерного сканера Leica RTC360 на строящейся промышленной площадке ПАО «Уралкалий» г. Березники, Пермский край. Цель съемки – геодезический мониторинг строительства и выполнение исполнительной документации по разделам отопление, вентиляция, водопровод, канализация и тепловые сети надшахтного здания №2. Для привязки облаков точек к строительной системе координат и высот внутри действующих промышленных предприятий создаются линейно-угловые сети с помощью электронного тахеометра для определения координат и высот марок для наземного лазерного сканера. В статье рассмотрен автоматический способ и метод регистрации наилучшего приближения для совмещения облаков точек, полученных с помощью НЛС, с BIM-моделями. В результате было определено, что автоматический способ следует использовать, когда на исследуемом объекте присутствует строительная система координат. Метод регистрации наилучшего приближения используется, когда есть только условная система координат, например, для контрольных сборок металлических конструкций. Предложено выполнять автоматическую классификацию облаков точек, как внутри промышленных объектов, так и снаружи. Процесс классификации основан на алгоритме машинного обучения, который опирается на вычисления с использованием видеокарты. Непосредственно на реальном строящемся горнодобывающем предприятии было применено наземное лазерное сканирование, которое позволяет в дальнейшем выполнять геодезический мониторинг, создавать исполнительную документацию и своевременно выявлять отклонения от проекта с использованием BIM-моделей.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, мониторинг строительства, горнодобывающие промышленные предприятия, исполнительная съемка, BIM-модель

The use of laser scanners in geodetic support of the construction of mining industrial enterprises

D. B. Novoselov^{1}*

¹ LLC "OK "Sibshahtostroy", Novokuznetsk, Russian Federation

* e-mail: novoselov.db@okkshs.ru

Abstract. Currently, in the design and construction of large industrial enterprises, three-dimensional BIM models of buildings and structures are being introduced. This article describes the practical application of the Leica RTC360 terrestrial laser scanner at the industrial site of PJSC Uralkali, Berezniki, Perm Territory, under construction. The purpose of the survey is geodetic monitoring of construction and the implementation of as-built documentation for the sections of heating, ventilation, water supply, sewerage and heating networks of the shaft building No. 2. To bind point clouds to the construction coordinate system and heights, linear-angular networks are created inside existing

industrial enterprises using an electronic total station to determine the coordinates and heights of marks for a ground-based laser scanner. The article considers an automatic method and method for registering the best approximation for combining point clouds obtained using NLS with BIM models. As a result, the automatic method is used when there is a building coordinate system on the object under study. The method of registering the best approximation is used when there is only a conditional coordinate system, for example, for control assemblies of metal structures. It is proposed to perform automatic classification of point clouds, both inside industrial facilities and outside. The classification process is based on a machine learning algorithm that relies on calculations using a video card. Ground-based laser scanning was used directly at a real mining enterprise under construction, which allows further geodetic monitoring, creation of as-built documentation and timely detection of deviations from the project using BIM models.

Keywords: terrestrial laser scanning, construction monitoring, mining industrial enterprises, executive survey, BIM model

Введение

Сегодня в процессе проектирования средних и крупных промышленных предприятий в проектных организациях более широко внедряются технологии информационного моделирования [1–3]. Все чаще на строительной площадке применяются современные методы для мониторинга за строительством и используются проектные модели в трехмерном виде [4]. Также выполняется перевод строительной области на электронный документооборот согласно Постановлению правительства РФ № 1431 [5].

Для мониторинга строительства предлагается использовать съемку с применением наземных лазерных сканеров (НЛС). Лазерные сканирующие системы можно активно применять не только для наблюдения и обследования сложных зданий и сооружений, но и для получения реальной картины на месте аварии или катастрофы с привязкой места к опорной системе координат [6–11].

Результатом сканирования является облако точек, в котором каждая точка, расположенная на поверхности сканируемого объекта, имеет пространственные координаты, реальный цвет, интенсивность, угол сканирования, номер отражения и время съемки. Работа наземного лазерного сканера основывается на принципе измерения расстояний от прибора до точек с использованием лазерного дальномера. По сравнению с классическими методами измерений съемка с помощью НЛС позволяет получать исходные данные с высокой степенью детализации при наименьших затратах времени [12–15].

НЛС применяются для расчетов объемов земляных работ, угольных складов и инертных материалов на строительных и горнодобывающих площадках. В большинстве случаев такие объекты недоступны, имеют очень сложную форму, и это невозможно учесть при классической съемке [16].

Технология НЛС на средних и крупных промышленных предприятиях позволяет решать следующие задачи:

- восстановление исполнительной документации;
- реконструкция зданий и сооружений;
- выявление отклонений строительных конструкций каркаса зданий от проектного положения при строительстве и эксплуатации;

- создание виртуальной копии объекта;
- сравнения облаков точек с BIM-моделями и выявление коллизий [17–22].

Методы и материалы

На территории действующих горнодобывающих предприятий для привязки облаков точек к строительной системе координат используются черно-белые марки, совмещенные с геодезическим разбивочным обоснованием. Марка представляет собой цель, которая рисуется краской по определенному шаблону на основных несущих конструкциях [23]. Важной составляющей является цвет краски, он должен отличаться от цвета конструкций, чтобы ПО Leica Cyclone определяла автоматически с помощью команды «черно-белая марка» центр марки. Для определения координат центров марок прокладываются линейно-угловые сети на территории промышленных предприятий с использованием высокоточных электронных тахеометров. На рис. 1 представлена линейно-угловая сеть, проложенная на территории строящейся промышленной площадки ПАО «Уралкалий» г. Березники.

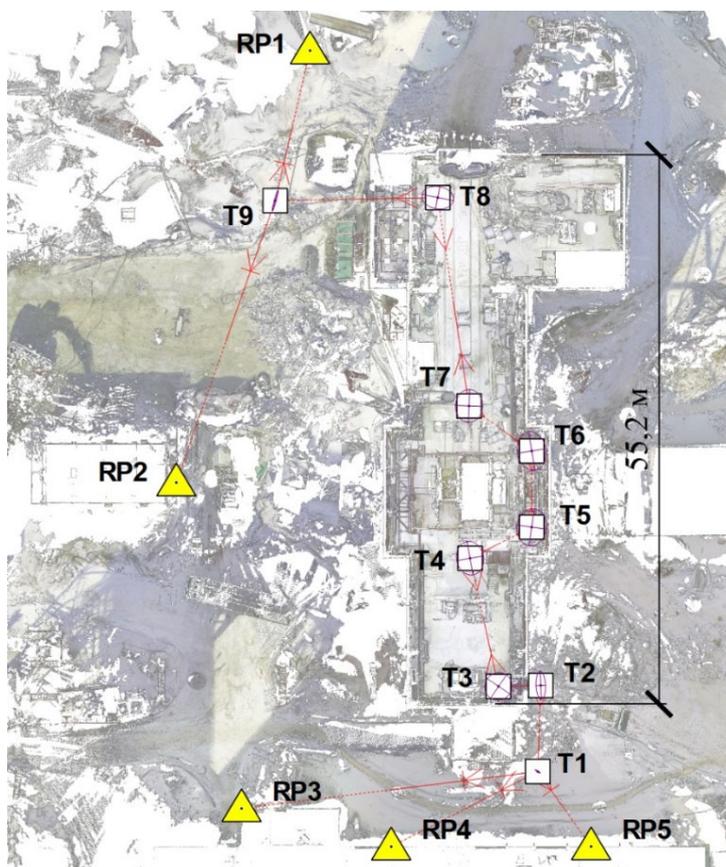


Рис. 1. Проект линейно-угловой сети внутри строящегося промышленного предприятия

На промышленных территориях обычно расположено много технологического оборудования, присутствуют очень стесненные условия, поэтому нет воз-

возможности выдержать предлагаемые расстояния для ходов полигонометрии. В этом случае необходимо выполнить расчет ошибок положения пунктов в середине полигонометрического хода для определения оптимального соотношения точности угловых и линейных измерений [24]. Общие ошибки (M) в положении пункта Т5 полигонометрического хода, представленного на рис. 1, в 2,4 мм можно обеспечить при точности измерений углов $m_{\beta} = 2''$ и длин сторон $m_s = 1,5$ мм (табл. 1). В табл. 1 приведены: $\sum_1^n S$ – длины ходов; A и B – размеры эллипсов ошибок; R – радиусы круга ошибок.

Таблица 1

Результаты оценки точности изогнутого хода

Пункт	M	R	A	B	m_{β}	m_s	$\sum_1^n S$
Т5	2,4 мм	1,7 мм	1,7 мм	1,7 мм	2,0"	1,5 мм	85 м

При использовании НЛС на промышленных территориях связь между станциями осуществляется по общим точкам сканирования. Перекрытие между соседними станциями НЛС должно быть не меньше 50 %. Также можно связывать соседние станции НЛС по маркам, количество марок должно быть не менее 3 штук. При обработке в современных ПО нет необходимости привязывать станции сканирования по маркам, потому что в производственных цехах присутствует много общих точек для сшивки станций НЛС. После создания связей между станциями сканирования выполняется пересчет облака точек в строительную систему координат с использованием черно-белых марок.

Результаты

Применение наземного лазерного сканера Leica RTC360 было выполнено на строящейся промышленной площадке ПАО «Уралкалий» г. Березники, Пермский край. Цель съемки – геодезический мониторинг строительства и выполнение исполнительной документации по разделам отопление, вентиляция (ОВ), водопровод, канализация (ВК) и тепловые сети (ТС) надшахтного здания № 2 (рис. 2).

Полевые работы были выполнены за две смены, выполнено сканирование с 101 станции НЛС как внутри, так и снаружи надшахтного здания № 2. Обработка заняла также две смены, в результате был получен большой массив геопространственных данных объемом около 4 млрд точек. Точность сшивки сканов по общим точкам составила 2 мм. В проекте присутствовало 15 исходных марок: 7 – на улице и 8 – внутри надшахтного здания № 2. Точность привязки в строительную систему координат по маркам составила 4 мм.

Часть сетей из проекта ТС, ОВ и ВК была построена не по проекту и с отклонением от проекта, поэтому нужно было выполнить качественную съемку всего надшахтного здания. Для этой цели наиболее подходящим геодезическим инструментом является наземный лазерный сканер. Весь объем пространственных данных, полученных с НЛС, также служит для выполнения строительного

контроля за основными конструкциями каркасов зданий. При использовании НЛС получается избыточный объем данных, так как разные объекты находятся на разном удалении от сканера, в таком случае необходимо проредить облако точек и установить среднее расстояние между соседними точками.

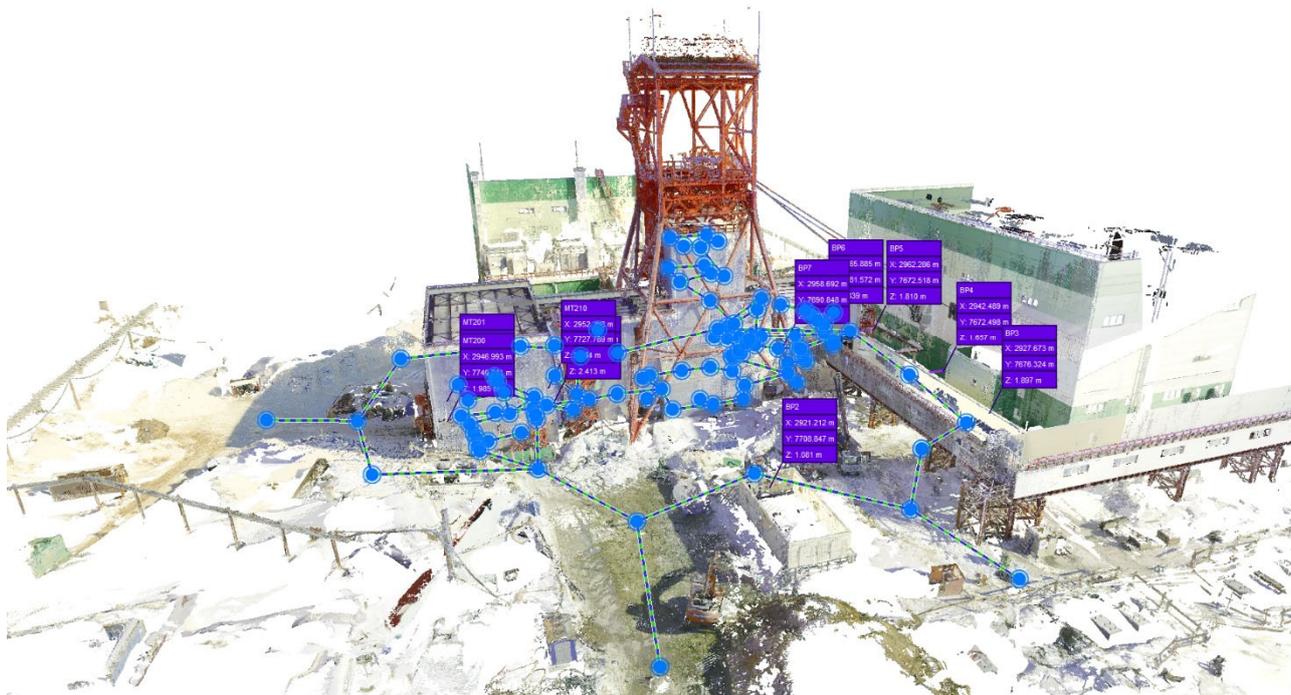


Рис. 2. Уравнивание облаков точек, полученных с помощью НЛС на промышленной территории

По полученным данным с наземного лазерного сканера можно оформлять исполнительные съемки на основные металлические и железобетонные конструкции каркаса здания. Для обработки облаков точек используется отечественное ПО 3D СКАН [25]. На первом этапе выполняется очистка облака точек от шума, движущих объектов и ошибочных точек. Затем выполняется автоматическая классификация облака точек, выделяются в отдельный слой точки, которые принадлежат каркасу здания, например металлические колонны. В нижней, средней и верхней частях конструкции создаются сечения. Затем по полученным сечениям определяется величина отклонения колонн от вертикали по осям здания, а после оформляется исполнительная съемка на основе проекта.

Совмещение геопространственных моделей, полученных с помощью НЛС, с BIM-моделями осуществляется автоматически, для этого необходимо перенести BIM-модель в строительную систему координат (рис. 3).

При разработке BIM конструкторское бюро принимает одно из пересечений главных осей за начало координат. Необходимо рассчитать приращение координат этого нулевого пересечения в соответствии с актом о закреплении основных осей здания и сооружений. В большинстве случаев BIM-модель строится в отно-

сительной системе высот, поэтому облако точек, полученное с НЛС, необходимо перевести в относительную систему высот или использовать исходные марки для НЛС в относительной системе высот.

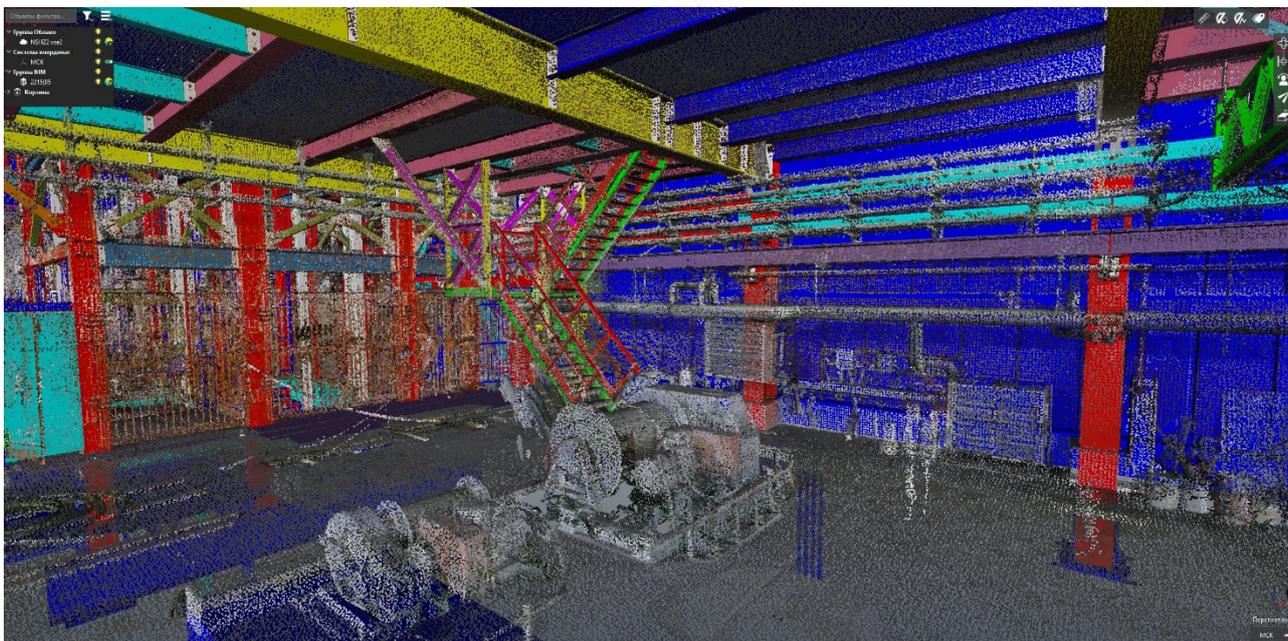


Рис. 3. Совмещение данных НЛС с BIM-моделью

Дополнительным способом совмещения облаков точек, полученных с НЛС, и BIM-моделей является команда «регистрация наилучшего приближения» в ПО Leica Cyclone. Этот способ применяется для отдельных деталей, например, при контрольных сборках непосредственно на производстве, где нет строительной системы координат. Эта команда анализирует перекрытие выбранных объектов, чтобы вычислить наилучшее соответствие этих объектов. Наилучшее соответствие – преобразование, которое максимально точно совмещает BIM-модель с облаком точек. Первый объект в выделенной области является опорным неподвижным объектом, в нашем случае – это облако точек. Для получения хорошего результата настоятельно рекомендуется, чтобы неподвижный объект покрывал основную часть BIM-модели.

После совмещения BIM-моделей с облаками точек выявляются отклонения проекта от факта. Величины отклонений можно визуализировать с помощью цветовой шкалы (рис. 4).

Геодезический мониторинг смонтированных конструкций и коммуникаций с помощью НЛС позволяет получать полную информацию о плановом и фактическом объеме выполненных работ, а также проводить анализ критичности отклонений смонтированных конструкций и коммуникаций от проекта. Это позволяет выявлять потенциально опасные участки строительства и своевременно принимать решения о дальнейшем ходе работ.

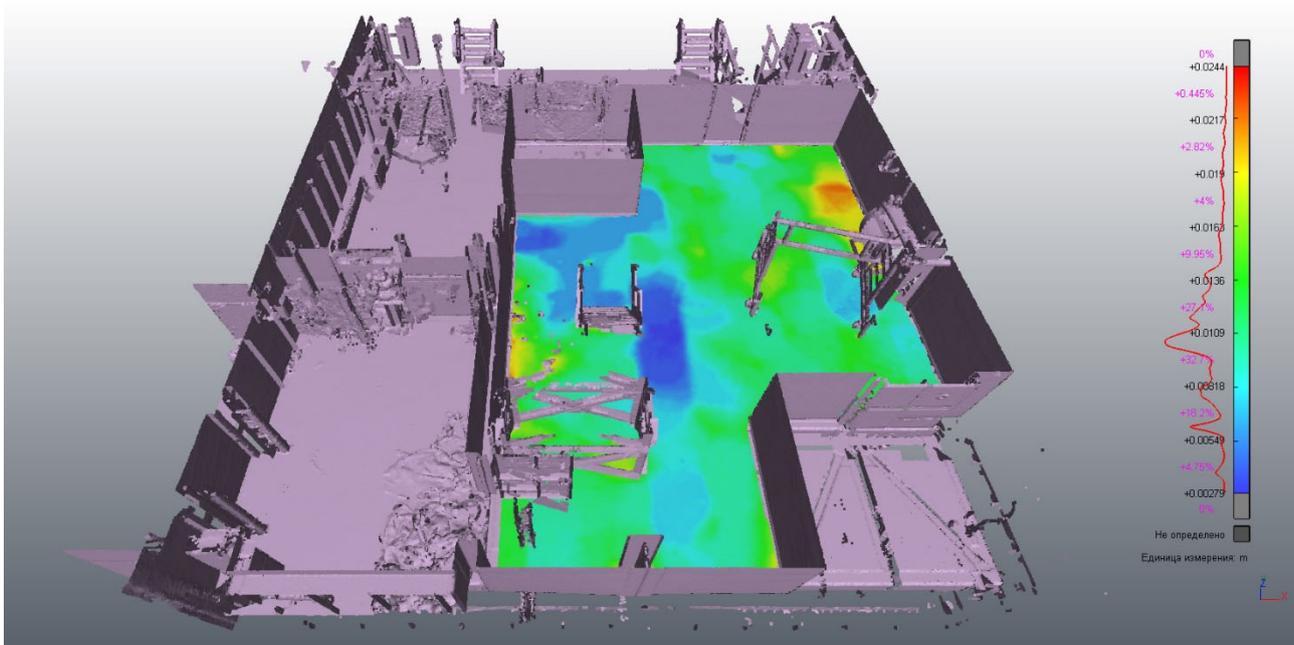


Рис. 4. Сопоставление проект-факт данных НЛС с BIM-моделями

ПО Cyclone позволяет выполнять автоматическую классификацию точек. Процесс классификации основан на алгоритме машинного обучения, который опирается на вычисления с использованием видеокарты.

При запуске автоматической классификации программное обеспечение проверяет, выполнены ли все требования для работы команды. Одним из требований является средняя плотность облака точек менее 5 мм для классификации внутренних помещений. Внутри промышленных объектов программа выделяет точки, принадлежащие полу, стенам, окнам, проемам, лестницам и др. Автоматическая классификация точек значительно экономит время при обработке больших объемов пространственных данных. ПО корректно классифицирует несложные внутренние помещения. Если есть некачественное распознавание элементов, то при необходимости можно использовать ручную классификацию для улучшения и уточнения автоматической классификации.

Применение современных программных продуктов по обработке геопространственных данных позволяет автоматизировать процесс обработки информации, полученной с помощью НЛС, для комплексного решения различных прикладных инженерных задач в процессе контроля за возводимыми зданиями и сооружениями.

Заключение

В статье описана методика использования наземного лазерного сканера при геодезическом контроле за возводимыми промышленными зданиями и сооружениями в горнодобывающей отрасли. Основные конструкции каркасов зданий, трубопроводы, технологическое оборудование рационально контролировать с применением наземных лазерных сканеров. Геодезический мониторинг уста-

новленных конструкций и коммуникаций с помощью НЛС позволяет получать информацию о плановом и фактическом объеме выполненных работ, а также проводить анализ критичности отклонений смонтированных конструкций и коммуникаций от проекта. Современное ПО позволяет автоматически классифицировать большие облака точек, совмещать BIM-модели с облаками точек и анализировать отклонения с использованием автоматических алгоритмов.

Непосредственно на реальном строящемся горнодобывающем предприятии было применено наземное лазерное сканирование, которое позволяет в дальнейшем выполнять геодезический мониторинг, создавать исполнительную документацию и своевременно выявлять большие отклонения от проекта с использованием BIM-моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азаров Б. Ф., Опара В. В. BIM-технологии: проектирование, строительство, эксплуатация // Ползуновский альманах. – 2018. – № 2. – С. 8–11.
2. Jernigan F., Jernigan F. BIG BIM little bim. Second edition // Salibrary: 4 Site Press, 2008. – 328 p.
3. Рыбин Е. Н., Амбарян С. К., Аносов В. В., Гальцев Д. В., Фахратов М. А. BIM-технологии // Изв.вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 1, № 1 (28). – С. 98–105.
4. Развитие системы контроля за ходом строительно-монтажных работ на основе комплексного применения программных продуктов Primavera P6 Professional R8.3.2 и ArchiCAD 17.0.0 / В. П. Грахов, Ю. Г. Кислякова, У. Ф. Симакова, Д. А. Мушаков // Наука и техника – 2017. – Т.16, № 6. – С. 466–474.
5. Об утверждении правил «Формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов» : постановление Правительства РФ от 15.09.2020 № 1431 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Комиссаров А. В. Обоснование направлений использования данных цифровой съемки при наземном лазерном сканировании // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 1 (33). – С. 95–100.
7. Наземное лазерное сканирование / А. В. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
8. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений / В. А. Бударова, Н. Г. Мартынова, А. В. Шереметинский, А. В. Привалов. // Московский экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 8–14.
9. Gordon, S. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners / S. Gordon, D. Lichti, J. Franke, M. Stewart // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. – Nottingham, U. K, 2004. – 16 pp.
10. Шульц Р. В. Наземное лазерное сканирование в задачах инженерной геодезии. – Германия: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 339 с.
11. 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. 131–139.
12. Мустафин М. Г., Шокер Ч. М. Оценка влияния линейно-угловых параметров лазерно-сканирующей съемки на точность построения модели объекта // Маркшейдерский вестник. – 2020. – № 6(139). – С. 45–50.

13. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
14. Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я. Требования к точности наземного лазерного сканирования для решения инженерно-геодезических задач с помощью цифрового информационного моделирования // Геодезия и картография. – 2021. – № 8. – С. 2–12. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-974-8-2-12.
15. Кузнецова А. А. Применение наземного лазерного сканирования для выявления отклонений конструкций от их проектных значений // Геодезия и картография. – 2018. – № 12. – С. 2–7. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-942-12-2-7.
16. Бударова В. А., Мартынова Н. Г., Шереметинский А. В., Привалов А. В. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений // Московский экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 8–14.
17. Badenko V., Fedotov A., Zotov D., Lytkin S., Volgin D., Garg R.D., Min L. Scan-to-BIM methodology adapted for different application // Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2019. – Vol. 42. – P. 49–55.
18. Галахов В. П., Жуков Г. А. Вынос BIM модели на строительную площадку и контроль строительства // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От введения до внедрения : сборник материалов II международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербургская ассоциация геодезии и картографии. – 2017. – С. 216–222.
19. Nguyen C. H. P. Choi Y (2018) Comparison of point cloud data and 3D CAD data for on-site dimensional T inspection of industrial plant piping systems. Automation in Construction, 91, pp. 44–52. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.008.
20. Ochmann S., Vock R., Klein R. (2019) Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from oriented point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 151, pp. 251–262. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.017.
21. Son, H., Kim, C., Kim, C. (2015) 3D reconstruction of as-built industrial instrumentation models from laser-scan data and a 3D CAD database based on prior knowledge. Automation in Construction, 49, pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.007.
22. Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 57–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-57-67.
23. Неволин А. Г., Новоселов Д. Б. Создание и ведение цифровых дежурных планов при строительстве горнодобывающих предприятий Кемеровской области // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 25–34. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-25-34.
24. Новоселов Д. Б. Совершенствование методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации промышленных предприятий в горнодобывающей отрасли: специальность 1.6.22. Геодезия : автореферат. дис. ... канд. техн. наук / Д. Б. Новоселов; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2021. – 24 с.
25. Грохольский Д. В., Кукареко И. С. CREDO 3D СКАН – новое решение для обработки данных лазерного сканирования // Геопрофи. – 2016. – №1 – С. 41–43.

© Д. Б. Новоселов, 2022