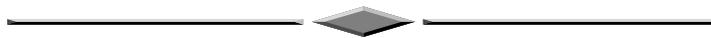


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.721.221.6:665.6

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Максим Александрович Алтынцев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Павел Александрович Карпик

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, магистрант, тел. (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

Территории нефтегазодобывающих комплексов представляют собой сложные производственные предприятия с разнообразной по составу инфраструктурой. Этапы проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений данных территорий требуют периодического осуществления геодезических съемок, в результате которых накапливается информация о пространственном положении всех объектов. В связи с высокой плотностью застройки таких территорий наиболее подходящим видом продукции, создаваемой по данным геодезических съемок, являются трехмерные модели. Для построения высокоточных трехмерных моделей застроенных территорий применяют технологию наземного лазерного сканирования. Методику полевого этапа лазерного сканирования и обработки его данных выбирают в зависимости от площади съемки, характера застройки и требований к точности и детализации трехмерной модели. В статье рассматривается методика полевого этапа лазерного сканирования территорий нефтегазодобывающих комплексов и методика трехмерного моделирования по полученным данным. Выполняется анализ программных продуктов обработки данных лазерного сканирования и способов трехмерного моделирования.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, нефтегазодобывающий комплекс, трехмерное моделирование, цифровая трехмерная модель, цифровой двойник.

Введение

Термин «цифровая трехмерная модель» плотно вошел в различные сферы деятельности человека. В общем случае цифровая трехмерная модель представляет собой визуальный объемный образ в действительности существующего или создаваемого объекта. Процесс создания трехмерной модели называют

трехмерным моделированием, который осуществляется в компьютерной среде. Методика создания модели определяется ее назначением, степенью детализации, сферой применения, сроком и другими особенностями производства [1].

Цифровая трехмерная модель часто используется в качестве источника данных для измерений. В этом случае она обладает метрическими и топологическими свойствами, которые выражают особенности связей ее структурных элементов. Такие модели называют метрическими. С точки зрения визуализации метрические трехмерные модели могут иметь лишь привлекательный внешний вид или обладать какими-либо функциональными возможностями, важными для определенной сферы производства [1].

Процесс создания трехмерной модели разделяют на пять этапов: моделирование, текстурирование, освещение, анимация и визуализация. Созданную по итогам пяти этапов модель называют анимационной. Такие модели в основном применяют в игровой и киноиндустрии, рекламе, дизайне. Модели, в которых исключен этап создания анимации, называют статическими [1, 2].

В различных сферах производства именно статические модели применяют для измерительных целей. Координаты структурных элементов статических метрических трехмерных моделей позволяют определять положение объекта в пространстве. Точность его положения зависит от вида инструментальных средств измерений и их технических характеристик.

В зависимости от назначения создаваемой модели и сферы ее применения выделяют различные способы трехмерного моделирования, основными из которых являются [3]:

- каркасное моделирование;
- поверхностное моделирование;
- твердотельное моделирование.

Каркасная модель состоит из связанных формообразующих линий, дуг, сегментов и не содержит информации об объеме, типе поверхности объекта. Каркасное моделирование используется для создания объектов, состоящих из замкнутых многогранников разнообразной формы, ограниченных плоскими гранями или полученных в результате перемещения формообразующей по заданной траектории. Такая модель содержит список граней, ребер и вершин с указанием их координат. Преимуществом каркасного моделирования являются пониженные требования к вычислительным ресурсам. Каркасные модели применяются там, где требуется высокая производительность. Недостатком каркасного моделирования является неоднозначность интерполяции, когда видимые грани невозможно отличить от невидимых, а также сложность в вычислении физических характеристик [2].

Поверхностная модель дополнительно к элементам каркасной включает информацию о поверхностях, образующих визуальный контур отображаемых элементов. Поверхности соединяются между собой путем перехода или скругления, точно формируя внешнюю оболочку объекта моделирования. Поверхностные модели могут достоверно описывать любой по сложности объект, но они

не имеют внутреннего объема, даже если полностью ограничивают замкнутое пространство. Это является основным отличием поверхностного моделирования от твердотельного [3].

Твердотельная модель является наиболее достоверной формой представления реального объекта. Результатом твердотельного моделирования является целостный элемент, который включает все геометрические компоненты, такие как ребра, грани, поверхности. Поверхности создаются в пределах геометрической формы части моделируемого объекта с такими параметрами, как объем и масса. В твердотельной модели ее внутренний объем отделен от остального пространства. Преимуществами твердотельного моделирования являются лучшая степень визуализации, простота и скорость внесения изменений, а также целостность всего объекта [1].

Для создания трехмерных координатно-метрических моделей реальных объектов применяют данные геодезических съемок. В настоящее время одним из самых современных методов геодезических съемок, позволяющих выполнить построение моделей с максимальной степенью детализации, является лазерное сканирование, которое разделяется на воздушное, мобильное и наземное. В зависимости от плотности застройки, требуемой точности и детализации моделей выбирают один из трех методов [4]. Далее речь пойдет про территории промышленных предприятий с плотной застройкой, поэтому в качестве метода съемки первоочередное внимание будет уделено наземному лазерному сканированию (НЛС).

Преимущества применения технологии наземного лазерного сканирования для создания цифровых трехмерных моделей

Технология НЛС зарекомендовала себя как надежный метод сбора пространственной информации об объектах местности. С каждым годом спектр применения данной технологии расширяется. НЛС активно используется при решении топографических задач, при проектировании, строительстве и эксплуатации сложных инженерных сооружений, в градостроительстве, при контроле качества в приборостроении и т. д. [5].

Главной причиной постоянного роста популярности применения НЛС в различных сферах является возможность сбора данных с чрезвычайно высокой плотностью и скоростью. Количество выполненных измерений координат точек местности может достигать нескольких тысяч на квадратный метр при скорости сканирования до нескольких сотен тысяч в секунду. Результаты таких измерений в совокупности называют массивом точек лазерных отражений (ТЛО).

Высокая плотность данных кардинально выделяет метод НЛС перед другими, классическими, методами геодезической съемки. При тахеометрической съемке, а также при съемке с помощью спутниковых наблюдений плотность данных несоизмеримо мала. Каждое измерение, выполненное такими методами, требует определенного времени. Этот факт оказывается решающим при выборе метода геодезической съемки в целях трехмерного моделирования.

Для трехмерного моделирования объектов местности необходимо выполнять большое количество измерений. Получение координат узлов всех частей зданий и сооружений классическими методами представляет собой на практике практически невыполнимую задачу. Время, которое понадобилось бы затратить на все измерения такими методами, несоизмеримо больше по сравнению с технологией НЛС. Учитывая, что точность НЛС сопоставима с точностью классических методов, выбор метода съемки становится очевиден. Единственным значимым недостатком технологии НЛС является ее дороговизна по сравнению со стоимостью комплекта оборудования для тахеометрической съемки и спутниковых наблюдений.

В последнее десятилетие в качестве метода съемки для трехмерного моделирования конкуренцию лазерному сканированию начинает составлять технология съемки с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [6]. Благодаря осуществлению полета на небольшой высоте, стало возможным выполнять обработку аэрофотоснимков с точностью первых сантиметров. В результате фотограмметрической обработки снимков получают точечную модель, аналогичную по своим характеристикам данным лазерного сканирования. Особую популярность технология съемки с помощью БПЛА обрела благодаря низкой стоимости комплекта оборудования, появлению мощных алгоритмов обработки данных и соответствующего программного обеспечения, позволяющего выполнить большинство этапов обработки данных БПЛА в автоматическом режиме.

Несмотря на описанные преимущества, аэрофотосъемка с помощью БПЛА неспособна полностью вытеснить лазерное сканирование по нескольким причинам. Во-первых, максимально возможно достижимая точность точечной модели, полученной по данным БПЛА, на порядок ниже точности данных НЛС. Многие небольшие объекты, такие как опоры линий электропередачи (ЛЭП), вообще могут не отобразиться. Также в большой степени это касается территорий с густой растительностью. В отличие от данных БПЛА, при лазерном сканировании благодаря отражающим свойствам луч способен проникнуть через весь слой растительности. Во-вторых, точечная модель из аэрофотосъемки содержит большое количество шумов, ошибочных измерений. В лазерном сканировании шум присутствует, но в среднем его уровень значительно ниже. В-третьих, избежать большого количества «мертвых зон» при аэрофотосъемке территорий с большим количеством сложных промышленных строений и сооружений не всегда представляется возможным. Устранить эти зоны зачастую возможно только при наземной съемке. При НЛС практически всегда возможно выполнить проектирование мест расположения съемочных станций с учетом всех перекрытий [7].

Таким образом, для построения цифровых трехмерных моделей объектов местности, особенно при плотной застройке, оптимальным и зачастую единственным выбором является технология НЛС. Другие методы геодезической съемки могут использоваться лишь в качестве дополнительного источника данных. Например, лазерное сканирование, в частности НЛС, выполняют совмест-

но со съемкой с помощью БПЛА. Основную информацию об объектах получают по данным НЛС, а информацию об объектах, прямая видимость до которых с земли отсутствует, извлекают из данных БПЛА [8]. Аэрофотоснимки также служат дополнительным источником данных для дешифрирования результатов НЛС. По аэрофотоснимкам можно выделить контуры зданий, дорог и других сооружений, которые в дальнейшем будут использоваться при трехмерном моделировании по массиву ТЛО [9].

Задача трехмерного моделирования инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов

Одной из первых отраслей, в которой начала применяться технология НЛС, стала отрасль нефтегазодобычи. НЛС получило широкое распространение при съемке инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов вследствие чрезвычайно высокой плотности их застройки. Все нефтегазовые территории характеризуются наличием сложных промышленных объектов, таких как здания, эстакады, резервуары, трубопроводы, наземные кабельные сети. Съемка таких объектов классическими методами значительно превышает по времени съемку с помощью наземных лазерных сканеров [10].

НЛС инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов позволяет получить достоверную информацию обо всех эксплуатируемых сооружениях месторождения, проконтролировать соответствие строящегося объекта проектным данным. Оперативное получение массива ТЛО способствует повышению экономической эффективности и безопасности эксплуатации нефтяного производства [11].

Построение трехмерных моделей объектов нефтегазодобычи позволяет перенести многие задачи, решаемые ранее в полевых условиях, в виртуальную компьютерную среду. В зависимости от применяемых программных средств, алгоритмов и шаблонов, зачастую можно создать такую модель, которую возможно будет использовать не только для измерительных задач, но и для получения атрибутивной информации о производственных сооружениях, такой как тип объекта, его назначение, материал конструкций, срок эксплуатации, а также, чтобы имитировать испытания реальных объектов [12].

В связи с наличием большого количества разнообразных производственных помещений и конструкций создание цифровых трехмерных моделей территорий нефтегазодобычи в основном выполняется с применением технологии НЛС.

Методики получения единой точечной модели методом наземного лазерного сканирования

Любая геодезическая съемка начинается с составления технического проекта. При НЛС в целях трехмерного моделирования в проекте указываются не-

обходимая точность создания трехмерных моделей, их детализация, формат представления, состав съемочного оборудования [13].

На следующем этапе выполняется рекогносцировка местности, суть которой заключается в выборе рационального способа создания и сгущения планово-высотного съемочного обоснования (ПВО). В результате анализа характера застройки и рельефа местности производится выбор точек расположения сканерных позиций и специальных марок для взаимного и внешнего ориентирования сканов. Расстояние между сканерными станциями выбирают, опираясь также на технические характеристики применяемого лазерного сканера, такие как дальность действия сканера, точность измерения расстояний, скорость и шаг сканирования, значение расходимости лазерного излучения. Необходимо на основе этих параметров заранее выполнить предварительный расчет точности и плотности данных лазерного сканирования, получаемых на определенном расстоянии от сканера. Например, плотность данных лазерного сканирования в 1 точку и более на 1 см^2 обеспечит возможность трехмерного моделирования объекта практически любой детальности, в то время как плотность в 1 точку на 100 см^2 не позволит выделить мелкие детали объекта, а также снизит общую точность моделирования всего сооружения. Рассчитав максимально допустимое расстояние между сканерными станциями на основе необходимой плотности массива ГЛЮ, проанализировав все возможные «мертвые» зоны на территориях, исходя из плотности застройки территории, определяют оптимальные расстояния между сканерными станциями и среднее значение площади съемки с одной станции. Зная среднюю площадь съемки с одной станции, рассчитывают их итоговое количество [14]:

$$n_{\text{ст}} = \frac{S_{\text{общ}}}{S_i}, \quad (1)$$

где $S_{\text{общ}}$ – общая площадь съемки;

S_i – средняя площадь съемки с одной станции;

$n_{\text{ст}}$ – количество сканерных станций.

Определив планируемое количество сканерных станций и время сканирования на одной из них, уточняют сроки выполнения полевых работ.

После осуществления рекогносцировки местности выполняется создание основного ПВО. Количество необходимых для закрепления точек ПВО определяется площадью съемки. Измерение координат точек выполняют с помощью тахеометра или спутниковых приемников. По измеренным координатам точек ПВО в дальнейшем выполняют внешнее ориентирование точечной модели, полученной в результате взаимного ориентирования сканов. На рис. 1 показан пример создания съемочного обоснования для территории дожимной насосной станции (ДНС) нефтегазового месторождения, площадь съемки составила 6 га. Для такой площади выполнялось закрепление четырех точек ПВО, координаты

которых определялись спутниковыми приемниками от постоянно действующей на территории базовой станции. Отдельными точками на рис. 1 показаны запроектированные сканерные станции.

На следующем этапе выполняется расстановка специальных марок в зонах взаимного перекрытия между сканами. Координаты их центров могут быть измерены с помощью тахеометра или спутниковых приемников. В этом случае они могут быть использованы для внешнего ориентирования сканов. В противном случае марки применяются только для взаимного ориентирования сканов. Необходимое количество марок определяется выбранным способом внешнего ориентирования сканов: прямым или аналитическим [13].

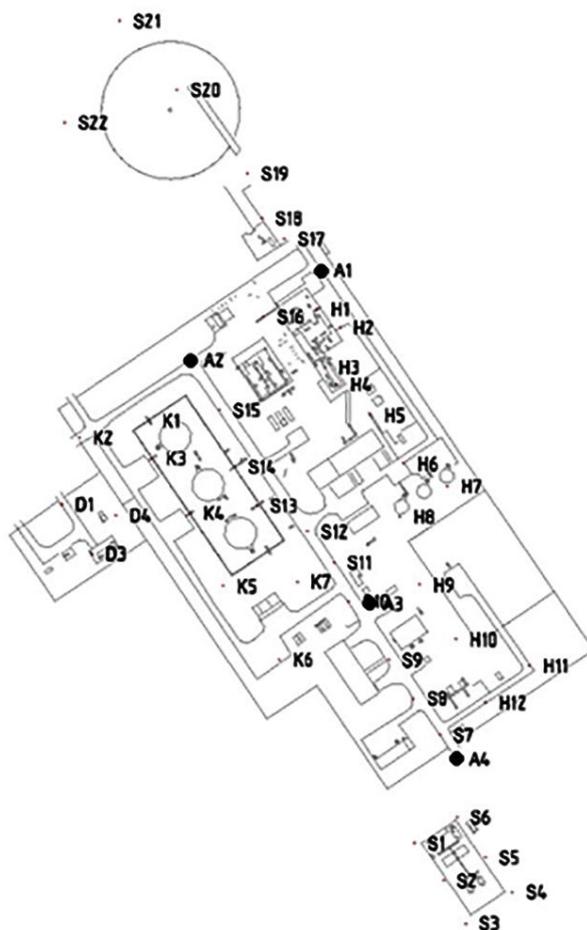


Рис. 1. Съёмочное обоснование на территорию ДНС:
точки А1 – А4

Прямой способ осуществляют путем проложения сканерных ходов. Методика проложения сканерного хода аналогична методике проложения теодолитного хода. Пример схемы сканерного хода представлен на рис. 2. Сканер центрируют над предварительно закрепленными точками, а ориентирование выполняют по двум маркам.

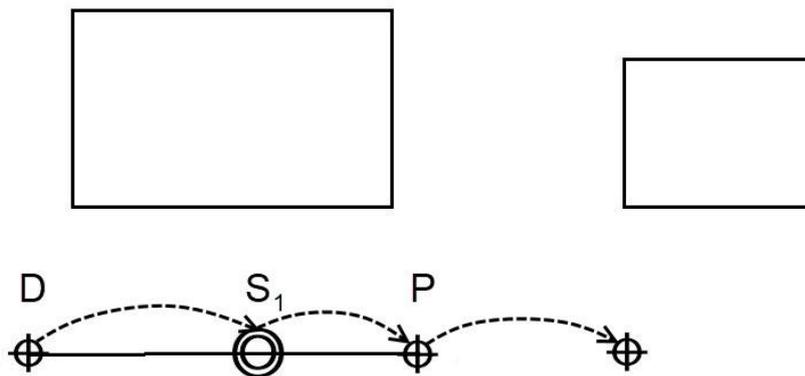


Рис. 2. Схема прямого способа

При аналитическом способе определение элементов внешнего ориентирования выполняют способом обратной линейно-угловой засечки. В этом случае центрирование над точкой не выполняют, горизонтирование осуществляется с помощью встроенного компенсатора, а для ориентирования используют несколько марок, количество которых может быть различным. Пример схемы данного способа с минимально возможным количеством марок показан на рис. 3.

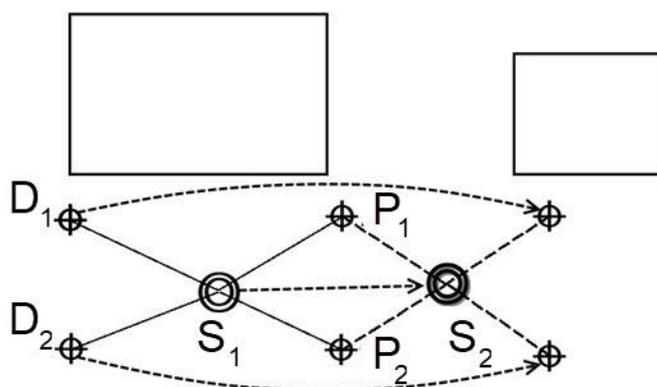


Рис. 3. Схема аналитического способа

На практике при лазерном сканировании территорий часто комбинируют прямой и аналитический способы. Например, возможно выполнение проложение сети сканерных ходов, экономя время за счет размещения меньшего числа марок. В тех местах, где проложение сканерных ходов выполнять нерационально ввиду малой площади участка, ориентировать лазерный сканер следует аналитическим способом.

Следующим этапом является наземное лазерное сканирование с каждой запроектированной станции. Лазерное сканирование может выполняться как

с помощью встроенного в сканер программного обеспечения (ПО), так и с помощью внешнего устройства, на которое оно установлено [15]. Каждой компанией-производителем наземных лазерных сканеров, как правило, применяется собственное ПО. Например, компания Leica использует ПО Cyclone, компания Riegl применяет ПО RISCAN, компания Trimble – ПО PointScape [16].

В начале этапа сканирования задают настройки его шага и угла поля зрения, а затем выполняют панорамный скан. Далее сканируют расположенные вокруг марки с повышенным разрешением. Детальное сканирование марок позволяет однозначно идентифицировать их центры [13]. На рис. 4 показан пример схемы проложения сети сканерных ходов. Каждый ход отмечен индивидуальным цветом.

По завершении процесса сканирования выполняется предварительная обработка данных, которая может осуществляться в том же ПО, используемом для сканирования, либо экспортироваться в стороннее, такое как PolyWorks от компании InnovMetric.

На этапе предварительной обработки выполняются фильтрация и уравнивание сканов. В результате фильтрации удаляются ТЛЮ по значению заданного расстояния от сканерной станции, отсеиваются ошибочные точки, полученные в результате переотражений от зеркальных поверхностей, выполняется прореживание данных. В результате уравнивания сканов получается единая точечная модель, внешне ориентированная по координатам точек ПВО [16].

Для оценки точности полученной точечной модели вычисляют общую среднюю квадратическую ошибку (СКО) определения координат [13]:

$$m_t^2 = m_{\text{осн_ПВО}}^2 + m_{\text{раб_ПВО}}^2 + m_{\text{ор}}^2 + m_{\text{изм}}^2, \quad (2)$$

где $m_{\text{осн_ПВО}}$ – СКО определения координат точек модели, вызванные погрешностями создания основного ПВО;

$m_{\text{раб_ПВО}}$ – СКО определения координат точек модели, вызванные погрешностями в определении координат сканерных специальных марок;

$m_{\text{ор}}$ – СКО определения координат точек модели, вызванная ошибками внешнего ориентирования сканов;

$m_{\text{изм}}$ – СКО определения координат точек модели, вызванная влиянием внешней среды, метрологических свойств объекта сканирования и инструментальными ошибками.

Формула (2) применяется при аналитическом способе внешнего ориентирования сканов. При сканировании по схеме, приведенной на рис. 4, применялся прямой способ. В этом случае из формулы (2) необходимо исключить ошибку $m_{\text{раб_ПВО}}$.

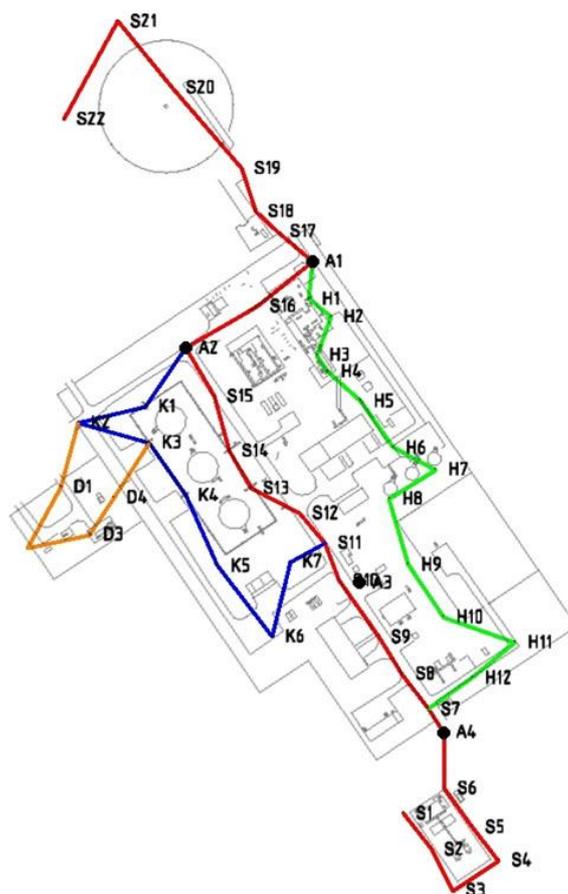


Рис. 4. Схема проложения сети сканерных ходов по территории ДНС

Построение цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов

Полученная единая точечная модель является основой решения различных производственных задач, в том числе трехмерного моделирования объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов. В зависимости от требуемого вида конечной трехмерной модели выбирают подходящее ПО. Трехмерные модели могут включать только геометрическую информацию и служить для измерительных целей либо входить в состав сложной информационной модели с большим объемом дополнительных данных, необходимых для проектирования новых сооружений и решения других производственных задач. Также они могут являться объектом испытаний, выполняемых в виртуальной среде вместо действительной реальности. Чтобы выбрать ПО трехмерного моделирования, необходимо заранее знать, как трехмерная модель будет использоваться в производстве.

Для создания большинства видов трехмерных моделей на первом этапе удобнее всего применять такие ПО, в которых осуществлены функции автоматического моделирования. Leica Cyclone является одним из самых популярных

ПО трехмерного моделирования с возможностью автоматического вписывания геометрических примитивов в массив ТЛО и построения поверхностей.

Cyclone поддерживает все основные способы трехмерного моделирования. Твердотельное моделирование применяют для описания объектов правильной формы. Получить сложный объект с помощью данного вида моделирования возможно путем вписывания множества геометрических примитивов, таких как сферы, цилиндры, параллелепипеды в различные части сооружения. Затем выполняют операции объединения, вычитания, пересечения выбранных примитивов [17].

Каркасное моделирование применяется в лазерном сканировании для упрощенного отображения объекта, когда его форму достаточно показать в виде кривых, точек и линий, задающих ребра. Примером такого объекта являются линии электропередачи [17].

Поверхностное моделирование используют для точного описания формы объектов неправильной формы, имеющих наиболее сложную структуру, и когда требуется добиться максимального уровня точности, соизмеримого с точностью уравнивания массива ТЛО. В Cyclone способ поверхностного моделирования основан на триангуляции «Делоне» [18]. Еще более точным видом поверхностного моделирования является построение сплайновых NURBS-поверхностей. Данный вид поверхностного моделирования реализован, например, в программе обработки данных лазерного сканирования RapidForm [16].

Примером применения поверхностного моделирования при сканировании объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов является обследование резервуаров. Благодаря моделированию поверхностей резервуаров выполняют их деформационный мониторинг, осуществляют поиск и устранение дефектов [19].

Поверхностное моделирование также применяют для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР). ЦМР всегда является неотъемлемой частью целостной трехмерной модели территории. Для этого сначала выполняют выделение ТЛО, принадлежащих земле, а затем построение по ним поверхности [20].

В итоге можно сделать вывод, что методики трехмерного моделирования объектов территорий нефтегазодобычи и подобных по степени застройки включают все основные способы трехмерного моделирования. В [21] приведен пример одной из них.

При выборе и разработке новых методик создания трехмерных моделей необходимо придерживаться основных этапов трехмерного моделирования, указанных в [13]. Выбор способа моделирования и основных инструментов будет зависеть от точности и плотности массива ТЛО. При низкой плотности без дополнительной информации будет зачастую невозможно для некоторых объектов построить твердотельную модель [22]. В этом случае выполняют каркасное моделирование или не показывают детали объекта. На рис. 5 приведен пример результатов трехмерного моделирования в ПО Cyclone одного участка с разной степенью детализации.



Рис. 5. Результаты трехмерного моделирования:

а) модель с низкой детализацией; б) модель с высокой детализацией

Кроме плотности массива ТЛЮ, на точность трехмерного моделирования и возможность отобразить все детали объекта будет влиять значение расходимости лазерного луча выбранной модели лазерного сканера. При высоком значении расходимости многие мелкие детали поверхностей не описываются точечной моделью, кроме этого, возникают ошибки на ребрах объектов, местах стыков конструктивных элементов сооружений [23]. В [24] приведено исследование влияния расходимости на точность планового положения точек местности, где показано, что СКО планового положения можно представить функцией от расходимости:

$$m_L = kf(\Psi), \quad (3)$$

где m_L – СКО планового положения точек;

k – коэффициент;

Ψ – расходимость лазерного луча.

В [24] определены значения коэффициента k для сканеров с высокой и низкой расходимостью.

При лазерном сканировании территорий нефтегазовых месторождений учет параметра расходимости приобретает первостепенную роль. Наличие большого количества производственных объектов на единицу площади, таких как трубы, кабельные лотки, столбы, трансформаторы, требует выбора модели лазерного сканера с низкой расходимостью. Для ускорения процесса работы с сохранением высокой плотности массива ТЛЮ выбранная модель должна также обладать высокой частотой сканирования. На рис. 6 приведен фрагмент результата лазерного сканирования и создания трехмерной модели для территории нефтегазодобывающего комплекса.

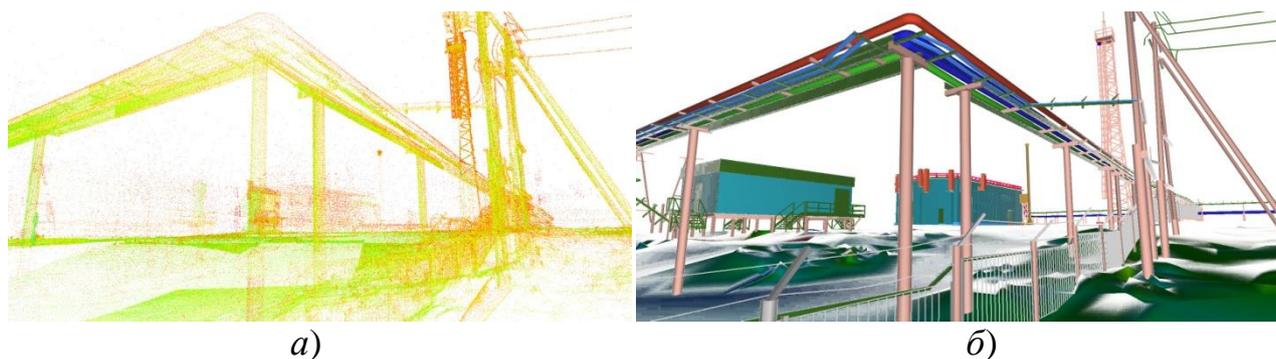


Рис. 6. Результаты лазерного сканирования и трехмерного моделирования для территории нефтегазодобывающего комплекса:
а) массив ТЛО; б) трехмерная модель

Трехмерные объекты, показанные на рис. 6, были смоделированы с применением различных способов. Для описания моделей кабельных лотков, трубопроводных сетей, их опор, столбов, основных частей зданий применялось твердотельное моделирование. Чтобы показать задвижки, провода ЛЭП, фермовые конструкции и детали ограждений между столбами, использовалось каркасное моделирование. Поверхностное моделирование было выбрано для построения цифровой модели рельефа.

На рис. 7 показан результат трехмерного моделирования для другого участка территории ДНС. Создание моделей резервуаров осуществлялось способом твердотельного моделирования. В случае решения задачи определения их деформаций следовало бы выбирать способ поверхностного моделирования. В данном примере поверхностное моделирование применялось для отображения деталей ограждений между столбами.

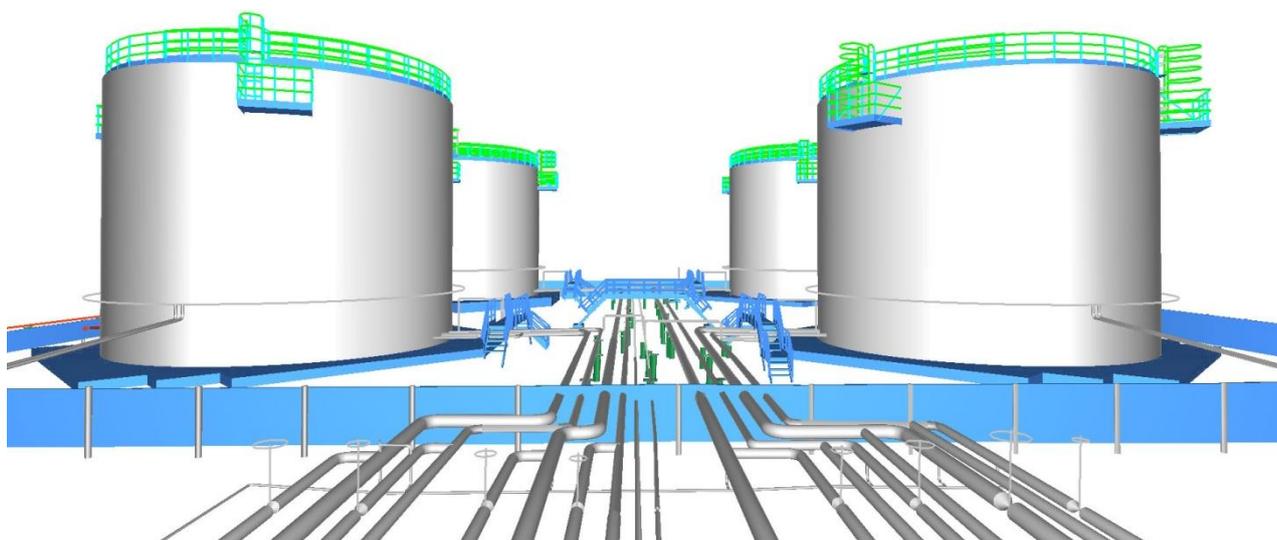


Рис. 7. Результаты трехмерного моделирования участка территории ДНС

Созданные в специализированном ПО, таком как Cyclone, модели в дальнейшем экспортируются в ПО, где выполняется их окончательное оформление. В качестве ПО для оформления моделей могут выступать система автоматизированного проектирования (САПР), геоинформационная система (ГИС) либо среда информационного моделирования (ВМ).

Среди этих трех видов ПО наибольшим возможностям обладает ВМ, которое позволяет не только хранить данные о геометрических размерах трехмерных моделей и накладывать текстуры на них, но и быть источником информации обо всех ее составных элементах, таких как стены, потолки, колонны, окна, двери и др. [25]. В связи с необходимостью хранить множество различной информации, оформление экспортированной из Cyclone в ВМ трехмерной модели представляет собой сложную задачу. Часто оказывается проще выполнить импорт данных лазерного сканирования в ВМ и осуществить моделирование с самого начала.

ВМ позволяет накапливать большой объем данных, хранить их в базах данных. ВМ – это часть «цифрового двойника», которая отражает информацию об объекте на какой-то момент времени. Цифровой двойник полностью копирует не только физическую форму реального объекта, но и его поведение. Цифровой двойник обеспечивает возможность выполнять оптимизацию производственного оборудования [26, 27].

Данные лазерного сканирования являются основой создания моделей цифровых двойников инфраструктуры нефтегазодобывающих и других предприятий. Учитывая тот факт, что модели цифрового двойника требуют постоянного обновления, на нефтегазодобывающих предприятиях для хранения большого объема данных могут применяться функциональные WEB-сервисы.

Заключение

Для создания высокоточных трехмерных метрических моделей инфраструктурных объектов нефтегазодобывающих комплексов целесообразно применять метод наземного лазерного сканирования. Полученные метрические модели в результате обработки массива ТЛЮ представляют собой физические модели объектов нефтегазодобывающего комплекса на дату съемочных работ. Совокупность трехмерных моделей объектов нефтегазодобывающего комплекса, созданных методом наземного лазерного сканирования, является основой для создания цифровых двойников и имеет перспективы дальнейшего развития.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сивожелезова А. А. Основные принципы создания 3D-моделей. Понятия и методы оптимизации в трехмерной графике // Молодой ученый. – 2020. – № 10 (300). – С. 10–15.
2. Меженин А. В. Технологии 3d моделирования для создания образовательных ресурсов : учеб. пособие. – СПб., 2008. – 112 с.
3. Косников Ю. Н. Поверхностные модели в системах трехмерной компьютерной графики : учеб. пособие. – Пенза : Пензенский государственный университет, 2007. – 60 с.
4. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1. – С. 141–144.
5. Построение трехмерных моделей спортивных сооружений средствами лазерного сканирования (на примере Новосибирского биатлонного комплекса) / Д. В. Комиссаров, Е. В. Миллер, М. А. Аверков, В. В. Загородний // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1. – С. 216–220.
6. Самбаев Б. Ш. Построение 3D-модели строений по данным с БПЛА // Молодой ученый. – 2019. – № 14 (252). – С. 54–57.
7. UAV aerial survey: accuracy estimation for automatically generated dense digital surface model and orthophoto plan / M. Altyntsev, S. Arbuzov, R. Popov, G. V. Tsoi, M. O. Gromov // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2016. – XLI-B6. – P. 155–159.
8. Ткачева А. А., Фаворская М. Н. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6. – С. 40–49.
9. Elberink S. O., & Vosselman G. 3D modelling of topographic objects by fusing 2D maps and lidar data // Proceedings of the ISPRS TC-IV Intl symp. on : Geospatial databases for sustainable development, 2006. – P. 199–204.
10. 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.
11. О применении наземного лазерного сканирования в нефтегазовой отрасли / Г. Г. Васильев, А. П. Сальников, А. А. Катанов, М. А. Лежнев, И.А. Леонович, М. В. Лиховцев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 4 (16). – С. 47–51.
12. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 56–66.
13. Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
14. Особенности создания цифровых моделей городских территорий средствами наземного лазерного сканирования / В. А. Середович, А. В. Середович, А. В. Комиссаров, А. В. Радченко, О. А. Дементьева, Л. К. Радченко, А. В. Усиков // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. – С. 136–140.
15. Herban I., Vilceanu, C. V. Terrestrial laser scanning used for 3D modeling // 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 2012.
16. Шевченко Г. Г., Гура Д. А., Глазков Р. Е. Анализ программного обеспечения для обработки данных наземного лазерного сканирования // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2016. – Т. 12, № 3. – С. 127–140.
17. Катрич А. Е., Барина Т. А. Обработка данных наземного лазерного сканирования для получения 3D-моделей объектов // Научные достижения и открытия современной моло-

дежи : сборник статей победителей Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Пенза : Наука и просвещение, 2017. – С. 1213–1215.

18. Создание 3D-модели планетария СГГА по данным наземного лазерного сканирования для модернизации звездного зала / А. В. Иванов, Е. И. Горохова, Л. И. Горохова, К. В. Мурашев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 150–155.

19. Оптимизация процесса камеральной обработки результатов наземного лазерного сканирования при оценке напряженно-деформированного состояния резервуаров / Г. Г. Васильев, А. П. Сальников, А. А. Катанов, М. В. Лиховцев, Е. Г. Ильин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 32–39.

20. 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 // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 79–83.

21. Середович А. В., Дементьева О. А., Горохова Е. И. Трехмерное моделирование участков городских территорий для проектирования инженерных объектов // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 64–68.

22. Алтынцев М. А., Чернов А. В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 9. – С. 52–63.

23. Проблемы и перспективы использования наземного лазерного сканирования при обследовании резервуаров / Г. Г. Васильев, М. А. Лежнев, И. А. Леонович, А. П. Сальников // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 1. – С. 21–24.

24. Априорная оценка точности создания трехмерной цифровой модели местности по данным наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, А. В. Комиссаров, Е. А. Егорченкова, Н. С. Коротченко // Инженерные изыскания. – 2012. – № 12. – С. 58–60.

25. BIM-технологии / Е. Н. Рыбин, С. К. Амбарян, В. В. Аносов, Д. В. Гальцев, М. А. Фахратов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 1, № 1 (28). – С. 98–105.

26. Кокорев Д. С., Юрин А. А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. – 2019. – № 10 (34). – С. 31–35.

27. Васильев А. Н., Тархов Д. А., Малыгина Г. Ф. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 521–532.

Получено 05.06.2020

© М. А. Алтынцев, П. А. Карпик, 2020

THE TECHNIQUE FOR CREATING DIGITAL THREE-DIMENSIONAL MODELS OF OIL AND GAS MANUFACTURING FACILITY OBJECT INFRASTRUCTURE USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Maxim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Pavel A. Karpik

Novosibirsk State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate, phone: (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

Oil and gas manufacturing facility territories are complicated enterprises with diverse infrastructure. Design, construction and operation of engineering plants require periodic geodetic surveying in these territories, as a result of which information on the spatial position of all objects is accumulated. Due to the high area density, 3D models are the most suitable products created with geodetic surveying. Terrestrial laser scanning is used to create high-precision 3D models of built-up territories. A technique of field laser scanning stage and its data processing is selected depending on area of a survey, site development and requirements for accuracy and detail of 3D model. The technique of field laser scanning stage for oil and gas manufacturing facility territories and the technique of 3D modelling according to the obtained data is discussed. Analysis of laser scanning data processing software and 3D modeling methods is performed.

Key words: terrestrial laser scanning, oil and gas manufacturing facility, 3D modelling methods, digital 3D model, digital twin.

REFERENCES

1. Sivozhelezova, A. A. (2020). Basic principles for creating 3D models. Concepts and methods of optimization in 3D graphics. *Molodoj uchyonyj [Young Scientist]*, 10(300), 10–15 [in Russian].
2. Mezhenin, A. V. (2008). *Tekhnologii 3d modelirovaniya dlya sozdaniya obrazovatel'nyh resursov [3D modeling technologies for building educational resources]*. St. Petersburg, 112 p. [in Russian].
3. Kosnikov, Yu. N. (2007). *Poverhnostnye modeli v sistemah trekhmernoj komp'yuternoj grafiki [Surface models in 3D computer graphics]*. Penza: Penza State University Publ., 60 p. [in Russian].
4. Seredovich, V. A., Altyntsev M. A., & Popov, R. A. (2013). Features of different laser scanning data type application in monitoring of natural and industrial objects. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 18.1, 141–144 [in Russian].
5. Komissarov, D. V., Miller, E. V., Averkov, M. A., & Zagorodniy, V. V. (2005). Generating three-dimensional models of sports facilities by means of laser scanning (on the example of Novosibirsk biathlon complex). In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2005: T. 5 [Proceedings of GEO-Siberia-2005: Vol. 5]* (pp. 216–220). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
6. Sambaev, B. Sh. (2019). Generating a 3D model of constructions from UAV data. *Molodoj uchyonyj [Young Scientist]*, 14(252), 54–57 [in Russian].
7. Altyntsev, M., Arbuzov, S, Popov, R., Tsoi, G. V., & Gromov, M. O. (2016). UAV aerial survey: accuracy estimation for automatically generated dense digital surface model and orthothoto plan. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, XLI-B6, 155–159.
8. Tkacheva, A. A., & Favorskaya, M. N. (2015). Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo Data. *Information and Control Systems*, 6, 40–49 [in Russian].
9. Elberink, S. O., & Vosselman, G. (2006). 3D modelling of topographic objects by fusing 2D maps and lidar data. *Proceedings of the ISPRS TC-IV Intl symp. on: Geospatial databases for sustainable development*, 199–204.
10. Budarova, V. A., Martynova, N. G., Sheremetevsky, A. V., & Privalov, V. A. (2019). Ground-based laser scanning of industrial sites on the territory of oil and gas fields. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal [Moscow Journal]*, 6, 8–14 [in Russian].
11. Vasiliev, G. G., Salnikov, A. P., Katanov, A. A., Lezhnev, M. A., Leonovich I. A., & Likhovtsev, M. V. (2014). About application of surface laser scanning in the oil and gas industry.

Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov [Science & Technologies: Oil and Gas Products Pipeline Transportation], 4(16), 47–51 [in Russian].

12. Petrov, A. V. (2018). Simulation as the basis of digital twin technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 22(10), 56–66 [in Russian].

13. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].

14. Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., Komissarov, A. V., Radchenko, A. V., Dementyeva, O. A., Radchenko, L. K., & Usikov, A. V. (2009). Features of city territories digital model development by terrestrial laser scanning. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2009: International Scientific Conference: Vol. 1, Part 1]* (pp. 136–140). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

15. Herban, I., & Vilceanu, C. B. (2012). Terrestrial laser scanning used for 3D modeling. *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*.

16. Shevchenko, G. G., Gura, D. A., & Glazkov, R. E. (2016). Software analysis for information processing of surface laser scanning. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Modern Industrial and Civil Construction]*, 12(3), 127–140 [in Russian].

17. Katrich, A. Y., & Barinova, T. A. (2017). Data processing of terrestrial laser scanning to produce 3d models of objects. In *Sbornik statey pobediteley mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauchnye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi [Proceedings of International Scientific Conference Champions: Scientific Achievements and Discoveries of Modern Youth]* (pp. 1213–1215). Penza: Nauka i prosveshchenie Publ. [in Russian].

18. Ivanov, A. V., Gorokhova, E. I., Gorokhova, L. I., & Murashov, K. V. (2014). Creating a 3D model of the planetarium SSGA according to terrestrial laser scanning for modernization of the star hall. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2 Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 150–155). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

19. Vasiliev, G. G., Salnikov, A. P., Katanov, A. A., Likhovtsev, M. V., Ilyin, & E. G. (2019). Optimization of the process of post-processing of the results of surface laser scanning in the evaluation of the stress-strain state of vertical steel tank. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov [Science & Technologies: Oil and Gas Products Pipeline Transportation]*, 9(1), 32–39 [in Russian].

20. Amanova, A. K., Shirokova, T. A., & Komissarov, A. V. (2010). Development of 3D modeling techniques for the objects of urban lands situation and relief using the data of terrestrial laser scanning in Tomsk. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 3, ch. 3 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 1, Part 3]* (pp.79–83). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

21. Seredovich, V. A., Dementyeva, O. A., & Gorokhova, Ye. I. 3D modeling of the city territories sites for engineering projects designing. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 1, ch. 3 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 1, ch. 3]* (pp.64–68). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

22. Altyntsev, M. A., & Chernov, A. V. Application of laser scanning technology for modelling of real estate objects in 3D cadaster. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 79(9), 52–63 [in Russian].

23. Vasiliev, G. G., Lezhnev, M. A., Leonovich I. A., & Salnikov, A. P. (2016). Challenges and perspectives of tank inspection with laser scanning. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya [Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons]*, 1, 21–24 [in Russian].

24. Komissarov, A. V., Shirokova, T. A., Egorchenkova, E. A., Korotchenko, N. S., & Komissarov, D. V. (2012). A priori accuracy estimate of creating a three-dimensional digital terrain model using ground-based laser scanning data. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 12, 58–60 [in Russian].
25. Rybin, E. N., Ambaryan, S. K., Anosov, V. V., Galcev, D. V., & Fakhratov, M. A. (2019). BIM technology. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate]*, 1, 1(28), 98–105 [in Russian].
26. Kokorev, D. S., & Yurin, A. A. (2019). Digital twins: concept, types and benefits for business. *Colloquium-journal*, 10(34), 31–35 [in Russian].
27. Vasilyev, A. N., Tarkhov, D. A., Malykhina, G. F. (2018). Methods of creating digital twins based on neural network modeling. *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern Information Technology and IT-education]*, 14(3), 521–532 [in Russian].

Received 05.06.2020

© M. A. Altyntsev, P. A. Karpik, 2020