Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

А. В. Комиссаров

Лазерное сканирование и трехмерное моделирование

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебно-методического пособия для обучающихся по направлению
подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование
(уровень бакалавриата)

Новосибирск
СГУГиТ
2020

УДК 528.7
К63

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент СГУГиТ *А. В. Иванов*

кандидат технических наук, начальник отдела землеустройства и кадастра ООО «СИБ-ГЕО-МАР» *Ю. А. Мушич*

Комиссаров, А. В.

К63 Лазерное сканирование и трехмерное моделирование: учеб.-метод. пособие [Текст] / А. В. Комиссаров. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 58 с. : ил.

ISBN 978-5-907052-90-1

Учебно-методическое пособие подготовлено доцентом, доктором технических наук А. В. Комиссаровым на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ.

В пособии рассмотрена технология наземного лазерного сканирования и методики создания топографических планов и построения цифровых моделей объектов ситуации и рельефа местности с использованием программного обеспечения Cyclone.

Пособие по дисциплине «Лазерное сканирование и трехмерное моделирование» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование (уровень бакалавриата).

Рекомендовано к изданию кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 528.7

ISBN 978-5-907052-90-1

© СГУГиТ, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4

1. Технология наземного лазерного сканирования 5

1.1. Термины наземного лазерного сканирования 5

1.2. Технология создания топографических карт и трехмерных моделей по данным наземного лазерного сканирования 7

2. Программное обеспечение для обработки данных наземного лазерного сканирования 18

2.1. Обзор функциональных возможностей программного обеспечения 18

2.2. Управляющее программное обеспечение 23

2.3. Программные продукты Cyclone для создания топографических планов и чертежей по данным лазерного сканирования 25

2.4. Трехмерное моделирование технологических объектов в программном продукте Cyclone 35

Заключение 55

Библиографический список 56

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие методов сбора и обработки материалов дистанционного зондирования позволяет решать большой круг прикладных задач в различных отраслях экономики страны, а также при разнообразных научных исследованиях.

За последние годы в области топографо-геодезического производства разработано большое количество аппаратных средств дистанционного сбора пространственной информации об объектах, территориях и явлениях: космические съемочные системы сверхвысокого разрешения, интерферометрические радары, лазерные съемочные системы. При этом все перечисленные средства позволяют создавать не только стандартные топографические или тематические планы и карты, но и достаточно новый вид продукции – трехмерную цифровую модель местности или объекта для решения на принципиально новом уровне традиционных и новых задач, таких как обеспечение пространственными данными трехмерного проектирования, авиастроения, градостроительства при точечной застройке и комплексном освоении территорий, при ликвидации чрезвычайных ситуации и т. д.

Данное пособие будет востребован при чтении курсов лекций по дисциплинам «Прикладная фотограмметрия и лазерное сканирование», «Лазерное сканирование и трехмерное моделирование» и т. д., преподаваемым для бакалавров по направлению 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование.

Автор выражает признательность и благодарность рецензентам за ценные научные и методические советы: кандидату технических наук, доценту кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела СГУГиТ А. В. Иванову и кандидату технических наук начальнику отдела землеустройства и кадастра ООО «СИБ-ГЕО-МАР» Ю. А. Мушич. Также автор выражает признательность ректору Сибирского государственного университета геосистем и технологий, доктору, технических наук А. П. Карпику за постоянную поддержку и всестороннюю помощь в издании данного пособия.

1. ТЕХНОЛОГИЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

1.1. Термины наземного лазерного сканирования

В настоящее время технология трехмерного (3D) лазерного сканирования используется в таких отраслях, как геодезия, проектирование, исследование деформаций зданий и сооружений, археология, медицина и др. К преимуществам данной технологии относятся: высокая степень автоматизации получения и обработки метрической информации, точность, избыточность. Современный этап развития экономики страны требует значительного объема пространственной информации о территории. Методы сбора пространственной информации разделяются на контактные и бесконтактные.

Бесконтактные методы имеют ряд неоспоримых преимуществ:

– возможность использования в особо опасных и недоступных территория без ущерба и вреда здоровью человека (исполнителям работ);

– значительно более высокий потенциал автоматизации процесса измерения;

– возможность выполнения измерения с подвижных носителей;

– гораздо больший объем получаемой исходной информации;

– значительно меньшие трудозатраты и трудовые ресурсы при выполнении измерений.

Из всего многообразия бесконтантактных методов съемки наиболее перспективными являются активные системы сбора информации, так как они обладают рядом преимуществ по отношению к пассивным:

– возможность использования при любых погодных условиях;

– отсутствие необходимости в дополнительных источниках освещения, т. е. возможность использования как в дневное, так и в ночное время суток;

– измерение дальности до объектов местности, следовательно, получение трехмерных координат в процессе съемки;

– узкий спектральный диапазон (практически монохроматичный) создает условия для более полного учета влияния атмосферы в результатах измерений.

Все активные съемочные системы разделяются на два вида:

– лазерные (использующие в основе оптический диапазон излучения);

– радиолокационные (использующие в основе радиодиапазон излучения).

Использование лазеров при получении пространственной информации об объектах местности вызвано их свойствами, такими как когерентность излучения, монохроматичность, узкая расходимость пучка и т. д., что позволяет получать более точные и детальные данные по сравнению с другими съемочными системами [1]. Поэтому наибольший интерес для получения пространственной информации об объектах местности представляют данные системы сбора информации.

Кроме того, следует учитывать возросшие потребности отраслей экономики, а именно представление пространственной информации в трехмерном виде. При этом для них предъявляются следующие требования [2]:

– сопоставимая точность получения данных по высоте и в плане;

– детальность (разрешение) получаемых трехмерных моделей в метрических величинах, соответствующая точности получаемых данных;

– решение инженерных и управленческих задач по трехмерной цифровой модели, состоящей из топологически связанных математических моделей объектов и объеденных с семантической информацией о них, т. е. представление информации в виде трехмерной геоинформационной модели.

Для обеспечения этих потребностей и выполнения всех условий современного общества могут быть использованы только приборы лазерного сканирования на современном этапе науки и техники.

В работе [3] приведен наиболее полный перечень областей, в которых применяется технология наземного лазерного сканирования, их можно разделить по точности получения координат и высот точек местности (категориям):

– топографические (средняя квадратическая погрешность пространственных координат (СКП) до 10 см);

– проектные (СКП до 5 см);

– архитектурно-строительные (СКП до 1 см);

– экспертные, или точные (СКП до 1 мм);

– высокоточные (СКП менее 1 мм).

Для внедрения нового технологии получения данных был разработан понятийный аппарат:

– *лазерное отражение для точки* – информация о точке объекта, содержащая пять характеристик, а именно: сферические пространственные координаты точки (φ, θ, R), интенсивность отраженного сигнала (I) и реальный цвет точки (I_{RGB});

– *массив точек (точечная модель)* – множество лазерных отражений от объектов, формируемое из совокупности сканов;

– *мертвая зона* – зона, которая не попадает в поле зрения сканера с одной станции;

– *скан* – изображение, получаемое наземным лазерным сканером (НЛС) за один цикл его работы, элементами (пикселями) которого являются лазерные отражения точек объекта;

– *сканерная станция* – точка стояния сканера;

– *трехмерная векторная модель* – трехмерная модель поверхности объекта, представляемая с помощью набора математических функций (геометрических примитивов, сплайн-функций, нерегулярных триангуляционных сетей и т. п.).

В настоящем учебно-методическом пособии будут использоваться данные термины с соответствующими им определениями.

1.2. Технология создания топографических карт и трехмерных моделей по данным наземного лазерного сканирования

На основе опыта проведения производственных работ по наземной лазерной съемке различных объектов и предложенной классификации, а также принципов системности математическую модель технологии наземного лазерного сканирования предлагается представить следующим образом:

$$G(\Omega, \mathrm{T}, \mathrm{K}) = \int_0^{+\Omega} \int_0^{+\mathrm{T}} \int_0^{+\mathrm{K}} \left[\begin{array}{l} \left(f_{\text{инстр}}(\omega, \tau) \cdot f_{\text{окр.ср.}}(\omega) \cdot f_{\text{метрол}}(\omega) \right) \cdot \\ \cdot f_{\text{ориен}}(\omega, \tau, \kappa) \cdot f_{\text{обр}}(\omega, \tau, \kappa) + I(\kappa) + \eta(\omega, \tau, \kappa) \end{array} \right] d\omega d\tau d\kappa, \quad (1)$$

где $f_{инстр}(\omega,\tau,\kappa)$ – функция, характеризующая инструментальную точность и скорость сканирования конкретного сканера;

$f_{окр.ср}(\omega)$ – функция, описывающая влияние окружающей среды на точность проводимых измерений НЛС;

$f_{метрол}(\omega)$ – функция, описывающая влияние метрологических свойств объектов съемки на точность результатов сканирования;

$f_{ориент}(\omega,\tau,\kappa)$ – функция, характеризующая способ, геометрию и точность ориентирования сканов;

$f_{обр}(\omega,\tau,\kappa)$ – функция, характеризующая способ, режим и допуски при обработке данных наземного лазерного сканирования;

$I(\kappa)$ – функция, отражающая информационную емкость данных наземного лазерного сканирования;

$\eta(\omega,\tau,\kappa)$ – функция, учитывающая упрощения и округление при расчете параметров наземного лазерного сканирования, которые влияют на качество получаемых данных.

На основе математической модели (1), опыта проведения производственных работ по наземной лазерной съемке различных объектов разработана обобщенная технология наземной лазерной съемки для получения различных видов продукции, представленная на рис. 1.

Из технологической схемы, представленной на рис. 1, выделяются четыре основных вида работ, которые можно выстроить в следующую иерархическую цепочку:

– подготовительные работы;

– полевые работы;

– камеральные работы;

– подготовка отчетной документации и контроль качества продукции.

Данная иерархическая цепочка отвечает принципам комплексного подхода.

Рассмотрим сущность и особенности выполнения процессов технологии наземного лазерного сканирования.

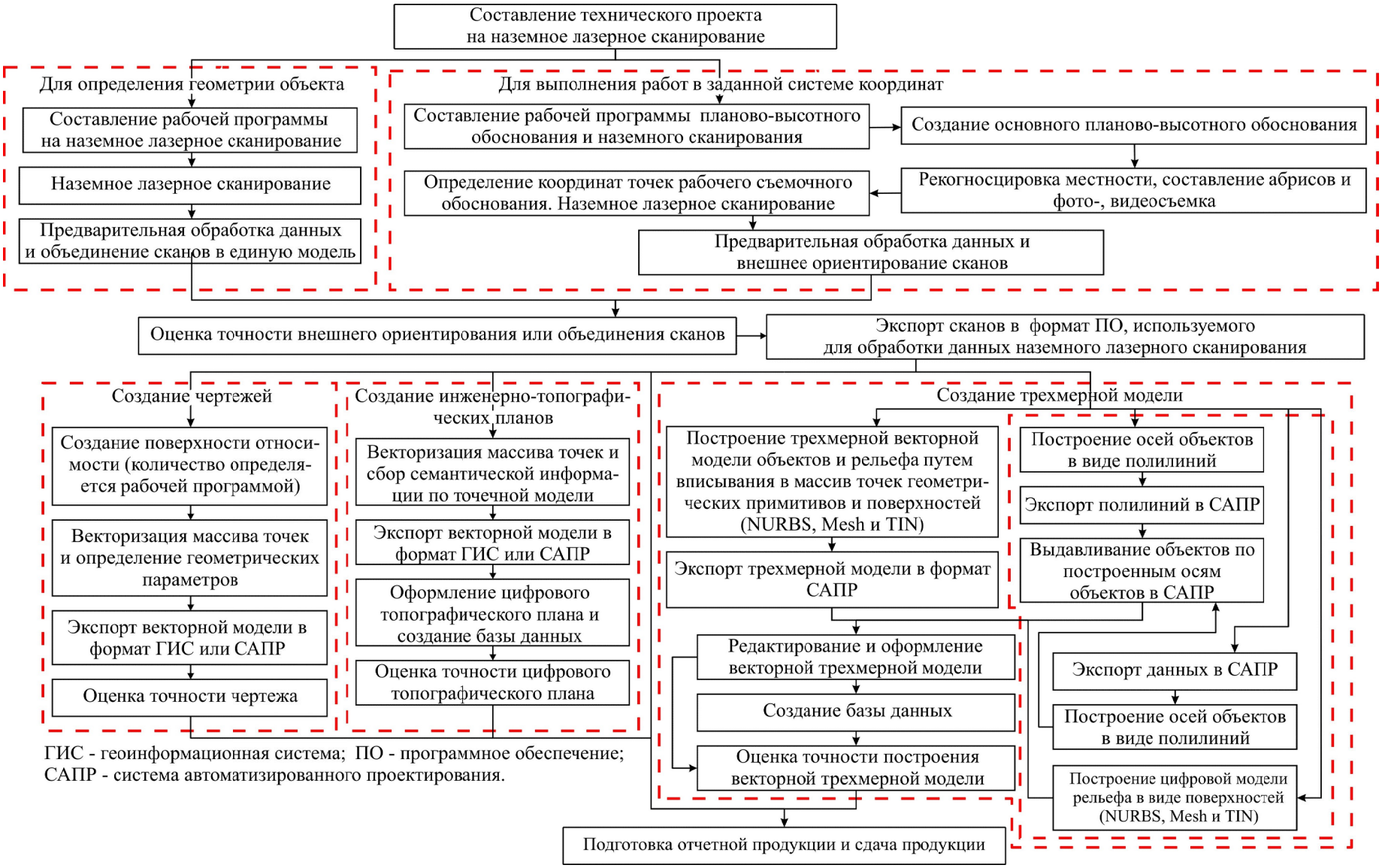


Рис. 1. Технологическая схема построения трехмерных моделей местности, создания цифровых топографических планов и чертежей по данным наземного лазерного сканирования

Подготовительные работы

Составление технического проекта на наземное лазерное сканирование. На этапе составления технического проекта регламентируются требуемая точность построения трехмерной модели местности (объекта) или цифрового плана, содержание и детализация их, необходимый формат (структура файла) готовой продукции, используемое оборудование, стоимость проведения работ, выполняется сбор имеющихся картографических материалов, проектных документов и прочей информации об объекте съемки. При необходимости уточняются вопросы о необходимости сбора дополнительной семантической информации на каждый объект.

Составление рабочей программы планово-высотного обоснования и наземного сканирования. На данном этапе выбирается метод создания основного планово-высотного обоснования (ПВО), способ закрепления точек ПВО, проектируются сеть ПВО, количество и расположение сканерных станций, определяется состав используемого оборудования, рассчитывается оптимальный шаг сканирования, проектируется схема рабочего съемочного обоснования и т. п.

Полевые работы

Создание основного планово-высотного обоснования. В соответствии с инструкцией [4], в качестве точек основного съемочного обоснования выступают только закрепленные на местности знаки временной и долговременной сохранности. Основное планово-высотное обоснование может быть использовано не только при сканерной, но и при тахеометрической съемке. Определение координат и высот точек основного ПВО необходимо для создания трехмерных моделей и крупномасштабных планов местности в заданной системе координат и включает следующие процессы [5]:

– рекогносцировка местности и уточнение схемы основного ПВО;

– закрепление точек основного планово-высотного обоснования;

– полевые измерения по планово-высотной привязке точек основного обоснования;

– камеральная обработка, состоящая из следующих этапов: уравнивание результатов полевых измерений и составление каталога координат и высот точек основного ПВО;

– оценка точности создания основного съемочного обоснования.

Практический опыт показал, что при наземной лазерной съемке плановые координаты точек основной опорной сети следует определять с помощью спутниковых геодезических технологий и геодезических построений (проложением теодолитных или полигонометрических ходов, прямой или обратной геодезическими засечками). В случае геодезических построений отметки точек основной высотной сети определяются тригонометрическим или геометрическим нивелированием.

Вычисление координат точек основного съемочного обоснования и оценка точности его создания осуществляются в зависимости от выбранного способа координатной привязки и программного обеспечения (ПО).

Рекогносцировка местности, составление абрисов и фото-, видеосъемка. На данном этапе уточняются места расположения сканерных станций. По завершении рекогносцировки составляются абрисы на снимаемую территорию, фрагмент которых показан на рис. 2. От полноты абрисов зависит достоверность дальнейшего распознавания объектов съемки при дешифрировании точечной модели в камеральных условиях.

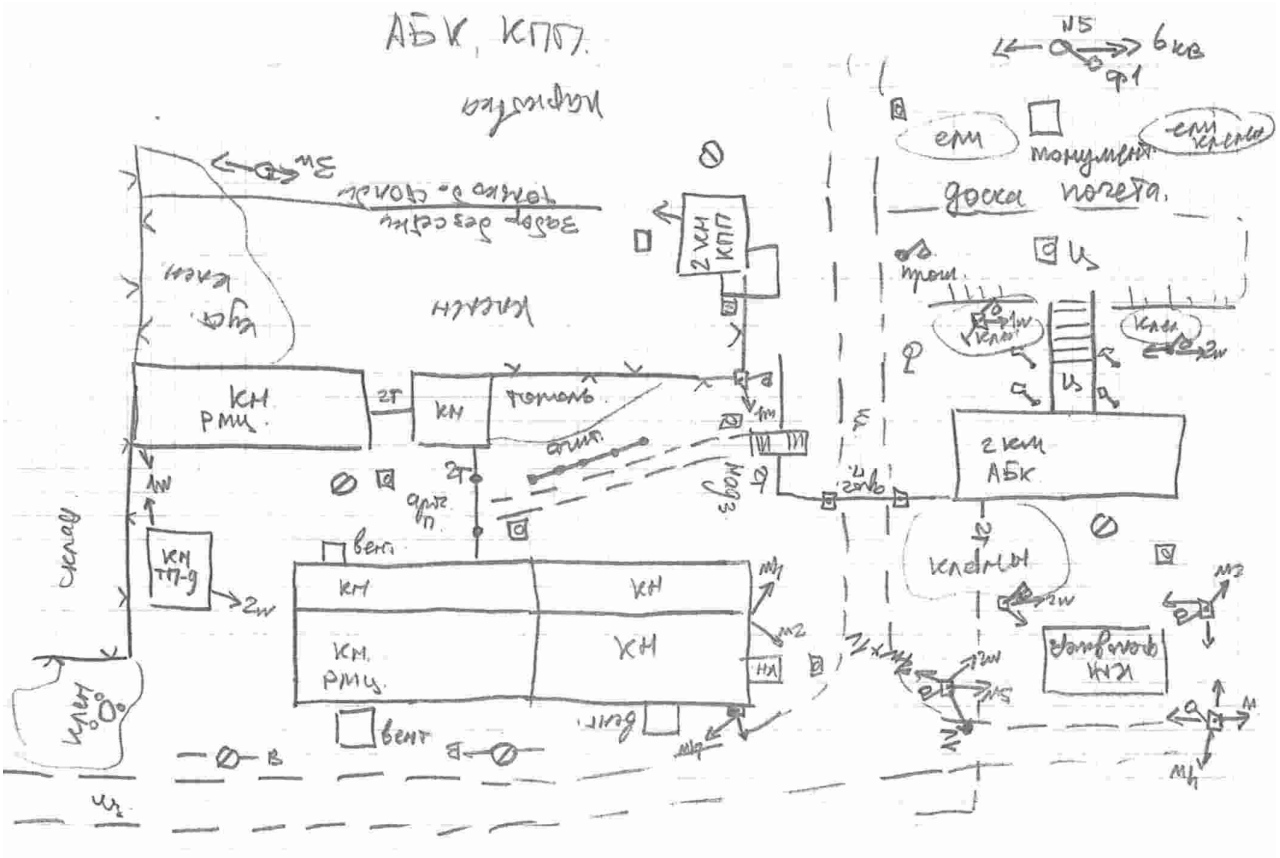


Рис. 2. Фрагмент абриса

При съемке малозастроенных территорий абрисы лучше составлять по точечной модели объекта, полученной после наземного лазерного сканирования, распечатанной в ортогональной проекции на бумаге, аналогично тому, как выполняется полевое дешифрирование объектов по фотопланам. При таком подходе значительно упрощается процесс составления абрисов, так как на скане будут отображены все объекты в едином масштабе. В процессе составления абрисов (полевого дешифрирования сканов) на них наносится вся необходимая семантическая информация.

На объекты съемки также выполняют фото- или видеосъемку, которые необходимы для упрощения процесса дешифрирования при обработке данных наземного лазерного сканирования. При сканировании объектов, имеющих большое количество ярусов труб, составление абрисов становится очень сложным или практически невозможным процессом, в этом случае их роль выполняют материалы фото- или видеосъемки.

Определение координат точек рабочего съемочного обоснования, наземное лазерное сканирование. Под рабочим съемочным обоснованием понимается совокупность специальных марок, координаты и высоты которых определены относительно основного планово-высотного обоснования. Данный этап заключается в определении пространственных координат центров специальных марок, для чего могут быть использованы такие же методы, средства и приемы, как и при создании основного съемочного обоснования. Привязка точек рабочего съемочного обоснования выполняется с пунктов основного ПВО.

Порядок работы на сканерной станции состоит из следующих этапов [5]:

а) установка сканера на запроектированной точке на штатив, высота которого задается такой, чтобы обеспечить максимальный охват интересующей территории (объекта) на одном скане;

б) расстановка вокруг сканера специальных марок, которые являются точками рабочего съемочного обоснования;

в) определение координат и высот центров специальных марок с точек основной опорной сети. Оценку точности создания рабочего обоснования можно выполнить путем многократного измерения центров специальных марок или определением координат одних и тех же марок с различных

пунктов основного съемочного обоснования (аналогично, как и при оценке точности тахеометрической съемки);

г) сканирование местности и объектов вокруг точки стояния сканера. В случае, если сканер снабжен цифровой камерой, то выполняется также цифровая фотосъемка;

д) идентификация и определение приближенных координат центров специальных марок. В зависимости от модели сканера эти операции выполняются либо по полученному скану, либо по цифровому снимку, если сканер оснащен цифровой камерой;

е) сканирование специальных марок с максимальным разрешением, что позволяет с предельно возможной точностью для данной модели сканера определять их координаты в системе координат скана;

ж) перемещение сканера на следующую точку сканирования и повторение этапов а) – б).

Предварительная обработка данных и внешнее ориентирование сканов. Управление наземным лазерным сканером и предварительная обработка результатов сканирования обычно осуществляются с использованием программного продукта (ПП) фирмы – изготовителя сканера. Предварительная обработка данных начинается с фильтрации данных. На данном этапе удаляются точки, не принадлежащие моделируемому объекту съемки. Для этой цели используются различные фильтры, например, для удаления шумов, осреднения данных, высокочастотной и низкочастотной фильтрации и т. д. Заключительным процессом на данном этапе является внешнее ориентирование сканов.

Оценка точности внешнего ориентирования или объединения сканов. В зависимости от программного обеспечения, используемого для внешнего ориентирования и объединения сканов, данный этап может контролироваться по следующим параметрам [5]:

– средней квадратической погрешности единицы веса, вычисляемой при объединении или внешнем ориентировании сканов;

– расхождениям пространственных координат специальных марок или характерных точек во внешней системе координат;

– средним квадратическим ошибкам (СКО) определения элементов внешнего ориентирования или объединения сканов.

Камеральная обработка и создание отчетной продукции

Создание трехмерных моделей. Экспорт сканов в формат программного обеспечения, используемого для обработки данных наземного лазерного сканирования. Поскольку большинство программных продуктов, предназначенных для обработки сканов, используют внутренний формат, то возникает необходимость экспорта в них данных из программы, управляющей сканером. Результатом этого процесса является единая база данных сканерной съемки либо единая точечная модель объекта.

Построение трехмерной векторной модели объектов и рельефа местности путем вписывания в массив точек геометрических примитивов и поверхностей (NURBS, Mesh и TIN). Для построения трехмерных векторных моделей объектов ситуации по данным наземного лазерного сканирования используются следующие режимы:

– автоматический;

– полуавтоматический;

– интерактивный.

Выбор режима векторизации точечной модели зависит от используемого программного обеспечения, формы и размеров элементов объектов, если они имеют правильную форму, то используется автоматический режим создания модели. Полуавтоматический и интерактивный режимы применяются для моделирования объектов неправильной, сложной геометрической формы, а также маленьких размеров.

В процессе векторизации, как с целью создания цифровых топографических планов, так и построения трехмерной векторной модели, целесообразно разделять объекты по слоям. При этом их следует называть по типам объектов, например, «забор металлический ниже одного метра», «забор металлический выше одного метра», «забор бетонный», «сетка рабица», «изгородь» и т. д. Данный подход позволяет при оформлении, например, топографического плана в геоинформационной системе быстро изменить стили линий.

Построение цифровой модели рельефа в виде поверхностей (NURBS, Mesh и TIN) заключается в выделении точек, принадлежащих поверхности земли, и построении по ним NURBS-, Mesh- и TIN-поверхностей, что определяется рабочей программой.

Построение осей объектов в виде полилиний. При использовании этой технологии оси элементов конструкций показываются в виде полилиний. Также вычерчивается поперечный профиль конструкции на одном из концов оси. Затем эта модель в виде полилиний экспортируется в программу САПР, где выполняется «выдавливание» конструкций по созданным осям. Данные процедуры возможны и в САПР, где отрисовка выполняется аналогичным образом. Выбор технологического решения в данном случае определяется опытом исполнителя и наличием у него программного обеспечения.

Применение той или иной технологической ветви построения векторной модели (см. рис. 1) зависит от характера элементов ситуации. Для моделирования таких элементов, как уголки, швеллеры, двутавровые балки, электрические кабели и провода, целесообразнее применять схему на основе осей и сечений элементов. Для создания моделей зданий, трубопроводов, сферических объектов и т. д. следует использовать схему моделирования на основе геометрических примитивов, NURBS-поверхностей, Mesh-поверхностей и т. д.

Редактирование и оформление векторной трехмерной модели. Данный процесс осуществляется с целью обеспечения целостности получаемой трехмерной модели. Обычно редактирование выполняется в системах автоматизированного проектирования, например, AutoCAD.

Создание базы данных. Для решения практических задач трехмерная модель местности интегрируется или «связывается» с базой данных семантической информации. Для удобства работы база данных и модель разделяются по слоям.

Оценка точности построения векторной трехмерной модели. Оценка точности построения трехмерной модели местности по данным наземного лазерного сканирования может выполняться двумя способами:

– по разностям координат и высот характерных точек местности (или объектов), полученным по векторной модели и в полевых условиях одним из известных геодезических способов, например, с помощью электронного тахеометра;

– по разностям длин линий, полученным в полевых условиях, и по созданной векторной модели.

В качестве контрольных выбираются точки, которые не должны изменять свое пространственное положение за время между моментами сканирования и контрольными геодезическими измерениями.

Создание цифровых чертежей и топографических планов. Векторизация массива точек и сбор семантической информации по точечной модели для создания цифровых чертежей и топографических планов. Перед началом векторизации точечной модели создается поверхность относимости, т. е. плоскость, на которую будут наноситься элементы чертежа или плана. Для топографического плана в качестве такой поверхности выбирается плоскость, параллельная плоскости *XY* внешней геодезической системы координат. Для чертежей в качестве такой поверхности может быть выбрана поверхность стены, элементы которой отрисовываются, или любая другая.

Следующим этапом является рисовка объектов, при этом поверхность относимости должна быть параллельна плоскости экрана. Для векторизации объектов используются стандартные ГИС или САПР объекты по типу локализации: точка, линия, полилиния, полигон, сплайн-линия, прямоугольник и равносторонний *n*-угольник.

По своей сути, векторизация точечной модели с целью создания цифровых чертежей и топографических планов полностью идентична рисовке по ортофопланам, по материалам аэро- и космической съемки или фототеодолитной съемки.

Векторизация точечной модели с целью создания топографических планов выполняется в следующей последовательности:

а) рисовка сооружений и крупных объектов. На начальном этапе рекомендуется на плане отобразить крупные площадные объекты, такие как здания, сооружения и т. д., которые надежно дешифрируются по точечной модели без применения абрисов;

б) векторизация линейных объектов, например, трубопроводов, кабельных каналов, линий электропередачи (ЛЭП) и т. д. Для надежного дешифрирования таких объектов необходимо использовать абрисы, составленные на этапе проведения полевых работ, а также другие документы, например, ранее созданные топографические планы на данную территорию, технологические схемы объектов и др.;

в) нанесение точечных объектов, таких как канализационные люки, колодцы связи, пожарные гидранты и др. Пространственное положение

объектов, выступающих над землей менее чем на 1 см, рекомендуется определять геодезическими методами, например, с помощью электронного тахеометра.

Отображение рельефа на цифровых топографических планах. Способ построения модели рельефа зависит от загруженности топографического плана. Если топографический план имеет большую плотность контуров, то рельеф отображается в виде точек с отметками, в остальных случаях – горизонталями и другими условными знаками (обрывы, откосы, обваловки, утесы, ледники и т. д.).

Экспорт векторной модели в формат ГИС или САПР. Данный процесс аналогичен процессу создания топографических планов на фотограмметрических станциях.

Оформление цифрового топографического плана и создание базы данных. Данный этап заключается в формировании выходных инженерно-топографических планов в соответствии с действующей нормативной базой.

Подготовка отчетной документации и контроль качества продукции. Оценка точности цифрового топографического плана производится по данным наземного лазерного сканирования таким же образом, как и цифровых моделей местности.

Подготовка отчетной продукции и сдача продукции являются заключительным этапом. Отчетная продукция, как правило, включает пояснительную записку о проведении работ (технический отчет), а также графические приложения в виде созданных топографических планов, чертежей и трехмерных моделей. Помимо этого, в отчетную документацию могут входить результаты экспертиз, акты контроля точности и согласования готовой продукции. Перечень материалов, входящих в состав отчетной продукции, регламентируется требованиями технического задания и предписанием рабочей программы.

2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

2.1. Обзор функциональных возможностей программного обеспечения

Все производители наземных лазерных сканеров предлагают свое ПО для управления сканером и обработки результатов сканирования. При этом большинство программ обработки позволяет решать прикладные задачи в различных областях народного хозяйства. Например, фирма Riegl Laser Measurement Systems GmbH производит в настоящее время ПП Riscan Pro, Trimble – 3D-Extractor, PointScape, RealWorks Survey, 3Dipsos. Кроме того, ПО, предназначенное для обработки результатов сканирования, выпускается фирмами, не производящими сканеры, например RapidForm фирмы INUS Technologies [6].

Программные продукты, применяемые в технологии лазерного сканирования, в зависимости от их функционального назначения можно разделить на управляющее ПО, ПО для создания единой точечной модели, ПО для построения трехмерных моделей и двумерных чертежей по данным сканирования и комплексное ПО (табл. 1).

ПО, предназначенное для управления НЛС, является неотъемлемой частью приборов, так как учитывает различного рода ошибки в результатах измерений (например, постоянные и законопостоянные ошибки дальномера, эксцентриситеты осей вращения и др.).

В настоящее время производители ПО стремятся создавать комплексные программные продукты, позволяющие одновременно решать задачи управления наземным лазерным сканером, обработки полученных результатов и включающие функции систем автоматизированного проектирования, например:

– сравнение реальной модели с проектной, и вывод графической информации о имеющихся расхождениях;

– редактирование векторной трехмерной модели;

– создание модели в виде Solid различной формы, т. е. в виде твердого трехмерного тела, а не набора полигонов и структурных линий и др.

Таблица 1

Классификация ПП, применяемых при наземном лазерном сканировании, по функциональному назначению

ПО	Назначение ПО
Управляющее ПО	– управление сканером для задания разрешения сканирования, сектора сканирования путем визуального выбора объектов, режима сканирования, режима работы цифровой камеры; – визуализация сканов в режиме реального времени; – контроль получаемых результатов; – настройка и калибровка сканера; – тестирование сканера, выявление возможных неисправностей; – учет ошибок, связанных с влиянием внешних условий окружающей среды; – объединение сканов; – внешнее ориентирование сканов; – экспорт результатов сканирования
ПО для создания единой точечной модели	– объединение сканов; – внешнее ориентирование сканов; – редактирование точечной модели: сегментирование и разрежение; – визуализация точечной модели; – экспорт и печать
ПО для построения трехмерных моделей и двумерных чертежей по данным сканирования	– создание по массиву точек нерегулярной триангуляционной сети (TIN) и NURBS-поверхности; – редактирование TIN; – создание модели объекта с помощью геометрических примитивов; – профилирование; – построение чертежей; – проведение измерений (длин, диаметров, площадей, объемов объектов); – визуализация построенной модели; – автоматизированные механизмы создания чертежей; – построение изолиний; – возможность сравнения построенной модели с проектной; – текстурирование трехмерной модели; – экспорт и вывод на печать результатов обработки данных НЛС
Комплексное ПО	– все функции управляющего ПО;создание точечной модели;построение трехмерных моделей и двумерных чертежей по данным наземного лазерного сканирования

В настоящее время существует большое разнообразие программных продуктов для обработки данных наземного лазерного сканирования, поэтому авторами был выполнен обзор функциональных возможностей наиболее распространенного программного обеспечения. Основные функции этих ПП приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные функции, реализованные в ПО для обработки данных лазерного сканирования

Группы функций	Экспорт/ Импорт			Ориентирование			Работа с точечной моделью					Построение двумерных чертежей	
Функции / ПО	импорт сканерных данных других форматов	экспорт в CAD-программы	импорт из CAD-программ	ориентирование сканов по опорным точкам	ориентирование сканов по связующим точкам	комплексное ориентирование	различные варианты цветовой визуализации точечной модели	фильтрация точечной модели	выполнение измерений по точечной модели	построение профилей и сечений по точечной модели	построение ортоизображений по точечной модели	построение двумерных чертежей по массиву точек	создание текстовых объектов
Trimble 3Dipsos 3.0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Trimble RealWorks Survey		●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●
3rd Tech SceneVision-3D		●		●	●		●					●	●
Callidus 3D-Extractor		●		●	●		●						●
Cyclone CloudWorx		●	●				●	●	●	●		●	●
Cyclone	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●
FARO Scene		●	●	●	●				●	●	●	●	●
I-Site VoidWorks	●	●					●	●	●	●		●	
I-Site Studio	●	●	●	●	●		●	●	●	●		●	●
Metris Focus Inspection	●	●	●					●	●	●			●
Metris Focus Reverse	●	●	●					●	●	●			●
Riegl RiSCAN PRO				●			●	●	●			●	
Z+F LFM Modeller		●	●	●			●	●	●			●	
PolyWorks/Inspector	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	
PolyWorks/Modeller	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●
Inus RapidForm2006	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●
Inus RapidFormXO	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●
Kubit PointCloud		●	●				●	●	●	●		●	●
Topotek Reconstructor		●		●	●		●	●	●	●	●	●	
Geomagic Studio			●	●	●	●	●	●	●		●		●

Продолжение табл. 2

Группы функций	Плоские триангуляционные сети						Твердотельное моделирование					
Функции / ПО	построение плоских триангуляционных сетей	редактирование плоских триангуляционных сетей	текстурирование плоских триангуляционных сетей	инспектирование плоских триангуляционных сетей	построение сечений триангуляционной сети	определение объемов и площадей плоских триангуляционных сетей	построение твердотельных объектов по точечной модели	независимое построение твердотельных объектов	построение моделей промышленных конструкций	поддержка библиотек элементов	поддержка работы со слоями	измерения по трехмерной модели
Trimble 3Dipsos 3.0	●	●	●		●	●	●		●	●	●	●
Trimble RealWorks	●	●	●	●	●	●						
3rd Tech SceneVision-3D												
Callidus 3D-Extractor	●			●		●	●					
Cyclone CloudWorx							●	●	●		●	●
Cyclone	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●
FARO Scene	●					●	●					●
I-Site VoidWorks	●	●			●	●						
I-Site Studio	●	●			●	●						
Metris Focus Inspection	●	●		●	●	●						
Metris Focus Reverse	●	●			●	●						
Riegl RiSCAN PRO	●	●	●									
Z+F LFM Modeller	●	●					●		●			
PolyWorks/Inspector				●								●
PolyWorks/Modeller	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●
Inus RapidForm2006	●	●	●	●	●	●	●				●	●
Inus RapidFormXO	●	●		●	●	●	●				●	●
Kubit PointCloud							●	●	●		●	●
Topotek Reconstructor	●	●	●	●								●
Geomagic Studio	●	●	●	●	●	●						●

Окончание табл. 2

Группы функций	Объемные триангуляционные сети и NURBS							Управление сканером	
Функции / ПО	построение объемных триангуляционных сетей	редактирование объемных триангуляционных сетей	текстурирование объемных триангуляционных сетей	работа с NURBS	инспектирование трехмерных моделей	выдача отчетов по инспектированию моделей	определение объемов и площадей трехмерных объектов	управление одной моделью сканера	управление несколькими моделями сканеров
Trimble 3Dipsos 3.0	•	•	•				•		
Trimble RealWorks Survey						•			
3rd Tech SceneVision-3D									
Callidus 3D-Extractor									
Cyclone CloudWorx									
Cyclone								•	•
FARO Scene									
I-Site VoidWorks	•	•					•		
I-Site Studio	•	•					•	•	•
Metris Focus Inspection	•	•			•	•	•		
Metris Focus Reverse	•	•		•			•		
Riegl RiSCAN PRO								•	
Z+F LFM Modeller									
PolyWorks/Inspector					•	•			
PolyWorks/Modeller	•	•		•			•		
Inus RapidForm2006	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Inus RapidFormXO	•	•			•	•	•		
Kubit PointCloud									
Topotek Reconstructor			•						
Geomagic Studio	•	•	•	•	•	•	•		

•- данная функция реализована в ПО

На основе анализа программ, предназначенных для управления сканером и обработки данных наземного лазерного сканирования и практического опыта их применения, рекомендуется при выборе ПП для решения конкретных задач учитывать их функциональные возможности, удобство интерфейса и скорость выполнения тех или иных операций.

2.2. Управляющее программное обеспечение

В работе [3] приведен обзор наземных лазерных сканеров и фирм, производящих их. Для каждой марки НЛС выпускается свое программное обеспечение, позволяющее выполнять управление лазерным сканером. Основные функции управляющего программного обеспечения представлены в табл. 1. Рассмотрим их более подробно.

Выбор области и разрешения сканирования. Данные функции необходимы, во-первых, для того, чтобы сократить время работы на сканерной станции, во-вторых, это позволяет уменьшить объем получаемой информации. В большинстве случаев сначала съемку территории вокруг сканера выполняют по параметрам, рекомендованным заводом-изготовителем. Эта съемка носит название «обзорное» или «панорамное» сканирование. Затем более детально (с более высоким разрешением) снимают интересуемую область, которая представляет собой часть всего поля зрения НЛС.

В зависимости от модели сканера выбор области сканирования осуществляется одним из способов:

а) путем ввода численных параметров, представляющих собой начальные и конечные значения углов сканирования по горизонтали и вертикали [7];

б) по цифровой фотографии или видеоизображению, полученным при помощи встроенной в НЛС камеры [8, 9];

в) по «обзорному» или «панорамному» скану, полученному на данной точке стояния сканера [7].

В каждом программном продукте реализовано несколько способов задания области сканирования.

При использовании первого способа участок сканирования фактически задается координатами его углов в полярной системе координат скана. В этом случае область сканирования представляет собой прямоугольник.

При использовании двух других способов зону сканирования можно задать в виде полигона произвольной формы.

Некоторые программные продукты позволяют одновременно указать несколько областей сканирования и для каждой из них выбрать индивидуальное разрешение съемки. При этом после запуска НЛС будет последовательно выполняться сканирование каждого участка без вмешательства оператора.

Для каждой области можно задать либо количество повторных сканирований при реализации в НЛС непрерывного способа вращения головки и сканирующей призмы, либо число измерений на каждую точку в случае шагового способа поворота сканирующих элементов. Данная функция позволяет уменьшить величину случайных ошибок в результатах сканирования. Как показали практические исследования, увеличение данных параметров свыше девяти не приводит к повышению точности, однако при этом возрастает время сканирования.

Разрешение сканирования в зависимости от удаления объекта съемки относительно сканера можно задавать как в угловой мере, так и в линейной.

Визуализация сканов. В различных управляющих программных продуктах визуализация сканов осуществляется в 2D- или 3D-режиме. Данная функция позволяет в онлайн-режиме контролировать процесс съемки (качество и детальность) и определять «мертвые» зоны при сканировании.

Учет метеопараметров и ввод параметров калибровки НЛС являются очень важными функциями при выполнении высокоточных работ с помощью лазерных сканеров, так как позволяют исключить ошибки сканирования, вызванные влиянием атмосферы, и инструментальные погрешности прибора.

Внешнее ориентирование сканов. В первых версиях многих управляющих программных продуктов не были реализованы алгоритмы внешнего или взаимного ориентирования сканов, что вызывало определенные трудности при дальнейшем использовании результатов сканирования. В этом случае для приведения сканов в заданную систему координат необходимо было выполнить экспорт полученных сканерных данных в другие программные продукты, что требовало значительных временных затрат. В настоящее время внешнее ориентирование сканов выполняется в управляющем программном обеспечении. Кроме того, некоторые

производители предлагают дополнительные модули к управляющему ПО для уравнивания сканов.

Цифровая съемка встроенной или внешней цифровой камерой. Эта функция позволяет управлять процессом получения снимков при помощи цифровой камеры. В качестве параметров настроек задается область, которую необходимо сфотографировать.

Для триангуляционных наземных лазерных сканеров, выпускаемых в настоящее время, в качестве параметров настроек при съемке задается расстояние, на которое необходимо сфокусировать камеру (автоматически либо в интерактивном режиме), количество сканирований (проходов) объекта и контрастность цифровых изображений.

2.3. Программные продукты Cyclone для создания топографических планов и чертежей по данным лазерного сканирования

Топографический план представляет собой отображение на плоскости ситуации и рельефа, который указывается в виде горизонталей и отметок точек объектов или поверхности Земли [11]. Чертеж также является двумерным представлением объекта, но при этом обычно третья координата не отображается.

Технологическая схема создания цифровых топографических планов (ЦТП) по данным наземного лазерного сканирования была представлена на рис. 1. Для этих целей можно использовать ПП Cyclone (версия 5.2.1), получившее наиболее широкое распространение в России и позволяющее более полно овладеть приемами обработки данных лазерного сканирования. Рассмотрим технологию создания ЦТП с применением ПО Cyclone.

Создание топографических планов и двумерных чертежей в программном продукте Cyclone. В программном продукте Cyclone имеется несколько вариантов составления двумерных чертежей и планов, а именно:

– с использованием функции Virtual Surveyor (в переводе с английского – виртуальный топограф) [12, 13];

– с применением модуля CloudWorx, который является приложением к программным продуктам САПР AutoCAD, Microstation, системе проектирования Aveva PDMS [14, 15];

– с помощью функций двумерного рисования на плоскости проецирования (относимости) 2D Drawing [12, 13].

Практический опыт показал, что применение функции Virtual Surveyor (Tools→Virtual Surveyor) создания двумерных чертежей является наименее производительным по сравнению с остальными. Данная функция предназначена для набора пикетов (рис. 3) по точечной модели, для которых указывается семантическая информация. Полученные координаты пикетов экспортируются в файл в виде текстового формата данных, а также в формат AutoCAD Desktop XML или в стандартный формат Leica System 1200, который предназначен для обмена данными с традиционными геодезическими инструментами Leica – электронными тахеометрами, спутниковыми приемниками или комбинированным прибором Leica Smart-Station. Текстовые файлы удобно использовать для передачи данных в геоинформационную систему или систему автоматизированного проектирования, где выполняется оформление чертежей и планов. Как видно из сущности работы с функцией Virtual Surveyor, в этом случае создание чертежей и планов по массиву точек аналогично «тахеометрической съемке».

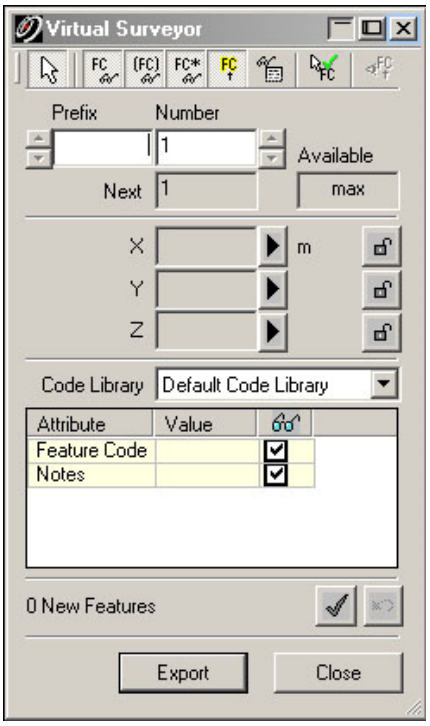


Рис. 3. Диалоговое окно функции Virtual Surveyor

Данную функцию удобно применять для сбора высотной информации, например об отметках колодцев, бордюрных камней, высотах арочных проемов и т. д.

Для выноса точек объекта в натуру или последующей привязки сканерных станций можно использовать текстовый файл с координатами точек. Такие процедуры имеются в модуле Cyclone SCAN, который предназначен для управления работой сканера.

Второй способ создания ЦТП заключается в том, что результаты наземного лазерного сканирования подгружаются в программный продукт системы автоматизированного проектирования, например, AutoCAD,

Microstation, AVEVA PDMS или Intergraph SmartPlant Review, где выполняется обработка массива точек. Приложение CloudWorx предназначено для визуализации сканов и точечных моделей в программах САПР без специального конвертирования в соответствующие форматы. Удобство работы с CloudWorx заключается в том, что данные наземного лазерного сканирования подгружаются напрямую из базы данных Cyclone без загрузки в файл AutoCAD или другой программы. При этом не существует никаких ограничений по объему отображаемых данных. Для удобства визуализации можно ограничивать область отображения массива точек по одной из плоскостей или делать сечения [13, 14].

Для работы с массивами точек могут быть использованы все функции перечисленных систем автоматизированного проектирования. При работе с приложением CloudWorx Pro дополнительно можно использовать мощные автоматические функции моделирования геометрических объектов, такие же как в основном модуле Cyclone MODEL.

При использовании третьего варианта создания топографических планов (в дальнейшем речь будет идти о топографических планах, но все действия выполняются аналогично и для построения чертежей) по данным наземного лазерного сканирования сначала задается плоскость проецирования, на которую будут проецироваться геометрические объекты, с помощью функции Tools→Reference Plane, как показано на рис. 4. В программном продукте Cyclone в качестве плоскости проецирования для создания топографических планов используется базовая плоскость «Reference Plane», располагаемая параллельно плоскости XY системы координат, в которой создается план (рис. 5).

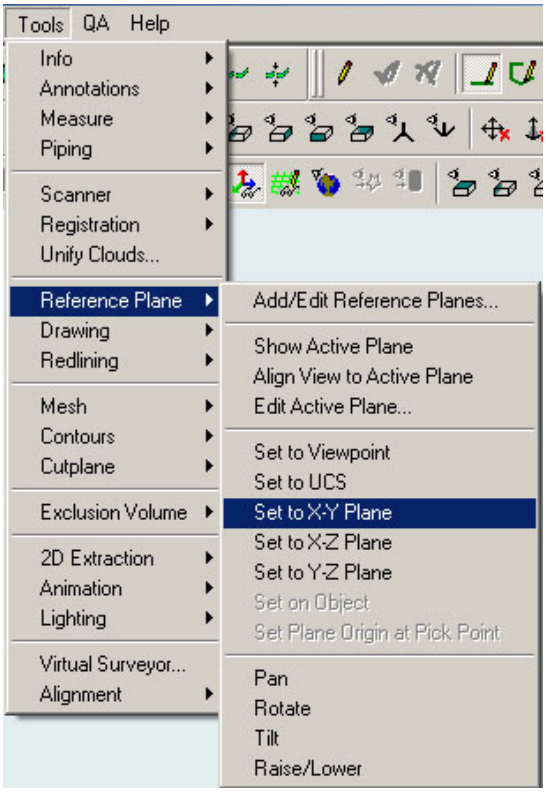


Рис. 4. Создание плоскости относимости

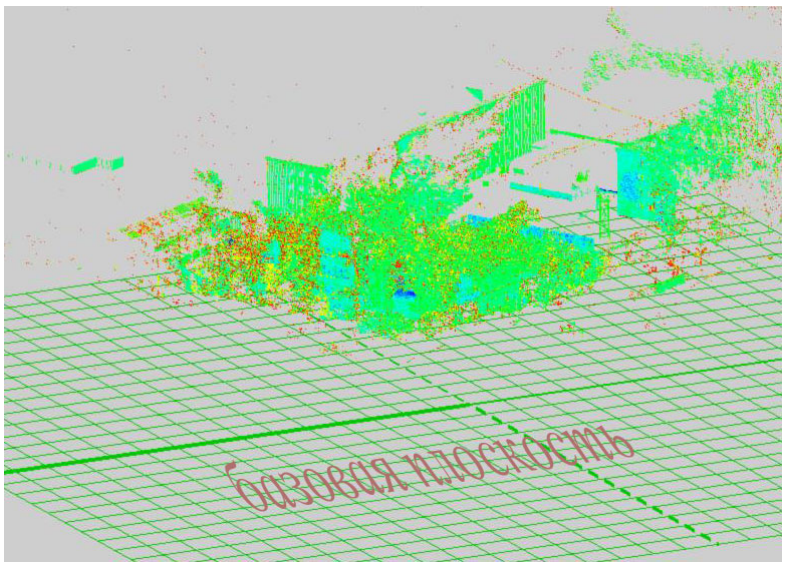


Рис. 5. Взаимное положение точечной модели и плоскости проецирования при построении контурной части ЦТП по данным лазерного сканирования

Плоскость проецирования лучше располагать под точечной моделью, так как в данном случае отрисованные полилинии не будут закрывать точечную модель. Векторизация массива точек выполняется с помощью операции Tools→Drawing инструментов рисовки на плоскости «2D Drawing Tools».

При визуализации точечной модели на экране монитора необходимо задать ее отображение в ортогональной проекции, что осуществляется функцией Viewpoint→Orthographic. При этом направление взгляда оператора, осуществляющего обработку, должно быть перпендикулярно плоскости проецирования [15, 16], что выполняется при помощи операции Viewpoint→Standard viewpoint→Top. При векторизации объектов с целью создания топографических планов в программном продукте Cyclone следует отключать возможность вращения точечной модели при помощи функции Viewpoint→View Lock→Rotate.

Как показал опыт составления топографических планов по данным наземного лазерного сканирования, важной особенностью векторизации точечной модели является то, что узлы полилиний создаваемого двумерного плана топологически не связаны с точечной моделью. Вследствие влияния на результаты сканирования (главным образом на измеренные расстояния) атмосферных условий и метрологических свойств объектов точечная

модель содержит шумовую составляющую. Визуально это выражается в «рыхлости» поверхности объектов, отображаемой точечной моделью, например, отсканированная плоскость будет иметь некоторую толщину, зависящую от степени шумовой составляющей, а на углах и гранях этой плоскости будут иметь место точки, «висящие в воздухе», т. е. не принадлежащие объекту съемки (рис. 6) [16].

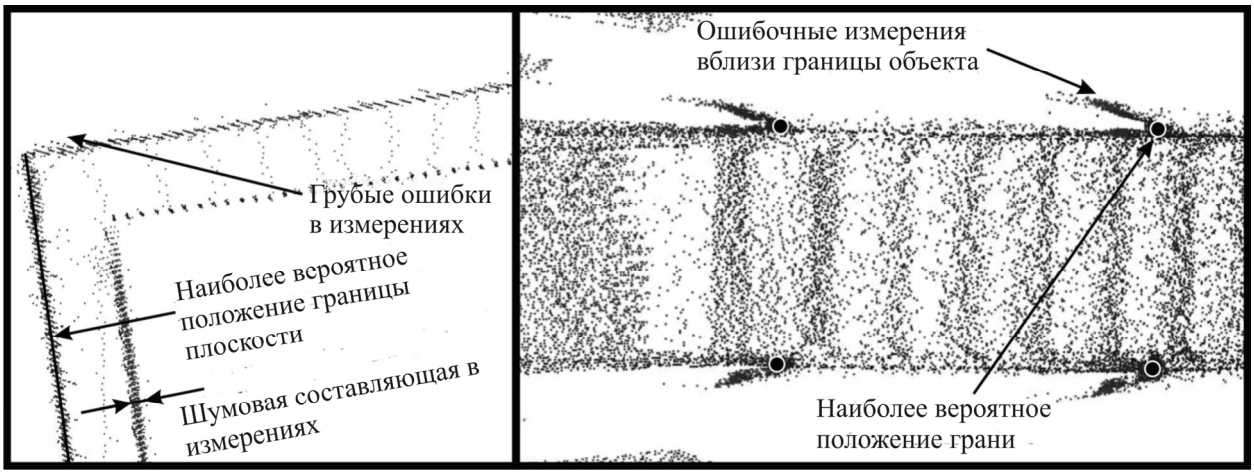


Рис. 6. Шумы в измерениях, вызванные свойствами
отражающих поверхностей

Для уменьшения влияния шумов на точность создания ЦТП при векторизации точечной модели необходимо проводить линии, отображающие границы объектов, в виде тренда, характеризующего вероятнейшее положение контура на плане (см. рис. 6) [16, 17].

Объекты ЦТП по характеру локализации можно разделить на три типа: площадные, линейные и точечные.

Основными площадными объектами являются здания, сооружения, бетонные и металлические площадки и т. д., которые в ПП Cyclone в зависимости от формы контура векторизуются с использованием следующих типов инструментов:

– Draw Rectangle – прямоугольные объекты;

– Draw Square – квадратные объекты;

– Draw Circle (3 point on Circle), Draw Circle (Point, Centre) – объекты, которые при проецировании на базовую плоскость, представляют собой окружность;

– Draw Ellipse – объекты, проекцией которых на базовую плоскость, является эллипс;

– Draw Isometric Polygon – объекты, которые при проецировании на плоскость отображаются правильными *n*-угольниками;

– Draw Polygon – для объектов, имеющих другие формы.

При использовании функции «2D Drawing Tools», убедившись в том, что объект нарисован по точечной модели правильно, необходимо нажать правую кнопку мыши и в выпадающем меню выбрать операцию Create Drawing, с помощью которой будет создана векторная модель объекта. Если объект нарисован неверно, то для отмены рисовки в меню следует нажать Cancel Drawing.

Основными линейными объектами являются трубопроводы, кабельные и электрические сети, ограждения, элементы рельефа, дороги и др. Для отображения их на топографических планах в ПП Cyclone используются различные инструменты:

– если линейные объекты представляют собой замкнутый контур (рис. 7), то для их векторизации используются такие же инструменты, как и для площадных объектов;

– объекты в виде незамкнутых контуров (см. рис. 7) отрисовываются при помощи инструмента Draw Polyline;

– линейные объекты, представляющие собой часть окружности, отображаются с помощью инструментов: Draw Arc (3 point on Arc), Draw Arc (Start, End, Centre), Draw Arc (Start, Centre, End). Для рисовки таких объектов указываются две точки на дуге окружности и одна в ее центре.

В программном продукте Cyclone имеются и другие инструменты «рисования», а именно Draw Cubic Spline и Draw Cubic Spline Loop, однако ими не рекомендуется пользоваться при создании топографических планов, поскольку могут иметь место случаи некорректного экспорта файлов с результатами векторизации в форматы ГИС.

Основными точечными объектами являются оборудование на трубопроводах, осветительные мачты, опоры линий электропередачи и кабельных эстакад, колодцы, скважины, отдельно стоящие деревья и кустарники. Объекты с точечным характером локализации векторизуются в ПП Cyclone в виде точек, располагаемых в центре объекта. Для создания точечных

объектов сначала указывается центр объекта с использованием функции Edit→Modes→Pick Modes, затем, выполняя следующие операции Create Object→From Pick Point→Vertex, либо Create Object→Insert→Vertex, создается модель точечного объекта.

Рис. 7. Примеры линейных объектов

Примеры создания контуров некоторых объектов по данным наземного лазерного сканирования представлены на рис. 8.

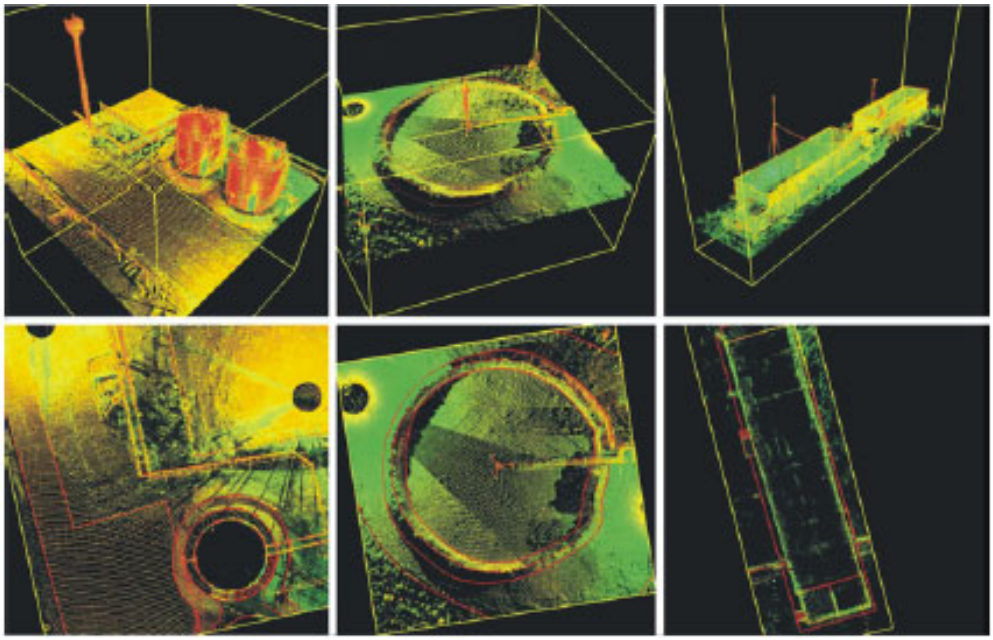


Рис. 8. Примеры создания контуров объектов по данным лазерного сканирования

С целью создания топографических планов векторизацию точечной модели необходимо осуществлять от общего к частному (сначала отображаются основные объекты, связи между ними, затем остальные объекты) в следующей последовательности:

– основные строения, сооружения;

– трубопроводы;

– задвижки, заглушки и другое оборудование на трубопроводах;

– площадки, ограждения, кабельные эстакады, дороги, тротуары;

– элементы рельефа;

– остальные объекты (растительность, гидрография и др.).

При создании двумерных чертежей рисовка всех элементов (мелких и крупных) выполняется одновременно.

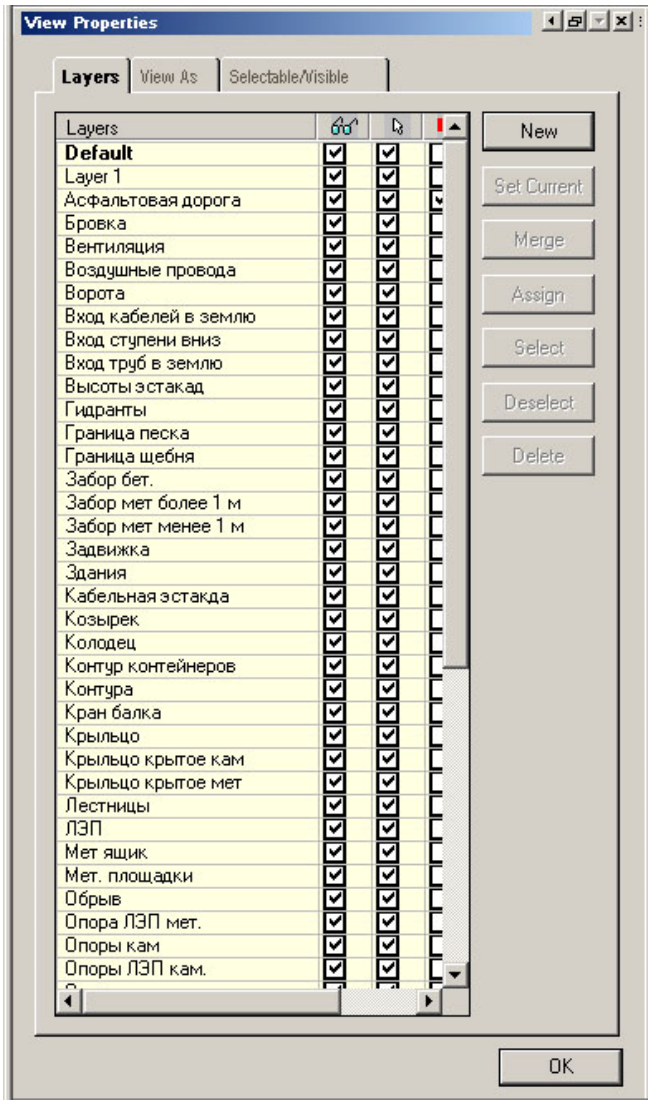


Рис. 9. Диалоговое окно для работы с тематическими слоями

При векторизации объектов ситуации необходимо разделять их по тематическим слоям, требования к составу и содержанию которых определяются в процессе проектирования работ [15]. Вид диалогового окна при работе с тематическими слоями представлен на рис. 9. В результате векторизации точечной модели создается плановая часть ЦТП, разделенная по тематическим слоям.

Высотная составляющая является неотъемлемой частью ЦТП. Полученная в результате векторизации плоская векторная модель объектов ситуации не несет информации о высотных характеристиках объектов и рельефа. При обработке данных

наземного лазерного сканирования отметки точек наиболее целесообразно определять путем построения вертикального среза точечной модели, проходящего через искомую точку. Результатом данной операции будет являться профиль точечной модели. Толщину среза необходимо подбирать таким образом, чтобы получаемый профиль позволял однозначно определять отметку интересующей точки. При создании сечения важно соблюдать, чтобы его плоскость была перпендикулярно или параллельно ориентирована относительно рассекаемого объекта (рис. 10, *а*, *в*).

При несоблюдении данного требования профиль точечной модели получается нечетким, т. е. искаженным (рис. 10, *б*, *г*).

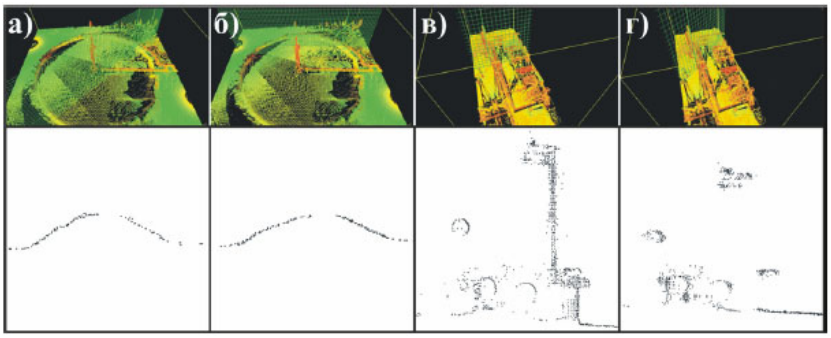


Рис. 10. Профили точечной модели при правильной (*а*, *в*) и неправильной (*б*, *г*) ориентации секущей плоскости

Отметки отдельных точек сооружений или рельефа определяются в следующей последовательности. В первую очередь наносится плановое положение данных точек на плоскость проецирования, т. е. создаются векторные объекты типа «точка». Там, где необходимо в соответствии с требованиями инструкции, точки привязываются к узлам плоской векторной модели. Для определения отметок точек выполняется сечение точечной модели вертикальной плоскостью. На получаемых профилях точки перемещаются вдоль оси Z до пересечения с точечной моделью (рис. 11).

Результатом данного этапа является набор точек с координатами Z, представляющими собой определяемые отметки сооружений и рельефа.

Для всех объектов ЦТП можно заполнить атрибутивную информацию или сделать пояснительные подписи с использованием функции Tools→Annotations→Add/Edit Annotations. При создании топографических

планов всю атрибутивную информацию, такую как средняя высота деревьев, толщина стволов, расстояние между деревьями, высота арочного проема и т. д., можно получить по точечной модели.

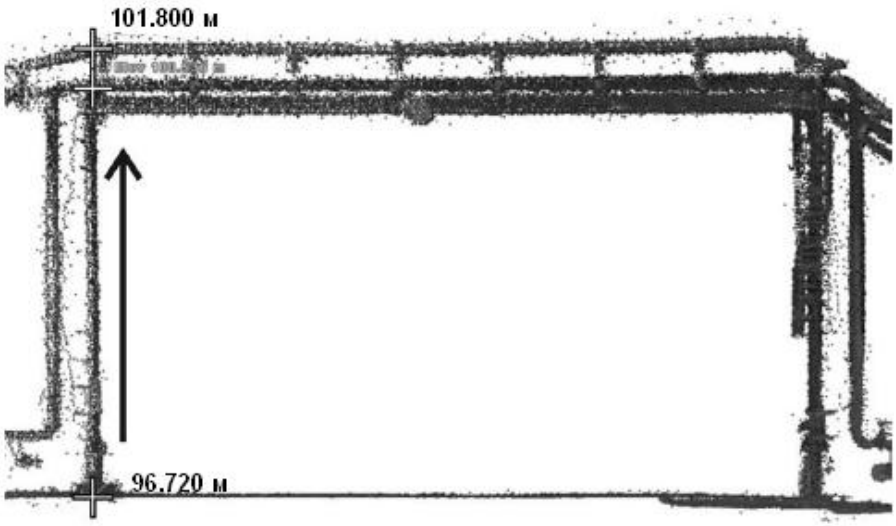


Рис. 11. Определение отметок по точечной модели

На рис. 12 показан фрагмент созданного топографического плана в программном продукте Cyclone.

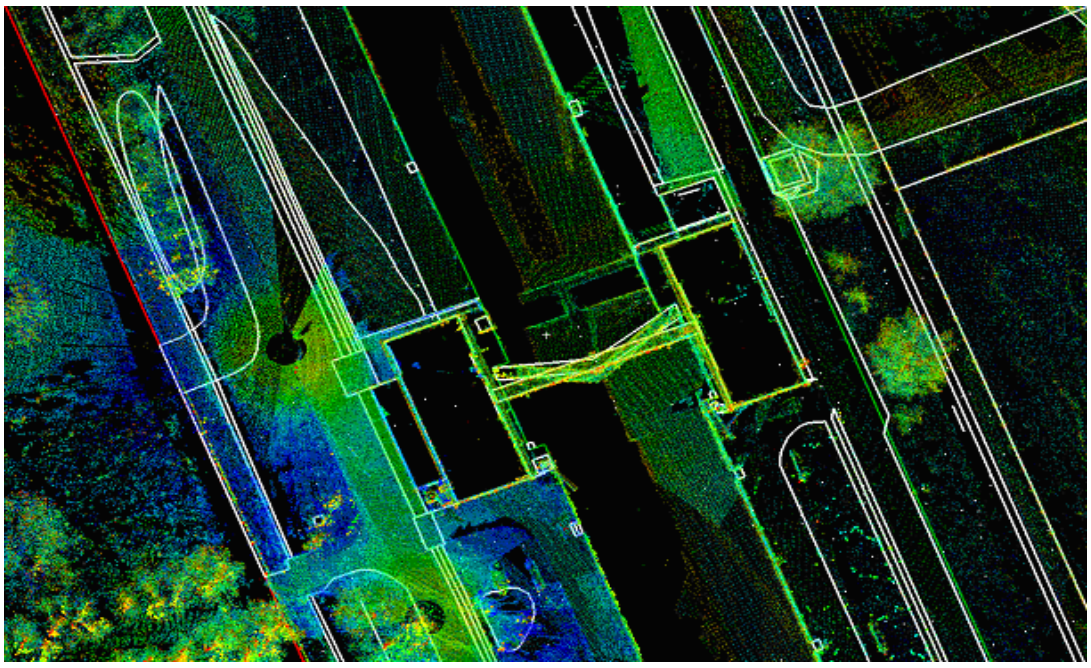


Рис. 12. Фрагмент векторной модели ЦТП Новосибирского судоходного шлюза в ПО Cyclone

После того, как топографический план или двумерный чертеж создан, выполняется экспорт векторной модели в системы автоматизированного проектирования или геоинформационные системы для дальнейшего оформления. Обычно это осуществляется через обменный формат COE (Cyclone Object Exchange), хотя возможны и другие варианты. На рис. 13 представлена векторная модель ЦТП в геоинформационной системе MapINFO.

Описанная технологическая схема является основной при создании топографических планов и двумерных чертежей в ПП Cyclone по данным наземной лазерной съемки в Региональном центре лазерного сканирования СГГА. Она с успехом применялась при выполнении проектов на различные объекты.

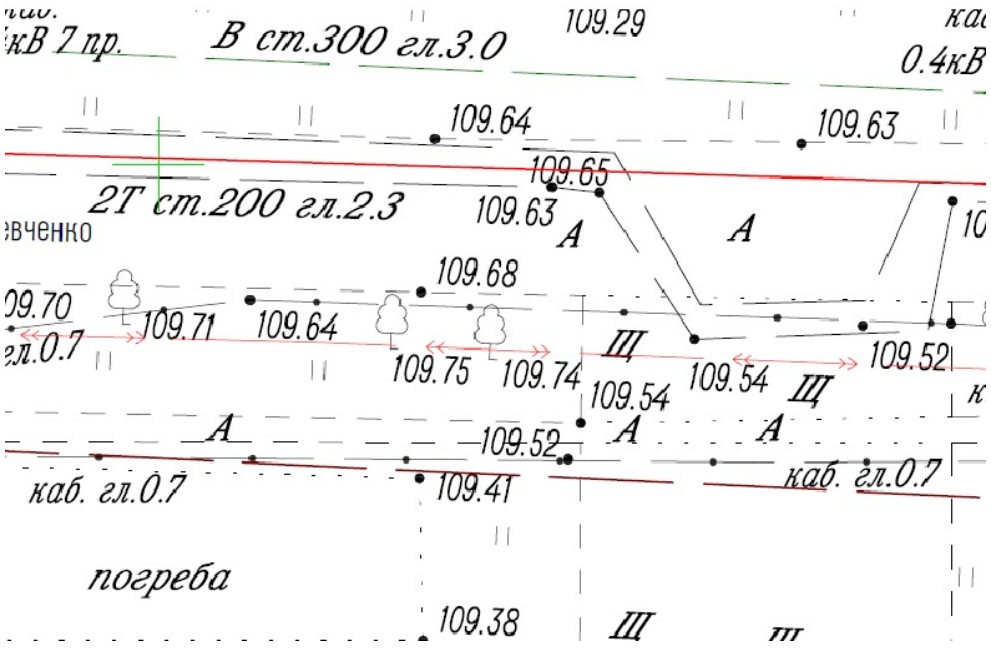


Рис. 13. Фрагмент построенной векторной модели объектов в ГИС MapINFO

2.4. Трехмерное моделирование технологических объектов в программном продукте Cyclone

В настоящее время наиболее мощным программным продуктом для обработки данных наземного лазерного сканирования с целью построения трехмерных моделей технологических объектов является ПО Cyclone [12, 18, 19].

Основная часть работ в технологии построения трехмерных моделей объектов ситуации и рельефа по данным наземного лазерного сканирования приходится на камеральную обработку результатов съемки, выполненной при помощи НЛС.

Программное обеспечение Cyclone предназначено для построения трехмерных моделей в виде геометрических примитивов, Mesh-поверхности, а также структурных линий объектов. Кроме того, в этом программном продукте реализованы функции, позволяющие создавать векторную модель в виде плоских чертежей.

Модуль Model ПО Cyclone предназначен для векторизации массива точек, с помощью моделей цилиндров, плоскостей, криволинейных поверхностей, отдельных элементов трубопроводов (задвижек, отводов), различных металлоконструкций (уголков, швеллеров, двутавров) и др. Также в данном модуле имеются дополнительные функции редактирования (сдвиг, поворот, выдавливание и т. д.) создаваемых моделей объектов и возможность конвертирования в форматы, совместимые с CAD-программами.

Трехмерное моделирование объектов ситуации на основе геометрических тел (рис. 14) и примитивов (рис. 15) с успехом применяется для построения моделей технологических объектов, в состав которых входят трубопроводы, двутавровые балки, швеллеры и др.

Для построения трехмерных векторных моделей в виде геометрических примитивов в ПО Cyclone используются следующие режимы:

– автоматический;

– полуавтоматический;

– интерактивный.

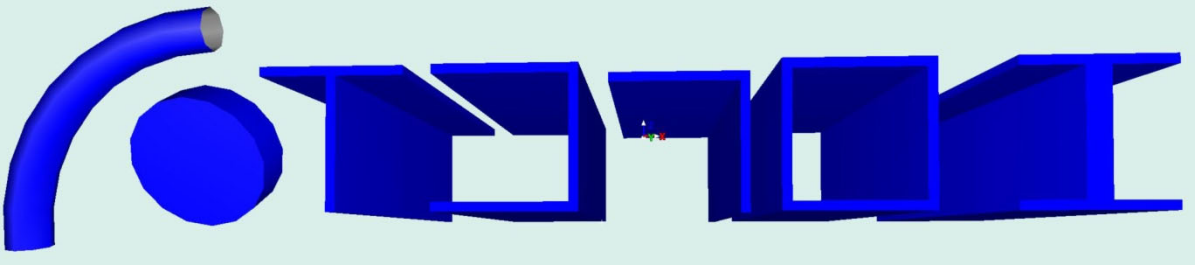


Рис. 14. Формы геометрических тел в программном продукте Cyclone

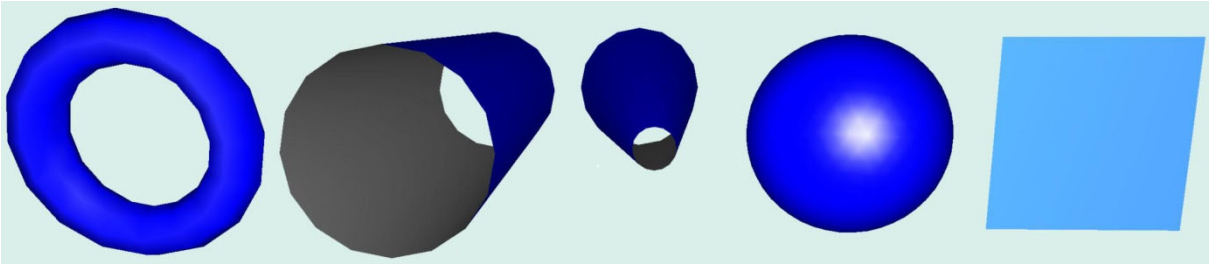


Рис. 15. Формы геометрических примитивов в программном продукте Cyclone

Сущность данных режимов для построения трехмерных векторных моделей заключается в следующем.

Автоматический режим вписывания геометрических примитивов при построении трехмерной модели объекта. При использовании данного режима выполняется анализ точечной модели вокруг выбранной точки, на основе чего осуществляется встраивание геометрического примитива в массив точек. Реализация данной функции в программном продукте Cyclone состоит в следующем.

На первом этапе с помощью функции Create Object→Region Grow выделяется массив точек и указывается тип встраиваемого примитива (рис. 16).

Затем выводится окно с рассчитанными параметрами примитива, а на точечной модели в белый цвет раскрашиваются точки, принятые в обработку (рис. 17).

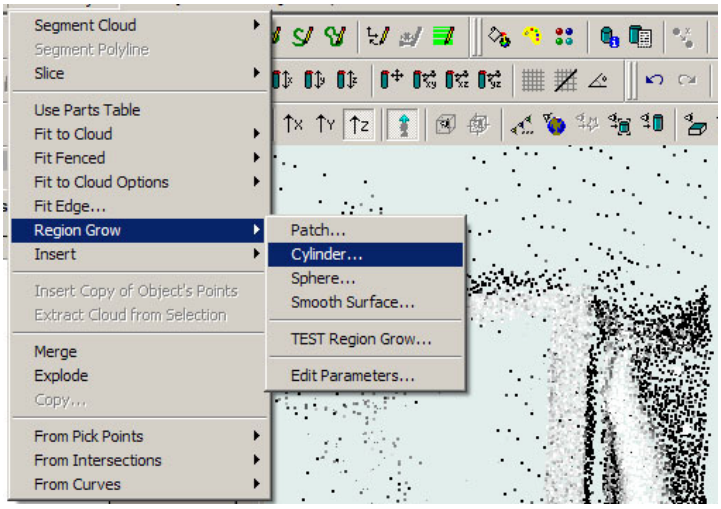


Рис. 16. Диалоговое окно при встраивании геометрического примитива в массив точек в автоматическом режиме

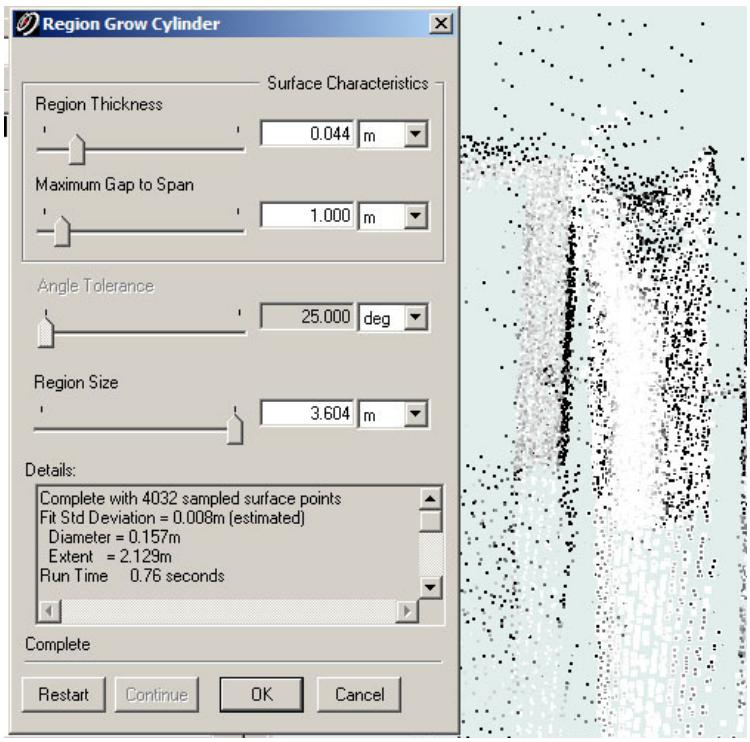


Рис. 17. Диалоговое окно оценки качества встраивания примитива и джойстики для указания параметров выбора точек, участвующих в обработке

В окне (см. рис. 17) приводится количество точек, принятых в обработку при построении примитива, его геометрические параметры, средняя квадратическая ошибка вписывания и время выполнения расчетов.

Как видно из рис. 17, ПО Cyclone позволяет оператору при встраивании геометрического примитива вмешиваться в работу алгоритма. Путем передвижения джойстиков можно изменить размер выборки, участвующей в обработке, что создает удобство при работе с программой профессионалам, а наличие настроек «по умолчанию» делает ее удобной для новичков.

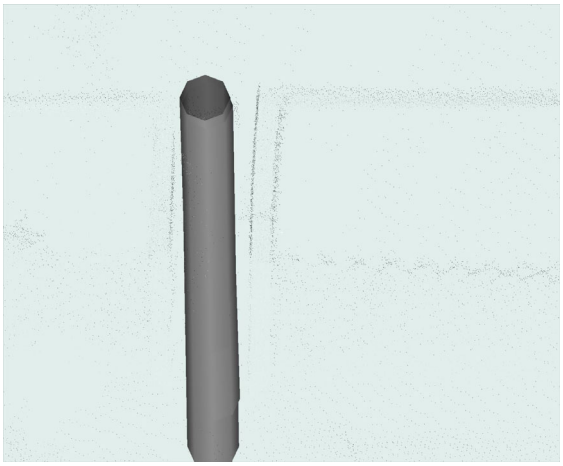


Рис. 18. Трехмерная векторная модель столба

В случае удовлетворительного качества вписывания примитива создается трехмерная модель объекта путем нажатия кнопки OK (рис. 18).

Из опыта построения трехмерных моделей объектов в ПО Cyclone автоматический режим следует использовать для моделирования объектов, отсканированных с высокой плотностью и при обработке данных с низким уровнем «шума» (факторы, влияющие на величину шума).

Автоматический режим создания трехмерных моделей объектов является наиболее точным, так как размер и положение моделируемого объекта вычисляются математически. Такая процедура позволяет добиться наиболее точного положения геометрического примитива в точечной модели, однако иногда она требует достаточно много времени. На рис. 19 показана общая технология построения трехмерной модели трубы в автоматическом режиме в ПО Cyclone.

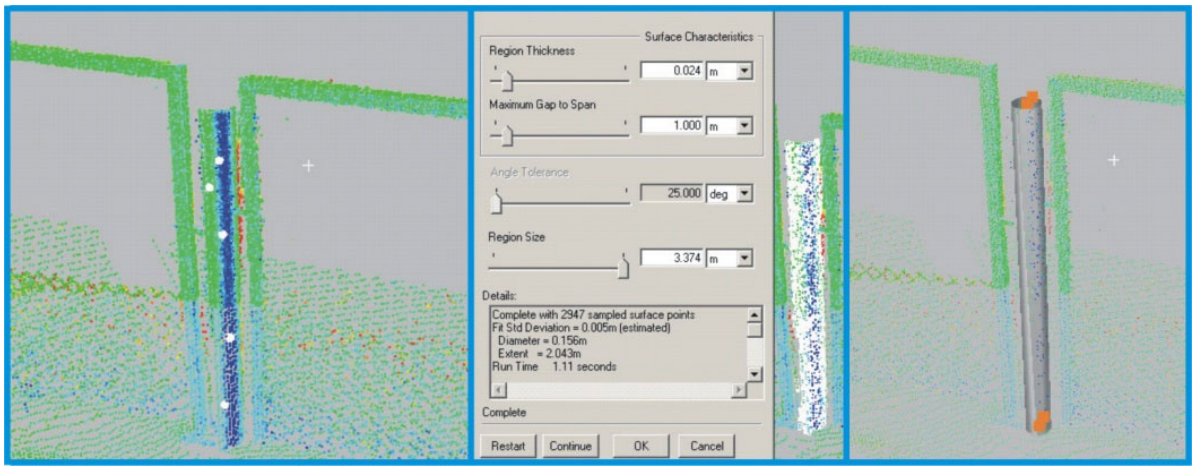


Рис. 19. Автоматическое вписывание геометрического примитива в точечную модель

Полуавтоматический режим построения трехмерной модели. Эта функция основана на оценке всей точечной модели, имеющейся в окне просмотра данных наземного лазерного сканирования (ModelSpace), и вычислении параметров геометрического тела или примитива, вписываемую в эту модель. Для трехмерного моделирования объекта с применением этой функции выполняется следующий порядок действий. Сначала при помощи инструмента Polygonal Fence Mode выделяется массив точек, принадлежащих объекту, и производится процесс копирования данных в новое окно ModelSpace с использованием функции Copy Fenced to New ModelSpace (рис. 20).

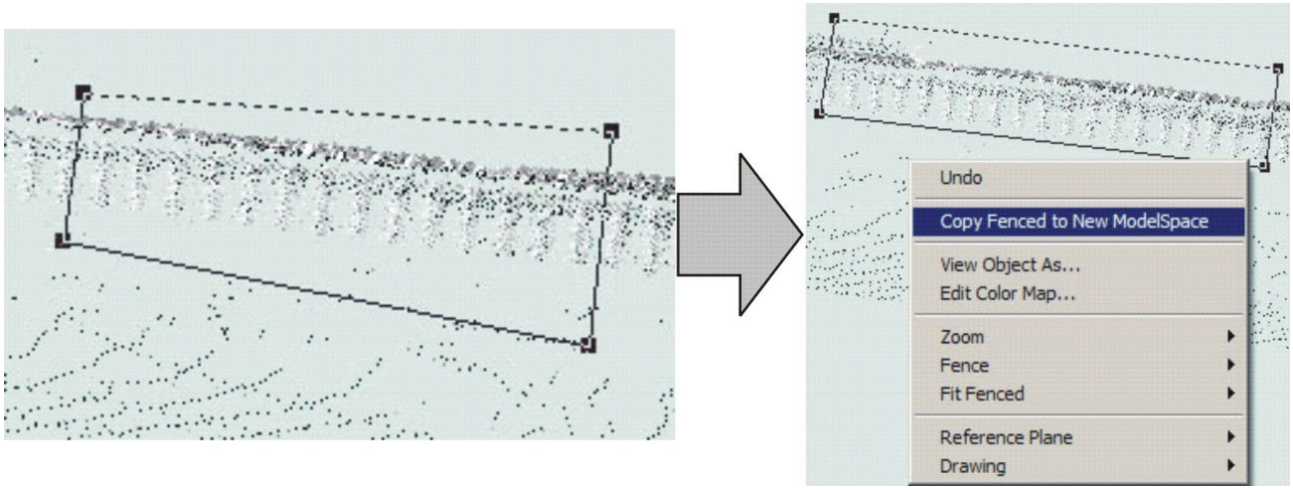


Рис. 20. Копирование массива точек, принадлежащих моделируемому объекту, в новое окно ModelSpace

Затем удаляются точки, не относящиеся к выбранному объекту моделирования (рис. 21).

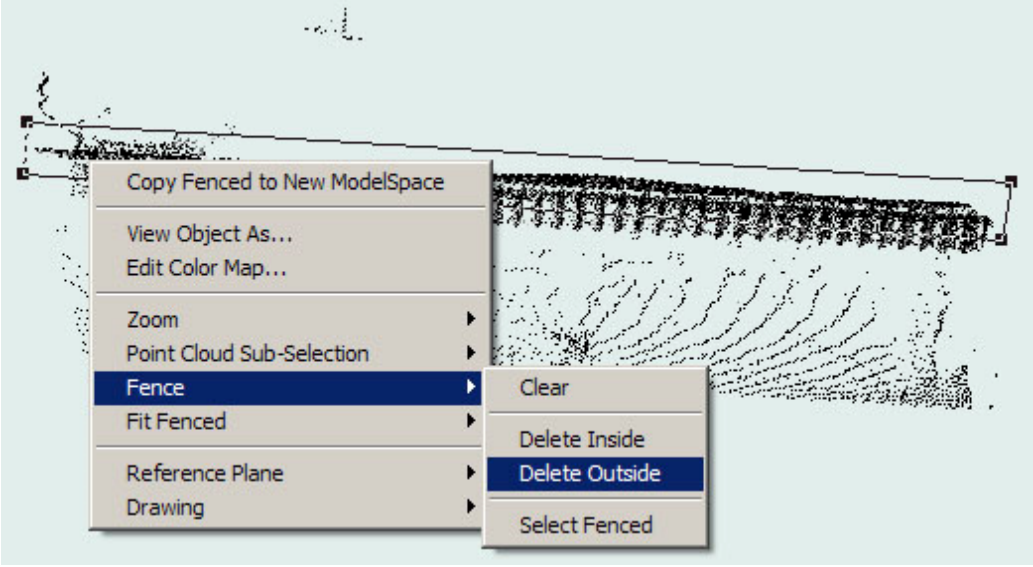


Рис. 21. Удаление точек, не принадлежащих выбранному объекту

После этого при помощи функции Create – Fit to Cloud указывается вид геометрического тела или примитива, который необходимо вписать в массив точек (рис. 22).

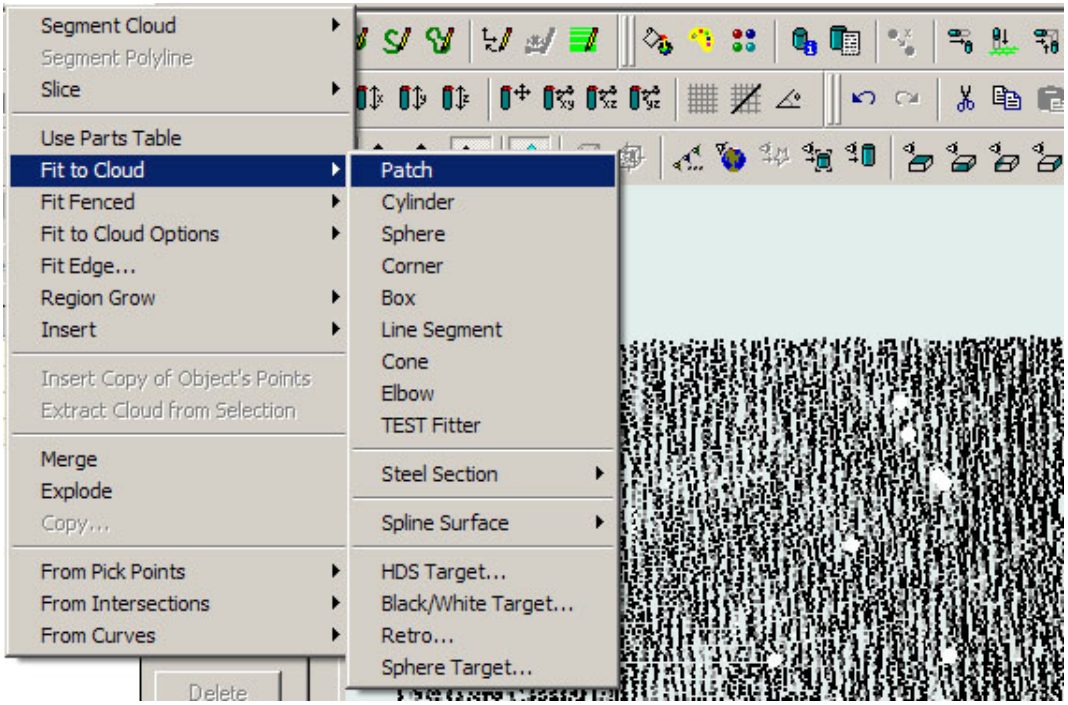


Рис. 22. Функция встраивания геометрического тела или примитива в полуавтоматическом режиме

В результате выполненных операций будет построена трехмерная модель объекта в полуавтоматическом режиме, пример которой представлен на рис. 23.

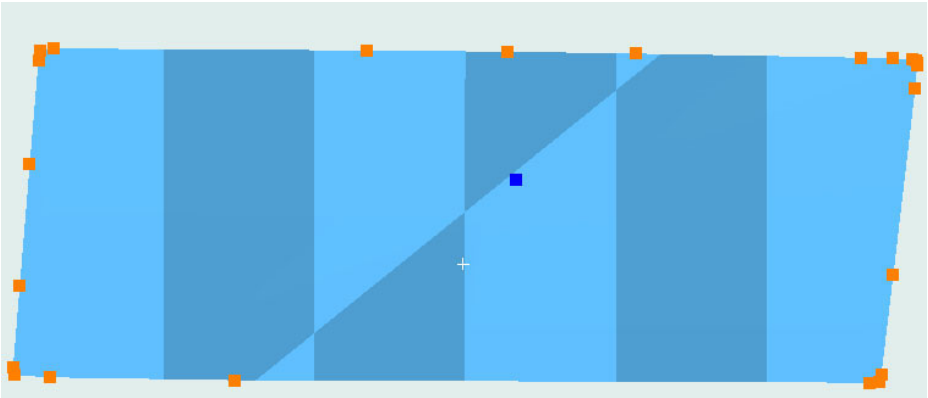


Рис. 23. Трехмерная модель построенной стены

При использовании полуавтоматического режима построения трехмерной модели объектов оценка качества моделирования производится визуально.

На рис. 24 показаны основные этапы построения трехмерной модели трубы в полуавтоматическом режиме.

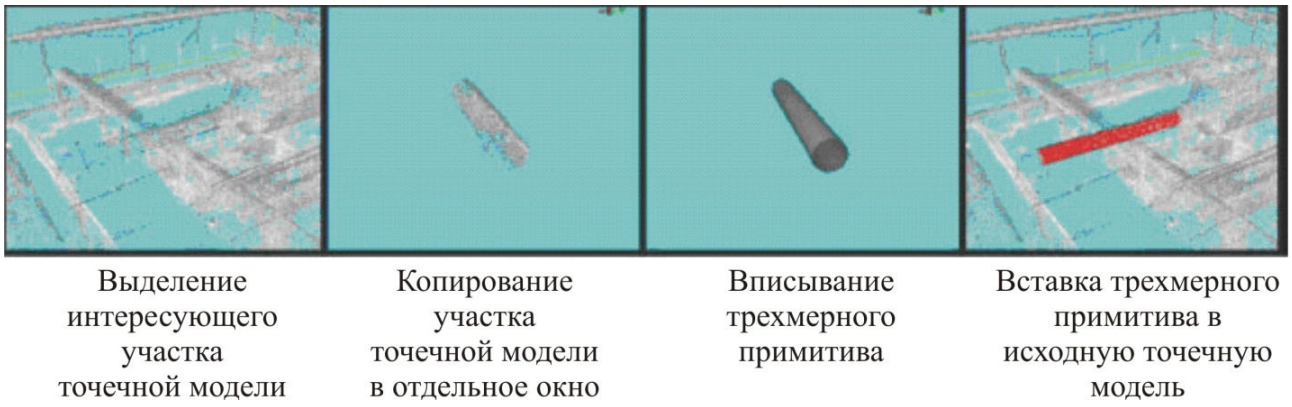


Рис. 24. Полуавтоматическое вписывание трехмерного примитива в точечную модель

Также возможен другой вариант технологии построения трехмерных моделей объектов в полуавтоматическом режиме. На точечной модели при помощи функции Polygonal Fence Mode указываются точки, в которые необходимо встроить геометрическое тело или примитив, задается функция Create Object→Fit to Fenced (рис. 25), в результате будет создана трехмерная модель объекта.

Применение того или иного варианта построения трехмерной модели в полуавтоматическом режиме в программном продукте Cyclone прежде всего обусловлено степенью загруженности объектами участка моделирования. При моделировании сложных технологических объектов наиболее эффективно использовать второй вариант полуавтоматического режима построения моделей (рис. 25).

Интерактивный режим построения трехмерной модели. Этот режим используется в случае моделирования мелких деталей объектов или при наличии сканерных данных низкого качества. Сначала с использованием абриса или цифровых снимков создается геометрическое тело или примитив, наиболее соответствующий элементу объекта, с применением функции Create Object→Insert (рис. 26).

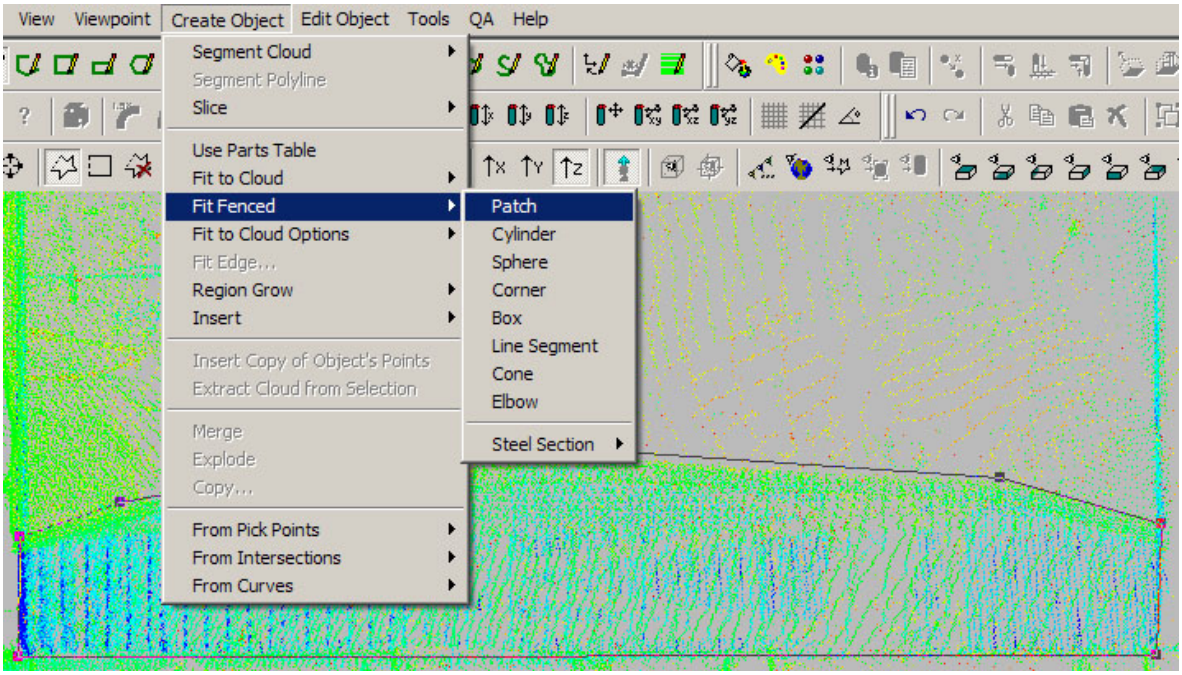


Рис. 25. Построение трехмерных моделей примитивов в полуавтоматическом режиме с использованием функции Fit to Fenced

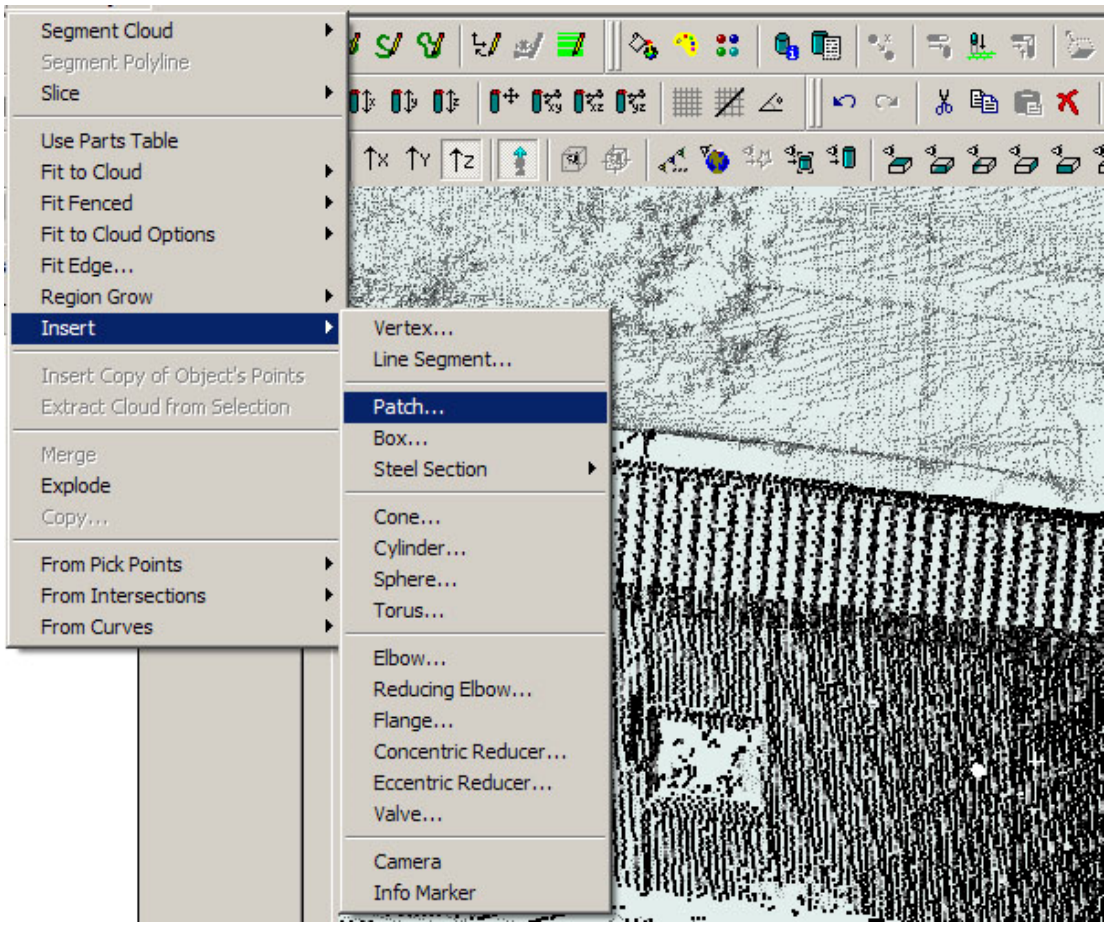


Рис. 26. Построение трехмерной модели в интерактивном режиме

Затем выполняется редактирование положения и ориентации созданного тела (примитива), которое можно либо выполнять вручную с помощью инструмента Edit Object→Handles→Show Rotation Handles (рис. 27), либо при помощи функции Edit Object→Move/Rotate задаются направление, величина перемещения тела, а также указываются ось, относительно которой будет выполняться его вращение, и величина угла поворота (рис. 28).

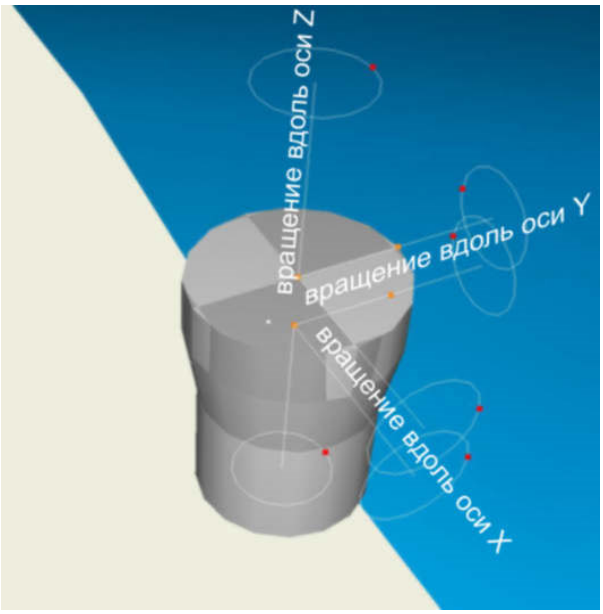
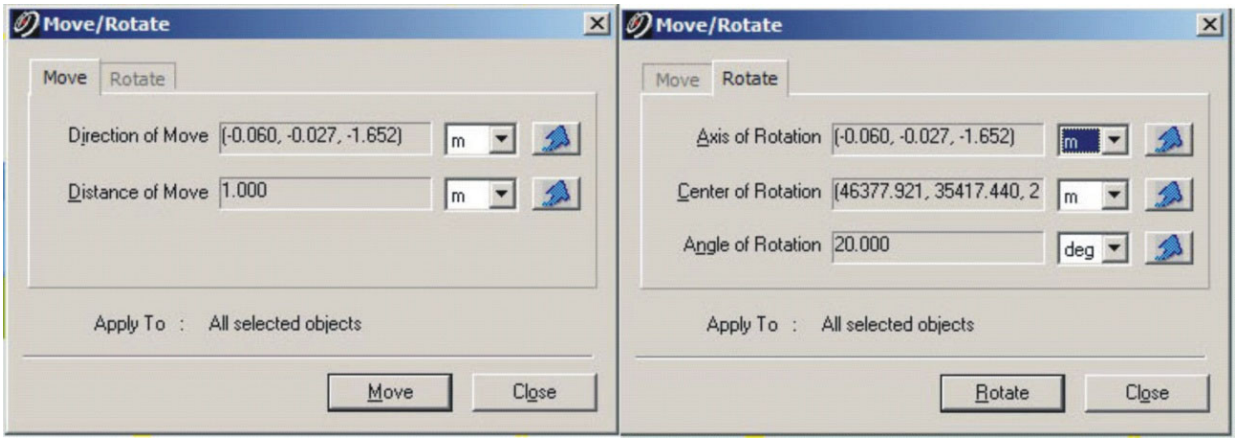


Рис. 27. Изменение положения и ориентации геометрического тела или примитива



а) *б)*

Рис. 28. Диалоговые окна перемещения и вращения геометрического тела или примитива: *а)* перемещение по заданным параметрам; *б)* вращение по заданным параметрам

После этого производится редактирование параметров (размеров) геометрического тела или примитива. Окно изменения параметров представлено на рис. 29. Функция изменения параметров примитивов также используется при автоматическом и полуавтоматическом режимах моделирования объектов в ПП Cyclone.

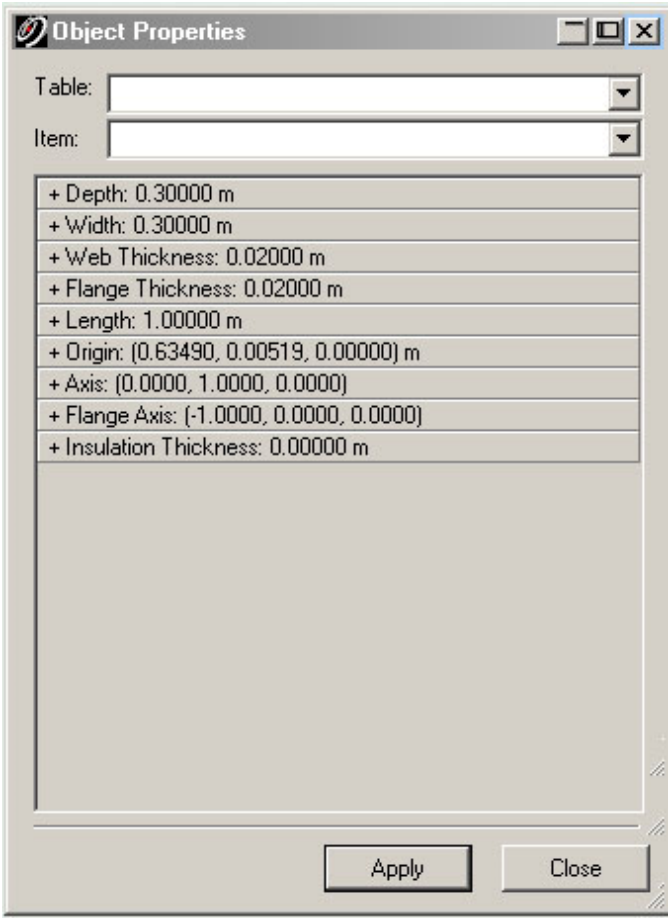


Рис. 29. Диалоговое окно редактирования параметров модели объекта

На рис. 30 показана трехмерная модель лестницы Новосибирского судоходного шлюза, для построения которой использовался интерактивный режим.

Интерактивный режим моделирования объектов менее точен по сравнению с автоматическим и полуавтоматическим, однако при наличии у пользователя достаточного опыта работы с ПО использование его позволяет добиваться необходимой точности формирования трехмерной модели и экономить время.

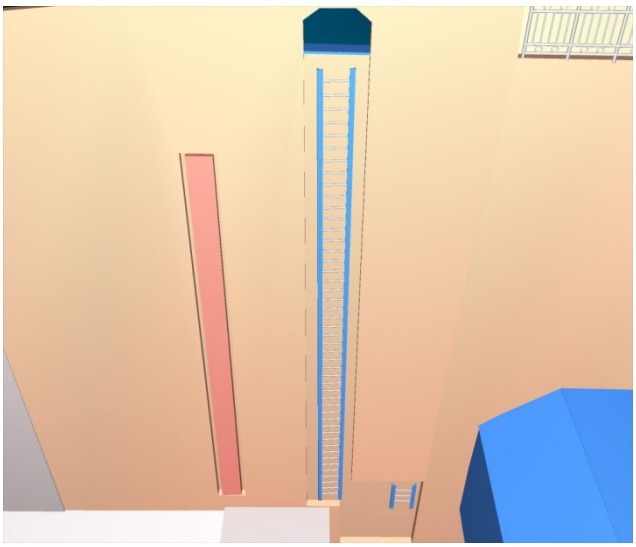


Рис. 30. Модель лестницы, построенная в интерактивном режиме

Поскольку отображение каждой отдельной точки на экране монитора требует определенного объема оперативной и графической памяти, при работе в ПП Cyclone оператор указывает ограничения по количеству одновременно загружаемых и отображаемых точек. Пользователь может изменить установки «по умолчанию» с помощью функции Edit→Preference в соответствии с параметрами компьютера, однако значительное увеличение таких точек приведет к «торможению» работы ПК. Для облегчения работы с точечной и трехмерной векторной моделями объекта можно использовать инструмент Limit Box (рис. 31), ограничивающий области их отображения, либо копировать необходимую часть этих моделей в новое окно (ModelSpace) при помощи функции Polygonal Fence Mode→Copy Fenced to New ModelSpace (см. рис. 20).

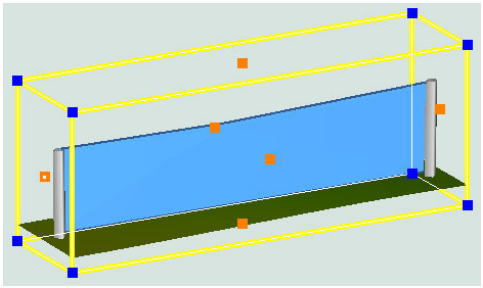


Рис. 31. Результат работы

Представленные способы построения трехмерных моделей объектов являются основными для трехмерного моделирования технологических объектов.

Создание трехмерных моделей отдельных элементов объектов нефтегазопромыслов целесообразно выполнять в следующей последовательности:

– моделирование зданий промышленного и жилого назначения, элементов зданий (лестниц, площадок, оконных проемов, вентиляционных и дымовых труб, фундаментов, элементов электроподстанций и т. д.). На рис. 32 представлена последовательность операций при создании трехмерных моделей зданий.

Модели стен зданий создаются с помощью геометрического тела в виде параллелепипеда или выдавливанием их контура. Крыши различных зданий, как правило, имеют сложную форму, поэтому их модели создаются способом выдавливания. Модели труб и свайных фундаментов, в зависимости от формы, строятся с помощью геометрических тел: цилиндра или параллелепипеда;

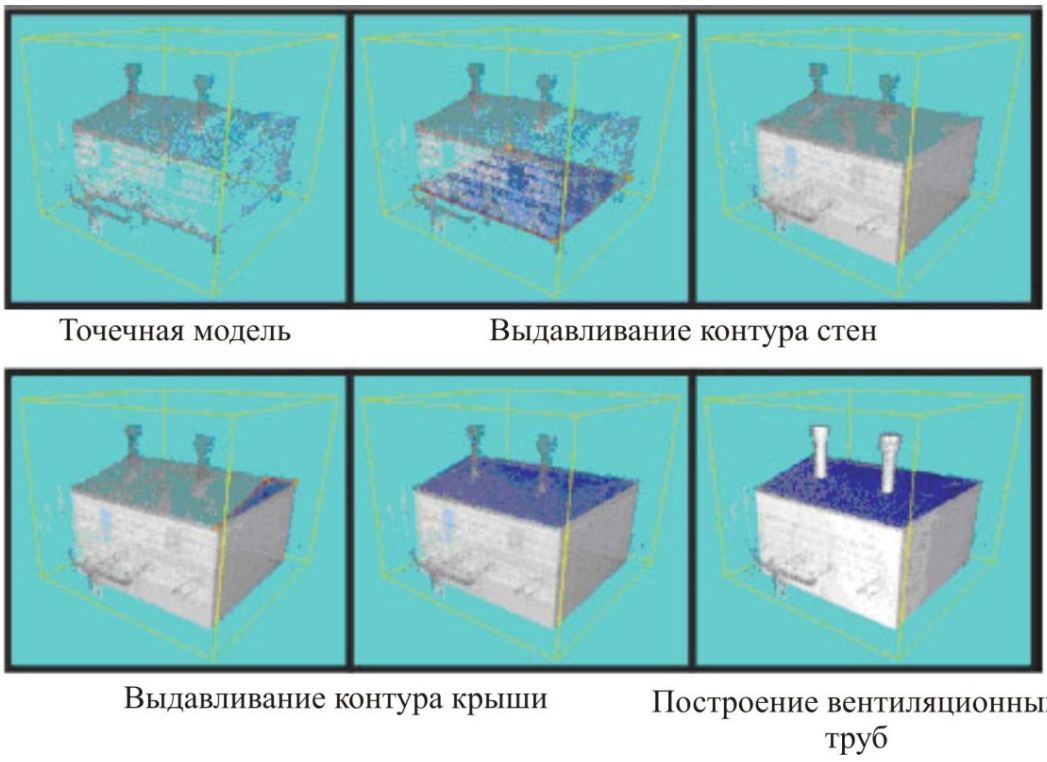
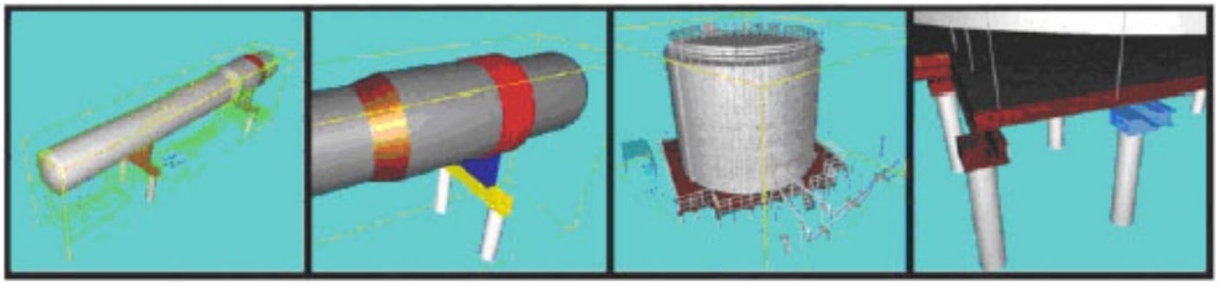


Рис. 32. Создание трехмерной модели здания

– построение моделей технологических блоков, сооружений, резервуаров, осветительных мачт, опор линий электропередачи (ЛЭП) и их дополнительных элементов (лестниц площадок, фундаментов). Резервуары и технологические аппараты имеют, как правило, цилиндрическую форму. Для моделирования фундаментов и опор таких сооружений используются

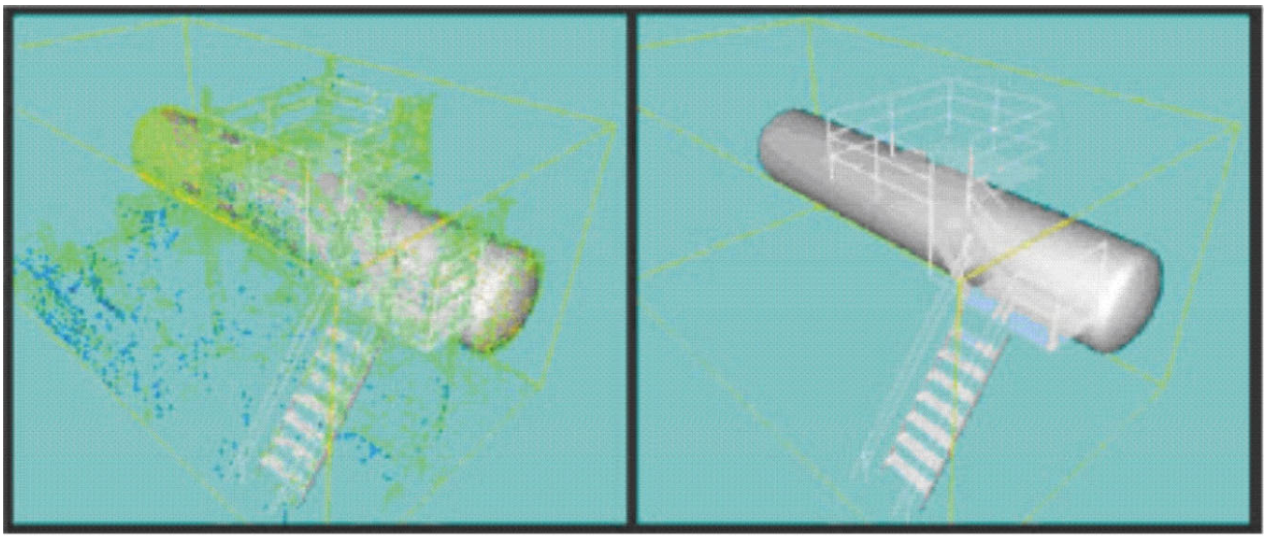
стандартные модели строительных конструкций или способ выдавливания, если элемент имеет сложную форму (рис. 33).



Трехмерная модель теплообменника | Цилиндрические элементы модели | Трехмерная модель резервуара | Трехмерная модель фундамента здания из строительных профилей и выдавленных плоскостей

Рис. 33. Трехмерные модели технологических сооружений

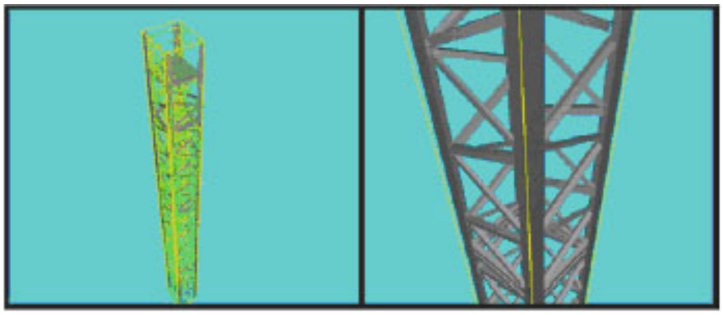
Многие технологические сооружения имеют дополнительные обслуживающие площадки с лестницами. Построение моделей площадок и ступеней выполняется с помощью полигонов, а перил – с использованием полилиний (рис. 34).



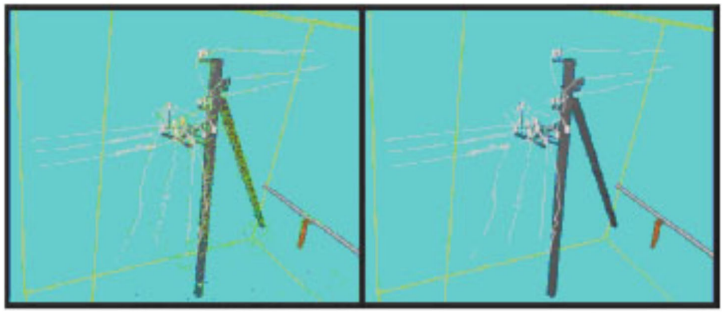
Трехмерная модель сепаратора | Трехмерная модель лестницы и площадки

Рис. 34. Трехмерные модели обслуживающих металлических площадок с лестницами

Трехмерные модели опор ЛЭП и осветительных мачт в зависимости от формы создаются с помощью геометрических тел: цилиндра, параллелепипеда или стандартных строительных конструкций (рис. 35);



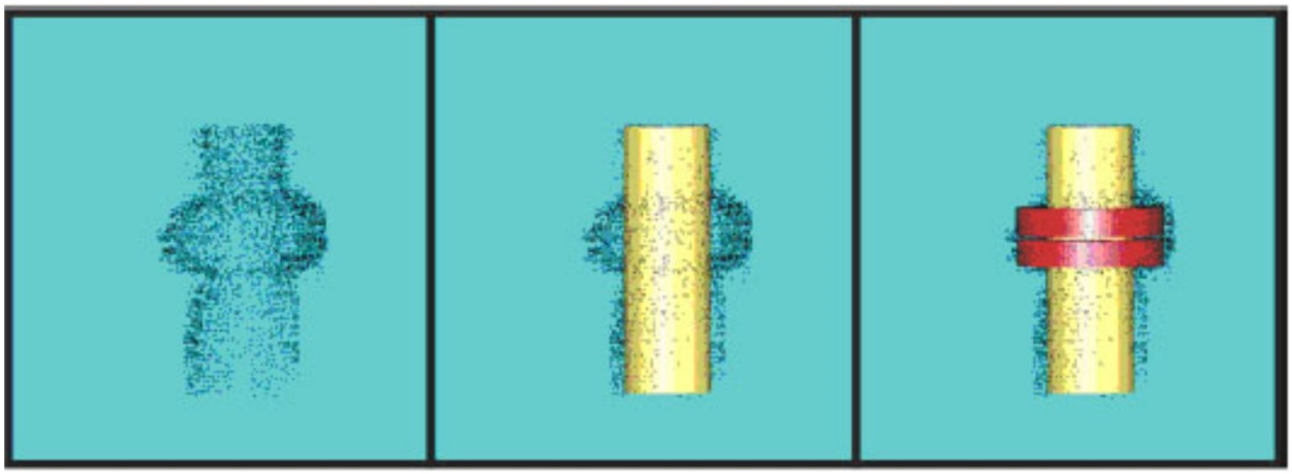
Точечная и трехмерная модель осветительной опоры



Точечная и трехмерная модель опоры ЛЭП

Рис. 35. Точечные и трехмерные модели опор

– *создание моделей трубопроводов и их элементов (фланцев, задвижек, переходников, отводов, опор)*. Трубопроводы состоят из прямолинейных участков, соединенных отводами, переходниками или задвижками. Создание трехмерных моделей трубопроводов осуществляется в автоматическом или интерактивном режиме. Графически процедура построения моделей прямолинейных участков трубопроводов представлена на рис. 36.



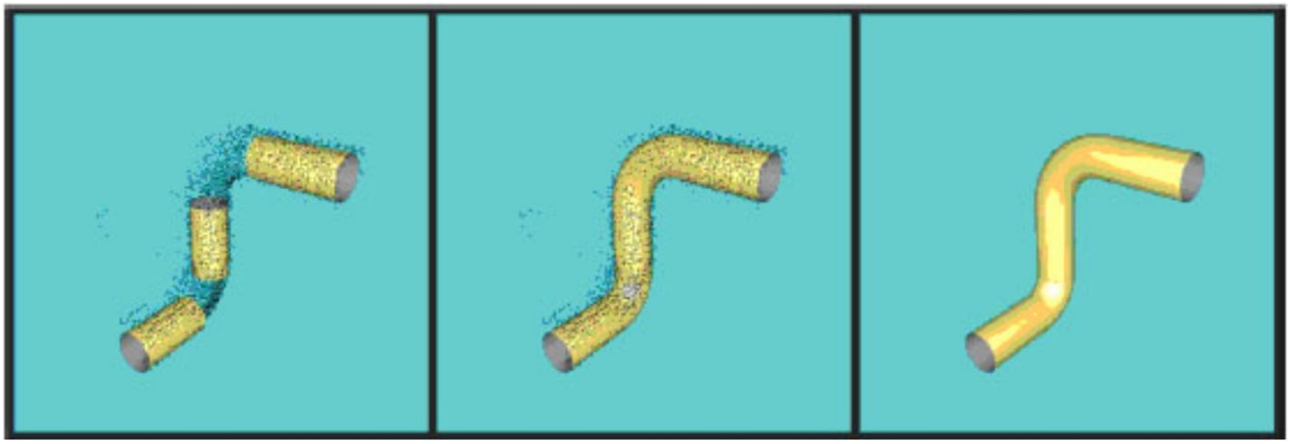
Точечная модель

Векторная модель участка трубопровода

Векторная модель трубопровода с добавлением фланцев

Рис. 36. Создание трехмерных моделей трубопроводов и их элементов

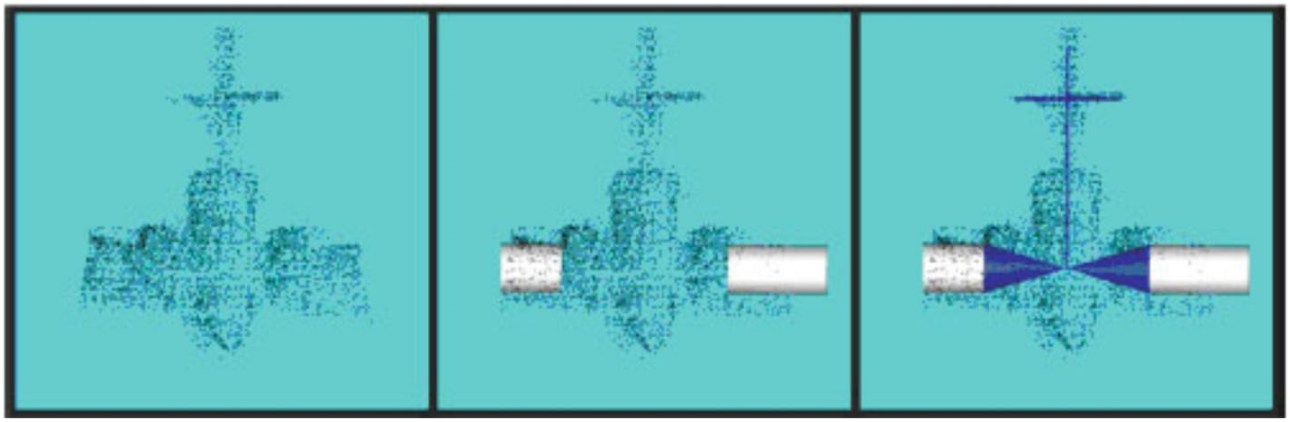
Построение трехмерных моделей отводов осуществляется после моделирования прямолинейных участков трубопроводов. Для этих целей используются сегменты геометрических тел в виде торов (рис. 37).



Трехмерная модель прямолинейных участков трубопровода | Соединение прямолинейных участков трубопровода отводами | Трехмерная модель трубопровода

Рис. 37. Создание трехмерной модели трубопровода с отводами

Для моделирования задвижек ПО Cyclone содержит условную трехмерную модель, обозначающую задвижку, для которой задаются диаметр и внешние размеры. Пример соединения моделей прямолинейных участков трубопроводов условной моделью «Задвижка» в ПО Cyclone представлен на рис. 38.



Точечная модель | Трехмерная модель трубопровода | Векторная модель трубопровода с задвижкой

Рис. 38. Соединение моделей трубопроводов условной моделью «Задвижка»

При последовательном построении моделей трубопроводов необходимо соблюдать условие стыковки осей составных элементов. Модели опор под трубопроводами строятся из тел и примитивов, аналогичных используемым при моделировании фундаментов резервуаров и технологических аппаратов (рис. 39);

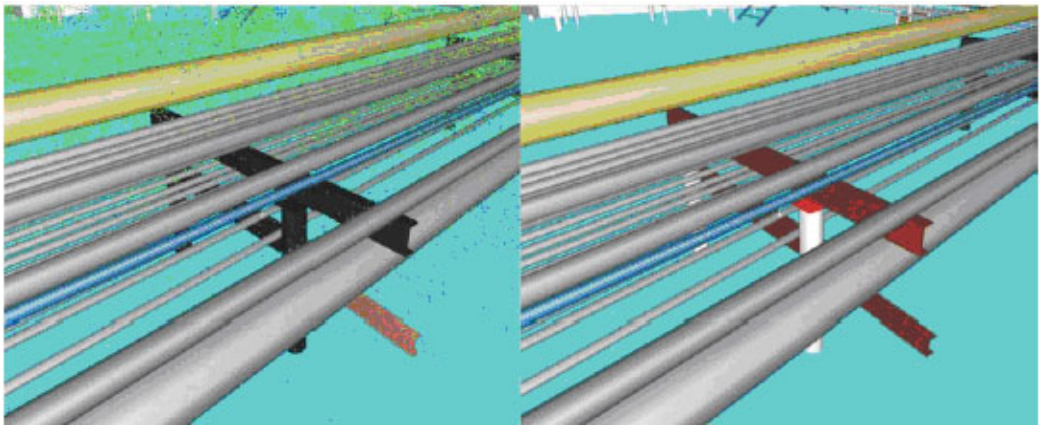


Рис. 39. Трехмерные модели опор под трубопроводами

– *моделирование кабельных эстакад и их элементов*. На технологических объектах существует большое количество надземных кабельных эстакад, обеспечивающих электроснабжение и работу средств автоматики и связи. Конструкция таких эстакад состоит из опор, на которые крепятся фермы. На фермы устанавливаются кабельные стойки с полками. Трехмерные модели кабельных эстакад создаются из геометрических тел, соответствующих по форме реальным элементам эстакады (рис. 40).

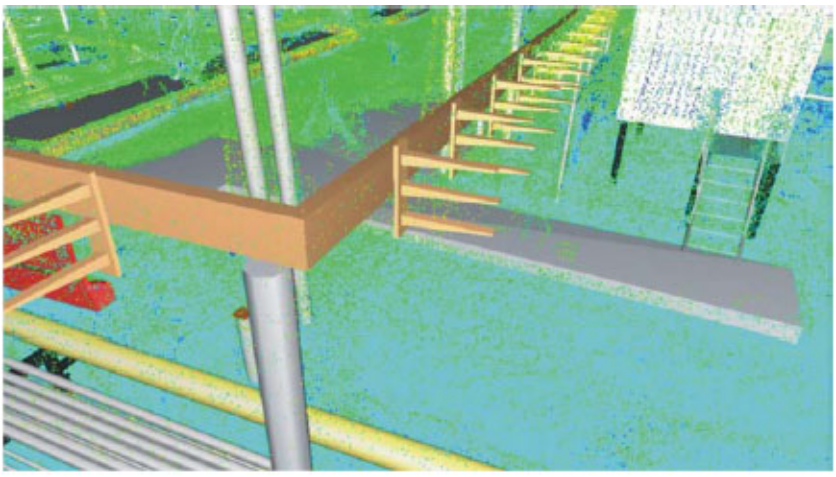


Рис. 40. Трехмерные модели кабельных эстакад

Трехмерные векторные модели, созданные в программном продукте Cyclone, представлены на рис. 41–44.

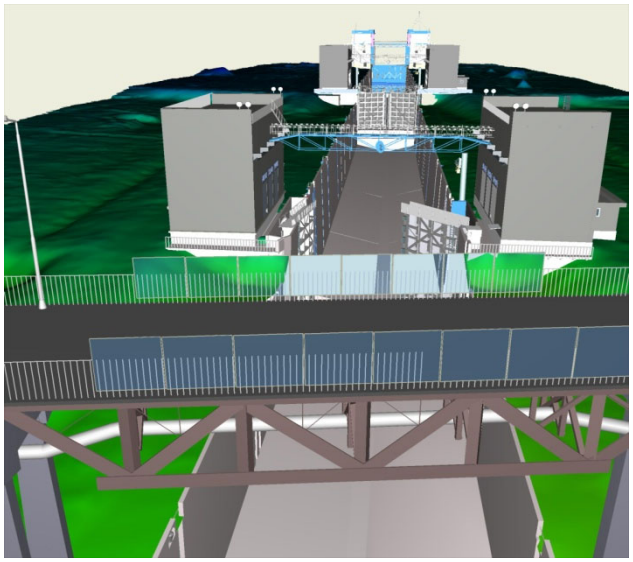


Рис. 41. Трехмерная модель Новосибирского судоходного шлюза, построенная в ПП Cyclone

Рис. 42. Векторная модель зрительного зала Новосибирского областного кукольного театра

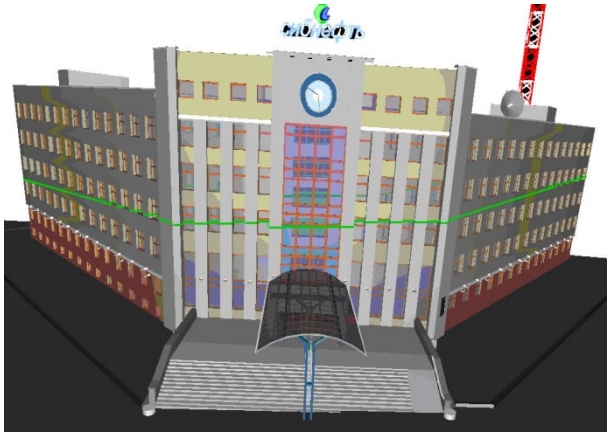


Рис. 43. Векторная модель здания управления ОАО «Сибнефть» г. Ноябрьска (фасад)

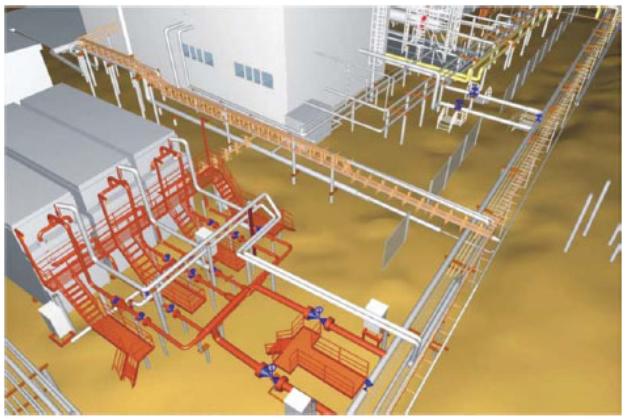


Рис. 44. Фрагмент цифровой трехмерной модели установки комплексной подготовки газа

На основе созданной трехмерной модели объекта в ПП Cyclone можно построить ее срез (рис. 45) с использованием функции Create Object→Slice→by Reference Plane.

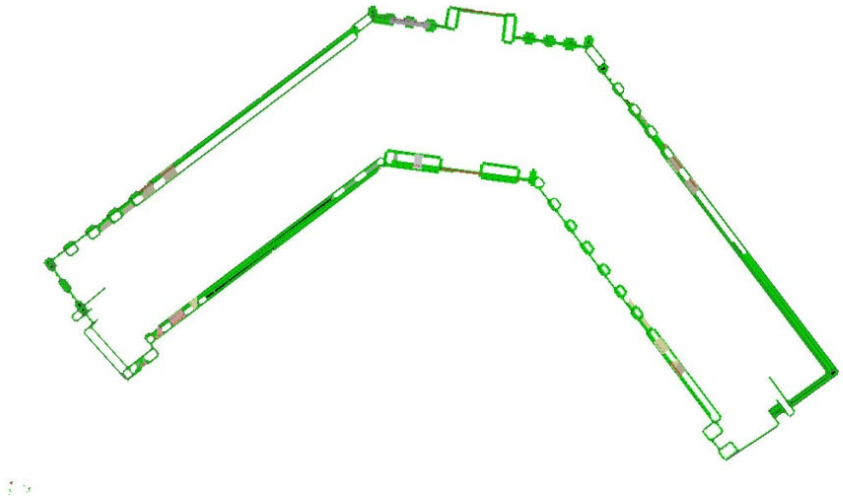


Рис. 45. Срез векторизованной трехмерной модели здания управления ОАО «ННГ-Сибнефть» (г. Ноябрьск) на уровне четвертого этажа

Трехмерную модель объектов ситуации можно создавать с помощью трехмерных полилиний и чертежей профилей. Для этих целей в ПП Cyclone реализованы два режима рисовки полилиний: автоматический (рис. 46) и интерактивный.

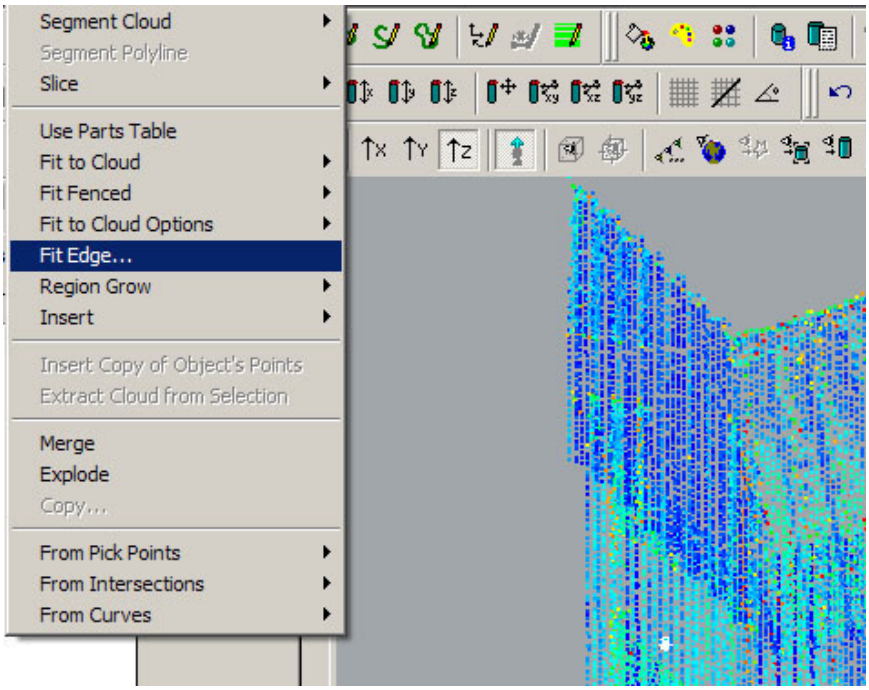


Рис. 46. Вызов функции автоматического встраивания полилиний

После вызова функции Create Object→Fit Edge появляется диалоговое окно автоматического встраивания полилиний (рис. 47), в котором указывается поперечный срез объекта, по которому необходимо создать структурные линии. После этого оператор показывает места, в которые необходимо встроить полилинии (белые кресты на рис. 47), и нажимает кнопку Fit.

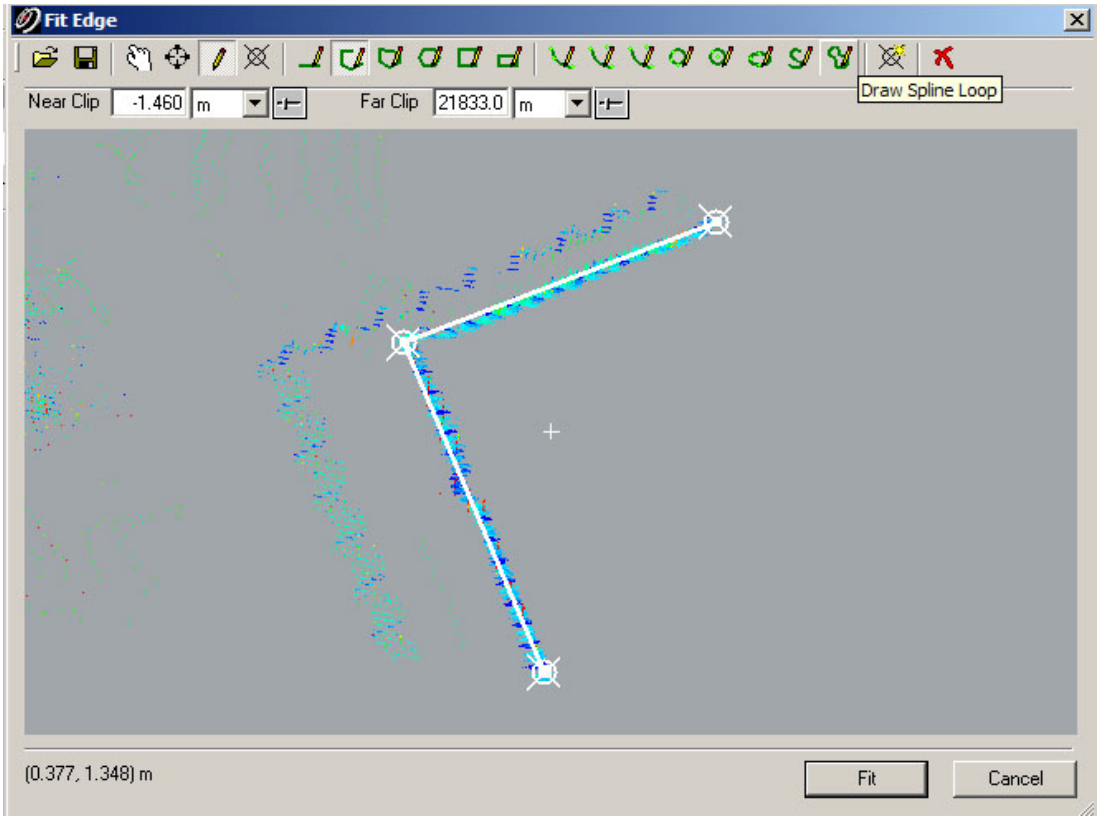


Рис. 47. Диалоговое окно встраивания полилиний
в автоматическом режиме

На последнем этапе программа предлагает оператору выбрать степень сглаживания встраиваемых полилиний, после чего действие функции завершается.

В интерактивном режиме рисовки полилиний оператор указывает точки на точечной модели, которые должны являться узлами полилинии и затем при помощи функции Create Object→From Pick Point→Poliline вписывает ее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из опыта применения методов и технологий лазерного сканирования для решения научных и прикладных задач в различных областях экономики страны (топография, маркшейдерия, геология, архитектура, строительство, сельское хозяйство, судостроение, археология, медицина и др.), можно смело говорить об уверенном внедрении данных направлений в повседневную практику. При этом разработчики стремятся реализовать концепцию полной автоматизации при сборе пространственных данных об объектах местности средствами дистанционного зондирования и геодезическими приборами, что позволяет решить три основные проблемы любого производства:

1) увеличить производительность работ;
2) повысить качество и надежность получаемой продукции;
3) сократить издержки производства на оплату труда.

Фактически, точность определения координат точек местности с использованием методов и технологий дистанционного зондирования зависит в основном от характеристик съемочной системы. Повышение надежности результатов материалов, полученных по данным дистанционного зондирования, обусловлено, прежде всего, снижением влияния человеческого фактора при выполнении технологических операций. При камеральной обработке материалов ДЗ по-прежнему большую роль играет опыт оператора в интерпретации большого объема данных дистанционного зондирования и проблема автоматизации обработки этих данных становится главной. Однако в этом направлении ведутся активные разработки алгоритмов и программных продуктов, позволяющих упростить и автоматизировать работу «камеральщика».

Все это позволяет говорить о том, что в настоящее время технологии дистанционного зондирования являются основным источником сбора пространственной информации об инженерных сооружениях, природно-территориальных комплексах, объектах архитектурного наследия и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Середович А. В., Иванов А. В. Применение трехмерного лазерного сканирования для определения деформаций вертикальных резервуаров // Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка. Сегодня и завтра : тез. докл. V-й Междунар. конф. и выставки. – М. : XportMedia, 2005. – С. 43–46.

2. Методика калибровки шаровых резервуаров методом наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, М. С. Калинина, Е. А. Егорченкова, Н. С. Коротченко // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. − 2015. – № 4 (102). – С. 163–170.

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

4. Инструкция по топографической съемке в масштабе 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М. : Недра, 1973. – 176 с.

5. Комиссаров А. В. Лазерное сканирование: обобщение существующей практики // Инженерные изыскания. − 2013. – № 2. – С. 22–25.

6. Комиссаров Д. В., Иванов А. В. Обзор программных продуктов для обработки данных наземного лазерного сканирования // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т.1, ч.1. – С. 205–206.

7. Комиссаров А. В., Широкова Т. А., Романович Е. В. Обоснование углового шага сканирования при наземной лазерной съемке // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 96–99.

8. Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В. Определение метрических характеристик об объектах архитектурного наследия по данным наземного лазерного сканирования // Материалы конф. Междунар. промышл. форума GEOFORM+ «Геопространственные технологии и сферы их применения», 14–17 марта 2006 г., Москва. – М., 2006. – С. 43–45.

9. Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В. Мониторинг деформаций сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования //

Материалы конф. Междунар. промышл. форума GEOFORM+ «Геопространственные технологии и сферы их применения». – 14–17 марта 2006 г., Москва. – М., 2006. – С. 45–47.

10. Воробьев В. И. Оптическая локация для радиоинженеров. – М. : Радио и связь, 1982. – 176 с.

11. Антонова Ф. В. Применение многогруппового метода приближений для уравнивания тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 1971. – № 3. – С. 28–32.

12. Ковров А. А. ПО RiSCAN PRO и его возможности по обработке данных наземного лазерного сканирования // Геопрофи. – 2006. – № 5. – С. 59–61.

13. Кемниц Ю. В. Теория ошибок измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1967. – 176 с.

14. Клюшин Е. Б., Михелев Д. Ш. Инженерная геодезия : учеб. для техникумов. – М. : Недра, 1990. – 264 с.: ил.

15. Калибровка аэрофотоаппаратов по снимкам испытательного полигона / Л. Н. Васильев и др. // Геодезия и картография. – 1974. – № 10. – С. 40–49.

16. ГОСТ Р 50779.21–2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Ч. 1. Нормальное распределение. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 44 с.

17. Горенштейн И. А. Инерциальные навигационные системы. – М. : Машиностроение, 1970. – 284 с.

18. Комиссаров А. В. Исследование точности наземных лазерных сканеров // Современные проблемы технических наук : сб. тез. докл. Новосиб. межвуз. науч. студен. конф. «Интеллектуальный потенциал Сибири». – Новосибирск, 2004. – Ч. 3. − С. 104.

19. Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В. Исследование точности трехмерного лазерного сканера (на примере Riegl LMS Z-360) // Материалы IV Междунар. конф. и выставки «Лазерное сканирование и цифровая аэросъемка. Сегодня и завтра» – М. : Типография компании XPortMedia, 2004. – С. 10–11.

Учебное издание

Комиссаров Александр Владимирович

Лазерное сканирование и трехмерное моделирование

Редактор *Е. К. Деханова*

Компьютерная верстка *О. И. Голикова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 24.01.2020. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 3,37. Тираж 55 экз. Заказ 7.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.