

УДК 528.48

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ДЛЯ РЕМОНТА АВТОДОРОГИ

*Иван Сергеевич Камнев*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (983)311-66-49, e-mail: kamneviv@mail.ru

В статье рассмотрено применение методики лазерного сканирования при производстве инженерно-геодезических изысканий для ремонта автомобильной дороги IV категории. Сделан анализ выполненных измерений и произведена оценка точности данных лазерного сканирования путем сравнения их с высотными отметками, полученными в результате нивелирования короткими лучами по программе III класса оси автодороги. Также даны рекомендации выполнения полевых работ по наземному лазерному сканированию для повышения точности измерений и эффективности геодезических работ в целом. Выполнено исследование точности определения объемов фрезерования и закладываемых новых материалов для ремонта дорожного полотна в зависимости от плотности создаваемой цифровой трехмерной векторной модели покрытия автодороги по данным лазерного сканирования.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, инженерно-геодезические изыскания, оценка точности, цифровая модель рельефа, ровность, определение объемов.

На современном этапе развития отраслей планирования, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений начинают активно внедряться методы трехмерного проектирования, которые в свою очередь требуют применения новейших технологий и методик выполнения инженерно-геодезических изысканий, отвечающих за достоверность и оперативность определения трехмерных геодезических данных [1, 2].

Чем точнее, объективнее и полнее отображается реальное состояние объекта, тем обоснованнее принимаются инженерами и проектировщиками решения по выбору методов, направленных на достижение поставленных целей. Таким образом, сводится к минимуму степень ошибочности принимаемого решения [3].

Одним из методов отвечающих данным требованиям, является лазерное сканирование (ЛС), обоснование возможности использования которого приведено в статье [4].

В настоящей статье приводится описание применения методики лазерного сканирования автомобильной дороги IV категории, а также оценка точности высотных измерений и анализ полученных данных.

В рамках эксперимента по оси автодороги было выполнено геометрическое нивелирование короткими лучами по программе III класса. Точки нивелирования были запроектированы с шагом в 5 м в точках перегиба. Перед выполнением нивелирования, в заранее запроектированных местах для однозначного определения одноименных точек при проложении нивелирных ходов в прямом

и обратном направлениях, были забиты дюбели на уровне асфальта. Также определены плановые координаты каждой точки. При выполнении инженерно-геодезических работ использовался цифровой нивелир с компенсатором. Уравнивание нивелирных ходов осуществлялось в программном обеспечении (ПО) Credo\_Нивелир.

Для данного исследования был взят наземный лазерный сканер Riegl VZ-400. Сканирование осуществлялось с крыши автомобиля, на которой зафиксировано специальное крепление для установки геодезического прибора. Специалист одновременно с выполнением измерений выполнял оперативную обработку измерений на рабочем ноутбуке в ПО RiSCAN PRO.

Станции наземного лазерного сканирования (НЛС) размещались с интервалом в 50 м. На каждой станции в автоматическом режиме выполнялось точное определение углов наклона сканера. Пример результата сканирования с одной станции показан на рис. 1. На данном рисунке точки лазерного отражения (ТЛО) раскрашены по интенсивности отраженного сигнала.

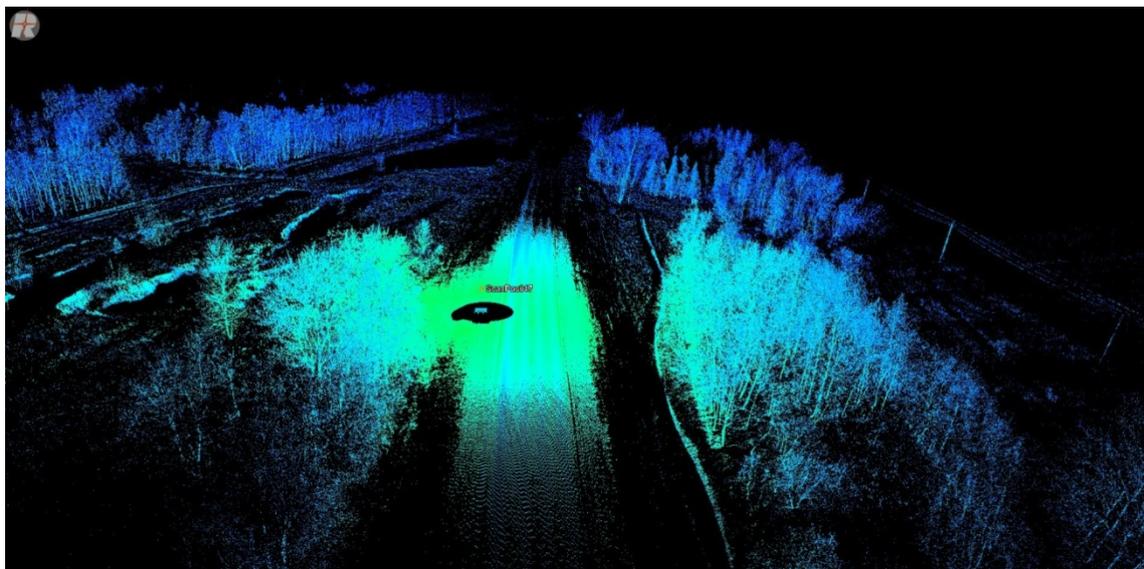


Рис. 1. Результат сканирования с одной станции

Внешнее ориентирование сканов осуществлялось аналитическим методом каждые 400 м. На станциях привязки вокруг сканера устанавливалось по 4 светоотражающих 50-миллиметровых марки. Во время сканирования с пунктов заранее созданной опорной геодезической сети, при помощи электронного тахеометра, определялись координаты специальных марок в безотражательном режиме. После завершения панорамного сканирования дополнительно создавались плотные сканы опорных точек для точного определения координат центров марок. Схема лазерного сканирования с крыши автомобиля участка автомобильной дороги показана на рис. 2.

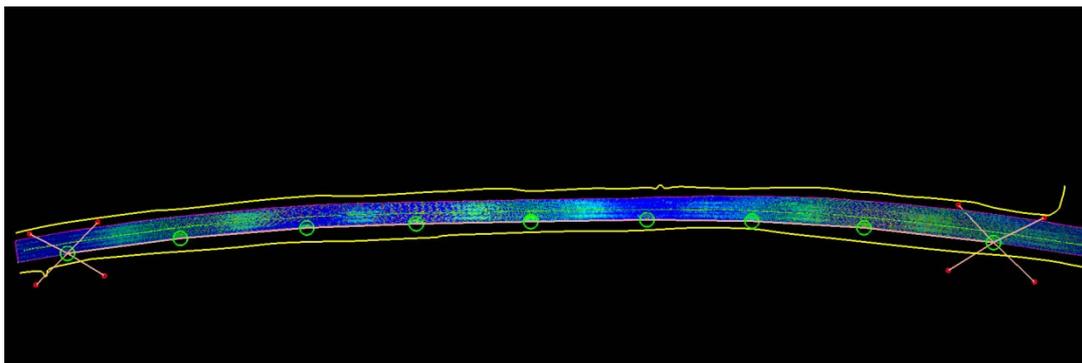


Рис. 2. Схема выполнения лазерного сканирования

На схеме, показанной на рис. 2, отображена поверхность проезжей части автомобильной дороги. Желтыми линиями обозначены бордюры дороги, зелеными окружностями показаны станции сканирования, а красными – условные места расстановки специальных марок для обеспечения внешнего ориентирования сканов.

Подробное описание и обоснование аналитического метода внешнего ориентирования описано в монографии [5].

В результате плотного сканирования от каждой 50-миллиметровой марки отражено порядка 7 000 ТЛЮ. Пример плотного облака точек марки приведен на рис. 3.

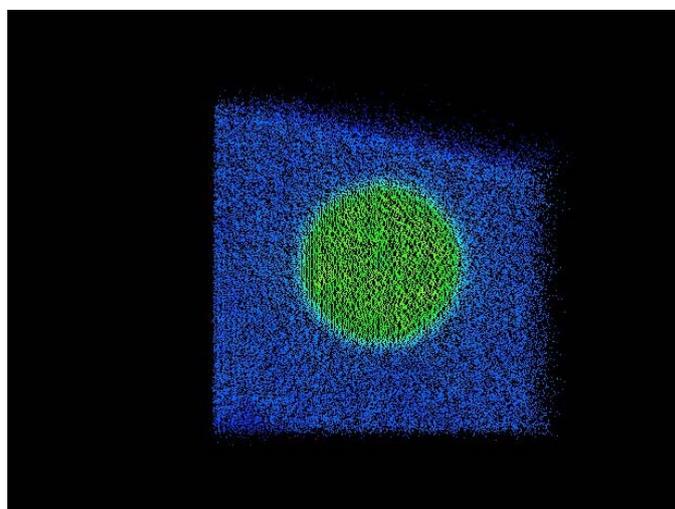


Рис. 3. Облако точек специальной марки

Обработка полученных данных лазерного сканирования выполнялась методом наименьших квадратов в ПО RiSCAN PRO. Максимальная ошибка регистрации сканов (стандартное отклонение) составила 0,003 м. Пример отчета о регистрации облака точек представлен в табл. 1.

## Отчет о регистрации сканов

| Параметр                            | Значение             |
|-------------------------------------|----------------------|
| Поиск ближайшей точки               |                      |
| Радиус поиска (м)                   | 0,08                 |
| Максимальный угол наклона (deg)     | 10°                  |
| Устанавливаемые параметры           |                      |
| Минимальное отклонение ошибки 1 (м) | 0,005 0              |
| Минимальное отклонение ошибки 2 (м) | 0,000 2              |
| Порог превышения                    | 2                    |
| Метод уравнивания                   | Наименьших квадратов |
| Статистические данные               |                      |
| Стандартное отклонение (м)          | 0,002 8              |

Для осуществления фильтрации облака точек уравненные данные НЛС были преобразованы в формат .las и импортированы в ПО Terra Solid. В результате фильтрации выявлены ТЛО, принадлежащие земной поверхности.

Структурные линии дорожной одежды на сегодняшнем этапе развития трехмерного моделирования качественно определить в полностью автоматическом режиме не представляется возможным и выполнять такие построения приходится либо в полуавтоматическом, либо в ручном режимах. В связи с этим построение структурных линий осуществлялось в два этапа.

На первом этапе были подобраны параметры для создания структурных линий бортики и подошвы с целью построения их в автоматическом режиме средствами ПО Terra Solid. На следующем этапе построенные линии отредактированы вручную. Однако структурные линии кромки дороги и ее оси построены вручную. На рис. 4 показано отфильтрованное облако точек участка автомобильной дороги с построенными структурными линиями.

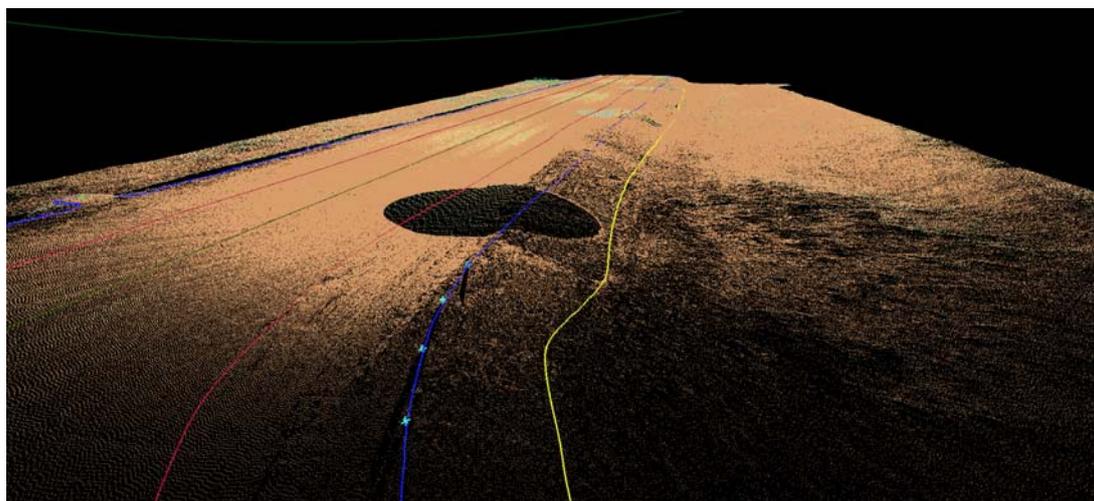


Рис. 4. Структурные линии дорожной одежды

На рис. 4 подошва автомобильной дороги отображена желтым цветом, бровка – синим, кромка показана красным цветом, а ось – зеленым. Голубые перекрестия отображают точечные дорожные объекты.

По данным лазерного сканирования определение оси автомобильной дороги, как линии перегиба дорожного полотна, становится совершенно однозначным, так как на поперечном разрезе ТЛО отчетливо видна наивысшая точка дорожного покрытия.

На следующем этапе камеральной обработки построена цифровая модель рельефа (ЦМР). Построение ЦМР выполнялось отдельными участками, между соседними структурными линиями, для увеличения скорости работы персонального компьютера (ПК). Соответственно были получены 7 цифровых моделей рельефа, а именно: две ЦМР от подошвы до бровки, две от бровки до кромки, одна от кромки до кромки и две цифровых модели рельефа прилегающей к дороге территории.

Для поставленной задачи дальнейшая работа выполнялась с одной из созданных ЦМР – асфальтированной поверхностью полотна автомобильной дороги.

На полученную цифровую модель спроецированы точки нивелирования с последующим определением их отметок по данным лазерного сканирования. Общее количество точек на весь экспериментальный участок протяженностью 5 км составило 1001.

В данной статье приведен фрагмент общей полученной аналитической таблицы (табл. 2).

Таблица 2

Таблица анализа расхождений в отметках точек, полученных по данным лазерного сканирования и нивелирования

| Но-<br>мер<br>точки | Отметки (м)                    |                     |                            | Анализ        |               |                        |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|---------------|------------------------|
|                     | оси по данным<br>нивелирования | оси по данным<br>ЛС | оси геометриче-<br>ской ЛС | $\Delta(2-3)$ | $\Delta(2-4)$ | вероятнейшие<br>ошибки |
| 1                   | 2                              | 3                   | 4                          | 5             | 6             | 7                      |
| 48                  | 100,099                        | 100,099             | 100,100                    | 0,000         | -0,001        | 0,004                  |
| 49                  | 100,021                        | 100,021             | 100,021                    | 0,000         | 0,000         | 0,004                  |
| 50                  | 100,019                        | 100,019             | 100,019                    | 0,000         | 0,000         | 0,004                  |
| 51                  | 99,745                         | 99,746              | 99,748                     | -0,001        | -0,003        | 0,003                  |
| 52                  | 99,745                         | 99,747              | 99,748                     | -0,002        | -0,003        | 0,002                  |
| 53                  | 99,631                         | 99,631              | 99,631                     | 0,000         | 0,000         | 0,004                  |
| 54                  | 99,620                         | 99,620              | 99,620                     | 0,000         | 0,000         | 0,004                  |
| 55                  | 99,489                         | 99,489              | 99,490                     | 0,000         | -0,001        | 0,004                  |
| 56                  | 99,486                         | 99,483              | 99,484                     | 0,003         | 0,002         | 0,007                  |
| 57                  | 99,338                         | 99,338              | 99,340                     | 0,000         | -0,002        | 0,004                  |
| 58                  | 99,327                         | 99,327              | 99,330                     | 0,000         | -0,003        | 0,004                  |
| 59                  | 99,155                         | 99,156              | 99,160                     | -0,001        | -0,005        | 0,003                  |
| 60                  | 98,871                         | 98,871              | 98,872                     | 0,000         | -0,001        | 0,004                  |
| 61                  | 98,743                         | 98,743              | 98,743                     | 0,000         | 0,000         | 0,004                  |

Окончание табл. 2

| Но-<br>мер<br>точки | Отметки (м)                    |                     |                            | Анализ        |               |                        |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|---------------|------------------------|
|                     | оси по данным<br>нивелирования | оси по данным<br>ЛС | оси геометриче-<br>ской ЛС | $\Delta(2-3)$ | $\Delta(2-4)$ | вероятнейшие<br>ошибки |
| 1                   | 2                              | 3                   | 4                          | 5             | 6             | 7                      |
| 62                  | 98,552                         | 98,552              | 98,554                     | 0,000         | -0,002        | 0,004                  |
| 63                  | 98,538                         | 98,538              | 98,539                     | 0,000         | -0,001        | 0,004                  |
| 64                  | 98,182                         | 98,182              | 98,183                     | 0,000         | -0,001        | 0,004                  |

В табл. 2 приведены значения отметок, полученных из нивелирования короткими лучами по программе III класса и из данных лазерного сканирования. В столбце 3 показаны отметки точек, спроецированных на полученную ЦМР, а в столбце 4 отображены отметки геометрической оси автомобильной дороги, найденные по облаку ТЛО. В столбцах 5 и 6 приведены разности между отметками, полученными разными способами.

Далее выполнена оценка точности высотных измерений, полученных путем ЛС. При расчетах использовались формулы математической статистики и теории вероятностей, из которых максимальную информативность, для данного исследования, несут следующие:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

где  $\bar{X}$  – среднее арифметическое значение;  $X$  – значение одного измерения;  $i$  – порядковый номер измерения;  $n$  – общее количество измерений;

$$\bar{X}_{\text{абс.}} = \frac{\sum_{i=1}^n |X|_i}{n}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}_{\text{абс.}}$  – среднее арифметическое отклонение по абсолютной величине;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – средняя квадратическая ошибка.

Результаты выполненных расчетов по данным формулам представлены в табл. 3.

Оценка точности высотных измерений

| Среднее арифметическое, $\bar{X}$ (м) | Среднее арифметическое по абсолютной величине, $\bar{X}_{\text{абс.}}$ (м) | СКО, $\sigma$ (м) |
|---------------------------------------|--|-------------------|
| -0,002 453                            | 0,007 475  | 0,005 943         |

Данные табл. 3 позволяют сделать вывод, что метод лазерного сканирования обеспечивает точность высотных измерений не грубее одного сантиметра. Учитывая высокую плотность измерений, можно смело говорить о том, что данный метод позволяет существенно повысить точность определения объемов новых слоев ремонта и фрезерования, о чем также упоминается в [6].

Следует учитывать то, что измерения выполнялись в три этапа: утром, днем и вечером. Также стоит отметить, что в период проведения сканирования присутствовали значительный перепад давления и смена погодных условий, а именно утренняя ясная погода резко изменилась на снегопад к вечеру. Полученный результат включает в себя ошибку за рефракцию, перепад атмосферного давления, перепад температур, внешнего ориентирования и регистрации сканов. Для увеличения точности проводимых измерений могут приниматься следующие изменения в программе полевых работ:

- сокращение интервалов между станциями внешнего ориентирования (до 200 м);
- закрепление НЛС непосредственно на штатив, установленный на земной поверхности, а не на крыше автомобиля;
- увеличение количества специальных марок на станции внешнего ориентирования до 8 штук;
- обеспечение выполнения полевых работ при одних погодных условиях;
- выполнение полевых работ в ночное время.

Доказано, что точность сканирования с одной станции достигает 1,5 мм, что обосновано в диссертации [7]. Исходя из этого, можно уверенно говорить о том, что при соблюдении определенной методики полевых измерений и камеральной обработки данных лазерное сканирование обеспечивает достаточную точность не только для создания топографических планов, но и для определения ровности дорожного покрытия.

Современные методы определения ровности покрытия, такие как измерение просвета под трехметровой рейкой, нивелирование, измерения при помощи толчкометра и профилометра, не позволяют увидеть всей картины о состоянии дорожного полотна.

В качестве примера можно сказать, что, согласно ГОСТ 30412-96 [8] при использовании метода измерения рейкой с клиновым промерником на длину участка 300–400 м общее число измерений составляет около 120. При использовании метода измерения нивелиром и нивелирной рейкой шаг мест установки

нивелирной рейки равен  $5 \pm 0,2$  м. Кроме того, эти методы не подразумевают наблюдения за покрытием у кромок в пределах от 0,5 до 1 м.

Использование метода лазерного сканирования позволяет обеспечить получение полной информации о всей поверхности дорожного полотна без образования пробелов в результатах измерений, которые допускают упомянутые выше методы. Получение таких данных достигается за счет тотальной съемки.

По определению состояния дорожного полотна по данным сканирования уже имеются патенты № 2509978 [9], 2526793 [10].

В патенте № 2509978 представлен способ определения неровности поверхности дорожного полотна с использованием виртуальной трехметровой рейки. Патент № 2526793 описывает способ определения состояния поверхности покрытия автомобильной дороги по ее геометрическим параметрам путем совмещения проектной цифровой трехмерной модели (ЦТМ) и фактической ЦТМ.

Для исследования возможного возникновения ошибочных данных в подсчетах объема необходимого материала для ремонта дорожного покрытия по данным сканирования автодороги построены две цифровые векторные трехмерные модели поверхности измеряемого участка. Первая модель построена из расчета 40 точек на квадратный метр, а вторая – 4 точки на квадратный метр. Далее эти модели были спроецированы друг на друга и подсчитан объем между ними. Данный объем составил  $35 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ км}^2$ .

Из результатов вычислений видно, что разница между двумя ЦТМ, построенными по одним и тем же данным, весьма существенная. Это связано с тем, что при «разрежении» облака точек уменьшается количество вершин треугольников в Tin-модели, что в свою очередь сглаживает реальную поверхность.

Расхождения построенных трехмерных моделей хорошо видны как на поперечном профиле трассы, так и на продольном, представленным на рис. 5 и 6 соответственно.

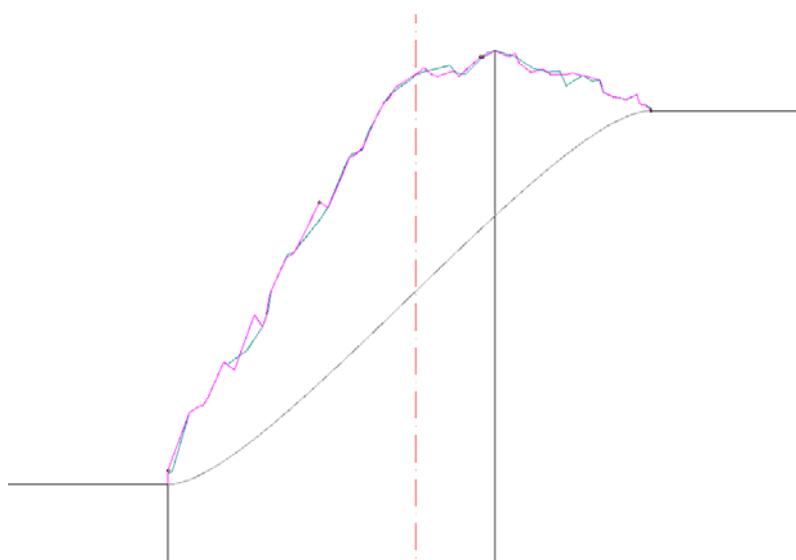


Рис. 5. Расхождение поперечных профилей, построенных по плотной и разреженной ЦТМ



Рис. 6. Расхождение продольных профилей, построенных по плотной и разреженной ЦТМ

Поперечный разрез для наглядности был построен в соотношении масштабов 1 : 50.

Построение ЦМР дорожного полотна по данным лазерного сканирования дает возможность визуальной оценки состояния покрытия. Визуально можно определить места стоков и скопления воды, пример представлен на рис. 7.



Рис. 7. Визуальное определение стоков воды по дорожному полотну

На рис. 7 направление стоков воды отображено стрелками, а места скопления – окружностями. По такой ЦМР легко различимы выбоины и ямы.

Из вышеописанного можно сделать вывод, что чем полнее отображены геометрические данные исследуемого объекта, тем обоснованнее, качественнее и точнее будут приниматься проектные решения.

В заключение стоит отметить, что метод лазерного сканирования позволяет выполнить построение цифровой векторной трехмерной модели, максимально близкой к фактической поверхности. В зависимости от поставленной перед инженерами задачи, точность наземного лазерного сканирования может варьироваться от 1,5 до 10 мм. Такие данные дают возможность значительно повысить качество проектирования автомобильных дорог.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каранеева А. Д., Старостина О. В., Панасенко Е. А. Применение лазерного сканирования при инженерно-геодезических изысканиях // Междунар. науч.-техн. инт.-конф. «Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов» [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://kadastr.org/conf/2013/pub/infoteh/lazer-skan-izyskan.htm>.
2. Карпик А. П., Никитин А. В. Информационная система построения инфраструктуры геопространственных данных для автомобильных и железных дорог // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 7–15.
3. Никитин А. В. Оптимальные методы построения инфраструктуры геопространственных данных для транспортных коридоров : монография. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – 159 с.
4. Середович В. А., Камнев И. С. Обоснование возможности использования лазерного сканирования в инженерных изысканиях линейных сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 153–156.
5. Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
6. Мотуз В. О., Сарычев Д. С. Применение лазерного сканирования и 3D-моделей в жизненном цикле автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – Вып. 1 (2). – С. 12–15.
7. Иванов А. В. Разработка методики геодезического контроля инженерных объектов на основе данных наземного лазерного сканирования : дис. ...канд. техн. наук. – Новосибирск, 2012. – 150 с.
8. ГОСТ 30412-96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий. – М., 1996. – 9 с.
9. Середович В. А., Середович А. В., Иванов А. В. Способ определения неровности поверхности дорожного полотна : пат. 2509978 Рос. Федерация № 2012136545/28; заявл. 24.08.12; опубл. 20.03.2014. – Бюл. № 8. – 3 с.
10. Середович В. А., Середович А. В., Иванов А. В. Способ определения состояния поверхности покрытия автомобильной дороги по ее геометрическим параметрам : пат. 2526793 Рос. Федерация, № 2013121067/28; заявл. 07.05.13; опубл. 27.08.2014. – Бюл. № 24. – 3 с.

Получено 31.03.2017

© И. С. Камнев, 2017

## RESEARCH OF LASER SCANNING TECHNOLOGY AT ENGINEERING GEODESIC SURVEYS FOR REPAIRING MOTORWAY

*Ivan S. Kamnev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (983)311-66-49, e-mail: kamneviv@mail.ru

In this article, the application of the laser scanning technique in the highway surveying for the repair is considered. The measured are analyzed and the accuracy of the laser scanning data is estimated by comparing them with the topographic elevation data resulting from geometric leveling of the road axis. Also recommendations are given for field survey of terrestrial laser scanning to accuracy increase of measurements and increasing the effectiveness of geodetic survey. The investiga-

tion of accuracy the quantities measurement of milling and the new materials for the roadway replacement is made, depending on the density of the digital 3D terrain model of the road surface created by laser scanning data.

**Key words:** laser scanning, engineering-geodetic surveys, accuracy estimation, digital relief model, evenness, volume determination.

## REFERENCES

1. Karaneeva, A. D., Starostina, O. V., & Panasenko, E. A. (2013). Applying laser scanning for engineering-geodetic surveys. In *Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia internet-konferentsiia: Kadastr nedvizhimosti i monitoring prirodnykh resursov [International Scientific and Technical Internet Conference: Cadastral Register and Natural Resource Monitoring]*. Retrieved from at <http://kadastr.org/conf/2013/pub/infoteh/lazer-skan-izyskan.htm> [in Russian].
2. Karpik, A. P., & Nikitin, A. V. (2016). Information system build geospatial data infrastructure for roads and railwais. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 7–15 [in Russian].
3. Nikitin, A. V. (2015). *Optimalnye metody postroeniia infrastruktury geoprostranstvennykh dannykh dlia transportnykh koridorov [Optimal methods of constructing a geospatial data infrastructure for transport corridors]*. Khabarovsk: FESTU Publ. [in Russian].
4. Seredovich, V. A., & Kamnev, I. S. (2015). Justifying a possibility of using laser scanning for engineering surveys of linear structures. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziia, geoinformatika, kartografiia, marksheideriia [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 153–156). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
5. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA [in Russian].
6. Motuz, V. O., & Sarychev, D. S. (2014). Applications of lidar mapping and 3D models in road lifecycle. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog [CAD & GIS for Roads]*, 1(2), 12–15 [in Russian].
7. Ivanov, A. V. (2012) *Razrabotka metodiki geodezicheskogo kontroliia inzhenernykh obiektov na osnove dannykh nazemnogo lazernogo skanirovaniia [Development of methods for surveying engineering facilities based on terrestrial laser scanning data]. Candidate's thesis.* Novosibirsk [in Russian].
8. Standarts Russian Federation. (2000). *Dorogi avtomobilnye i aerodromy. Metody izmerenii nerovnostei osnovanii i pokrytii (GOST 30412-96) [Roads and aerodromes. Methods for measuring the unevenness of bases and coatings]*. Moscow: Author [in Russian].
9. Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., & Ivanov, A. V. *Patent RF No. 2509978* Novosibirsk: IP Russian Federation.
10. Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., & Ivanov, A. V. *Patent RF No. 2526793*. Novosibirsk: IP Russian Federation.

Received 31.03.2017

© I. S. Kamnev, 2017