УДК 528.02:528.8

ЛАЗЕРНОЕ 3D-СКАНИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ

Овчаренко А.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Рассмотрена методика дистанционного изучения пустот и полостей. Предложены и опробованы методы: «заглядывания», «головой вниз», «короткого сканерного хода», смешанные методы. Методика является оперативной, обеспечивает получение точных геометрических характеристик объекта и параметров ориентации относительно внешнего пространства. Способы позволяют уменьшить, или избежать вообще, риск пребывания персонала в подземной полости. Метод дает итоговую документацию объекта в форматах пригодных для детального изучения формы и строения, выполнения обмеров, визуальной оценки внутреннего состояния.

3D сканирование, подземные пустоты, полости, сканы объектов.

LASER 3D SCANNING OF UNDERGROUND EMPTINESS

Ovcharenko A.V. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The technique of remote studying of emptiness and cavities is considered. Methods are offered and tested: «peeping», «the head down», «the short scan course», the mixed methods. The technique is quick, provides exact geometrical characteristics of object and parameters of orientation in external space. The technique allows to reduce, or to avoid in general, risk of stay of the personnel in an underground cavity. The method gives final documentation of object in formats suitable for detailed studying of a form and a structure, performance of measurements, a visual assessment of internal state.

3D scanning, underground emptiness, cavities, application examples.

Введение

Подземные полости и пустоты – важный объект для детального изучения. Имеется громадное число природных и антропогенных объектов, интересных для детального инструментального изучения с выяснением морфологии и состояния внутренних поверхностей, ориентации в пространстве, с получением точных линейных обмеров, включая расчет объема. Это разнообразные карстовые пещеры, гроты и провалы, частично вскрытые пегматитовые занорыши и погреба, подземные сооружения, тоннели, катакомбы, ёмкости, колодцы, провалы, промоины и т. п. Особый класс таких объектов составляют подземные культовые сооружения, которые являются культурно-историческими памятниками и требуют тщательного изучения, фиксации состояния, в том числе в электронной форме, исключающей утрату. Это же можно отнести и к уникальным природно-геологическим памятникам, таким как, например, «Красная круча» в Оренбургской области, карстовые провалы района Кунгура и Орды, термокарстовые провалы Ямала.

При катастрофических землетрясениях и техногенных авариях, как правило, образуются завалы с полостями и подвалами, в которых часто оказываются люди и животные, ждущие помощи. В настоящее время интерес к изучению подземных пустот еще более обострился. Это связано как с обнаружением ряда уникальных провалов на Ямале, в Германии, Гватемале, Израиле и в других регионах, так и с необходимостью оперативного изучения традиционных объектов-полостей. В большом количестве случаев оперативное 3D-дистанционное инструментальное изучение и фотографирование без непосредственного присутствия оператора в полости является единственным реальным методом их детального изучения. Таким образом, оперативное изучение полостей и подземных сооружений является важной и актуальной задачей.

В настоящее время создано большое число 3D-сканеров с разнообразными показателями точности, скорости сканирования и различными собственными размерами и функциональными особенностями (Середович и др., 2009). Современные сканеры имеют такие компактные размеры и

функции дистанционного управления, что могут быть использованы для целей сканирования пустот при наличии небольших отверстий, щелей и дыр в изучаемом объекте, в которые может пройти прибор, но не проходит человек или его присутствие исключено. В настоящей работе было опробовано два конкретных сканера: FARO FOCUS^{3D} и штанговая сканирующая головка C-ALS®$_{\text{МКЗ}}$ для изучения подземных полостей (*диаметр 50 мм, класс защиты IP67 с возможностью погружения в воду до 1 м, полный охват сферы 360°*). Однако при описании методики и приемов сканирования мы использовали, по возможности, приемы и принципы, общие для любых типов сканирующих устройств и обрабатывающих программ.

Исходя из опыта (Овчаренко, 2014; 2015), наиболее эффективными методами сканирования для изучения полостей и пустот являются: метод «заглядывания», обзор «головой вниз», смешанные приемы в сочетании с дистанционным запуском и управлением сканером. Различия методов состоят в: а) условиях обзора из пунктов, в которых устанавливается прибор; б) способах установки самого сканирующего прибора. Лазерное сканирование есть, по существу, точное измерение расстояний от некоторого центра прибора до точек окружающего пространства с вычислением координат этих точек. Последовательность обмера точек пространства заложена в конкретную конструкцию прибора и практически не влияет на основной результат сканирования – трехмерное облако координат точек поверхности изучаемого объекта. Различия состоят в детальности и скорости сканирования. При изучении полостей облако точек распределено по некоторой сложной замкнутой поверхности, ограничивающей полость, а также совокупности предметов, которые в ней расположены и частично экранируют полную сцену. Часто задача изучения полости состоит, кроме этого, в дополнительной координатной привязке к внешним объектам. Очевидно, что для изучения замкнутой полости достаточно сканер разместить внутри и выполнить одно сканирование с полным сферическим обзором. Если требование детальности изучения достигается при одной стоянке сканера, то на этом процесс измерений заканчивается, в противном случае сканирование производится с дополнительных доступных позиций, с которых прибор «видит» все другие детали изучаемой сцены, невидимые с первой позиции. Задача существенно усложняется, если нет прямой возможности сканирования с размещением прибора внутри полости. В этом случае используются названные выше приемы: «заглядывания», «обзор головой вниз», а также смешанные приемы с сочетанием стандартного сканирования, включая т.н. «короткий сканерный ход» внутрь скрытой полости. На рис. 1–4 показаны принципиальные схемы размещения прибора для этих методов.

Метод «*заглядывания*» состоит в таком внешнем размещении сканера, при котором он видит только часть пространства изучаемой полости. Если менять внешнее

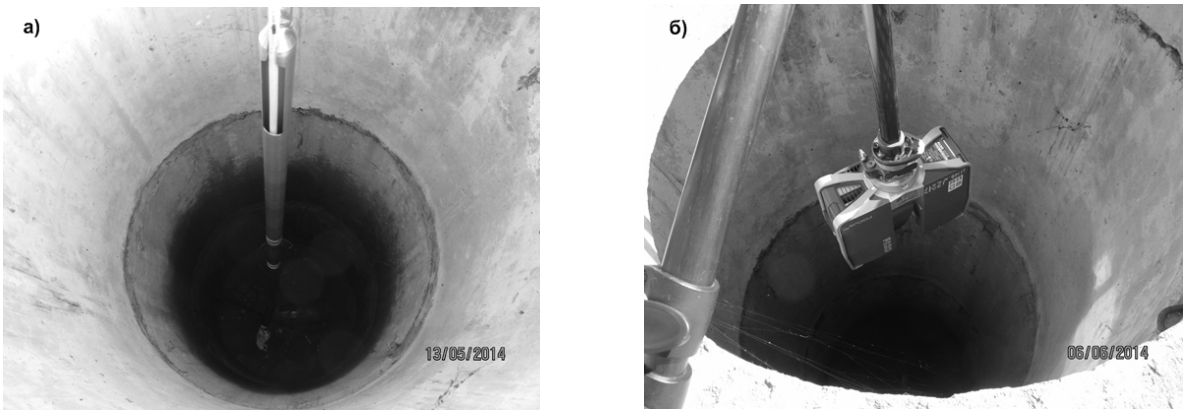

Рис. 1. Примеры установки сканеров «вниз головой» для изучения полостей:
а – прибор C-ALS®$_{\text{МКЗ}}$; б – прибор FARO FOCUS^{3D}

Рис. 2. К методу «заглядывания» в полость. Сканер размещен у лаза в старательскую штольню, которая залита водой

Рис. 3. Установка сканера без треноги на нивелирном столике для уменьшения габаритов установки

расположение сканера, то в ряде случаев можно в совокупности охватить изучением значительную часть полости или всю целиком. При условии, что канал доступа в полость позволяет переместить сканер внутрь (без оператора), можно использовать прием «вниз головой» (см. рис. 1) и «комбинированный приём вниз головой» (внесение в полость и размещение вниз головой). При этом управление включением процесса сканирования и выбора режимов выполнятся дистанционно с компьютера по линии *«Wi-Fi»*. При использовании режима «заглядывания» сканер нужно размещать по возможности наиболее близко к краям проема, чтобы максимально увеличить обзор внутреннего пространства. Рекомендуется использовать несколько близких позиций сканирования, разнесенных в проеме по горизонту и высоте. Иными словами, в полость нужно «заглядывать», поочередно прижимая прибор к левой-правой и верхней-нижней стороне проема. Для сшивания сцен при этом необходимо использовать стандартные сферические отражатели (4–5 шт.) или специальные бумажные марки, размещаемые во внешнем пространстве.

Когда размещение сканера на треноге бывает невозможным, а это типично при малых проемах или труднодоступных местах, его можно размещать непосредственно на грунте проема с применением стандартного нивелирного столика с максимально укороченным стержнем для установки (см. рис. 3).

Размещение сканера в проемах должно предусматривать его надежную устойчивость и наличие зазоров для свободного вращения сканера (или измерительной головки) на столике в горизонтальной плоскости. При размерах проема 25х30 см уже возможно внесение прибора (FARO FOCUS^{3D}) в саму полость. В полости («голо-вой вниз») также нужно контролировать свободное вращение сканера в горизонтальной плоскости.

Для передачи внешней системы координат внутрь полости необходимо предусмотреть короткий сканерный ход с последовательностью позиций: внешнее пространство – проем – внутреннее пространство. С позиции «проем» сканер должен видеть реперные сферы или марки во внешнем пространстве и характерные точки (не менее четырех) во внутреннем пространстве (см. рис. 4). С позиции «головой

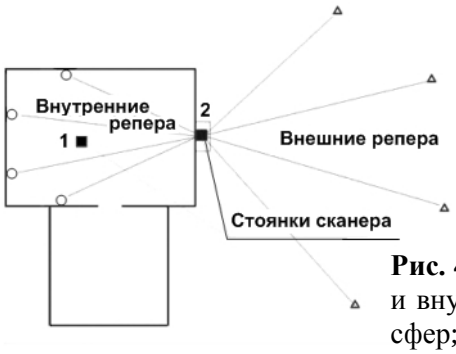

Рис. 4. Короткий сканерный ход из двух стоянок для связи внешней и внутренней систем координат: 1 – внутри полости с обзором 4-х сфер; 2 – в проеме с обзором 4-х внутренних и 4-х внешних сфер

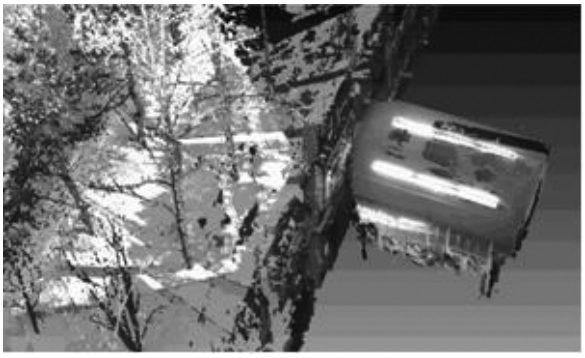

Рис. 5. Объемная модель, полученная при совмещении внутренней и внешней систем координат

Рис. 6. Сканирование из проема позволяет сканеру одновременно видеть внутреннее и внешнее пространство и связать таким образом системы координат

вниз» сканер должен видеть характерные точки внутреннего пространства. Хорошей учебной моделью скрытой полости является обычная комната, систему координат которой требуется совместить с внешней системой координат.

Примеры увязки внешней и внутренней систем координат приведены на (рис. 4–6). Для этого случая достаточно расположить сканер в проеме (окне), с которого видны репера сферы во внешнем пространстве и внутри комнаты. В данном примере выполнено также сканирование во внешнем пространстве. Совмещенная модель внутреннего помещения показана на рис. 5. По этой модели возможно вычислить размеры комнаты, ее площадь и объем, а также расположение внутренних предметов. Кроме этого, внутренний объект

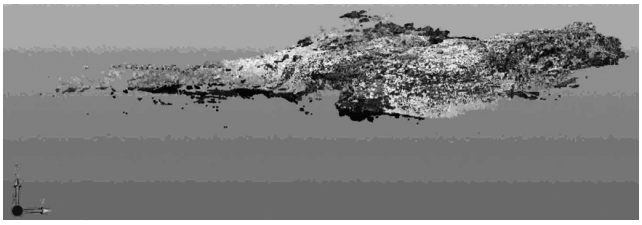

Рис. 7. Грот «Длинный» Кунгурской пещеры. 3D-модель, вид сбоку

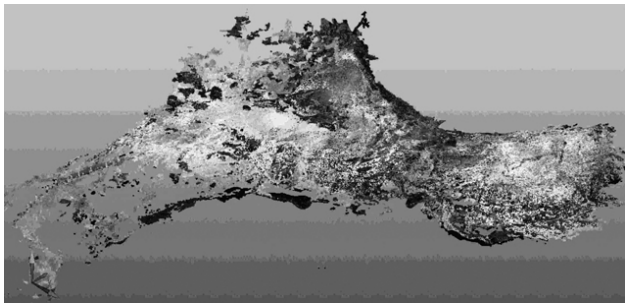

Рис. 8. Грот «Длинный» Кунгурской пещеры. 3D-модель, вид сверху

ориентирован относительно объектов внешнего пространства. Такую модель можно использовать для проектирования и расчета различных коммуникаций на объекте.

Методы анализа

Анализ результативного облака точек 3D-модели выполняется построением серии сечений изучаемой полости и формированием документов этих сечений для выполнения обмеров и визуального анализа. Рассмотрим пример Кунгурской пещеры. В Кунгурской ледяной пещере изучался грот «Длинный». Было выполнено внутреннее сканирование с шести позиций с применением стандартных сферических отражателей для сшивки сцен в единую объемную модель. Построенная модель позволяет полностью изучить морфологию грота, выявить и картировать трещины на своде и стенах, картировать литологические разности пород, определить места, потенциально опасные для обрушения блоков с кровли грота. На рис. 7–13 показаны продольные и поперечные сечения грота, горизонтальные панорамы развертки.

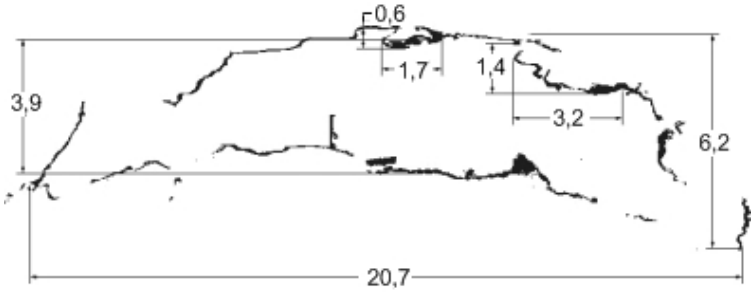

Рис. 9. Одно из поперечных сечений грота «Длинный». В кровле грота имеются висящие блоки, представляющие опасность для туристов и персонала

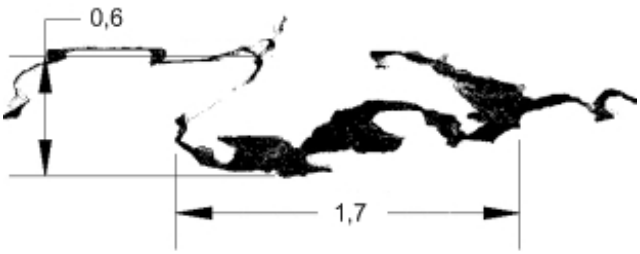

Рис. 10. Выполнение обмеров средствами AutoCAD по висячему блоку в кровле грота «Длинный»

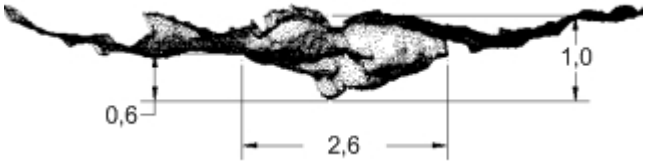

Рис. 11. Выполнение обмеров висящих блоков в кровле пещеры

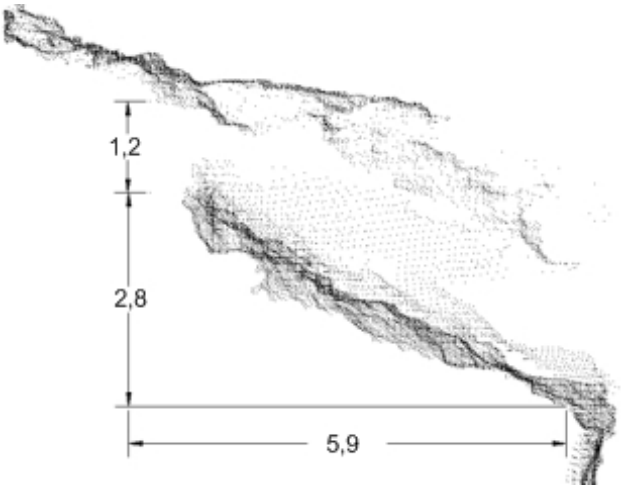

Рис. 12. Выполнение обмеров висящих блоков в кровле средствами AutoCAD

Рис. 13. Блоковая делимость и трещины на стенах и кровле грота. Двумерная панорама по данным 3D-сканирования

При изучении искусственных полостей часто бывает важным оценить состояние и сохранность конструкции с выявлением дефектов стен (поверхности). В таких случаях применяется анализ с помощью карт отклонений.

Рис. 14. 3D-модель железобетонного колодца из трех колец. Видны сдвиги колец, которые изучены количественно

Рис. 15. Карта отклонений стенок колодца от идеального цилиндра

Карта отклонений может быть построена всегда, когда изучаемую поверхность можно описать некоторой аналитической функцией (плоскость, сфера, цилиндр, полином и т. д.) или комбинацией аналитических объектов. Карта отклонений есть некоторая числовая матрица отклонения реальной поверхности от подходящей аналитической функции. Визуализация такой числовой матрицы может быть выполнена в различных формах: карты изолиний, цвето-тоновой карты, теневой карты, трехмерной блок-диаграммы (пример колодца на рис. 14–16). При наличии полости неправильной сложной формы рационально выполнять визуализацию в виде трех ортогональных проекций. Выбор сис-

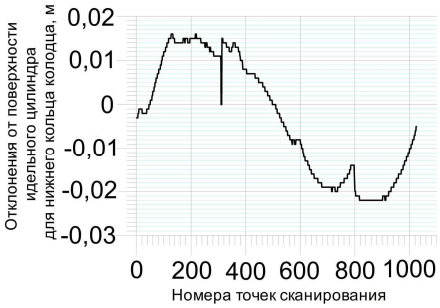

Рис. 16. График отклонений от формы идеального цилиндра нижнего кольца колодца

Рис. 17. Пример двумерной панорамы-развертки колодца теплотрассы

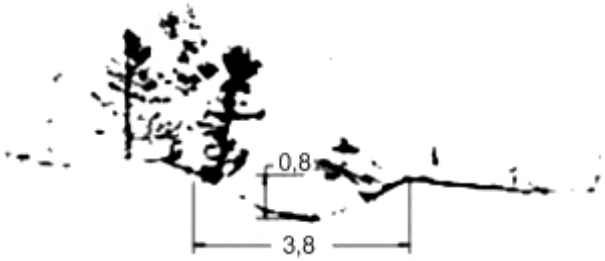

Рис. 18. Пример изучения старого старательского шурфа (пологая западная часть)

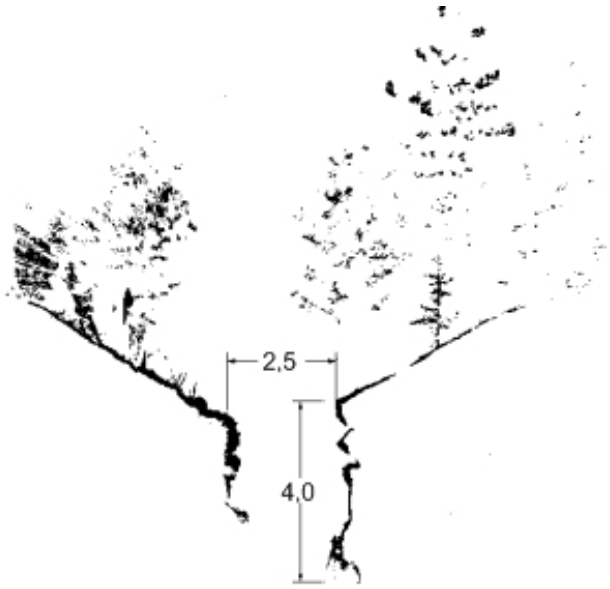

Рис. 19. Пример изучения старого старательского шурфа (сечение, восточная часть). В нижней части вход в обрушенную штольню. Сверху – деревья

темы координат для оптимального вида проекции выполняется интерактивно путем поворотов 3D-модели объекта.

Пример применения метода «головой вниз» и «заглядывания» для изучения колодца теплосети, заброшенных старательских горных выработок, скрытой промоины плотины показаны ниже на рис. 17–22. Данные сканирования получены без присутствия оператора в пустотах.

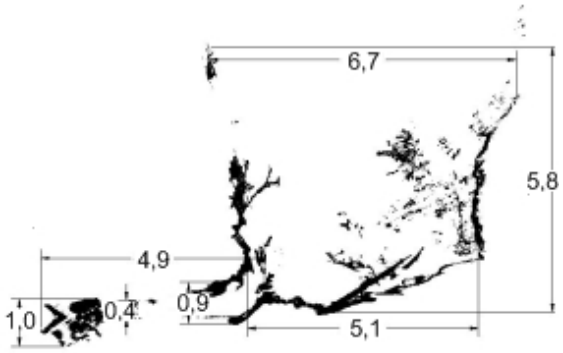

Рис. 20. Пример изучения заброшенной штольни, пройденной из глубокой канавы (вертикальное сечение, канава – справа, штольня слева)

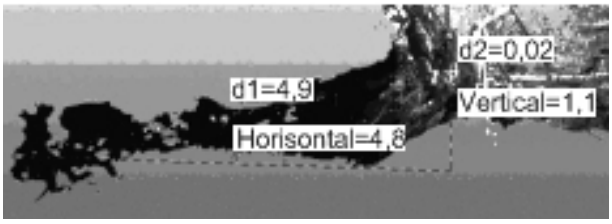

Рис. 21. 3D-модель старательской штольни. Вид сбоку. Даны измерения длины, широты, высоты старательской штольни

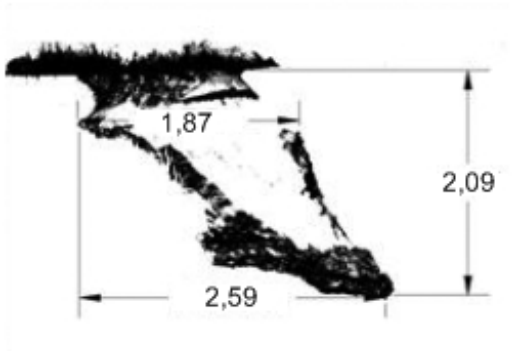

Рис. 22. Пример глубокой промоины в теле Штанговой плотины Полевского пруда (Свердловская область). Сечение построено по данным 3D-сканирования методом «заглядывания»

Выводы

Методика дистанционного изучения пустот и полостей является оперативной, безопасной и обеспечивает получение точных геометрических характеристик объекта, а также его ориентацию относительно внешнего пространства. Позволяет уменьшить риск пребывания персонала в подземной полости или полностью избежать его и получить итоговую документацию объекта в форматах, пригодных для детального изучения морфологии, выполнения обмеров, визуальной оценки внутренних предметов. Методика может использоваться для подземных пустот, имеющих малый канал (25х30 см) доступа в полость.

Приношу свою благодарность коллегам, оказавшим мне помощь при выполнении работ на ряде объектов – О.А. Кусонскому и П.Б. Бородину (обсерватория «Арти»), Н.П. Панчукову, О.И. Осетровой, М. Богомаз (Кунгурский научный стационар ГИ УрО РАН), Г.А. Петрову (УКГСЭ).

Работа связана с выполнением поисковых исследований по проектам Президиума РАН № 12-И5-2067.

Литература

Овчаренко А.В. Определение объема и веса музейного экспоната метеорита «Челябинск» на основе 3D-сканирования // Метеориты, астероиды, кометы. Падения на Землю, исследования и экологические последствия. II межд. научно-практическая конф. Челябинск, 2014. С. 114–118.

Овчаренко А.В. Сканирование подземных пустот и полостей 3D-сканированием // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. 42-я сессия межд. научного семинара им. Д.Г. Успенского. ГИ УрО РАН, ПГНИУ, Пермь, 2015. С. 161–163.

Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А. Наземное лазерное сканирование. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.