

И.А. Рыльский<sup>1</sup>, Д.А. Парамонов, М.С. Малеванная

## СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БПЛА И НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

### АННОТАЦИЯ

Технологии виртуального моделирования значительно развились в последние годы, несмотря на трудности и различия в подходах. В настоящее время существуют различные новые технологии, которые предлагают большую гибкость и возможность обработки и использования огромных объёмов пространственных данных – изображений с БПЛА, спутниковых изображений, данных лазерного сканирования, ГНСС – измерений, ГИС-слоёв и так далее. В последнее время большую популярность получили упрощённые виртуальные модели с представлением территории в виде высокополигональной поверхности, не разделённой на отдельные объекты, что крайне неудобно, неэффективно и является тупиковым подходом при моделировании крупных территорий. В данной работе использован подход к созданию виртуальных моделей на базе данных аэрофотосъёмки с БПЛА, лазерного сканирования местности и спутниковых измерений. Здания и сооружения рассматриваются как отдельные объекты, связанные с базой данных и гиперссылками. Все искусственные объекты (здания, сооружения) представляют собой файлы OBJ (низкополигональная геометрия, построенная полуавтоматически, MESH не допускается) и текстурируются с использованием надириных и наклонных изображений. Данные наземного лазерного сканирования (облако точек с географической привязкой) используются в качестве источника наземных контрольных точек для данных БПЛА, для моделирования очень сложных объектов и для составления карт сложного городского ландшафта, в котором может быть много столбов, проводов и металлических конструкций. Вся информация географически привязана с высокой точностью, равной 1:200 – 1:500. Эти подходы позволяют устранить недостатки различных методов отображения, получая лучшие результаты при меньших усилиях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** объектно-ориентированная виртуальная модель, наземное лазерное сканирование, лидар, аэрофотосъёмка, наклонные изображения, БПЛА, ГИС, 3D объекты, картография, устойчивое развитие

Ива А. Rylskiy<sup>2</sup>, Dmitriy A. Paramonov, Marina S. Malevannaya

## JOINT USE OF UAV TECHNOLOGIES AND TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR CREATION OF OBJECT-ORIENTED VIRTUAL MODELS

### ABSTRACT

Virtual modeling of cities is very demanded task now. Though the technologies developed greatly during last years, there are a lot of difficulties and many different approaches for achieving goals. In nowadays there are different new technologies, that offer great flexibility and enormous volumes of spatial data – UAV imagery, satellite imagery, laser scanning, GNSS, etc. Our team is focused on development of virtual city model production using following approaches: the virtual

<sup>1</sup> Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119234, Москва, Россия, e-mail: [rilskiy@mail.ru](mailto:rilskiy@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [rilskiy@mail.ru](mailto:rilskiy@mail.ru)

model should be organized as a stand-alone software solution; following spatial data sources should be used:

- UAV making nadir and oblique imagery for getting textures, production of orthomosaics and building 3D surfaces;
- terrestrial laser scanning – for small, but important objects, big vertical constructions and rough terrain;
- GNSS measurements are performed during surveys (using base stations and kinematic measurements) and after them (ground control points, check points, etc.)

Buildings and constructions are treated as separated objects linked to the database (address, coordinates, geocoding, points of interest, etc.) and hyperlinks (documents, floor plans, charts, additional models, images, scans, etc.). All artificial objects (buildings, constructions) are OBJ files (low-polygonal geometry built semi-automatic using survey data with artificially controlled edges and faces, no MESH allowed) and are mapped automatically using nadir and oblique imagery. Terrestrial laser scanning data (georeferenced point cloud) is used as a source of ground control points for UAV data, for modeling very complex facilities and for mapping complex city landscape where a lot of poles, wires and metal constructions can occur. All information is georeferenced with high accuracy, equal to 1:200 – 1:500 scale.

These approaches allow us to eliminate the disadvantages of different mapping methods, getting better results with less efforts.

**KEYWORDS:** object-oriented virtual model, terrestrial laser scanning, lidar, aerial imagery, oblique images, UAV, GIS, 3D objects, cartography, sustainable development

## ВВЕДЕНИЕ

Задача создания виртуальных моделей (ВМ) в современном обществе становится всё более популярной. Возросшая вычислительная мощь настольных компьютеров и мобильных устройств позволяет использовать виртуальные модели как самостоятельный продукт, как элемент дополненной реальности, а также как вспомогательный элемент сложных аппаратных систем поддержки принятия решений (например, автоматизированных рабочих мест служб спасения).

В то же время требования к полноте и качеству прорисовки деталей моделей непрерывно возрастают, что требует использования всё более сложных методов моделирования и текстурирования объектов (при использовании вручную накладываемых создателями текстур и вручную создаваемых моделей). Это ведёт к чрезвычайному удорожанию любых виртуальных моделей, создаваемых при участии различных художников и тому подобных. В случае, когда речь идет о виртуальных моделях, тиражируемых миллионами экземпляров (например, модели, применяемые в компьютерных играх или в популярных веб-сервисах), этот подход экономически оправдан и приемлем. Для моделей с меньшим потенциальным количеством пользователей подобные затраты труда, денег и времени неприемлемы.

Традиционно малобюджетные виртуальные модели (в течение последних 20 лет) на относительно крупные территории (более 100 га) создавались с использованием ГИС-данных. Обычно они представлены цифровой моделью рельефа, которая текстурируется космическими снимками. Векторные данные представляются вытянутыми по вертикали линейными и площадными объектами (дома-параллелепипеды, заборы-стены, озёра-«пластинки» и так далее), трёхмерными надписями (рис. 1). Иногда в подобные низкодетальные модели вставляют несколько (до 50–100) действительно сложных трёхмерных объекта [Капралов и др., 2004].

Все указанные модели используют принцип послойного хранения данных (в растровых слоях, шейпах, покрытиях).

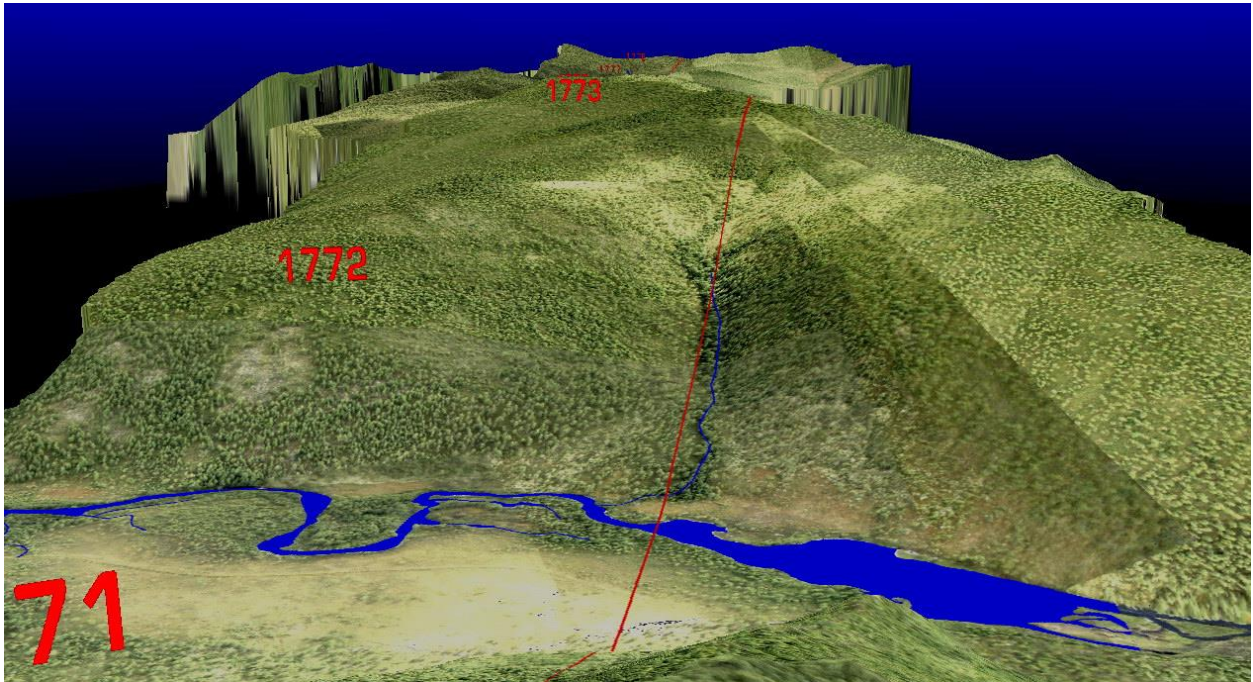


Рис. 1. Пример элементарной виртуальной модели проектируемого трубопровода  
Fig. 1. An example of an elementary virtual model of the projected pipeline



Рис. 2. Пример виртуальной модели города с 3D вытянутыми зданиями и ГИС-данными  
Fig. 2. Example of a virtual city model with 3D elongated buildings and GIS data

Помимо визуальной «аскетичности», подобные модели в основном являются набором ГИС-данных, который в той или иной форме визуализируется с использованием каких-либо сторонних программных средств (например, Erdas Virtual GIS, SpaceEyes, ArcScene и тому подобных), без которых все эти данные не могут быть просмотрены в форме виртуальной модели. Упомянутые программные средства, как правило, недёшевы и не могут быть использованы большим числом пользователей, в том числе одновременно (рис. 2).

В настоящее время подобные модели мало удовлетворяют пользователей как с точки зрения качества «картинки», так и с точки зрения функционала. Они не слишком технологичны в изготовлении и нуждаются в первую очередь в наличии уже переработанных до уровня готовых ГИС-слоёв пространственных данных. Всё это малоперспективно и в ближайшее время, по-видимому, не приведет к кардинальным изменениям в области создания виртуальных моделей. Тем не менее, использование ГИС-слоёв растровых и векторных данных для создания виртуальных моделей (далее – ВМ) не является догмой.

В самом деле, большинство пользователей в первую очередь, в отличие от пользователей карт и ГИС, ожидают от виртуальных моделей *реализма* как в части визуального ряда, так и в части взаимодействия (например, невозможности летать сквозь стены, инерции при полёте над местностью, эффектов реального мира вроде текущей воды и т.п.). ГИС-слои (в первую очередь, это касается векторных данных) – это квинтэссенция абстракции, когда реальные объекты сводятся к двумерной геометрии и базе данных. Исторически, когда ВМ впервые стали возможны для создания рядовыми пользователями на персональных компьютерах (середина 1990-х годов), для работы были доступны либо картографические данные (растровые или оцифрованные векторные), либо уже готовые ГИС-слои. Об использовании данных аэрофотосъёмки или полноценных трёхмерных моделей речи не шло.

Для виртуальных моделей значительного (сотни и тысячи квадратных километров) пространственного охвата подобные подходы остаются актуальными и сейчас. Однако при изготовлении ВМ среднего охвата (десятки квадратных километров) или малого (несколько квадратных километров и менее) возникает необходимость в гораздо более детальных данных.

В то же время на 2019 год уже существует значительное количество методов сбора пространственных данных, которые в различной форме могут быть использованы при создании ВМ, минуя при обработке фазу двумерных векторных ГИС-данных. При этом они могут быть доступны для покупки и/или самостоятельного получения рядовому пользователю [Allen et al., 2003]. Из подобных методов следует отметить данные воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и аэрофотосъёмки [Lohr, 1997], данные наземного лазерного сканирования (НЛС), данные аэрофотосъёмки (надирной и наклонной) с БПЛА (АФС БПЛА).

В данной работе мы поставили следующие задачи:

- создать виртуальную модель территории на базе данных наземного лазерного сканирования (НЛС) и аэрофотосъёмки с БПЛА (АФС БПЛА) без использования архивных материалов ДДЗ и ГИС (за исключением адресной информации);
- отработать методику моделирования трёхмерных объектов без использования двумерных векторных ГИС-слоёв;
- отработать методику текстурирования трёхмерных объектов с использованием не условных, а фотореалистичных текстур;
- создать виртуальную модель в виде самостоятельного приложения, не использующего сторонние ГИС-пакеты для реализации работы с пространственными данными;
- использовать не послойное представление данных, а объектно-ориентированный подход.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **МЕТОДЫ СБОРА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

#### **Наземное лазерное сканирование**

В определённой мере данные воздушного лазерного сканирования сходны одновременно и с данными наземного лазерного сканирования (но менее плотны), и с данными аэрофотосъёмки с БПЛА (но могут иметь меньшую детальность). Впрочем, при соответствующих параметрах залёта они вполне могут быть схожи по своим характеристикам с АФС БПЛА и НЛС. Кроме того, уже постепенно внедряется в практику лазерное сканирование и АФС с БПЛА. Ввиду подобной схожести рассмотрим отдельно методы наземного лазерного сканирования (НЛС) и АФС с БПЛА.

Данный метод появился в начале XXI века и является по сути дальнейшим развитием направления безотражательных тахеометров. Принцип работы достаточно прост: используя импульсный лазер, производится измерение дистанции безотражательным методом, горизонтального и вертикального угла испускания луча. Полученное отражение регистрируется в собственной системе координат сканера, при этом отражённый сигнал имеет измеряемое значение амплитуды отражённого сигнала и может быть пронормирован к дальности, получив тем самым значение отражательной способности объекта, от которого он отразился. «Качая» лазерный луч в вертикальной и горизонтальной плоскости, можно произвести съёмку местности в некотором радиусе от прибора.

Современные наземные лазерные сканеры имеют скорость работы до 1 200 000 точек в секунду (Riegl VZ2000i) и дальность до 6 000 м (Riegl VZ6000), при этом точность измерения координат отдельных точек составляет 5–15 мм на дистанциях 500–6 000 м, а среднее расстояние между точками также составляет 5–15 мм. Это позволяет использовать системы наземного сканирования для получения беспрецедентно точных данных о форме поверхностей объектов, попадающих в поле зрения прибора. Кроме того, обычно наземное лазерное сканирование проводится параллельно с наземной же фотосъёмкой, и впоследствии эти данные совмещаются [Малеванная, Рыльский, 2014].

Метод наземного лазерного сканирования весьма удобен при работе по относительно небольшим объектам – до 10 км<sup>2</sup>. При этом для работы (в зависимости от прибора) достаточно 1–2 человек; нет необходимости нанимать отдельное воздушное судно или транспортное средство, получать специальные разрешения; стоимость оборудования в наши дни также не является фантастической.

#### **Моделирование объектов по данным НЛС, используемые методы и программное обеспечение**

При простой форме объектов возможно использование режима цифрования в 2D с последующим присвоением атрибута высоты. При более сложной форме объекта необходимо использование профессиональных решений в области создания 3D графики (например, 3D Studio MAX), САПР (AutoCAD, Microstation) или специализированное программное обеспечение (например, Phidias, Polyworks).

Ценность метода наземного лазерного сканирования при решении задачи информационного обеспечения виртуального моделирования состоит в том, что он позволяет без смены инструмента и значительных усилий сколь угодно детализировать отрисовку отснятых объектов – результат зависит в основном только от желания авторов и потраченных усилий. При этом время, затрачиваемое на съёмочные работы (при использовании современного оборудования), мало зависит от требований к детальности итоговой модели (в большинстве случаев детальность съёмки будет избыточной).

#### **Аэрофотосъёмка с БПЛА**

Пожалуй, это одно из самых известных новшеств в области сбора пространственных данных, хорошо известное как профессионалам, так и обычным пользователям. Отметим, что использование компактных систем на базе БПЛА типа мультикоптер, оснащённых фотокамерами с размером кадра 20 и более мегапикселей и фазовым ГНСС-приёмником

для фиксации координат центров фотоснимков позволяет оперативно (за 1–4 дня) получить данные аэрофотосъёмки на территориях в 10 км<sup>2</sup> и более силами бригады из 1–2 человек.

Однако для целей создания виртуальной модели требования для аэросъёмочных работ несколько отличаются. Надирная съёмка в первую очередь применяется для создания цифровой модели видимой поверхности (в условиях города – это поверхности растительности, зданий, рельефа). На материалах надирной съёмки достаточно плохо видны вертикальные объекты и текстуры стен, хотя хорошо видны крыши и горизонтальные поверхности. Для получения текстур стен необходима съёмка под углом, то есть перспективная съёмка.

Экспериментальным путём установлено, что наиболее универсальными решениями в области перспективной съёмки являются системы, оборудованные 5 камерами – одной в надир (с фокусным расстоянием  $F$ , обеспечивающим охват около 60 угловых градусов) и четырьмя наклонными, установленными перпендикулярно друг другу по азимуту и под углом около 35 градусов к вертикали (с фокусным расстоянием  $1,5 F$ , обеспечивающим охват около 40 угловых градусов). В этом случае удаётся соблюсти примерное равенство размеров пиксела на надирных и наклонных снимках, устранить возможные «мёртвые зоны» стереосъёмки и обеспечить покрытие всех объектов на данной местности снимками со всех сторон.

Традиционно подобные системы существуют в исполнении для пилотируемых систем (например, решения от IGI или LEICA). С 2015 года на выставках отдельными производителями представляются аналогичные решения (но более компактные, с более скромными характеристиками) для БПЛА. Однако во всех случаях эти системы довольно дороги и увесисты, потому требуют соответствующего крупного и дорогого БПЛА.

Тем не менее, результаты, аналогичные описанным, могут быть получены с использованием БПЛА, оснащённого одной камерой. В этом случае требуется не один, а три залёта. В первом из них камера устанавливается в надир и полёт производится на оптимальной с точки зрения фотограмметрии высоте (назовем её  $H$ ). Во втором залёте высота уменьшается до  $0,7 H$ , при этом камера выставляется, скажем, вперёд под углом 35 градусов к вертикали. Полёты производятся по стандартной схеме параллельных залётов с перекрытием 30 % по направлениям, к примеру, «север-юг». В третьем полёте высота и перекрытие полёта устанавливается аналогично второму полёту, но оси полётов прокладываются по направлениям «запад-восток». Несмотря на увеличение полётного времени, это позволяет использовать гораздо более дешёвые и компактные дроны, что в большинстве случаев критично при создании виртуальных моделей небольшого охвата (рис. 3).

При взаимном ориентировании снимков для построения блока фототриангуляции наличие аппаратно измеренной информации о координатах центров проекций фотоснимков весьма ценно, так как позволяет существенно ускорить процесс аэрофототриангуляции и существенно повысить точность решения. При совместном ориентировании надирных и наклонных фотоснимков подобная информация необходима. При этом точность подобных измерений должна быть на уровне 20 см в плане и по высоте. Именно по этой причине при реализации однокамерной съёмки крайне желательно (и в данной работе использовалось) применение L1-приёмников ГНСС.

#### **Эффект от совместного использования**

Лазерное сканирование с земли обладает рядом особенностей, недоступных фотограмметрическому методу. Так, на нём видны провода, столбы, висячие и наклонные конструкции (всё это превращается в шумы и артефакты на данных фотограмметрии). При этом наземное сканирование оптимально для сканирования вертикальных поверхностей. В то же время АФС с БПЛА оптимально для съёмки слабонаклонных (крыши) и горизонтальных поверхностей (рельеф, асфальт и прочие). Слияние этих данных позволяет

взаимоустранить недостатки каждого из методов, заполнив «мёртвые зоны» и дополнительно отобразив новые объекты.

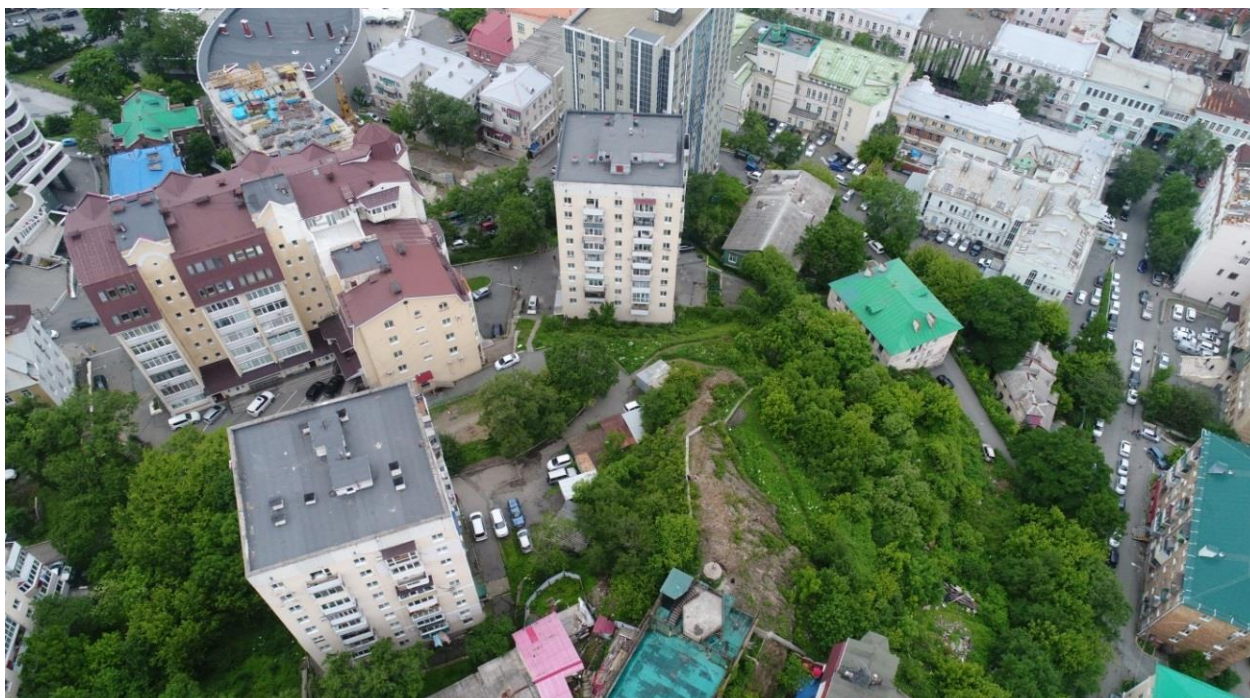


Рис. 3. Пример наклонного (перспективного) снимка с БПЛА  
Fig. 3. Example of oblique (perspective) image made from UAV

### ***ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НА ОСНОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ***

Описанные выше подходы к информационной основе для создания виртуальной модели продемонстрируем на примере создания модели центральной части г. Владивостока. Данная модель была создана в 2018–2019 годах. Съёмочные работы выполнялись с использованием следующих видов оборудования:

- наземный лазерный сканер Riegl LMS Q620 (дальность съёмки до 1000 м), точность – 10 мм, скорость съёмки – 24 000 точек в секунду;
- БПЛА DJI Phantom 4 Pro с одной камерой на 20 Мпикс и бортовым ГНСС-приёмником (L1, фазовый, самостоятельная доработка серийного изделия авторами статьи);
- ГНСС-приёмники Trimble 5700 (использованы для планово-высотной подготовки залёта БПЛА и геопривязки скан-позиций наземного лазерного сканера).

Съёмка выполнялась в центральной, наиболее гористой части города Владивостока (районы улиц Тигровой, Набережной). Вдоль улиц с сложными либо историческими фасадами, а также в районах сложного рельефа (набережная города Владивостока) было произведено наземное лазерное сканирование с шагом вплоть до 0.008 углового градуса. Параллельно этому были произведены надирная и наклонная аэрофотосъёмки с использованием БПЛА и цветной фотокамеры. Полученные наборы данных были сначала уравниены по отдельности.

#### **Первичная обработка данных**

Планово-высотная подготовка содержала 46 контрольных точек, промаркированных заранее (кресты на твёрдых объектах, опознаваемые на фотоснимках и на данных наземного сканирования). Работы производились в местной системе координат. Среднеквадратическая погрешность измерений координат точек планово-высотного обоснования внутри местной системы координат составила 28 мм в плане и 38 мм по

высоте, что достаточно для создания материалов 1:500 с сечением рельефа 0,5 м (СНиП 11-02-96). Для обеспечения максимальной целостности данных при уравнивании и фотограмметрического блока, и данных лазерного сканирования использовались одни и те же опорные точки.

Данные наземного лазерного сканирования (до 50 скан-позиций) были совместно уравнианы и геопривязаны с использованием программного обеспечения Riegl RiScan Pro. Результатами работы явились облака точек лазерных отражений от видимых поверхностей и рельефа улиц и прилегающих объектов (рис. 4).

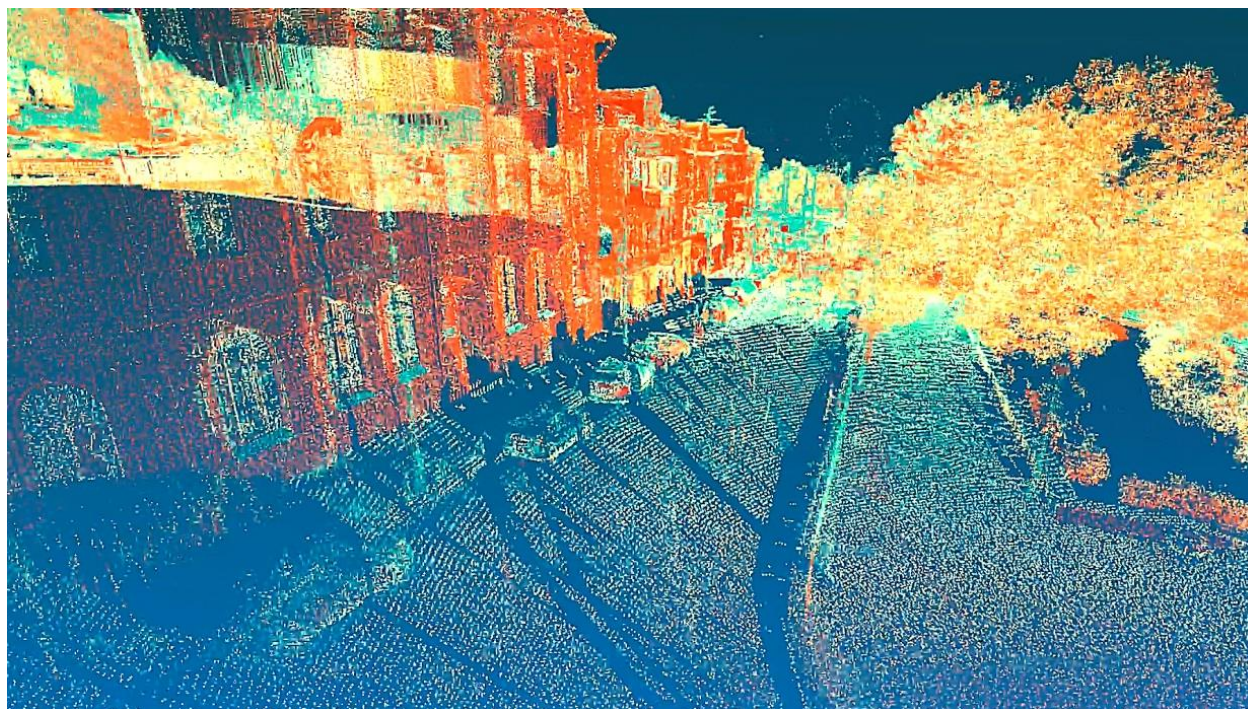


Рис. 4. Пример данных наземного лазерного сканирования г. Владивостока  
 Fig. 4. Example of terrestrial laser scanning data in Vladivostok

Фотограмметрическое уравнивание аэрозалёта производилось с использованием программного обеспечения AgiSoft Photoscan. Полученные результаты аэрофототриангуляции позволили получить следующие виды данных:

- ортофотопланы (с использованием надирных снимков);
- текстуры стен домов и сооружений (в виде текстур для OBJ файлов);
- облака точек, координаты которых были получены по фотограмметрическим данным.

Разрешение фотоснимков составило около 3,5 см для надирных снимков и 4,5 см – для наклонных снимков. Среднеквадратическая погрешность по контрольным точкам составила около 9 см.

#### **Создание моделей видимых поверхностей**

Объединение разнородных данных в виде слияния двух облаков точек (лазерных и фотограмметрических) позволило получить максимально полные данные о стенах (плохо рассчитываются по данным БПЛА) и крышах (не видны на наземном лазерном сканировании). По итогам совмещённого облака точек были созданы растровые модели поверхностей (рельеф, стены, крыши). Поверхности были представлены в регулярно-ячейистой форме (шаг раstra 15 см). Формат данных – ArcInfo GRID. Далее эту поверхность мы будем называть ЦМП – *цифровая модель поверхностей*.

При выполнении аналогичных работ ранее на этом этапе – когда ЦМП создана – работы по моделированию объектов обычно заканчивались. После этого полученную

модель, состоящую из миллионов или даже миллиардов граней, пытались импортировать и визуализировать в реальном времени под видом «фотореалистичной виртуальной модели». Помимо чудовищной вычислительной нагрузки на компьютер, этот подход обладает ещё рядом недостатков:

- очень большой объём (в гигабайтах) даже у простых и небольших моделей;
- сложности с импортом/экспортом в подавляющее большинство САПР- и ГИС-пакетов (они просто не поддерживают такое количество граней);
- в модели в принципе нет разделения ни на что: дома, рельеф, машины, кроны деревьев и др. объекты слиты в одну модель поверхности;
- невозможно присоединить какую-либо атрибутивную нагрузку об объектах в силу отсутствия объектов как таковых;
- деградация чётких пространственных форм и граней в сглаженные, «оплывшие» формы.

Подобная модель, не имеющая чётко прорисованных структурных линий, по которым перегибаются поверхности, в дальнейшем будем называть *бесструктурной трёхмерной моделью*.



Рис. 5. Искажение форм зданий на бесструктурной модели (слева) и правильное отображение этих же элементов в структурной модели (справа)  
Fig. 5. Distortion of building forms on a model without structural lines (left) and the correct representation of the same elements in a structural model (right)

Подобные недостатки делают итоговый результат практически неприемлемым для какого-либо использования, кроме просмотра (рис. 5). Для устранения этих недостатков фактически необходима оцифровка нужных пространственных рёбер объектов с последующим созданием модели с гораздо меньшим (в сотни и тысячи раз) количеством граней [Schwalbe, 2005].

При моделировании мы по-разному моделировали три принципиально разных класса объектов:

1. Рельеф и гидрография. Моделируется методом классификации трёхмерных точек с последующим разреживанием полученной триангуляционной модели [Zhang, Chen, 2001] до уровня 50 000–60 000 граней на 1 км<sup>2</sup> с длиной рёбер до 30–50 м. Процедура автоматизирована в значительной степени. Использовано программное обеспечение TerraSolid. Моделируется сегментами размером в несколько десятков га.

2. Растительность – моделируется как отдельные части поверхностей [Тикунов, Рыльский, 2016] (например, «группы деревьев») в виде триангуляционной поверхности с длиной рёбер до 4–6 м. Моделируется сегментами размером от 100 м<sup>2</sup> до несколько десятков га.
3. Здания и искусственные сооружения. Моделировались вручную, для этого была использована ЦМП. На её основе производилась рисовка рёбер трёхмерных элементов зданий и сооружений. Моделирование зданий и сооружений проводилось с детализацией основных архитектурных элементов – рёбер конструкции, форм скатов крыш, групп балконов, подъездов, пристроек. Плановая точность рисовки контуров – 20 см (достаточно для 1:500) [Naala et al., 1998]. Оценочная высотная точность полученной модели поверхности – не хуже 12 см по высоте (с учётом погрешности самих контрольных точек).

Модель, в которой представлены трёхмерные данные, описанные выше (то есть включая поверхности, у которых прорисованы чёткие линии перегиба поверхностей), будем называть *структурной трёхмерной моделью*.

Для оптимизации усилий по созданию трёхмерных объектов был применен следующий подход. Большая часть зданий представляет собой относительно простые геометрические формы, развитые вертикально без нависающих частей (за исключением свесов крыш и куполов церквей). Поэтому для адекватной прорисовки рёбер моделируемого объекта в целом достаточно оцифровки этих ребер в проекции сверху («в плане») с последующим присвоением 3D координат каждой из вершин оцифрованных линий с использованием цифровой модели поверхности (ЦМП).

Авторами был создан набор ГИС-инструментов на базе ArcView, позволяющих эффективно реализовать вышеописанный подход. Для создания моделей зданий со свешивающимися крышами и куполов также были созданы отдельные инструменты, позволяющие проводить их моделирование как с указанием параметров (размер свеса, диаметр купола), так и с использованием ЦМП (габариты крыши, высота низа и верха купола и прочее).



Рис. 6. Группы зданий, представленные в структурной 3D модели с нанесением фотореалистичных текстур

Fig. 6. Groups of buildings represented in a structural 3D model with photo-realistic textures

После оцифровки в подобном «2.5D» режиме производится построение OBJ объекта для каждого сооружения. Таким образом, вместо неразделимой поверхности мы получаем отдельные трёхмерные объекты в виде каждого сооружения, что позволяет перейти к объектно-ориентированному подходу при создании виртуальной модели [Vosselman, Dijkman, 2001; Vosselman, Suveg, 2001].

Полученные 3D объекты (в формате OBJ) заново добавляются в ранее созданный проект фототриангуляции Agisoft Photoscan для последующей уточнённой генерации текстур. Это позволяет в автоматизированном режиме нанести текстуры на грани каждого из объектов, обеспечив геометрическую корректность и фотореализм моделей (рис. 6).

Использование ЦМП, созданной с точностью 1:500 и выше, позволяет создать с аналогичной точностью 3D объекты, нанести на их стены реальные текстуры и внести эти объекты в виртуальную модель. Метричность в 3D позволяет выполнять измерения не только в плане, но и в трёхмерной форме: измерять площади и расстояния на фасадах, длины проводов между зданиями и тому подобное (рис. 7).

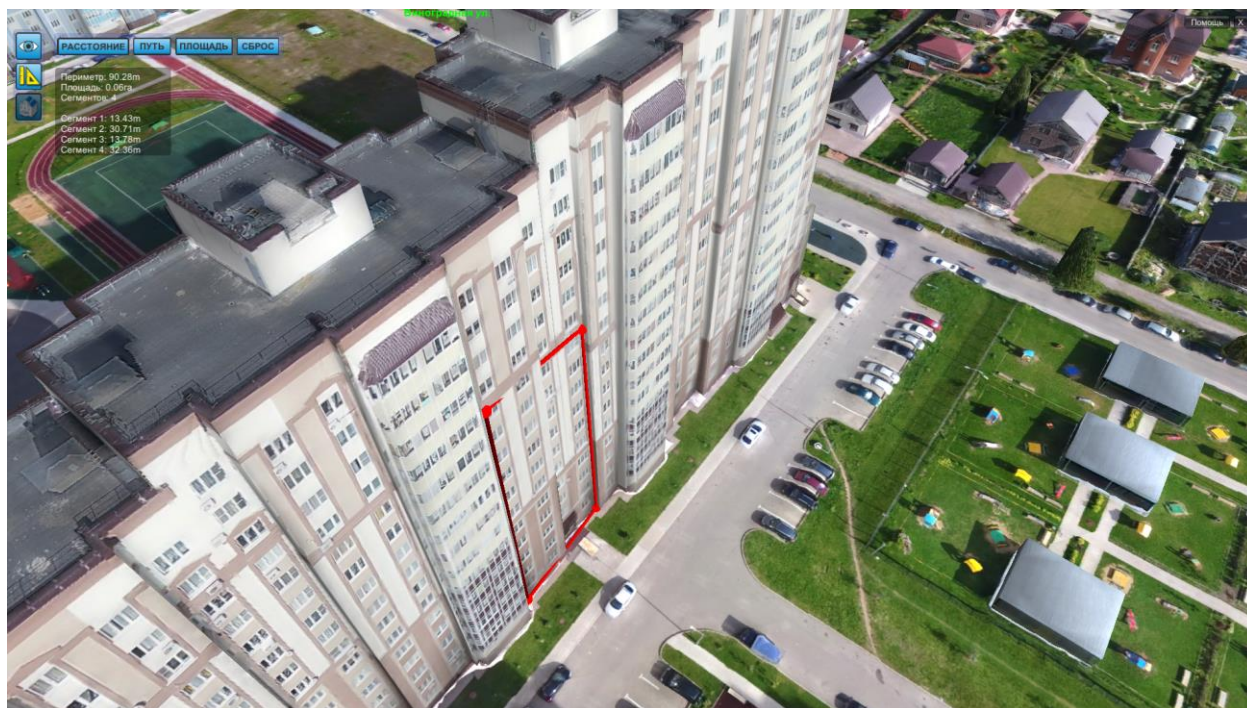


Рис. 7. Выполнение измерений на фасаде структурной модели здания  
Fig. 7. Taking measurements on the facade of the structural model of the building

### Создание виртуальной модели в виде отдельного приложения

Полученные трёхмерные объекты с прорисованными ребрами (в основном – здания), модели рельефа и групп деревьев с соответствующими им текстурами использовались для создания собственно виртуальной модели. Модель создавалась с использованием среды UNITY. Unity — межплатформенная среда разработки различного рода компьютерных симуляций. Unity позволяет создавать приложения, работающие под более чем 20 различными операционными системами, включающими персональные компьютеры, игровые консоли, мобильные устройства, интернет-приложения и другие.



Рис. 8. Подгрузка связанных с объектом дополнительных растровых данных  
 Fig. 8. Loading of additional raster data associated with the object

Основными преимуществами Unity являются наличие визуальной среды разработки, межплатформенной поддержки и модульной системы компонентов. К недостаткам относят появление сложностей при работе с многокомпонентными схемами и затруднения при подключении внешних библиотек. При этом Unity используется как крупными разработчиками, так и независимыми студиями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Развитые возможности импорта и экспорта различных 3D данных позволили с незначительными трудозатратами освоить создание виртуальных сред, использующих описанные выше наборы трёхмерных пространственных данных и их текстур. Помимо этого, возможность присоединения к каждому из объектов дополнительных данных в виде отдельных файлов данных позволяет реализовать объектно-ориентированный подход и создать полноценную модель с реализацией в том числе и ГИС-функционала. Это позволяет дополнять графическую трёхмерную модель текстовыми, табличными, мультимедийными данными, а также гиперссылками на сторонние страницы, объекты, приложения (рис. 8).

Реализованный на сегодняшний день функционал:

- моно- и стерео- режим просмотра;
- облёт с ручным управлением или по заданной траектории;
- управление мышью, курсором, тач-скрином;
- включение/отключение адресной информации;
- подгрузка поэтажных планов (дополнительные растровые изображения);
- подгрузка текстовых и табличных документов;
- выполнение измерений координат, длин, площадей;
- включение/выключение несуществующих, но планирующихся объектов.

Кроме того, Unity обеспечивает возможность запуска системы с заранее заданными параметрами. Так, например, перед запуском системы может быть указано положение и точка наведения камеры, её параметры, изменены параметры среды и тому подобное.

Именно таким образом в рамках тестирования была осуществлена тестовая работа данной модели (рис. 9) центральной части города Владивостока в режиме информационной поддержки АРМ службы 112.

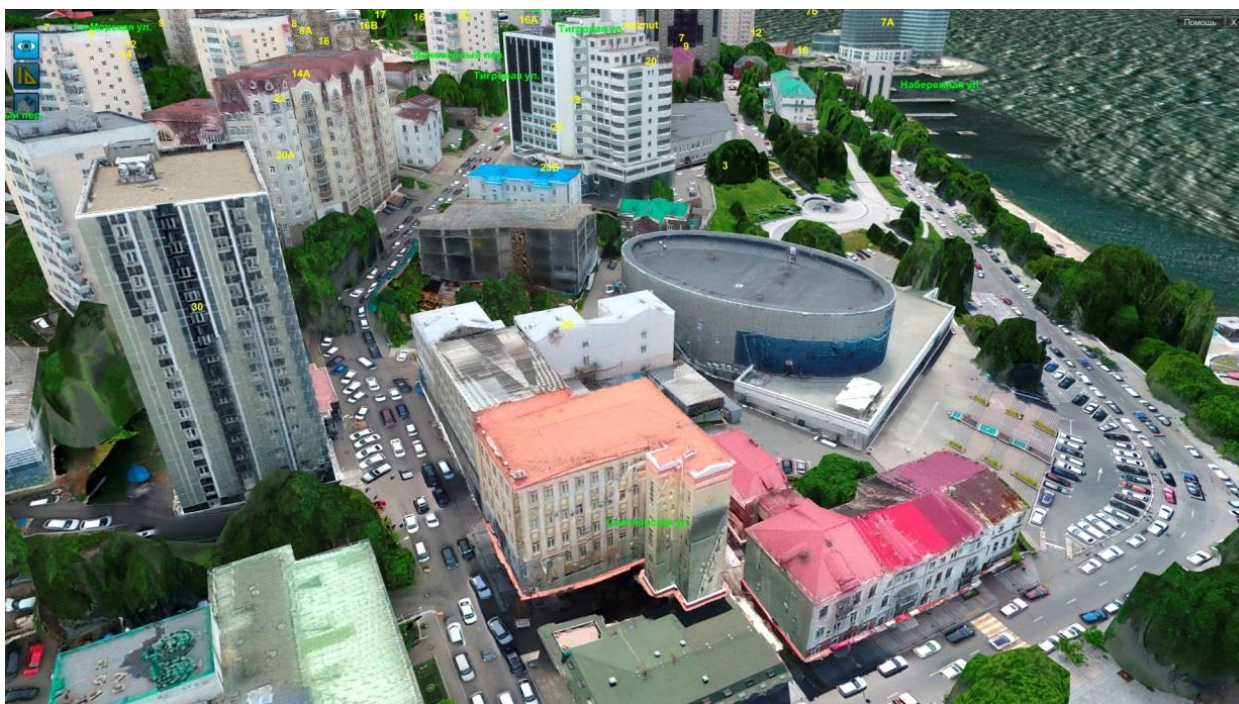


Рис. 9. Общий вид центральной части города Владивостока.  
Хорошо видна сложная пространственная структура территории  
Fig. 9. General view of the central part of Vladivostok.  
The complex spatial structure of the territory is clearly visible

Краткая схема работы виртуальной модели совместно с АРМ службы 112:

1. При поступлении сигнала о чрезвычайной ситуации в пределах территории, покрытой моделью, происходит трансформирование адресной информации о ЧС в координатную картографическую;
2. На основании координат формируется файл параметров запуска виртуальной модели;
3. Производится запуск модели с камерой, уже наведённой на объект, где в данный момент происходит ЧС.

Данная работа была проделана в тестовом режиме для оценки возможности сопряжения указанных систем совместно компанией-разработчиком (АО «СФЕРА»), АО «СОВЗОНД» и группой компаний R.PARTNER.

В течение 2017–2019 годов описанная методика была опробована на ряде объектов: модель посёлка Домодедово (Московская область), модель центральной части города Владивостока (Приморский край), модель центральной части города Калуги, модель припортовой территории порта Вера (Приморский край). Во всех случаях создавались самостоятельно работающие приложения, предназначенные для использования широким кругом лиц, в том числе – неспециалистов. Цели создания каждой из моделей различались. Так, модель Домодедово была создана как демонстратор технологий.

Модель порта Вера предназначена для корпоративного использования сотрудниками компании-заказчика и для использования в целях поддержки принятия решений по устойчивому развитию припортового комплекса.

Модель города Калуги предназначена для использования администрацией города с целью информационного обеспечения градостроительной деятельности и планирования территорий.

Модель города Владивостока использовалась для отработки взаимодействия с АРМ службы «112» по Приморскому краю и поддержки принятия решений при возникновении ЧС и взаимодействии подразделений МЧС.

Как видим, основным (но отнюдь не единственно возможным) назначением виртуальных моделей территорий является поддержка принятия решений и отображение городской среды для показа широкому кругу лиц.

Все модели создаются по принципу открытой архитектуры и могут быть в любой момент дополнены новой атрибутивной информацией, расширены как территориально, так и по функциональному набору или имплементированы в другие системы как составной или вызываемый компонент.

## ВЫВОДЫ

Новые технологические возможности в части сбора и геопривязки пространственных данных, а также в области визуализации трёхмерной информации позволяют по-новому переосмыслить возможности создания и использования виртуальных моделей, основанных на объектно-ориентированном подходе. Разработанные методические и технические решения, описанные в данной статье, позволяют создавать высокоточные виртуальные модели городских и промышленных объектов, отвечающие по функционалу, детальности и точности требованиям современных реалий. Стоимость и сроки создания, а также требования к профессиональной подготовке изготовителей данных моделей существенно снижаются по сравнению с ранее применявшимися.



Рис. 10. Пример данных воздушного лазерного сканирования, полученных с помощью лидара на базе БПЛА

Fig. 10. An example of airborne laser scanning data achieved with UAV-based lidar

Подобный подход – совместное использование лазерных и фотографических данных – не обязательно должен быть завязан на использование связки «наземное лазерное сканирование + аэрофотосъёмка с БПЛА» [Chen, 2007]. Уже на подходе широкое применение беспилотных летательных систем, оснащенных одновременно лидарами и

аэрофотокамерами, которые дают ещё более полную и детальную информацию об объектах (включая сведения о рельефе под кронами деревьев) – например, Riegl RiCopter оснащается сканерами с производительностью до 1,5 млн точек в секунду и камерами с разрешением до 50 мегапикселей (рис. 10).

Уже применяется в промышленности (правда, при съёмке крупных объектов) связка из воздушных лазерных сканеров и 5-камерных (надир+перспективные) сенсоров – например, Riegl VQ1560i + IGI Penta DigiCam. В силу массо-габаритных характеристик эти системы могут применяться только с пилотируемых аппаратов, но процесс миниатюризации продолжается. Описанные в данной статье технологии применимы во всех вышеупомянутых случаях.

Помимо вполне очевидных направлений использования в городском хозяйстве, абсолютно аналогичный подход возможен и в других областях знаний – при моделировании археологических объектов, уникальных природных ландшафтов, районов интенсивного воздействия на окружающую среду (открытые карьеры), а также зоны стихийных бедствий (лавинноопасные районы, зоны затопления, районы вулканизма и прочие).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной тематики исследований Регионального центра Мировой системы данных (Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова) при содействии компаний «СОВЗОНД» (город Москва) и «R. PARTNER» (город Хабаровск).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state budget theme of Regional Center of World Data System (Geographical Faculty of Moscow State University named after M.V. Lomonosov) in a collaboration with «SOVZOND» (Moscow) and «R. PARTNER» companies (Khabarovsk, Russia).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
2. Малеванная М.С., Рыльский И.А. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований. *Геодезия и картография*, 2014. Т. 5. № 4. С. 23–34.
3. Тикунов В.С., Рыльский И.А. Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о земле*, 2016. Т. 15. № 2073–3402. С. 104–113.
4. Allen P.K., Stamos I., Troccoli A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.C. 3D modeling of historic sites using range and image data. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 14–19 Sept. 2003, Taipei, Taiwan. IEEE, 2003. V. 1. P. 145–150. DOI: 10.1109/robot.2003.1241587.
5. Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. V. 73. No 2. P. 109–112.
6. Haala N., Brenner C., Anders K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998. V. 32. Part 3 (1). P. 339–346.
7. Lohr U. Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, 1997. V. I. P. 174–180.

8. *Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Workshop Laser scanning, Enschede, The Netherlands, 2005. WG III/3, III/4. V. 3. P. 12–14.
9. *Vosselman G., Dijkman S.* 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Canada: Natural resources, 2001. V. 34. № 3/W4. P. 37–44.
10. *Vosselman G., Suveg I.* Map based building reconstruction from laser data and References 109 images. Proceedings of Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. V. III. Centro Stefano Franscini, Monte Verit, Ascona: A.A. Balkema Publishers, 2001. P. 231–239.
11. *Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing (ICIP). Thessaloniki, Greece, 2001. V. 3. P. 935–938.

### REFERENCES

1. *Allen P.K., Stamos I., Troccoli A., Smith B., Leordeanu M., Hsu Y.C.* 3D modeling of historic sites using range and image data. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 14–19 Sept. 2003, Taipei, Taiwan. IEEE, 2003. V. 1. P. 145–150. DOI: 10.1109/robot.2003.1241587.
2. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. V. 73. No 2. P. 109–112.
3. *Haala N., Brenner C., Anders K.-H.* 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. V. 32. Part 3 (1). P. 339–346.
4. *Kapralov E.G., Koshkaryov A.V., Tikunov V.S.* Basics of Geoinformatics. Moscow: Academy, 2004. 480 p. (in Russian).
5. *Lohr U.* Digital elevation models by laserscanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 1997. V. I. P. 174–180.
6. *Malevannaya M.S., Rylskiy I.A.* Terrestrial laser scanning methods – new approaches to information provision of geographic researches. Geodesy and cartography, 2014. V. 5. No 4. P. 23–34 (in Russian).
7. *Schwalbe E., Maas H., Seidel F.* 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections. Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Workshop Laser scanning, Enschede, The Netherlands, 2005. WG III/3, III/4. V. 3. P. 12–14.
8. *Tikunov V.S., Rylskiy I.A.* Perspectives of using airborne laser scanning systems for forest mapping. News of the Irkutsk State University. Earth Science Series, 2016. V. 15. No 2073–3402. P. 104–113 (in Russian).
9. *Vosselman G., Dijkman S.* 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Canada: Natural resources, 2001. V. 34. No 3/W4. P. 37–44.
10. *Vosselman G., Suveg I.* Map based building reconstruction from laser data and References 109 images. Proceedings of Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. V. III. Centro Stefano Franscini, Monte Verit, Ascona: A.A. Balkema Publishers, 2001. P. 231–239.
11. *Zhang C., Chen T.* Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. Proceedings of the 2001 International Conference on Image Processing (ICIP). Thessaloniki, Greece, 2001. V. 3. P. 935–938.