



Технология создания цифровых моделей местности с применением метода наземного лазерного сканирования

М.А. Алтынцев¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

mnbvc@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Алтынцев М.А. Технология создания цифровых моделей местности с применением метода наземного лазерного сканирования // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 6. С. 38–53. DOI:10.30533/GiA-2025-065.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА цифровая модель местности, наземное лазерное сканирование, предварительная обработка, уравнивание, фильтрация

АННОТАЦИЯ Представлена технология создания цифровых моделей местности по данным наземного лазерного сканирования, охватывающая все этапы сбора и обработки данных. Отличием предложенной технологии от существующих является комплексный учет таких факторов, как погодные условия сбора данных, уровень застроенности территории, ее протяженность и площадь, а также предоставление рекомендаций по выбору методик трехмерного моделирования в зависимости от требований к формату векторных моделей и особенностей современного программного обеспечения. С целью повышения качества обработки данных в состав технологии включен универсальный алгоритм фильтрации. Разработанный алгоритм позволяет распознавать ложные точки в массиве данных и выделять точки поверхности земли для построения цифровой модели рельефа. Технология апробирована в ходе съемки территории дожимной насосной станции одного из нефтегазовых месторождений и в процессе обработки полученных материалов. Представленные результаты оценки точности уравнивания данных наземного лазерного сканирования подтвердили оптимальность отраженных в технологии этапов планирования и выполнения измерений. Результаты оценки точности построения цифровой модели рельефа этой территории показали, что универсальный алгоритм фильтрации позволяет с высокой достоверностью автоматизированно отфильтровать ложные точки. Обсуждается, что значения параметров алгоритма зависят от углового разрешения сканирования и расстояния между сканерными станциями.

Предложенные значения следует использовать в качестве начальных при подборе новых, если параметры съемки будут отличны от тех, что применялись при сканировании исследуемого объекта.

1 Введение

Метод наземного лазерного сканирования (НЛС) уже давно применяется для выполнения геодезических измерений на местности. Получаемые с его помощью данные представляются в виде массива точек лазерных отражений (ТЛО). Каждая точка массива имеет пространственные координаты и описывается такими характеристиками, как интенсивность отраженного сигнала, порядковый номер отражения, значения яркости в спектральных каналах, получаемые после наложения этой информации с цифровых фотографий [1]. В совокупности массив ТЛО представляет собой точечную цифровую модель местности (ЦММ). Благодаря высокой скорости сбора данных, их высокой точности и сплошного характера получаемого результата НЛС нашло применение в различных отраслях народного хозяйства. По точечной ЦММ создают трехмерные векторные твердотельные ЦММ, различные планы, обмерные чертежи, оценивают техническое состояние объектов, определяют их геометрические параметры и деформационные характеристики, контролируют качество их строительства и реконструкции [2].

НЛС является универсальным методом лазерного сканирования, помогающим решать широкий круг задач. В отличие от мобильного и воздушного лазерного сканирования НЛС позволяет достичь точности определения пространственных координат до миллиметра и выше. Однако оперативность сбора данных с помощью НЛС значительно уступает другим методам лазерного сканирования, вследствие чего рассматриваемый метод применяется на относительно небольших по площади территориях (это связано с особенностью сбора данных из статического положения) или там, где точности других методов лазерного сканирования оказывается недостаточно [3].

Детально технология сбора и обработки данных НЛС представлена в исследовании А.В. Комиссарова [4]. Она охватывает подготовительные работы, полевой сбор данных, предварительную и тематическую обработку. На этапе подготовительных работ составляются технический проект, рабочая программа плано-высотного обоснования (ПВО) и рабочая программа НЛС в зависимости от требований к пространственной привязке. Полевые работы включают рекогносцировку местности, создание ПВО и осуществление лазерного сканирования. Этапы подготовительных и полевых работ подробно освещены А.В. Середовичем [5]. В ходе предварительной обработки выполняются фильтрация и уравнивание данных. При фильтрации удаляются ложные точки, представляющие собой шумы в данных, или точки, которые не принадлежат объекту съемки. Такие шумы влияют на точность уравнивания и достоверность распознавания объектов в массивах ТЛО. При уравнивании осуществляется взаимное и внешнее ориентирование сканов (массивов ТЛО), полученных с отдельных сканерных позиций. Результатом предварительной обработки является точечная ЦММ. На ее основе далее в ходе тематической обработки в зависимости от цели съемки создают твердотельные трехмерные векторные ЦММ, чертежи и топографические планы.

С момента внедрения технологии сбора и обработки данных НЛС накопился большой практический опыт применения этого метода геодезической съемки, были разработаны и внедрены различные автоматизированные методы и алгоритмы обработки данных, расширен функционал программного обеспечения (ПО) по такой обработке, появились новые виды трехмерного моделирования. Поэтому в настоящее время стоит важная задача совершенствования и уточнения описанной технологии с учетом современных достижений науки и техники.

2 Материалы и методы

Предложенная А.В. Комиссаровым [4] технология сбора и обработки данных НЛС была усовершенствована посредством уточнения этапов составления рабочей программы НЛС и предварительного уравнивания, а также с учетом возможностей современного ПО для построения трехмерных векторных ЦММ различных видов. Технология разделена на две части. Первая часть охватывает подготовительные, полевые работы и предварительную обработку получаемых данных, вторая затрагивает их тематическую обработку с целью создания трехмерных векторных ЦММ. На рис. 1 представлена первая часть усовершенствованной технологии создания ЦММ с применением метода НЛС, согласно которой сначала составляются технический проект, рабочая программа ПВО и рабочая программа НЛС.

ПВО для осуществления НЛС делится на два вида: основное и рабочее. Основное ПВО необходимо создавать в случае, если требуется пространственная привязка к внешней системе координат. Для этого на местности закрепляются точки долговременного или временного типа, координаты которых определяются от пунктов государственной геодезической сети или сетей сгущения. Если необходимо определять только геометрические параметры объектов, то основное ПВО создавать не требуется. Рабочее ПВО служит для взаимного ориентирования сканов. Точками такого ПВО выступают характерные элементы объектов местности или размещенные вокруг сканерных станций марки.

На этапе составления рабочей программы НЛС учитываются уровень застроенности и характер территории съемки (площадной или линейно-протяженный объект). Они оказывают влияние на выбор метода вычисления элементов внешнего ориентирования сканов. При прямом методе используется прямая засечка, а при аналитическом — двойная обратная [1]. Процесс лазерного сканирования осуществляется посредством проложения сканерных ходов, площадным способом или их сочетанием. Площадная съемка реализуется с помощью аналитического метода. При проложении сканерных ходов может применяться как прямой, так и аналитический метод. Сочетание методов возможно следующим образом: сначала прокладываются каркасные сканерные ходы прямым методом, а затем выполняется досъемка от пунктов каркасной сети с помощью аналитического. Для незастроенной территории линейно-протяженного объекта с целью снижения трудоемкости полевых работ рекомендуется прокладывать сканерные ходы прямым методом. Если сканируется площадной объект, тогда выполняется досъемка аналитическим методом. Для застроенной территории линейно-протяженного объекта и при сканировании тоннелей оптимально прокладывать сканерные ходы аналитическим методом. В свою очередь, для застроенной территории площадного объекта следует выполнять площадную съемку аналитическим методом. Выбор аналитического метода на застроенных территориях обусловлен присутствием большого числа вертикальных плоскостей объектов, где можно разместить марки или распознать отдельные элементы с целью набора соответственных характерных точек для взаимного ориентирования сканов.

После НЛС местности, выполненного в соответствии с составленной рабочей программой, автоматически генерируются трехмерные массивы ТЛО и в случае необходимости в специализированном ПО, куда первоначально импортируются сгенерированные массивы, выполняется калибровка системы лазерного сканирования, заключающаяся в определении элементов взаимного ориентирования лазерного сканера и входящей в эту систему цифровой камеры. Далее в этом ПО выполняются автоматическая фильтрация, взаимное и внешнее ориентирование сканов.

К настоящему времени было разработано большое количество различных методов фильтрации [6–8]. Согласно одной из классификаций [9], их можно разделить на следующие группы: статистические, методы на основе проецирования, соседства, составления дифференциальных уравнений, гибридные, обработки сигналов и др.

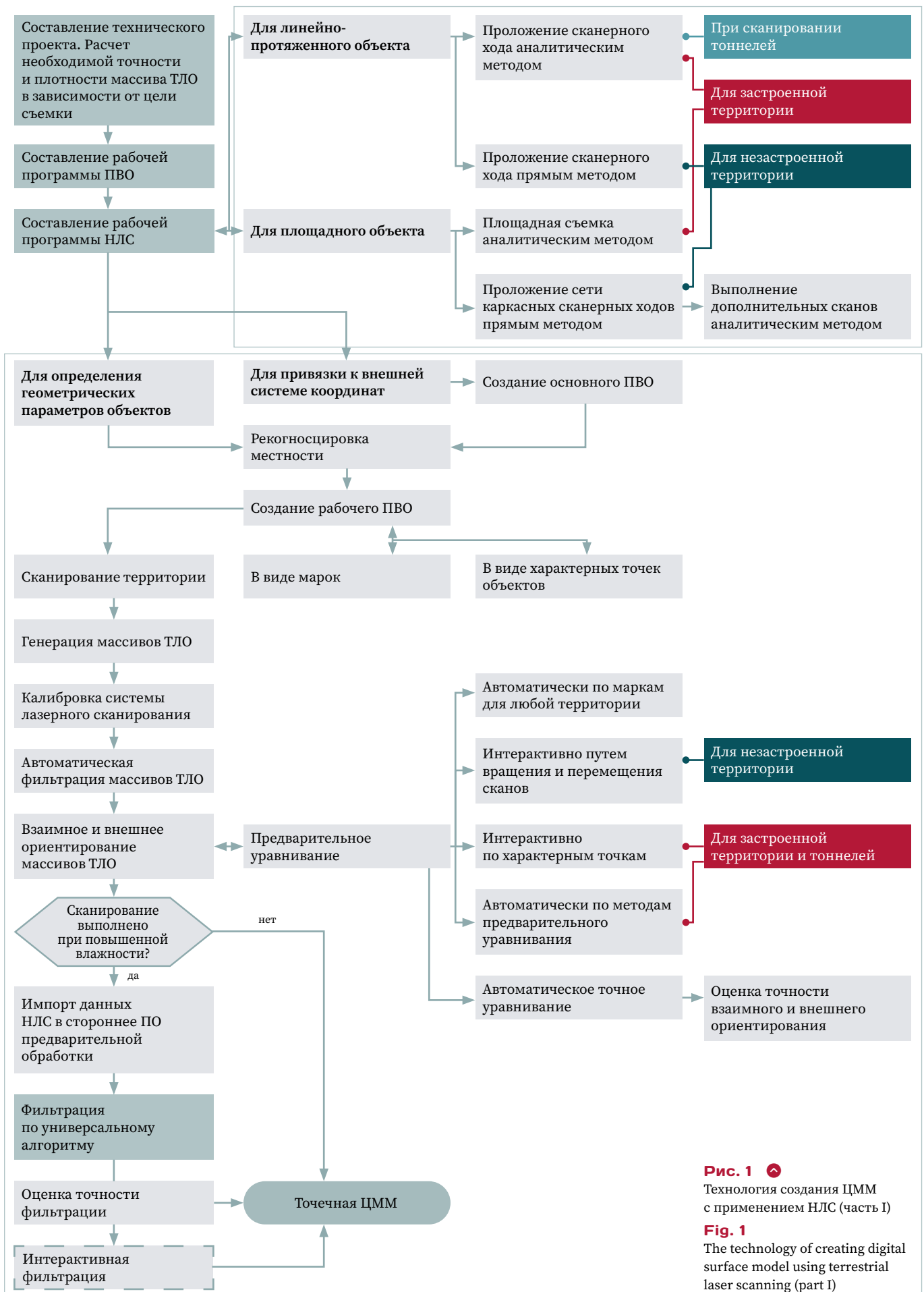


Рис. 1 Технология создания ЦММ с применением НЛС (часть I)
Fig. 1 The technology of creating digital surface model using terrestrial laser scanning (part I)

Выполняемое после автоматической фильтрации взаимное и внешнее ориентирование сканов может осуществляться одним из следующих способов:

- от пунктов государственной геодезической сети или сетей сгущения измеряются координаты всех точек рабочего ПВО, которые затем используются для внешнего ориентирования каждого отдельного скана;
- среди всех точек рабочего ПВО выбираются несколько равномерно размещенных по территории, которые совмещаются с точками основного ПВО; по расположенным в зонах перекрытия сканов точкам рабочего ПВО выполняется последовательное взаимное ориентирование каждого скана; получается единая точечная модель, ориентированная в системе координат первого скана, которая затем ориентируется во внешнюю систему координат по точкам основного ПВО;
- первый скан ориентируется по точкам основного ПВО, а затем к нему последовательно подсоединяются другие сканы по точкам рабочего ПВО.

Выбор подходящего способа определяется реализованной схемой создания ПВО и территорией съемки. Сначала выполняется предварительное уравнивание, а затем точное. Для незастроенной территории предварительное уравнивание рекомендуется выполнять автоматически по маркам или интерактивно путем вращения и перемещения сканов. Автоматическое уравнивание по маркам позволяет достичь наибольшей точности при минимальной трудоемкости камеральных работ, но требует размещения марок и их детального сканирования вокруг каждой станции. Для застроенной территории оптимально выполнять предварительное уравнивание интерактивно по характерным точкам или автоматически по соответствующим методам, которые используют информацию о положении вертикальных объектов. Многие подобные методы применяются в специализированном коммерческом ПО обработки данных лазерного сканирования [10]. Обзор таких методов приведен в [11].

Итогом выполненной предварительной обработки данных НЛС является единая точечная ЦММ, состоящая из уравненных сканов, в каждом из которых отфильтрованы ложные ТЛО. В зависимости от внешних условий выполнения измерений автоматическая фильтрация ложных ТЛО выполняется с различной точностью [12]. При сканировании в благоприятных погодных условиях, когда отсутствуют осадки и влага на поверхностях объектов, количество ложных ТЛО минимально и автоматические методы специализированного ПО справляются хорошо. В противном случае многие ложные ТЛО остаются в массиве. Тогда необходимо дополнительно настраивать параметры методов фильтрации, применять сразу несколько методов или разрабатывать алгоритмы фильтрации, представляющие собой комплекс последовательно применяемых методов, параметры которых подбираются исходя из средней плотности данных НЛС и особенностей сканируемой местности. Для фильтрации данных НЛС, полученных в неблагоприятных погодных условиях, был разработан универсальный алгоритм, показанный на рис. 2. Алгоритм отфильтровывает ложные ТЛО и распознает точки поверхности земли с целью построения цифровой модели рельефа (ЦМР). В алгоритме применяется информация об интенсивности отраженного сигнала, метод распознавания точек поверхности земли Аксельсона [13] и следующие методы фильтрации группы других методов: классификации изолированных, воздушных, нижних точек, а также точек, расположенных ниже поверхности. Сущность этих методов фильтрации описана автором ранее [14]. Для применения алгоритма данные НЛС импортируются в ПО Terrasolid. В нем реализованы все методы универсального алгоритма фильтрации, включая метод Аксельсона, пример использования которого рассмотрен в работе [15]. Этот алгоритм также может быть реализован в другом ПО, позволяющем открывать массивы ТЛО и поддерживающем пользовательский программный код [10].

Основой разработки алгоритма послужили два алгоритма фильтрации, один из которых разработан для данных мобильного [16], а другой — для данных воздушного [14] лазерного сканирования. Плотность данных мобильного и воздушного лазерного сканирования является более равномерной по сравнению с плотностью данных НЛС, которая уменьшается с удалением от сканерной

Рис. 2

Универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС

Fig. 2

The common algorithm of filtering terrestrial laser scanning data

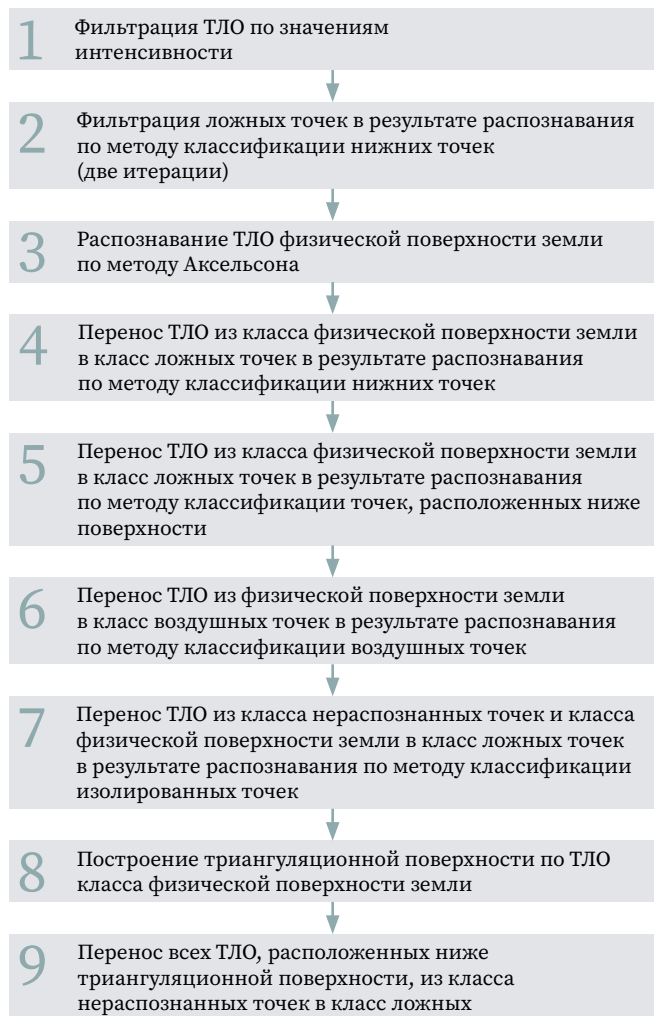


Таблица 1

Оптимальные значения параметров алгоритма фильтрации данных НЛС

Table 1

Optimal parameter values for the algorithm of filtering terrestrial laser scanning data

Этап	Применяемый метод	Значения параметров
1	—	Значение интенсивности менее 8 000 для ТЛО
2	Классификации нижних точек	I итерация: максимальное количество точек в группе — 10; радиус — 0,1 м; превышение — 0,5 м
		II итерация: максимальное количество точек в группе — 99; радиус — 0,3 м; превышение — 0,5 м
3	Аксельсона	Размер ячейки — 10 м; дистанция приближения — 1 м; угол приближения — 8°
4	Классификации нижних точек	Максимальное количество точек в группе — 10; радиус — 0,3 м; превышение — 0,3 м
5	Классификации точек, расположенных ниже поверхности	Среднее значение превышения — 0,02 м; коэффициент — 1
6	Классификации воздушных точек	Минимальное количество точек — 3; радиус поиска — 10 м; коэффициент — 4
7	Классификации изолированных точек	Максимальное количество точек в группе — 5; радиус поиска — 5 м

станции во всех направлениях. Это приводит к тому, что значения параметров методов, применяемых в алгоритме фильтрации данных НЛС, менее устойчивы. В табл. 1 приведены наиболее универсальные значения параметров, которые подобраны для фильтрации данных НЛС застроенных территорий.

В дальнейшем точечная ЦММ применяется для создания различной цифровой конечной продукции и решения отдельных научно-технических и практических задач. Трехмерные векторные ЦММ являются одним из основных видов такой цифровой продукции. На рис. 3 приведена вторая часть технологии создания ЦММ с применением НЛС, учитывающая требования к формату трехмерных векторных моделей и особенности применяемого ПО, которое можно разделить на три группы:

- специализированное ПО обработки пространственных данных с возможностями построения трехмерных векторных ЦММ;
- системы автоматизированного проектирования (САПР);
- ПО информационного моделирования (англ. Building Information Model, BIM).

Применение группы специализированного ПО позволяет упростить процесс моделирования за счет наличия инструментов, позволяющих автоматически или автоматизированно вписать геометрические примитивы в массивы ТЛО и построить различные поверхности. Наибольшее распространение получило ПО Leica Cyclone, методика моделирования в котором подробно описана в работе [17].

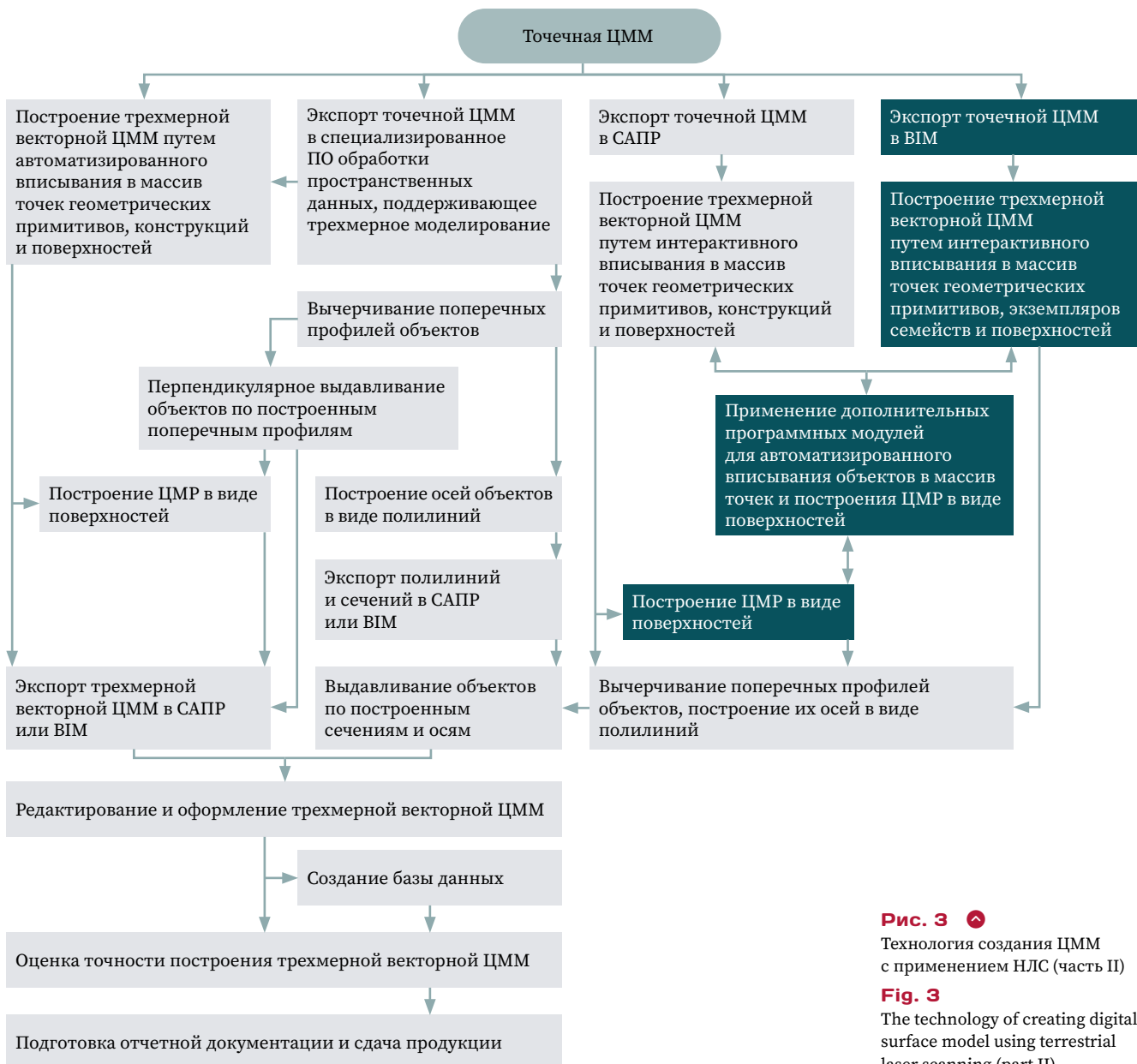


Рис. 3 Технология создания ЦММ с применением НЛС (часть II)

Fig. 3 The technology of creating digital surface model using terrestrial laser scanning (part II)

Многие недостатки специализированного ПО Cyclone отсутствуют в большинстве современных САПР и BIM, где можно выполнять трехмерное моделирование объектов. Функционал САПР и BIM в области трехмерного моделирования, как правило, значительно превосходит возможности специализированного ПО обработки данных НЛС [18, 19].

САПР позволяют создавать сложные твердотельные трехмерные тела и чертежи на их основе, размещать текстовую информацию, выпускать всю необходимую проектную и рабочую документацию. Для трехмерного моделирования в САПР может применяться исходная точечная ЦММ или созданная в специализированном ПО обработки пространственных данных предварительная трехмерная векторная ЦММ, которая импортируется в САПР с целью окончательного оформления.

В BIM-моделях хранится атрибутивная информация об элементах здания, таких как крыша, двери, окна, стены, включая порядок расположения материалов, из которых состоят такие элементы. Эти элементы формируют библиотеки объектов [19]. Они отсутствуют в САПР.

Размещение элементов в BIM осуществляется посредством их интерактивного вписывания в точечную ЦММ. В BIM при вписывании элементов применяется

набор ограничивающих критериев в отличие от САПР. Такие критерии формируются правилами проектирования и необходимы для контроля всех топологических связей между элементами.

В целях автоматизации трехмерного моделирования для ВМ и САПР также разрабатываются дополнительные программные модули. Эти модули, например, позволяют классифицировать ТЛО и выполнять автоматическое вписывание геометрических примитивов и их элементов, которые присутствуют в библиотеках объектов. Самым распространенным подобным коммерческим модулем является Leica CloudWorx. Разрабатываются и другие модули. Д.А. Якушев [20] приводит пример модуля для вписывания в точечную ЦММ объектов железнодорожной инфраструктуры и их элементов.

Трехмерная векторная ЦММ может быть импортирована из специализированного ПО обработки пространственных данных или САПР в ВМ. Тогда возможна ситуация некорректного распознавания отдельных объектов трехмерной модели в формате ВМ, и результат предварительного моделирования в специализированном ПО или САПР применяется для окончательного моделирования в ВМ.

В итоге окончательная трехмерная векторная ЦММ в ВМ создается одним из трех способов:

- интерактивным моделированием в ВМ по точечной ЦММ;
- применением дополнительных программных модулей для автоматизированного моделирования в ВМ;
- импортом трехмерной векторной ЦММ из специализированного ПО или САПР в ВМ с дальнейшим редактированием при соблюдении правил информационного моделирования.

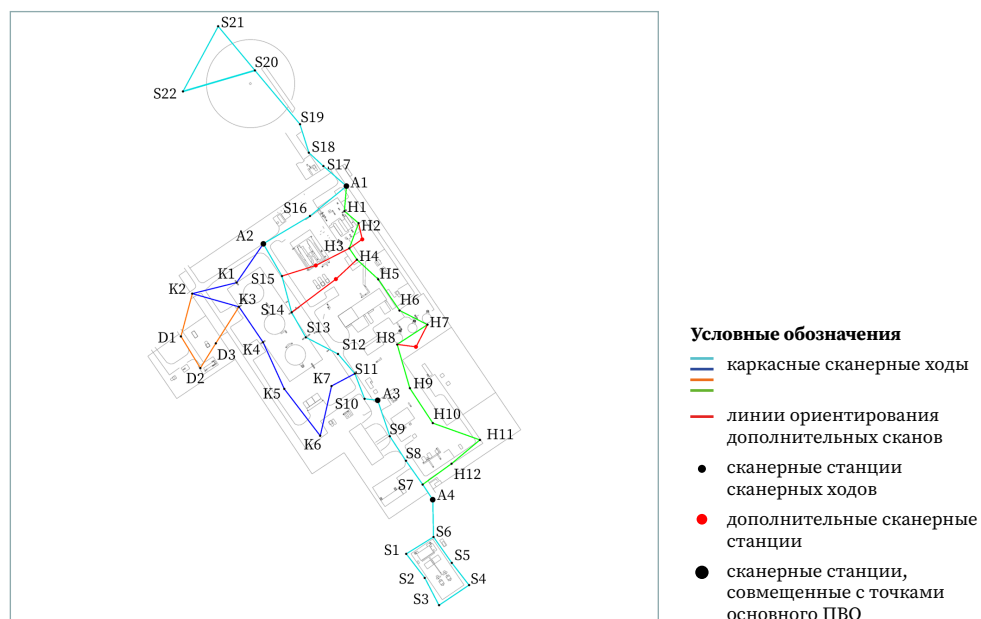
Таким образом, учет современной тенденции перехода от трехмерного моделирования в САПР к моделированию в ВМ, а также применение современных инструментов подобных систем отличает предложенную технологию от той, что описана в работе [4].

3 Результаты и обсуждение


Технология создания ЦММ с применением метода НЛС была апробирована на данных съемки объектов ПАО «Сургутнефтегаз». На рис. 4 представлена схема создания ПВО и выполнения НЛС на одном из таких объектов — дожимной насосной станции (ДНС) Алинского месторождения.

Рис. 4 
Схема создания ПВО и проложения сканерных ходов на дожимной насосной станции

Fig. 4
The diagram of creating horizontal and vertical control survey network and scanner traversing for the booster pump station




НЛС выполнялось с помощью сканера Leica ScanStation 2 посредством проложения каркасных сканерных ходов с использованием прямого метода. Задавалось угловое разрешение по вертикали и горизонтали $0,06^\circ$, а среднее расстояние между сканерными станциями составило 30 м. Четыре сканерные станции были совмещены с точками основного ПВО, а остальные использовались в качестве рабочего. Координаты точек основного ПВО были измерены с помощью спутникового приемника со средней квадратической ошибкой 9 мм. Площадь объекта съемки составила около 6 га. Сеть сканерных ходов была автоматически уравнена в ПО Leica Cyclone (табл. 2). Для досъемки зон объекта, не попавших в поле зрения лазерного сканера со станций сети каркасных ходов, применялся аналитический метод, при котором внешнее ориентирование каждого дополнительного скана выполнялось относительно двух ближайших точек каркасных ходов. С учетом того что минимально допустимое количество опорных точек для внешнего ориентирования при условии горизонтирования лазерного сканера равно двум, оценка точности уравнивания дополнительных сканов осуществлялась по зонам взаимного перекрытия массивов ТЛО. Для каждого скана измерялись расхождения по шести равномерно размещенным соответственным точкам.

Таблица 2 
Оценка точности уравнивания данных НЛС
Table 2
Accuracy estimation of adjusting terrestrial laser scanning data

Сканы	Ошибка	X, м	Y, м	Z, м
Сеть каркасных сканерных ходов	Средняя	0,005	0,008	0,002
	Средняя квадратическая	0,005	0,006	0,003
	Максимальная	0,027	0,028	0,018
Дополнительные	Средняя	0,008	0,012	0,004
	Средняя квадратическая	0,010	0,014	0,005
	Максимальная	0,018	0,024	0,006

Результат уравнивания представлен на рис. 5. Поскольку сканирование с нескольких станций было выполнено после выпадения осадков, точечная ЦММ содержала большое количество ложных ТЛО. Для их удаления был применен разработанный универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС.

На рис. 6 представлено сечение массива ТЛО глубиной 30 м, где приведен промежуточный результат фильтрации после этапа 1 алгоритма – выделения ТЛО по интенсивности. Информация об интенсивности позволила выделить многие ложные ТЛО, полученные в результате переотражения лазерного луча от влажных поверхностей. Значения интенсивности таких ТЛО от объектов ниже, чем ТЛО истинных объектов. Подобранный пороговое значение интенсивности позволило отфильтровать только часть ложных ТЛО.

Рис. 5 
Результат уравнивания данных НЛС
Fig. 5
The result of adjusting terrestrial laser scanning data

По интенсивности / By intensity



По высоте / By height

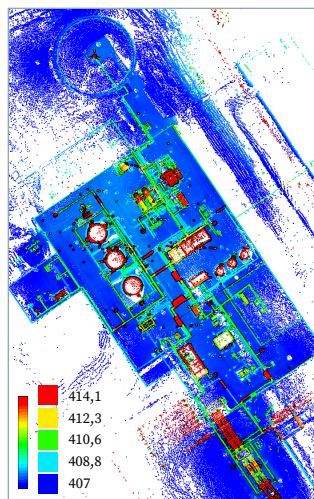



Рис. 6 
Фильтрации данных НЛС по значению интенсивности
Fig. 6
The filtering of terrestrial laser scanning data by intensity values

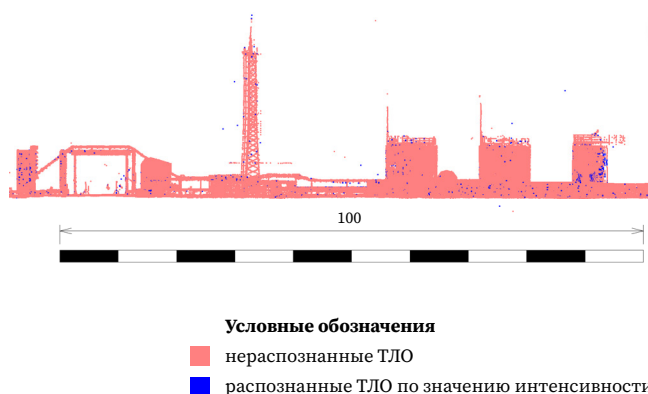


Рис. 7 
Фильтрация ложных ТЛО

Fig. 7
The filtering of false laser points

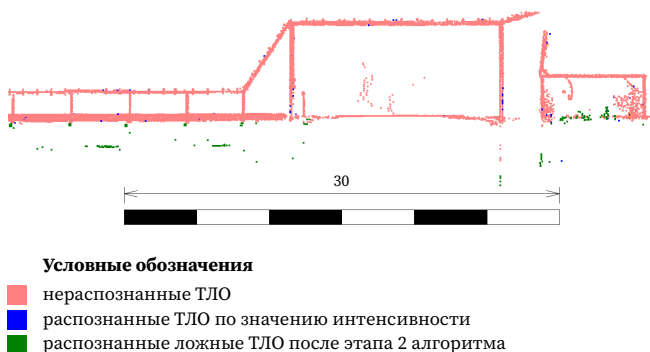


Рис. 8 
Распознавание ТЛО земли

Fig. 8
Recognition of ground laser points

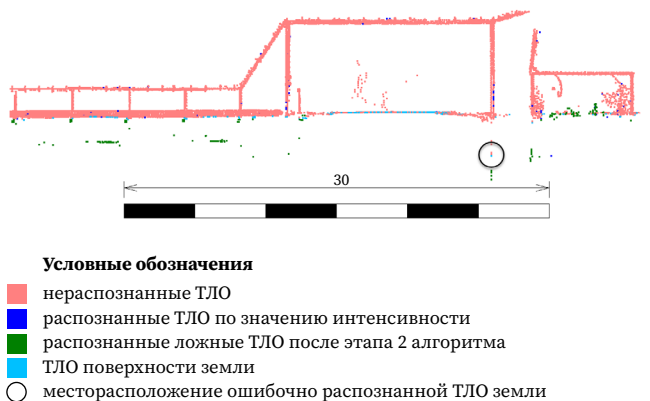



Рис. 9 
Результат классификации ТЛО после этапов 4 и 5 алгоритма фильтрации данных НЛС

Fig. 9
The result of point cloud classification after the steps 4 and 5

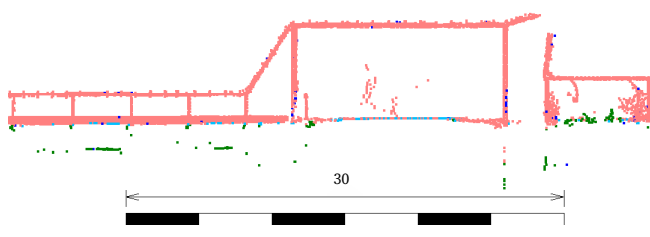
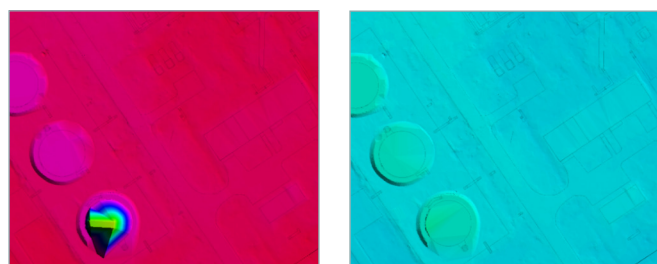


Рис. 10 
ЦМР, построенная по ТЛО поверхности земли

Fig. 10
Digital elevation model generated using ground laser points
После этапа 5 / After the step 5 После этапа 6 / After the step 6



Далее был применен метод фильтрации нижних точек. На рис. 7 приведено сечение массива ТЛО глубиной 4 м, где отображена кабельная эстакада, проходящая над автомобильной дорогой. Этот метод позволил выделить большинство ложных ТЛО, расположенных под поверхностью земли.

Чтобы выделить оставшиеся ложные ТЛО, расположенные под поверхностью земли, предварительно надо распознать точки этой поверхности. Алгоритм классификации точек физической поверхности земли позволил правильно распознать большинство таких точек, за исключением нескольких расположенных под землей и в воздухе. На рис. 8 отмечено расположение одной из ошибочно распознанных точек поверхности земли.

Чтобы устранить ошибки распознавания точек поверхности земли, сначала необходимо повторно применить методы классификации нижних точек и точек, расположенных ниже поверхности. В этом случае выполнялся анализ только среди распознанных точек поверхности земли. На рис. 9 продемонстрировано, что ошибочно распознанная точка поверхности земли была переклассифицирована в класс ложных ТЛО.

С целью исключения ошибок распознавания точек поверхности земли на объектах и в воздухе применялся метод классификации воздушных точек, при этом также анализировались только распознанные точки земли. Для демонстрации результатов работы этого метода была создана промежуточная ЦМР. На рис. 10 показан фрагмент ЦМР в виде триангуляционной поверхности, построенной до применения метода классификации воздушных точек и после него. Цветовые перепады граней треугольников ЦМР показывают, что применяемый метод позволил исключить из класса точек земли ошибочно распознанные ТЛО, принадлежащие поверхности одного из резервуаров.

Для исключения оставшихся отдельных ТЛО из класса нераспознанных и класса земли был применен метод классификации изолированных точек. На рис. 11 приведено сечение массива ТЛО глубиной 10 м, где показаны распознанные по этому методу изолированные ТЛО. Метод позволил исключить большинство оставшихся ложных ТЛО.

На рис. 12 приведен фрагмент окончательного результата фильтрации данных НЛС после последнего этапа универсального алгоритма, согласно которому все нераспознанные ТЛО, находящиеся ниже построенной по точкам земли триангуляционной поверхности, были отнесены к классу ложных. Таким образом, универсальный алгоритм фильтрации данных НЛС позволяет распознать ложные ТЛО, а также достоверно выделить точки поверхности земли, используемые для построения ЦМР.

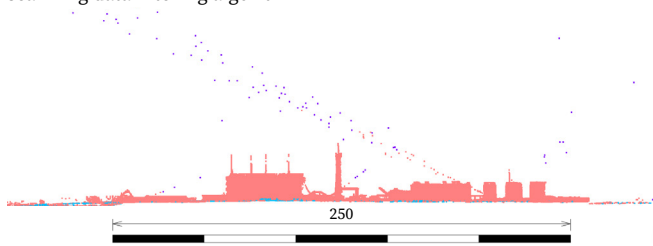
Для оценки точности построения ЦМР территории Алинского месторождения была создана эталонная поверхность, полученная по точкам земли, распознавание которых осуществлялось в два этапа:

Рис. 11 ✓

Результат классификации ТЛО после этапа 7 алгоритма фильтрации данных НЛС

Fig. 11

The result of classification algorithm after the seventh step of the terrestrial laser scanning data filtering algorithm



Условные обозначения

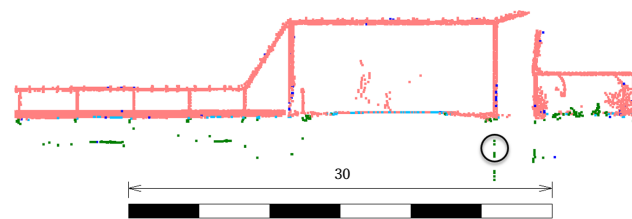
- нераспознанные ТЛО
- изолированные ТЛО
- ТЛО поверхности земли

Рис. 12 ✓

Фрагмент итогового результата классификации ТЛО

Fig. 12

The part of the final point cloud classification result



Условные обозначения

- нераспознанные ТЛО
- отфильтрованные ТЛО по значению интенсивности
- отфильтрованные ложные ТЛО после этапа 9 алгоритма
- ТЛО поверхности земли
- месторасположение переклассифицированных точек после этапа 9

Таблица 3 ✓

Оценка точности построения ЦМР

Table 3

Accuracy estimation of generating digital elevation model

Ошибка	Z, м
Средняя	0,019
Средняя квадратическая	0,027
Максимальное отрицательное отклонение	-0,112
Максимальное положительное отклонение	0,093

- 1) применение метода Аксельсона к исходному нефильтрованному массиву ТЛО;
- 2) исправление ошибок автоматической классификации оператором с помощью интерактивных инструментов.

Результаты оценки точности автоматически построенной ЦМР в ходе применения универсального алгоритма фильтрации данных НЛС приведены в табл. 3. Для этого область построения обеих ЦМР была предварительно ограничена периметром основной территории месторождения по внешним ограждениям и прилегающими площадками у входов на эту территорию. Точность оценивалась на основе разницы отметок автоматически построенной и эталонной ЦМР. Шаг размещения отметок составил 1×1 м². Отрицательное отклонение характеризует присутствие ложных точек под истинной поверхностью земли, а положительное — над ней. Ограничение зоны оценки точности выполнялось из-за значительного снижения плотности данных НЛС при удалении от сканерных позиций — по сторонам от территории ДНС. При таком ограничении средняя ошибка построения ЦМР удовлетворяет допуску инструкции по топографической съемке с высотой сечения рельефа 25 см. Без добавления границы построения ЦМР ошибки по контрольным точкам, расположенным по краям массива ТЛО, достигали метровых значений.

Результаты оценки точности подтверждают достоверность подбора приведенных в табл. 1 оптимальных значений параметров универсального алгоритма фильтрации данных НЛС для застроенных территорий. Согласно отображенной на рис. 1 технологии создания ЦММ, этот алгоритм рекомендуется применять для данных, полученных при сканировании в условиях повышенной влажности. Он позволяет удалить большинство ложных ТЛО, возникающих при сканировании в неблагоприятных условиях, когда после выпадения осадков поверхности объектов становятся влажными. В случае применения алгоритма для данных НЛС, полученных в благоприятных погодных условиях при отсутствии влаги, когда нет ложных ТЛО, точность фильтрации и распознавания точек поверхности земли для построения ЦМР не снижается. Другими словами, алгоритм можно применять одновременно для всех данных НЛС, полученных при продолжительной съемке больших по площади территорий в различных погодных условиях.

Если параметры съемки, такие как угловое разрешение и расстояние между сканерными позициями, сильно отличаются от тех, что использовались при подборе оптимальных значений параметров универсального алгоритма фильтрации (разрешение 0,06°, расстояние между сканерными станциями — 30 м), необходимо уточнять значения параметров алгоритма. В таком случае приведенные оптимальные значения следует использовать в качестве начальных.

Полученную в итоге точечную ЦММ можно в дальнейшем применять для создания трехмерной векторной модели по схеме, приведенной на рис. 3.

4 Выводы

Усовершенствованная технология создания ЦММ учитывает все особенности сбора и обработки пространственных данных, получаемых с помощью НЛС. Она отличается тем, что позволяет принять решение о выборе подходящего метода осуществления измерений (прямой или аналитический) для определенного вида территории (застроенная, незастроенная или тоннели) и ее характера (площадная или линейно-протяженная) на этапе составления рабочей программы НЛС; выбрать способ предварительного уравнивания в зависимости от вида территории; осуществить дополнительную автоматическую фильтрацию данных НЛС по разработанному универсальному алгоритму, распознавая точки поверхности земли; выполнить трехмерное моделирование территории по предъявляемым к моделям требованиям с учетом возможностей ПО.


В соответствии с представленной технологией были выполнены сканирование территории ДНС и обработка полученных данных. Предложенный универсальный алгоритм фильтрации позволил автоматически распознать ложные ТЛО, а также точки поверхности земли. Оценка точности построенной по точкам земли ЦМР показала надежность подобранных значений параметров алгоритма фильтрации при условии сканирования с указанными параметрами съемки. Дальнейшие исследования могут быть связаны с подбором оптимальных значений параметров алгоритма для фильтрации данных, полученных при различных параметрах съемки, и определения диапазонов угловых разрешений и расстояний между сканерными станциями, для каждого из которых следует выбирать те или иные группы подобранных параметров.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Середович В.А., Комиссаров А.В., Комиссаров Д.В. и др. Наземное лазерное сканирование: монография. Новосибирск: СГГА, 2009. 259 с.
2. Сабитова Т.А., Ященко С.О., Соболева Е.Д. Сравнительный анализ традиционных методов построения топографических планов и трехмерного лазерного сканирования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 1(82). С. 79–88.
3. Бударова В.А., Мартынова Н.Г., Шереметинский А.В. и др. Наземное лазерное сканирование объектов промышленных площадок на территории нефтегазовых месторождений // Московский экономический журнал. 2019. № 6. С. 8–14. DOI:10.24411/2413-046X-2019-16004.
4. Комиссаров А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2016. 278 с.
5. Середович А.В. Методика создания цифровых моделей объектов нефтегазопромыслов средствами наземного лазерного сканирования: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 165 с.
6. Bakula K., Pilarska-Mazurek M., Salach A., et al. Detection of Levee Damage Based on UAS Data-Optical Imagery and LiDAR Point Clouds // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 248. DOI:10.3390/ijgi9040248.
7. Rakotosaona M.J., Barbera V.L., Guerrero P., et al. PointCleanNet: Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds // Preprint arXiv.org. 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1901.01060v3> (дата обращения: 23.08.2025).
8. Zaman F., Wong Y.P., Ng B.Y. Density-based Denoising of Point Cloud // Preprint arXiv.org. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1602.05312> (дата обращения: 23.08.2025).
9. Jin J.S., Wang M.J., Jiang W., et al. A Review of Algorithms for Filtering the 3D Point Cloud // Signal Processing: Image Communication. 2017. Vol. 57. P. 103–112. DOI:10.1016/j.image.2017.05.009.
10. Медведев В.И., Райкова Л.С. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 2(9). С. 10–31. DOI:10.17273/CADGIS.2017.2.2.

11. Dong Z., Liang F., Yang B., et al. Registration of Large-Scale Terrestrial Laser Scanner Point Clouds: A Review and Benchmark // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 163. P. 327–342. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.
12. Kalashnikova O.V., Willebrand H.A., Mayhew L.M. Wavelength and Altitude Dependence of Laser Beam Propagation in Dense Fog // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2002. Vol. 4635. P. 279–288. DOI:10.1117/12.464103.
13. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models // *International Archives of ISPRS*. 2000. Vol. XXXIII-4. P. 111–118.
14. Алтынцев М.А. Методика предварительной обработки данных воздушного лазерного сканирования, полученных с применением беспилотных воздушных судов // *Геодезия и картография*. 2023. № 6. С. 30–41. DOI:10.22389/0016-7126-2023-996-6-30-41.
15. Шоломицкий А.А., Ханнанов Р.Р., Олейникова Е.А. Особенности обработки и анализа результатов наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге земляных дамб // *Вестник СГУГиТ*. 2024. Т. 29, № 2. С. 31–40. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.
16. Алтынцев М.А., Каркокли Хамид Маджид Сабер. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26, № 3. С. 5–19. DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.
17. Аманова А.К., Широкова Т.А., Комиссаров А.В. Разработка методики трехмерного моделирования объектов ситуации и рельефа городской территории по данным наземного лазерного сканирования г. Томска // *Сборник материалов VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010»*: в 6 т. Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. С. 94–98.
18. Бойков В.Н. САПР автодорог — перспективы развития // *САПР и ГИС автомобильных дорог*. 2013. Т. 1, № 1. С. 6–9. DOI:10.17273/CADGIS.2013.1.1.
19. Рыбин Е.Н., Амбарян С.К., Аносов В.В. и др. BIM-технологии // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т. 9, № 1. С. 98–105. DOI:10.21285/2227-2917-2019-1-98-105.
20. Якушев Д.А. Автоматизация мониторинга состояния инфраструктуры ж/д транспорта в высокоточном координатном пространстве по данным мобильного лазерного сканирования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 191 с.

АВТОР Алтынцев Максим Александрович

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия
 кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела,
 Институт геодезии и менеджмента
 д-р техн. наук, доцент
 0000-0002-2195-1628

Поступила 04.09.2025. Принята к публикации 19.12.2025. Опубликовано 26.12.2025.



Technology for Creating Digital Terrain Models Using Terrestrial Laser Scanning

Maksim A. Altyntsev¹✉

¹ Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russia
✉ mnbcv@mail.ru

CITATION Altyntsev MA. Technology for Creating Digital Terrain Models Using Terrestrial Laser Scanning. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(6): 38–53. DOI:10.30533/GiA-2025-065.

KEYWORDS digital terrain model, terrestrial laser scanning, preliminary processing, adjustment, filtering


ABSTRACT The technology based on terrestrial laser scanning data and included all stages of data collection and processing for creating digital terrain models is presented. The difference between the proposed technology and the existing ones is a comprehensive consideration of such factors as weather conditions for data collection, the degree of the territory development, its spatial extension and area, as well as the recommendation list for the choice of three-dimensional modeling methods depending on the requirements for the format of vector models and the features of modern software. To improve the quality of data processing, a universal filtering algorithm is included in the technology. The developed algorithm allows recognizing false points in the point cloud and extract the points of the ground surface for generating a digital terrain model. The technology was tested during the survey of the booster pump station territory located in an oil and gas deposit and the processing of the results. The presented laser scanning data accuracy estimation results confirmed the optimality of the planning and measurement steps described in the technology. The digital terrain model accuracy estimation results for the territory demonstrated that a universal filtering algorithm allows automated filtering of false points with high reliability. It is discussed that the values of the algorithm parameters depend on the angular resolution of scanning and the distance between the scanner stations. The proposed values should be used as initial when choosing new ones, if the surveying parameters are different from those used when scanning the researchable object.

REFERENCES 1. Seredovich VA, Komissarov AV, Komissarov DV, et al. *Nazemnoe lazernoe skanirovanie* [Terrestrial Laser Scanning] [monograph]. Novosibirsk: SGGA; 2009. 259 p. (In Russian).

2. Sabitova TA, Yashchenko SO, Soboleva ED. Sravnitel'nyi analiz traditsionnykh metodov postroeniya topograficheskikh planov i trekhmernogo lazernogo skanirovaniya [Features Construction of Digital Topographic Plans Using 3D Laser Scanning in the Construction Industry]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2021;1(82): 79–88. (In Russian).
3. Budarova VA, Martynova NG, Sheremetevsky AV, et al. Nazemnoe lazernoe skanirovanie ob"ektov promyshlennykh ploshchadok na territorii neftegazovykh mestorozhdenii [Ground-Based Laser Scanning of Industrial Sites on the Territory of Oil and Gas Fields]. *Moscow Economic Journal*. 2019;6: 8–14. (In Russian). DOI:10.24411/2413-046X-2019-16004.
4. Komissarov AV. *Teoriya i tekhnologiya lazernogo skanirovaniya dlya prostranstvennogo modelirovaniya territorii* [Theory and Technology of Laser Scanning for Spatial Modelling of Territories] [dissertation]. Novosibirsk; 2016. 278 p. (In Russian).
5. Seredovich AV. *Metodika sozdaniya tsifrovyykh modelei ob"ektov neftegazopromyslov sredstvami nazemnogo lazernogo skanirovaniya* [The Technique for Creating Digital Models of Oil and Gas Deposits Using Terrestrial Laser Scanning] [dissertation]. Novosibirsk; 2007. 165 p. (In Russian).
6. Bakula K, Pilarska-Mazurek M, Salach A, et al. Detection of Levee Damage Based on UAS Data-Optical Imagery and LiDAR Point Clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020;9(4): 248. DOI:10.3390/ijgi9040248.
7. Rakotosaona MJ, Barbera VL, Guerrero P, et al. PointCleanNet: Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds. *Preprint arXiv.org*, 2019. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1901.01060v3> (Accessed 23 August 2025).
8. Zaman F, Wong YP, Ng BY. Density-based Denoising of Point Cloud. *Preprint arXiv.org*, 2016. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1602.05312> (Accessed 23 August 2025).
9. Jin JS, Wang MJ, Jiang W, et al. A Review of Algorithms for Filtering the 3D Point Cloud. *Signal Processing: Image Communication*. 2017;57: 103–112. DOI:10.1016/j.image.2017.05.009.
10. Medvedev VI, Raikova LS. Programmy dlya obrabotki dannykh lazernogo skanirovaniya mestnosti [Programs for Processing Laser Scanning Data]. *CAD & GIS for Roads*. 2017;2(9): 10–31. (In Russian). DOI:10.17273/CADGIS.2017.2.2.
11. Dong Z, Liang F, Yang B, et al. Registration of Large-Scale Terrestrial Laser Scanner Point Clouds: A Review and Benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020;163: 327–342. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.
12. Kalashnikova OV, Willebrand HA, Mayhew LM. Wavelength and Altitude Dependence of Laser Beam Propagation in Dense Fog. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2002;4635: 279–288. DOI:10.1117/12.464103.
13. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of ISPRS*. 2000;XXXIII-4: 111–118.
14. Altyntsev MA. Metodika predvaritel'noi obrabotki dannykh vozdušnogo lazernogo skanirovaniya, poluchennykh s primeneniem bespilotnykh vozdušnykh sudov [The Technique of UAV-Based Airborne Laser Scanning Data Preliminary Processing]. *Geodesy and Cartography*. 2023;6: 30–41. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2023-996-6-30-41.
15. Sholomitskii AA, Khannanov RR, Oleinikova EA. Osobennosti obrabotki i analiza rezul'tatov nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri geodezicheskom monitoringe zemlyanykh damb [Features of Processing and Analysis of the Results of Terrestrial Laser Scanning During Geodetic Monitoring of Earth Dams]. *Vestnik SSUGT*. 2024;2(29): 31–40. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.
16. Altyntsev MA, Karkokli Hamid Majid Saber. Metodika avtomatizirovannoi fil'tratsii dannykh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya [Technique of Automatic Mobile Laser Scanning Data Filtering]. *Vestnik SSUGT*. 2021;26(3): 5–19. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.
17. Amanova AK, Shirokova TA, Komissarov AV. Razrabotka metodiki trekhmernogo modelirovaniya ob"ektov situatsii i rel'efa gorodskoi territorii po dannym nazemnogo lazernogo skanirovaniya g. Tomska [Development of 3D Modeling Techniques for the Objects of Urban Lands Situation and Relief Using the Data of Terrestrial Laser

- Scanning in Tomsk]. *Proceedings of VI International Scientific Congress "GEO-Siberia-2010"*. In 6 vols. Novosibirsk: SGGGA, 2010;1(3): 79–83. (In Russian).
18. Boikov VN. SAPR avtodorog – perspektivy razvitiya [Road CAD – Development Prospects]. *CAD & GIS for Roads*. 2013;1(1): 6–9. (In Russian). DOI:10.17273/CADGIS.2013.1.1.
 19. Rybin EN, Ambaryan SK, Anosov VV, et al. BIM-tehnologii [BIM Technology]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2019;9(1): 98–105. (In Russian). DOI:10.21285/2227-2917-2019-1-98-105.
 20. Yakushev DA. *Avtomatizatsiya monitoringa sostoyaniya infrastruktury zh/d transporta v vysokotochnom koordinatnom prostranstve po dannym mobil'nogo lazernogo skanirovaniya* [Automation of Monitoring the State of Railway Transport Infrastructure in High-Precision Coordinate Space Based on Mobile Laser Scanning Data] [dissertation]. Moscow; 2016. 191 p. (In Russian).

AUTHOR Maksim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russia
Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying,
Institute of Geodesy and Management
Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor
 0000-0002-2195-1628

Submitted: September 04, 2025. Accepted: December 19, 2025. Published: December 26, 2025.