- 6. Spichkin V.A., Opredelenie kriteriya krupnoy anomalii [Determination of the criterion of a large anomaly], Tr. AANII, 1987, T 402, pp. 15–20 (in Russian).
- Tsipisheva I.L., Muktepavel L.S., Ciciashvili G.Sh., Shatilina T.A., Radchenkova T.V., Osobennosti izmenchivosti ledovitosti v Tatarskom prolive (Yaponskoe more) v svyazi s regionalnoi atmosfernoi cirkulyaciei [Features of variability of ice cover in the Tatar Strait (Sea of Japan) in connection with regional atmospheric circulation], Izv. TINRO, 2016, T. 184, pp. 135–149 (in Russian).
- Yakunin L.P., Plotnikov V.V., Petrov A.G., Ledovie usloviya. Proekt «Morya». Gidrologiya i gidrohimiya morei, Tom VIII. Japonskoe more, Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya, St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, pp. 291–340 (in Russian).

УДК 711:528.711(470.43)

DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-31-46

## И.А. Рыльский<sup>1</sup>, И.В. Калинкин<sup>2</sup>

## СРАВНЕНИЕ ПРИГОДНОСТИ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АЭРОФОТОСЪЁМКИ С БПЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ

#### АННОТАЦИЯ

Широкое распространение инновационных методов съёмки очень сильно изменило подходы к информационному обеспечению работ по проектированию. В настоящее время одновременно несколько методов – воздушное лазерное сканирование, цифровая фотосъёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с последующим автоматизированным построением 3Д-точек – претендуют на роль наиболее оптимального источника данных для ГИС и проектирования. Однако эти материалы не являются похожими друг на друга ни по точности, ни по подробности.

Воздушное сканирование в основном проводится с использованием пилотируемых носителей. Данные воздушного сканирования отличаются высокой точностью, возможностью ведения съёмки рельефа под пологом растительности, металлических конструкций, мачт. Данные съёмок с БПЛА в основном представлены материалами аэрофотосъёмки, выполняемой кадровыми камерами. Далее эти снимки обрабатываются с помощью средств программной автоматической генерации 3Д-точек, используемых как для создания модели рельефа (поверхности), так и для создания ортофотопланов.

Эти материалы традиционно используются для создания производных картографических материалов. Лазерное сканирование уже очень давно используется для обеспечения проектной деятельности. В последнее время наблюдаются попытки использовать для этой цели и данные трёхмерной обработки фотосъёмок с БПЛА.

В ходе сравнения материалов этих двух видов съёмок, проводившихся на идентичных территориях в одно и то же время, были получены наборы данных, позволяющие оценить особенности данных, получаемых каждым из методов. По результатам сравнений данных обработки снимков БПЛА с данными лазерного сканирования можно сделать вывод, что материалы обработки фотоданных, полученных с БПЛА, существенно проигрывают в полноте и качестве данным лазерного сканирования.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет; 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1; *e-mail:* rilskiy@mail.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет; 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1; *e-mail:* ilyakl@yandex.ru

В статье рассмотрены отличия этих материалов и сделаны предположения о природе этих отличий.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

LIDAR, лидар, воздушное лазерное сканирование, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), аэрофотосъёмка

#### введение

В настоящее время отрасль картографии и дистанционного зондирования переживает бурный подъём, связанный с развитием ряда ключевых технологий сбора и обработки пространственных данных. Среди прочих отметим следующие:

- технологии лазерного сканирования (воздушное, мобильное, наземное);
- технологии различных видов съёмок с БПЛА (в основном пассивные съёмки);
- ГНСС-ИНС технологии позиционирования съёмочного сенсора.

Упомянутые технологии за последние 15 лет фактически произвели революцию в точности, скорости и стоимости сбора пространственных данных [Schwarz, 2010].

ГНСС-ИНС технологии с использованием волоконно-оптических гироскопов и акселерометров (позднее – и MEMS-решения) позволили решить задачу определения линейных и угловых параметров ориентации сенсоров (и носителей) в пространстве, а также принципиально повысили точность навигации. Лазерные сенсоры позволили достигать точностей однократных (без стереометодов) измерений дальности на уровне от долей миллиметров (для наземного сканирование) до первых сантиметров (воздушное лазерное сканирование). Беспилотные аппараты в настоящее время существенно снизили минимальный объем съёмки и стоимости налета.

Однако в ряде случаев одна и та же ниша на рынке услуг, ранее безраздельно принадлежавшая одной из технологий (например, геодезии или космическим съёмкам), становится объектом конкурентной борьбы нескольких одновременно развивающихся инновационных технологий. Это неизбежно вызывает необходимость сравнения характеристик и особенностей итоговых результатов, полученных разными технологиями при решении одной и той же задачи.

Одним из подобных примеров «технологического противостояния» является борьба технологии воздушного лазерного сканирования с пилотируемых носителей и технологии аэрофотосъёмки с БПЛА легкого и среднего классов при решении задач информационного обеспечения проектных работ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Воздушное лазерное сканирование

В конце 1990-х годов в области методов получения картографических материалов высокой детальности (масштаб 1: 5 000 и крупнее) произошли серьёзные перемены. Они были вызваны появлением новых методов дистанционного зондирования Земли с использованием импульсных лазеров. Вместо классической аэрофотосъёмки потребителям картографической информации была предложена высокоточная лазерно-локационная съёмка в сочетании с цифровой аэрофотосъёмкой [Kumar, 2014]. Последний вид съёмки в дальнейшем будем именовать «воздушное лазерное сканирование», или ВЛС, что будет подразумевать использование тандема «лазер + фото», поскольку лазерная съёмка без аэрофотосъёмки применяется редко.

Постепенное распространение данного метода в мире и прогресс в области создания цифровых камер и лазерных сканеров [Wehr, 1999] привели к эволюции точности и подробности получаемых по этим материалам данных – от 1: 5 000 в конце 1990-х до 1: 500 к началу 2015 г.

Лазерное сканирование является разновидностью активной съёмки. Установленный на авианосителе (самолёте, вертолёте) полупроводниковый лазер (работающий в импульсном режиме) проводит дискретное сканирование поверхности Земли и объектов, расположенных на ней, регистрируя направление лазерного луча и время прохождения луча (см. рисунок 1).

Таким образом, удаётся однозначно локализовать в пространстве точку (точки, если отражений было много), от которой отразился лазерный луч. Текущее положение лазерного сканера определяется с помощью высокоточного спутникового приёмника, работающего в дифференциальном режиме совместно с инерциальной системой. Зная углы разворота и относительные смещения между компонентами описанной системы, можно однозначно определить абсолютные координаты каждой точки лазерного отражения в пространстве.



**Рисунок 1.** Принципы лазерного сканирования с воздуха **Figure 1.** Principles of airborne laser scanning

Поскольку лазерный сканер испускает сотни тысяч импульсов в секунду («качая» луч из стороны в сторону и смещаясь вместе с носителем (скажем, вертолетом)), то территория съёмки оказывается покрыта множеством точек лазерных отражений, для каждого из которых известны координаты, интенсивность, а также порядок отражения: было ли это первое отражение – от самого высокого объекта в данной точке или последнее – от земли или здания [Blaschke, 2004]. Данные, получаемые в результате совместной обработки лазерной альтиметрии, данных инерциальной системы и приёмников GPS-ГЛОНАСС, представляют собой массив нерегулярно расположенных точек, для которых известны пространственные координаты, интенсивность отражённого сигнала и ряд дополнительных параметров.

Одновременно с лазерным сканированием ведётся аэрофотографирование поверхности земли с использованием цифровой камеры, регистрирующей излучение в видимом, инфракрасном либо тепловом или ИК диапазоне электромагнитного излучения. Аэрофотоснимки регистрируются на бортовом носителе. Наличие точных меток времени позволяет определить элементы внешнего ориентирования камеры и осуществить привязку снимка и коррекцию ошибок за рельеф, за наклоны, кривизну Земли и т.п. Исправленные ортоизображения сливаются в единую бесшовную мозаику. В результате же автоматизированной обработки точек отражений производится высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР) территории.

Что видно на этих данных? Производительность систем ВЛС не уступает обычной съёмке в видимом или ИК-диапазонах. При этом пользователь в любом случае получает многозональные фотоматериалы наравне с данными лазерного сканирования, по цене существенно не превосходящей цену обычной съёмки. Однако значимость этих данных гораздо выше, чем у данных классической аэрофото- или космической съёмки.

Кроме воздушного лазерного сканирования ни один из применяющихся на сегодняшний день методов в дистанционном зондировании земли не обладает одновременной возможностью получать и видимую поверхность крон (рисунок 2), и поверхность рельефа [Burnett, 2003]. Действительно, оптико-электронное наблюдение даёт нам информацию о видимой поверхности (кроны), оставляя рельеф невидимым. Радарная съёмка – либо рельеф, либо видимую поверхность (в зависимости от длины волны). Только воздушное лазерное сканирование сочетает в себе лучшие черты каждого из методов, обладая при этом субдециметровыми точностями измерения высоты. Именно благодаря этому свойству воздушное лазерное сканирование – один из немногих методов, позволяющих получить точные геометрические параметры объектов, используя прямые измерения [Tiede, 2005].

На данных лазерного сканирования видны в 3D висячие объекты – такие, как провода, висячие конструкции и тонкие конструктивные элементы (столбы, балки, проч.).

Наличие информации о рельефе и наземных объектах непосредственно в 3D позволяет автоматически получать относительные высоты деревьев [Zimble, 2003] и зданий, определять расстояния от проводов до объектов, строить профили с учётом надземных объектов – всё это делается без полевых работ, только по данным воздушного лазерного сканирования.

В зависимости от плотности лазерного сканирования определяются соответствия масштабу съёмки. Обычно для съёмки под 1: 5 000 применяется плотность около 1 точки на  $m^2$ , 1: 2 000 – 2 точки на 1  $m^2$ , под 1:1 000 – 4–6 точек на  $m^2$ , а под 1: 500 – 10–20 точек на  $m^2$ . Аэрофотосъёмка при этом ведётся под разрешение 30, 20, 12 и 6 см соответственно.

При обработке данных ВЛС форма и геометрия объектов получается с данных лазерного сканирования, а атрибутивные характеристики и контура объектов, не выражающихся в рельефе (например, разметка дороги) наносятся по результатам сопровождающей ВЛС аэрофотосъёмки.

На материалах с плотностью 4 т/м<sup>2</sup> (под 1:1000) легко отличимы в 3D-режиме (то есть просто по форме, без спектральных признаков) здания, поверхность грунта, кроны лиственных и хвойных деревьев с учётом наиболее высоких точек дерева (рисунок 2).

Подводя итоги описанию методов воздушного лазерного сканирования, ещё раз отметим ключевые особенности технологии:

- пригодность для картографирования в масштабах 1:500-1:5000;
- проницаемость для съёмки растительности;

- возможность съёмки висячих конструкций;
- ведение параллельно не только лазерного сканирования, но и высокодетальной аэрофотосъёмки специализированными среднеформатными камерами с аппаратным определением элементов внешнего ориентирования, достаточными для геопривязки данных с точностями на уровне 1: 500–1: 5 000;
- средний или значительный вес съёмочной системы от 8 до 120 кг, что, как правило, подразумевает необходимость использования пилотируемого носителя.



**Рисунок 2.** Пример лазерного сканирования с плотностью 4 точки/м<sup>2</sup> **Figure 2.** Example of LIDAR data with a density of 4 pts/m<sup>2</sup>



**Рисунок 3.** Пример лазерного сканирования с плотностью 12 точек/м<sup>2</sup> **Figure 3.** Example of LIDAR data with a density of 12 pts/m<sup>2</sup>

## Аэрофотосъёмка с БПЛА

Говоря о рынке съемок с использованием БПЛА, уточним сразу, что мы ведём речь исключительно о рынке РФ, с присущими ему рыночными, административными, логистическими и климатическими особенностями.

В силу ряда причин в РФ (как, впрочем, и в большинстве прочих стран) использование тяжёлых (взлетная масса более 30 кг) БПЛА в коммерческих целях затруднено – по соображениям безопасности, стоимости и организационным причинам. Подавляющая масса БПЛА относится к классу лёгких и/или средних с полезной нагрузкой до 3–4 кг и весьма незначительным радиусом полёта; рыночные особенности ограничивают стоимость съёмочного комплекта БПЛА цифрой до 5 000 000 рублей. Эти особенности определяют:

- дальность незначительная, ввиду низкой энерговооружённости и необходимости осуществлять посадку либо вертикально, либо «вскользь», либо на парашюте;
- полезную нагрузку в подавляющем большинстве случаев это пассивные RGBкамеры (в худшем случае – видеокамеры, в лучшем – полупрофессиональные фотоаппараты с матрицей до 24х35 и разрешением до 50 мегапикселов). Высокоточные инерциальные системы и лазерные сканеры не ставятся на подобные носители в силу высокой стоимости, значительной массы и ограниченных энергомассовых возможностей БПЛА. Исключения из данного правила единичны и носят некоммерческий, экспериментальный характер.
- уровень безопасности полётов как правило, стоимость и масса БПЛА не позволяют поставить высоконадёжные системы, обеспечивающие гарантированную связь с аппаратом, автопилотирование в неблагоприятных климатических и радиочастотных условиях, диспетчеризировать полёт, а также выполнить гарантированно и безопасно взлёт и посадку в течение всего жизненного цикла функционирования сенсоров (для лазерных сканеров – около 2 000 часов работы и 8–10 лет непрерывной эксплуатации). Это ведёт к тому, что пользователи банально опасаются ставить дорогие сенсоры (тяжёлые камеры, лазерные сканеры, гиперспектральные сенсоры и т.п. на БПЛА бюджетного класса или БПЛА как таковые, отдавая предпочтение пилотируемым носителям).

Таким образом, на 2017 г., говоря о рынке съёмок с БПЛА, мы можем говорить фактически о следующих особенностях данной технологии:

- возможность съёмок для создания ортофотопланов с детальностью 1: 500-1: 5 000;
- использование исключительно пассивных сенсоров, работающих в видимом и (редко) в ближнем ИК-диапазоне;
- незначительная дальность полета и производительность съёмки;
- невозможность установки точных ГНСС-ИНС систем на аппараты бюджетного класса (как следствие – практически полное отсутствие подобных систем на БПЛА в РФ);
- низкая стоимость подобной системы при покупке.

## Об исключениях из правил

Конечно, нам известно и о существовании исключений из указанных правил:

- лёгкие воздушные лазерные сканеры: например Riegl VUX SYS или Riegl MiniVUX данные системы имеют возможность работы с высот до 600 метров, обладают производительностью, близкой к топовым системам 5-летней давности, и массой 8 и 6 кг соответственно. Однако данная масса и стоимость систем (сотни тысяч евро) пока не позволили поставить ни один данный прибор на БПЛА.
- гиперспектральные и многозональные пассивные сенсоры для БПЛА обладают средней стоимостью (до нескольких десятков тысяч рублей) и массой (менее 1 кг), однако обладают низкой детальностью, охватом и – как следствие – производительностью. Обычно используются в экспериментальных или научных целях ограниченным кругом пользователей в РФ.

Поскольку общее количество вышеперечисленных систем на рынке РФ очень мало и их услуги не имеют широкого коммерческого применения, мы исключим их из данного сравнения.

## О том, что нужно при проектировании

Практика картографического обеспечения проектно-изыскательских работ в РФ имеет ряд особенностей, не характерных для кадастровых, экологических, тематических задач. Отметим среди них:

- жёсткие требования к точности съёмки и отображения рельефа. Помимо высоких точностей (до 8 см по высоте для топопланов 1:500 с сечением 0.25 м) по высоте, в структуре ЦМР необходимо отображать линии перегибов склона (бровки, подошвы откосов), тальвеги, характерные точки рельефа (особенно на резких перегибах);
- для работ в населённых пунктах под масштабы 1: 1 000 и 1: 500 необходимо отображать значительное количество тонких (столбы, столбики) или висячих конструкций и их параметров (провода, расстояния от них до земли);
- необходимость картографирования с одинаковой полнотой как открытых, так и покрытых растительностью или затенённых конструкциями участков местности.

## Постановка задачи

Принимая во внимание вышесказанное, было решено выполнить оценку разницы в качестве итоговых данных, которые могут быть получены при работе с использованием как методов лазерного сканирования + АФС с использованием пилотируемого носителя, так и сенсоров, снимающих с БПЛА.

Поскольку необходимых для данной работы в нужном ассортименте БПЛА не имелось, на ряд объектов были выполнены дублирующие полёты – один раз съёмка велась с использованием ВЛС+АФС, другой раз – просто фотокамерой (с фиксацией центров с использованием ГНСС геодезического класса).

Лазерная сканирующая система, использованная в данном проекте, является в целом довольно старой. Это Riegl Q560, обеспечивающий скорость работы до 240 000 точек в секунду, возможность работы на высотах до 1500 м, оборудованный инерциальной системой AeroCONTROL с точностью угловых измерений до 0.005 углового градуса, 2-частотным GPS-ГЛОНАСС модулем и специализированной цифровой среднеформатной аэрофотокамерой IGI, 39 мегапикселов, фокусное расстояние 50 мм.

В качестве сенсоров-эмуляторов БПЛА съёмки использовались:

- IGI 39 мегапикселов; 37х49 мм размер матрицы; съёмки с высоты 300 м, 250 м, с измерением координат центров; разрешение 4 см.
- NIKON D800; 36 мегапикселов, 24х35 мм размер матрицы; съёмки с высоты 300 м, 250 м., с измерением координат центров; разрешение 5-6 см, широкоугольный объектив.
- SONY RX1R; 24 мегапиксела, 24х35 мм размер матрицы; съёмки с высоты 300 м, с измерением координат центров; разрешение 7-8 см, широкоугольный объектив.
- встроенная камера DJI Phantom 4; съёмки с высоты 50-70 м, без измерения координат центров; разрешение 3-4 см, широкоугольный объектив.

Ожидаемая точность высотной модели, исходя из соотношения «высота-базис» и разрешения снимков, составила около 12 см для среднеформатной камеры, около 12–15 см для Nikon и Sony, около 10 см – для DJI. Среднеквадратическая погрешность при уравнивании и измерении на контрольных точках в целом подтверждают подобную точность. Все вышеперечисленные значения укладываются в требования, предъявляемые топопланам 1: 500 с сечением рельефа 0.5 м.

Съёмки лазерным сканером велись с высоты 450 м, что обеспечивает возможность работы с точностью, удовлетворяющей требования масштаба 1: 500 согласно требованиям СНиП 11-02-96. Оценка точности по контрольным точкам дает нам ожидаемую высотную точность данных на уровне 8–10 см. Данные также удовлетворяют требованиям 1: 500.

Все материалы фотограмметрической обработки проходили оценку по точности уравнивания с использованием данных о центрах координат, контрольных точек (от 12 до 28 штук на объект). Данные лазерного сканирования проверялись похожим образом (оценка точности расчёта траектории, взаимное различие залётов в точках лазерных отражений, соответствие контрольных точек данным лазерного сканирования). Аппаратура воздушного лазерного сканирования прошла поверку на полигоне ВНИИФТРИ в 2016 г., её точностные характеристики подтверждены соответствующим сертификатом (высотная точность измерений – лучше 5 см, плановая – лучше 8 см).

Были проведены сравнительные съёмки по результатам сравнения с контрольными точками на каждом из объектов.

Контрольные точки маркировались знаком «крест», центр креста определялся методом статических измерений от базовых станций, оценочная точность позиционирования центра – лучше 3 см. Во всех случаях система координат и высот – WGS84, эллипсоидальная. Координаты базовых станций определялись методом PPP в статике 8 часов; при вычислении центров координат фото и траекторного решения для лазера использовались одни и те же координаты станций.

Для сравнения этих разнородных по своей сути материалов съёмки было принято решение использовать в первую очередь облака трёхмерных точек. Действительно, при фотограмметрической обработке в автоматизированном режиме (с использованием корреляционных методов) в первую очередь практически любое программное обеспечение получает облако точек (координаты которых определены стереофотограмметрическим методом), и только потом данное облако уже фильтруется, используется для создания ЦМР (которая в свою очередь используется для создания ортофото и т.д.). При выполнении лазерного сканирования пользователь в первую очередь получает аналогичное облако точек (и аналогично его использует) с той только разницей, что данное облако получается не стереофотограмметрическим методом, а методом прямого измерения дальности и элементов внешнего ориентирования сенсора.

При этом для обоих методов характерно, что при наличии локальных или систематических ошибок в облаке точек методы решения данных проблем (и масштаб проблем) в целом идентичны. Поэтому мы считаем допустимым при сравнении использовать различия в форме облаков точек, полученных разными методами.

### Используемое программное обеспечение

Для обработки данных воздушного лазерного сканирования были использованы как комплект программного обеспечения, прилагающийся для низкоуровневой обработки данных сканеров Riegl (Riprocess, Grafnav, Aerooffice), так и комплект TerraSolid (под Microstation) для дальнейшей обработки и анализа точек лазерных отражений. Качество измерения координат и степень полноты данных определяются в целом не программным обеспечением, а аппаратными характеристиками воздушного лазерного сканера и блока ИНС-ГНСС навигации.

В отличие от лазерного сканирования при фотограмметрической обработке снимков программное обеспечение может достаточно сильно влиять на качество и полноту распознаваемых коррелятором данных и точность их геопозиционирования.

Ранее уже выполнялись исследования в области наиболее пригодного для целей фотограмметрической обработки программного обеспечения. В поле зрения компании попали такие программные продукты, как UASMaster, Agisoft Photoscan, OpticalScape и ряд других.

В основной массе подрядчиков, представленных в РФ и использующих съёмки с БПЛА, наиболее распространенным ПО для обработки является AgiSoft PhotoScan. Данное ПО достаточно недорого, дает внешне неплохой результат в части формирования облаков точек и ЦМР и имеет вполне дружественный интерфейс. В то же время используемые подходы для решения классических фотограмметрических задач в данном ПО отличаются от принятых в таких продуктах, как Photomod или Inpho. Однако в основном по причине цены и сложности освоения рядовой пользователь БПЛА практически никогда не может позволить себе купить

столь дорогостоящие продукты и использует наиболее простой путь – либо использует ПО, идущее в комплекте с БПЛА (если он зарубежный), либо покупает решение от Agisoft. Впрочем, идеологические подходы к фотограмметрическим задачам у UASMaster или OpticalScape схожи с Agisoft и мало напоминают строгие подходы к фотограмметрии, используемые, скажем, в Inpho.

Принимая во внимание вышесказанное, было принято решение при обработке данных, эмулирующих БПЛА съёмку, использовать для обработки AgiSoft Photoscan (далее – просто Agisoft).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ Лазерное сканирование против АФС с БПЛА: среднеформатная камера:

Красным цветом показаны точки, полученные фотограмметрическим методом, белым – данные воздушного лазерного сканирования.



**Рисунок 4.** Пример обработки одного и того же блока данных с использованием различных программных продуктов (UASMaster, AGIsoft Photoscan, OpticalScape) **Figure 4.** Profiles of 3D pointcloud formed in different software solutions (using photogrammetric methods for processing the same block of images)



Рисунок 5. Сравнение данных ВЛС и БПЛА-АФС.
Хорошо видно отсутствие точек рельефа под растительностью на фотограмметрическом блоке и их наличие в лазерных данных. Аналогичное – на одной из стен здания
Figure 5. Comparison of LIDAR data and photogrammetric 3D points. There are no 3D photogrammetric points under the vegetation, one wall is "absent"



Рисунок 6. Сравнение данных ВЛС и БПЛА-АФС.
Лазерные данные покрыли здание с обеих сторон, хорошо показаны кран и перекрытия в доме.
На данных с БПЛА ничего подобного нет, в стеснённых местах (стена и кран) данные отсутствуют.
В правом нижнем углу видны значительные артефакты облака точек, построенного по фотограмметрическим данным,
при этом по данным лазерного сканирования всё вполне корректно.
Figure 6. Comparison of LIDAR data and photogrammetric 3D points.
LIDAR data cover all the walls, metal constructions, and the roof.
3D photogrammetric points do not cover the crane, the wall nearby, and form distorted surface of relief under the crane



Рисунок 7. Цифровые модели рельефа (TIN), построенные по данным БПЛА АФС (слева) и воздушного лазерного сканирования (справа). Хорошо заметно очень большое количество артефактов на ЦМР по данным БПЛА АФС даже на незалесённых участках Figure 7. Digital elevation models formed using LIDAR data (right) and 3D photogrammetric points (left). The incorrect surface parts and distortions are quite obvious on 3D photogrammetric DEM



**Рисунок 8.** Разница высот (в метрах) между ЦМР по данным ВЛС и БПЛА АФС **Figure 8.** Difference between LIDAR and 3D photogrammetric DEM (in meters)



Рисунок 9. Характерное искажение высот, габаритов и формы зданий на открытой местности при использовании данных БПЛА АФС (красные точки) Figure 9. Typical distortions of building forms and overall dimensions on 3D photogrammetric data. LIDAR data are quite good



Рисунок 10. Полностью некорректное описание формы сооружения и рельефа на данных БПЛА АФС. Причина – недостаточно текстурный объект Figure 10. Completely incorrect form of object and relief defined by 3D photogrammetric points. LIDAR data are correct



Рисунок 11. Остутствие данных о столбах, проводах, ограждениях на дороге в данных БПЛА АФС. На данных лазерного сканирования они присутствуют Figure 11. Poles wires and metal constructions are absent on 3D photogrammetric data. LIDAR data have information about these objects



Рисунок 12. Отсутствие на данных БПЛА АФС точек ферменных сооружений и столбов. На данных лазерного сканирования они присутствуют Figure 12. Poles and metal constructions are absent on 3D photogrammetric data LIDAR data has information about these objects



 Рисунок 13. Проявления «эффекта колодца» на данных БПЛА АФС точек (в стеснённых участках без возможности качественного стереомоделирования коррелятор не создаёт облако точек). Лазерное сканирование при этом справилось успешно. Мачтовые конструкции на БПЛА АФС точках не отражены, на ВЛС отражены
Figure 13. "Pit" effect makes the walls of oil reservoir absent on 3D photogrammetric data. LIDAR data have information about these objects



Рисунок 14. Искажения формы и шум облака точек по БПЛА АФС на участке дороги. Профиль по фотограмметрическим данным совершенно не соответствует действительности. Лазерное сканирование – корректный результат Figure 14. Distorted profile of the road on 3D photogrammetric data – elevation noise is too big, the shape is incorrect. LIDAR data are correct

#### выводы

Результаты, продемонстрированные в данном сравнении, достаточно неожиданны. Действительно, судя по формальным признакам (точность уравнивания, использование широкоугольных объективов, съёмки с высоким разрешением, подтверждение высотной точности на контрольных точках), данные облаков точек, полученные с БПЛА АФС не должны уступать данным лазерного сканирования. Но, исходя из реальности, они им не просто уступают, а в целом не являются пригодными для задач проектирования, так как в принципе не позволяют адекватно отобразить ни состав объектов на местности, ни их форму, ни габариты. В то же время данные воздушного лазерного сканирования полностью свободны от этих недостатков.

Причин этому несколько. В первую очередь, контрольные точки располагаются на открытой со всех сторон местности, а маркировочный крест является идеальной текстурой для коррелятора. Неудивительно, что здесь всё отображается корректно и в соответствии с фотограмметрическими расчётами. В то же время стоит местности стать мало- или бестекстурой (рисунки 13 и 18), и в облаке точек появляются удивительные формы рельефа, которых в природе не наблюдается.

## Особенности работы коррелятора.

Сам принцип корреляции в пределах скользящего окна размером в несколько пикселов (и чем больше – тем лучше) не позволяет отобразить в модели резкие перегибы – бровки, столбы, углы крыш и зданий. Это приводит к характерным «стожкам», когда у зданий сглаживаются внешние углы, и «корытам» – когда на внутреннем угле дороги и забора возникает сглаживание. То же касается коньков крыш и т.п. Поскольку все вышеперечисленные объекты не являются точками локации контрольных измерений, то увидеть этот эффект при уравнивании мы не можем.

Существует мнение об упрощённости методики уравнивания, используемой в программном обеспечении, рассчитанном на малоподготовленного обработчика данных БПЛА АФС. Упрощённость методики проявляется в излишней «оптимистичности» оценки качества уравнивания блока и невозможности полноценно проконтролировать качество связки не только на контрольных точках, но и на связующих точках.

Принципиально невозможно увидеть стереоэффект в «колодце» – когда стеснённый участок и его стены в принципе не видны с каких-либо двух точек, соответственно, нет и облака трёхмерных точек.

Принципиально невозможно увидеть землю в лесу – неважно, с какой высоты. Отдельные прогалы в лесопокрытой территории не меняют общую картину – плотность данных по БПЛА АФС на залесённой территории в части рельефа практически равна нулю. Тем не менее программное обеспечение без колебаний строит модель по верхушкам растительных объектов, что впоследствии вызывает необходимость фильтровать данные без добавления реальной информативности.

Коснувшись причин описанных расхождений в данных, нельзя не отметить последствия. Приведённые примеры наглядно говорят о том, что применение методов использования БПЛА с камерами практически любого мыслимого типа (от «мыльниц» до профессиональных решений ценой до 100 000 евро) с обработкой в «ПО для любителей» не позволяет создать сколько-нибудь пригодные для проектирования материалы на городские, сельские и незаселённые территории с растительностью.

В случае использования профессионального ПО (Photomod, Inpho, проч.) и ручной рисовки структурных элементов рельефа в стереорежиме, а также дополнения стереомоделей материалами полевых работ в лесопокрытых районах возможно получить достоверную модель местности и создать данные, пригодные для задач проектирования. Однако поскольку одними из основных причин использования БПЛА с аэрофотокамерами являются их низкая стоимость и сжатые сроки работы, то подобное технологическое решение полностью обнуляет все преимущества БПЛА-съёмок как в скорости, так и в цене.

Напротив, данные лазерного сканирования, получаемые в ходе залёта, не обладают ни одним из подобных недостатков, высокоавтоматизированы в обработке и полностью пригодны для создания картматериалов под проектные задачи в любых условиях. В большинстве случаев с учётом дополнительных затрат на обработку данных и устранение вышеописанных «особенностей» данных с БПЛА, стоимость создания топопланов по данным лазерного сканирования практически идентична таковой по данным БПЛА.

Отметим также практически несопоставимую производительность методов – если БПЛА самолётного типа может осуществить в день не более 30–50 км<sup>2</sup> съёмок под масштаб 1:2 000, то при использовании лазерного сканирования за один день возможна съёмка до 500 км<sup>2</sup> территории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Blaschke T. 3D landscape metrics to modeling forest structure and diversity based on laser scanning data // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Freiburg, 2004. – Vol. XXXVI-8/W2. – Pp. 129–132.
- 2. Burnett C., Blaschke T. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis. – Ecological Modeling, 2003. – № 168. – Pp. 233–249.
- 3. *Kumar V.* Extraction of forest inventory parameters and 3D modelling from airborne LIDAR // Materials of ESRI international user conference. San Diego, 2014. Pp. 342–351.
- 4. Schwarz B. LIDAR: Mapping the world in 3D // Nature Photonics, 2010. № 4. Pp. 429–430.
- 5. *Tiede D. et al.* A full GIS-based workflow for tree identification and delineation using laser scanning // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vienna, 2005. Vol. XXXVI, Part 3/W24. Pp. 9–14.
- 6. Wehr A.; Lohr U. Airborne Laser scanning an introduction and overview // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999, № 54. Pp. 68–82.
- 7. *Zimble D.A. et all.* Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR // Remote Sensing of the Environment. 2003, № 87. Pp. 171–82.

## Ilia A. Rilskiy<sup>1</sup>, Ilia V. Kalinkin<sup>2</sup>

## FEASIBILITY COMPARISON OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA AND 3D-POINT CLOUDS FORMED FROM UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)-BASED IMAGERY USED FOR 3D PROJECTING

## ABSTRACT

New, innovative methods of aerial surveys have changed the approaches to information provision of projecting dramatically for the last 15 years. Nowadays there are at least two methods that claim to be the most efficient way for collecting geospatial data intended for projecting – the airborne laser scanning (LIDAR) data and photogrammetrically processed unmanned aerial vehicle (UAV)-based aerial imagery, forming 3D point clouds. But these materials are not identical to each other neither in precision, nor in completeness.

Airborne laser scanning (LIDAR) is normally being performed using manned aircrafts. LIDAR data are very precise, they allow us to achieve data about relief even overgrown with vegetation, or to collect laser reflections from wires, metal constructions and poles. UAV surveys are normally being performed using frame digital cameras (lightweight, full-frame, or mid-size). These cameras form images that are being processed using 3D photogrammetric software in automatic mode that allows one to generate 3D point cloud, which is used for building digital elevation models, surfaces, orthomosaics, etc.

All these materials are traditionally being used for making maps and GIS data. LIDAR data have been popular in design work. Also there have been some attempts to use for the same purpose 3D-point clouds, formed by photogrammetric software from images acquired from UAVs.

After comparison of the datasets from these two different types of surveying (surveys were made simultaneously on the same territory), it became possible to define some specific, typical for LIDAR or imagery-based 3D data. It can be mentioned that imagery-based 3D data (3D point

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography; 119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory,1; *e-mail:* rilskiy@mail.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography; 119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory,1; *e-mail:* ilyakl@yandex.ru

clouds), formed in automatic mode using photogrammetry, are much worse than LIDAR data – both in terms of precision and completeness.

The article highlights these differences and makes attempts at explaining the origin of these differences.

## **KEYWORDS:**

LIDAR, airborne laser scanning, unmanned aerial vehicle (UAV), photogrammetric processing, 3D pointc loud, aerial imagery

## REFERENCES

- 1. Blaschke T. 3D landscape metrics to modeling forest structure and diversity based on laser scanning data, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, 2004, Vol. XXXVI-8/W2, pp. 129–132.
- 2. Burnett C., Blaschke T. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis, Ecological Modeling, 2003, 168, pp. 233–249.
- 3. Kumar V. Extraction of forest inventory parameters and 3D modelling from airborne LIDAR, Materials of ESRI international user conference, San Diego, 2014, 342–351.
- 4. Schwarz B. LIDAR: Mapping the world in 3D, Nature Photonics, 2010, No 4, pp. 429–430.
- 5. Tiede D. *et al.* A full GIS-based workflow for tree identification and delineation using laser scanning, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vienna, 2005, Vol. XXXVI, Part 3/W24, pp. 9–14.
- 6. Wehr A., Lohr U. Airborne Laser scanning an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, No 54, pp. 68–82.
- 7. Zimble D.A. *et al.* Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR, Remote Sensing of the Environment, 2003, No 87, pp. 171–82.

УДК 852.831

DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-46-51

# Д.В. Пчельников<sup>1</sup>, Н.Н. Добрецов<sup>2</sup>

## ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ SUOMI NPP VIIRS И TERRA/AQUA MODIS

## АННОТАЦИЯ

На смену прибору со средним пространственным разрешением MODIS пришёл прибор VIIRS. Его спектральные каналы не являются полными аналогами MODIS, а также отличается пространственное разрешение, однако эти 2 прибора создавались для похожего круга задач, и позволяют их решать одинаково эффективно. В задачах, где требуется анализ многолетних временных рядов (за десятки лет), данных одного спутника Suomi NPP недостаточно – он вышел на орбиту только в 2012 году. Однако совместное его использование с Terra MODIS и Aqua MODIS для построения многолетних временных рядов позволяет расширить временной диапазон наблюдений и обеспечить продолжение наблюдений в будущем. В данной работе рассмотрены методики пространственного совмещения данных MODIS и

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук; Россия, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3; *e-mail:* denmail@igm.nsc.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук; Россия, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3; *e-mail:* nickdobretsov@gmail.com