

Научная статья
УДК 528.067
DOI: [10.34759/trd-2023-131-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-15)

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Вадим Александрович Ненашев^{1✉}, Виктория Игоревна Афанасьева²,
Александр Александрович Залищук³, Максим Юрьевич Григоров⁴,
Александр Владимирович Морозов⁵**

^{1,2,3,4,5} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Санкт Петербург, Россия

¹ nenashev@guap.ru ✉

Аннотация. В статье реализовано применение беспилотного летательного аппарата, с установленной на нем малогабаритной бортовой лазерной системой, для получения лидарных данных местности, которые впоследствии преобразованы в трехмерные модели местности и использованы для контроля над экологической обстановкой определенного участка земной поверхности.

Для сбора данных был использован метод лазерного сканирования местности. Обработка информации осуществлялась с помощью преобразования облака точек в трехмерную модель земной поверхности с помощью программы Agisoft Metashape.

Для сравнения двух моделей местности использовался метод совмещения, само совмещение осуществлялось в программе для трехмерного моделирования – «Blender».

В результате исследования получены данные о структурном различии двух сформированных моделей земной поверхности, построенных в разные временные промежутки для исследования экологической обстановки отснятого участка земной поверхности.

Применение беспилотных систем мониторинга земной поверхности для сбора и дальнейшей обработки лидарной информации применимы в различных областях деятельности человека, будь то актуализация карты местности или формирование виртуальной модели рельефа, подсчет количества деревьев, поиск людей, планирование возведения новых архитектурных и инженерных сооружений, охрана правопорядка и мониторинг экологической обстановки. С помощью данного подхода была показана практическая значимость процесса получения структурных изменений между двумя трехмерными моделями местности, снятыми в разные моменты времени с БПЛА для использования в сфере экологии.

Ключевые слова: бортовая лазерная система, БЛС, БПЛА, трехмерные модели, лазерное сканирование, экологический мониторинг.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем

космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

Для цитирования: Ненашев В.А., Афанасьева В.И., Залищук А.А., Григоров М.Ю., Морозов А.В. Формирование трехмерных моделей местности на основе лидарной съемки для выявления структурных изменений земной поверхности // Труды МАИ. 2023. № 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-15)

Original article

FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL TERRAIN MODELS BASED ON LIDAR SURVEY TO IDENTIFY STRUCTURAL CHANGES IN THE EARTH'S SURFACE

Vadim A. Nenashev¹, **Victoria I. Afanasyeva²**, **Alexander A. Zalishchuk³**,
Maxim Yu. Grigorov⁴, **Alexander V. Morozov⁵**

^{1,2,3,4,5}Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia

¹nenashev@guap.ru

Abstract. As of today, development of high-precision digital terrain model based on data of the small-sized onboard laser system for environmental state control is an up-to-date task. Detection of temporal changes in the landscapes of the controlled zones in dynamics may relate to such tasks. In this case, plotting the high-accuracy 3D-models of the terrain may be accomplished by the data of the small-sized onboard laser system, collected in the current time instant with the archive data free from the current changes. The multi-

temporal digital models plotting of the terrain allows rather distinctly outline season changes, such as fire zones detection, the size of the coast brim size of rivers, lakes and other impoundments, as well as the scales of the swamp terrain forming, ice melting, snow covers and other temporal changes. Such approach employing for highly-precise digital terrain model separated by time based on complex procession of the initial laser data collected from small UAVs is applicable for the purpose of environmental control, particularly for revealing structural changes of the various themes registered objects, which is an important and up-to-data task, particularly for various structures accomplishing search-and-rescue operations, including the ice situation determining, as well as under Arctic conditions. The purpose of the presented work consists in conducting the experiment on the UAV application with the small-sized onboard laser system installed on it for obtaining lidar terrain data, which afterwards would be converted into 3D terrain models and employed for the environmental situation control of the definite sector of the Earth surface. The article considers an example of application of the 3D terrain model, created with the lidar data, to compare two terrain models created according to the same route assignment with the one-week interval. The data on the structural difference of the Earth surface models taken off at the different time instants, which can be applied for studying the environmental situation of the registered section of the Earth surface were obtained. The results of the study can be used in the modernization of existing systems and the development of advanced systems for managing the environmental situation in a certain area of the earth's surface.

Keywords: on-board laser system, BLS, UAVs, three-dimensional models, laser scanning, environmental monitoring

Funding: the paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant agreement No. FSRF-2023-0003, “Fundamental principles of building of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring”.

For citation: Nenashev V.A., Afanaseva V.I., Zalishchuk A.A., Grigorov M.Yu., Morozov A.V. Formation of three-dimensional terrain models based on lidar survey to identify structural changes in the earth's surface. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-15)

Введение

Сегодня актуальной задачей является построение высокоточной цифровой модели местности (ЦММ) на основе данных от малогабаритной бортовой лазерной системы (МБЛС) для контроля экологической обстановки [1]. К таким задачам экологического контроля могут относиться, например, определение временных изменений ландшафтов контролируемых зон в динамике [2]. В этом случае построение высокоточных трехмерных моделей местности может осуществляться по данным от МБЛС [3], собранным в текущий момент времени с архивными данными, на которых - текущих изменений еще не было. Построение разновременных цифровых моделей местности позволяет детально выделить следующие изменения: размера береговой кромки рек, озер и прочих водоемов,

масштабов формирования болотистой местности, таяния льдов, снежных покровов и другие временные изменения. Использование такого подхода для построения высокоточных ЦММ [4] разнесенных по времени на основе комплексной обработки исходных лазерных данных, собранных с малых БПЛА, применимо в целях экологического контроля, в частности, выявления структурных изменений запечатленных объектов различной тематики, что является важной и актуальной задачей, в особенности для различных структур, осуществляющих поисково-спасательные операции, в том числе при определении ледовой обстановки, а также в условиях Арктики.



Рисунок 1 – БПЛА с установленной на нем МБЛС

Для решения поставленной задачи предлагается использовать БПЛА с МБЛС (рисунок 1). Используемая МБЛС включает в себя как лидар, так и цифровую камеру. Лидар предоставляет точную информацию о дальности, форме, размере, иными словами формирует максимально информативную и удобную для дальнейшей работы с трехмерную модель местности, состоящую из множества

точек. Однако, недостатком лазерной съемки является то, что он не предоставляет информации о цвете и поэтому МБЛС включает себя также и цифровую камеру.

Перспективность предлагаемого метода выражена в быстром и простом построении трехмерной модели [5], используя данные, полученные с помощью лазерного сканера и возможностью простого визуального сравнения. Научная новизна состоит в отсутствии аналогичных исследований по созданию трехмерных моделей рельефа для дальнейшего сравнения моделей между собой и выявления структурных изменений.

Анализ аналогичных исследований

Одним из известных способов сравнения данных о мониторинге структурных изменений земной поверхности является использование разновременных ландшафтных фотоснимков, которые проходят операцию моноплоттинга [6]. Моноплоттинг — это фотограмметрический метод извлечения трехмерной пространственной информации из изображения при наличии цифровых моделей рельефа высокого разрешения. В таком случае используется уже имеющаяся модель рельефа и пары разновременных снимков рельефа (рисунок 2). Обработка данных может быть осуществлена в программе WSL Monoplotting Tool [7].

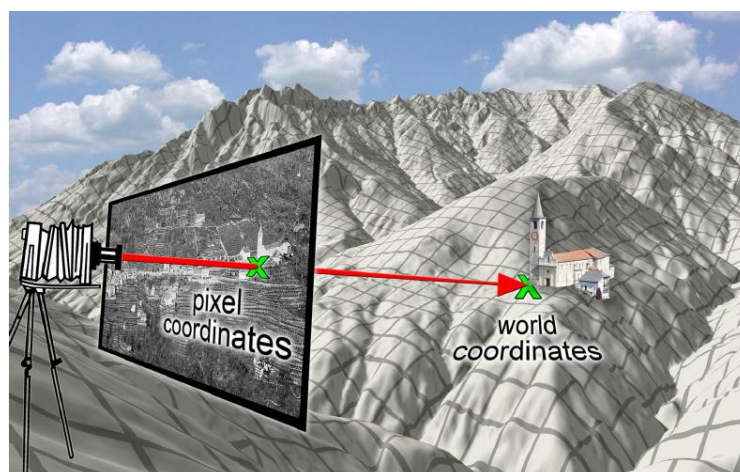


Рисунок 2 – Принцип действия моноплоттинга

Другим аналогичным способом может стать составление плотного облака точек при помощи множества фотографий, для этого может подойти программа Agisoft Metashape [8]. Под термином облако точек принято понимать набор вершин в трёхмерной системе координат. Эти вершины, определяются координатами X, Y и Z и предназначены для представления внешней поверхности объекта (рисунок 3).



Рисунок 3 – Плотное облако точек

Облако точек изначально будет иметь низкую детализацию, и как следствие, низкую точность представления рельефа местности, что даст не достаточную

информацию для одновременного сравнения [9]. Кроме этого, способ включает в себя долгую ручную обработку и настройку.

Постановка задачи построения высокоточной цифровой модели местности на основе данных от бортовой лазерной системы для контроля экологической обстановки

Для построения высокоточной ЦММ на основе данных от бортовой лазерной системы необходимо провести сбор данных на местности [10]. Нужно составить полетное задание с необходимыми параметрами, которые задаются в зависимости от точности желаемого результата. При желании получить более точные результаты - необходимо снизить высоту съемки [11]. Стоит отметить, что в таком случае, также возрастает время постобработки данных.

После сбора данных с борта МБЛС требуется произвести обработку этих данных. Обработка данных осуществляется в программе DJI Terra, откуда формируется файл в формате LAS, в котором хранятся записи данных о точках от лидара (см. рисунки 4 и 5). Полученное облако точек в таком виде преобразуется в трехмерную модель с заданной точностью [12]. Это преобразование может происходить в программе Agisoft Metashape. Один из возможных форматов преобразования облака точек в трехмерную модель – FBX. Данный формат трехмерных данных совместим с множеством видов программного обеспечения.

Выполнив первичное формирование трехмерной ЦММ, необходимо сохранить маршрутное задание и полученные обработанные данные [13]. Через

некоторое время, когда должно быть проведено сравнение обстановки, в целях контроля экологической обстановки, происходит новое формирование трехмерной ЦММ, используя сохраненное маршрутное задание, с дальнейшей обработкой.

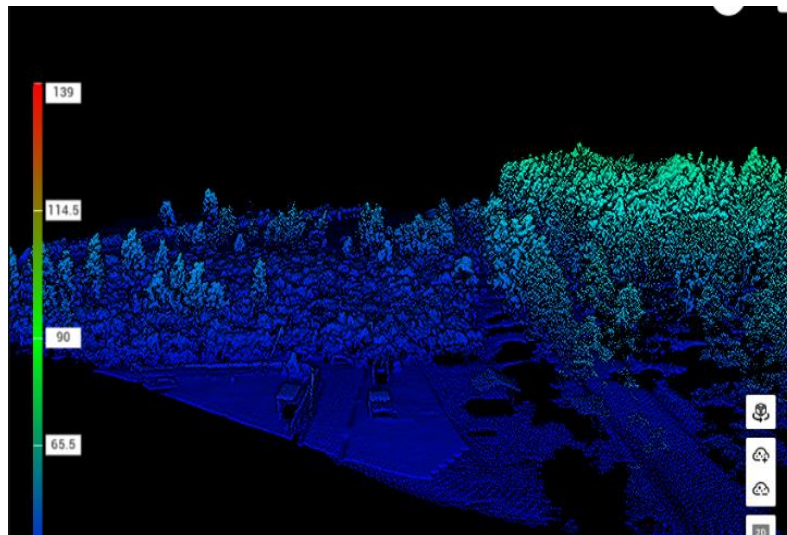


Рисунок 4 – Облако точек по шкале высоты над уровнем моря

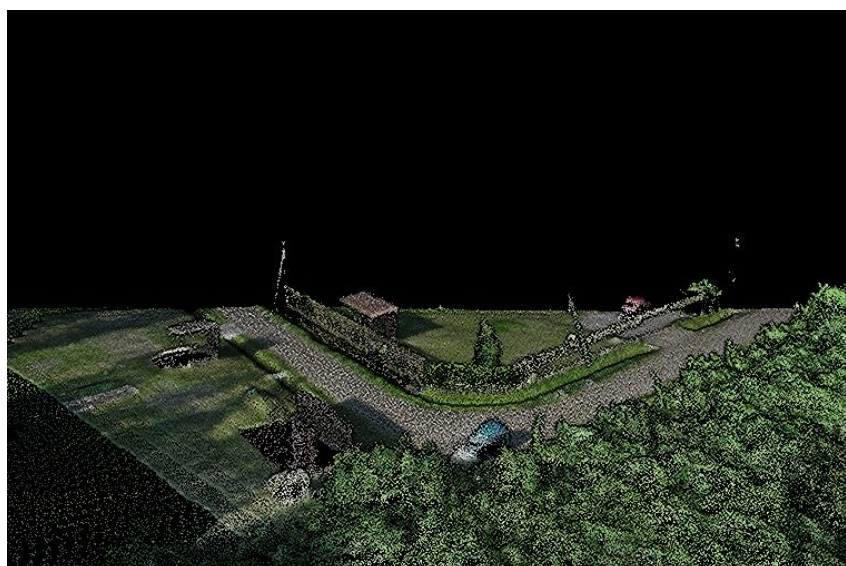


Рисунок 5 – Облако точек с наложением изображений

Получив две разновременные трехмерные ЦММ, они накладываются друг на друг [14], и с помощью этого могут быть показаны изменение рельефа местности [15], размытие рек, последствия пожара и других природных изменений [16].

Результаты экспериментального исследования двух трехмерных цифровых моделей местности

Для эксперимента произведено два сбора данных в полевых условиях. Временная разница между сборами данных составила 1 неделя. Каждое собранное облако точек было обработано и преобразовано в трехмерную модель формата FBX с помощью программы Agisoft Metashape (см. рисунок 6) [17].

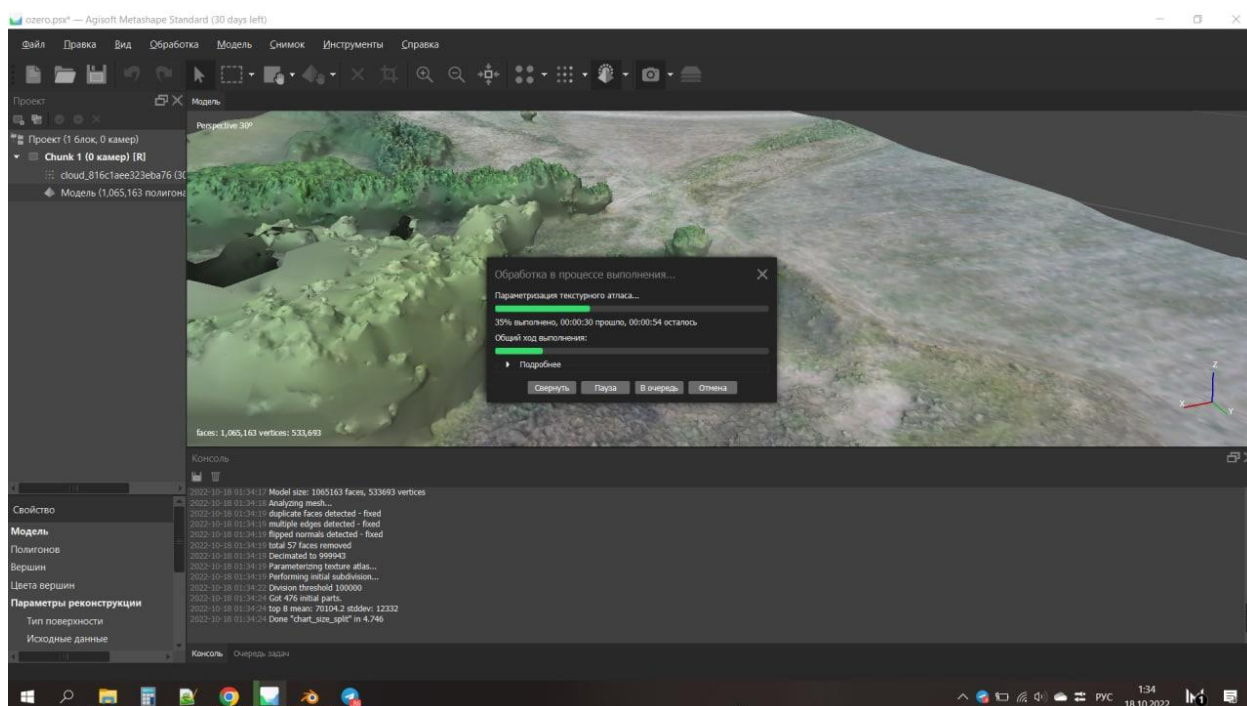


Рисунок 6 – Создание трехмерной модели

При сравнении двух похожих трехмерных моделей важно понять, является ли разница между ними существенной или ее можно не принимать в расчет. Оба объекта были представлены в полигональном виде, в качестве полигона использовался треугольник [18]. Сравнение осуществлялось с помощью наглядного метода – метода наложения друг на друга.

Обе трехмерные модели импортируются в программу Blender [19]. Далее они накладываются друг на друга, после чего отслеживаются изменения рельефа земной поверхности (рисунок 7).

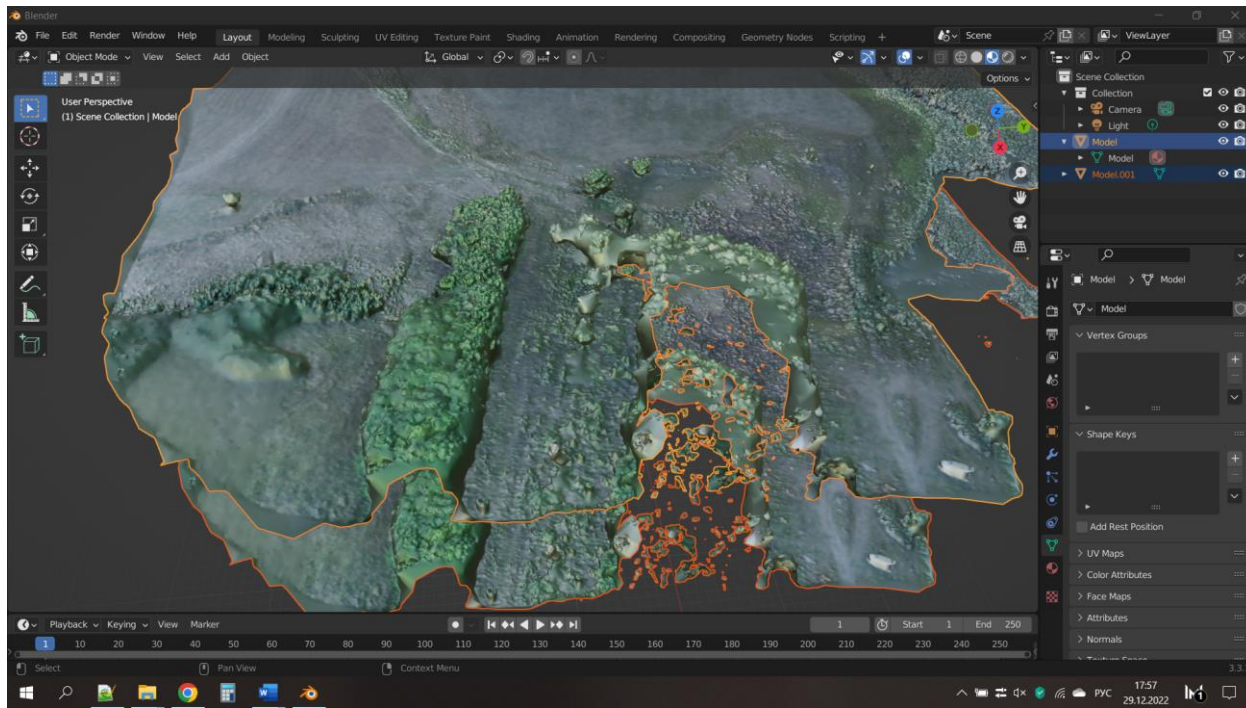
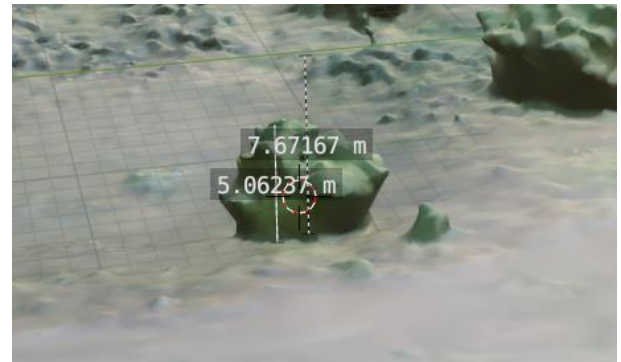


Рисунок 7 – Наложение трехмерных моделей

После наложения двух трехмерных ЦММ друг на друга наблюдается небольшое различие [20]. В первом случае, высота куста около озера составляет порядка 7,6 метров, после второй съемки, высота куста составляет около 5 метров (рисунок 8). Следовательно, можно сделать вывод об изменении растительности на данной местности. Данный вывод был получен без предварительной обработки трехмерных моделей.



а)



б)

Рисунок 8 – Отличие между двумя трехмерными моделями

Чтобы увидеть более детальные отличия необходимо наложить на обе модели различные контрастные текстуры (рисунок 9). Так можно разглядеть мельчайшую разницу между объектами. В нашем случае различиями являются небольшие изменения растительности и рельефа.

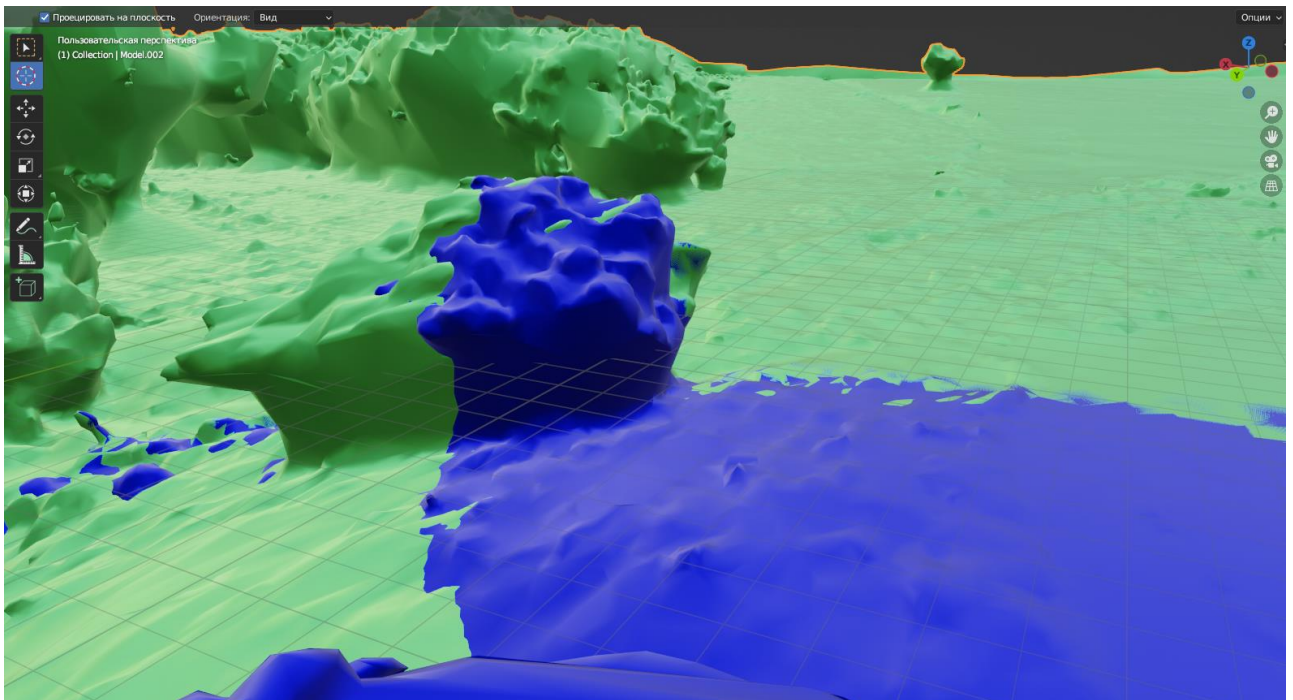


Рисунок 9 – Отличие между двумя трехмерными моделями после обработки

Таким образом, был рассмотрен пример использования трехмерной ЦММ, созданной с помощью лидарных данных, для сравнения двух моделей местности, созданных по одному маршрутному заданию с промежутком в одну неделю.

Выводы

Исходя из полученных результатов следует, что процесс построения высокоточной ЦММ на основе лидарных данных от бортовой лазерной системы показал свою перспективность для решения подобных задач.

Проведенный эксперимент показал, что лазерные системы в процессе построения моделей местности обладают рядом преимуществ, например, данная технология позволяет получить высокоточные данные о высотах и форме рельефа, что необходимо при планировании строительства, разработке инфраструктуры или выполнении геологических исследований. Использование малогабаритного бортового лидара значительно сокращает время и затраты на сбор данных по сравнению с традиционными методами, такими как аэрофотосъемка или топографические измерения.

На сегодняшний день применение лидара для получения трехмерных моделей местности, является перспективным и востребованным во многих сферах направления, где требуется осуществлять мониторинг земной поверхности с высокой детализацией наблюдаемых территорий.

Список источников

1. Costa D.G., Vasques F., Portugal P., Aguiar A. On the Use of Cameras for the Detection of Critical Events in Sensors-Based Emergency Alerting Systems // Journal of Sensor and Actuator Networks, 2020, vol. 9 (4), pp. 1-24. DOI:[10.3390/jsan9040046](https://doi.org/10.3390/jsan9040046)
2. Москалева С.А., Келина Н.А. Применение дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель в ландшафтно-экологических исследованиях // XLVIII Огарёвские чтения (Саранск, 06–13 декабря 2019): сборник трудов. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. С. 204-209.
3. Чибуничев А.Г., Гук А.П. Фотограмметрия: вчера, сегодня, завтра // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 2. С. 3-9.
4. Рыжков К.А., Горина А.В., Нестеренко И.В. и др. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов в геодезических работах // Студент и наука. 2019. № 1. С. 83-87.
5. Ткачева А.А. Использование данных дистанционного зондирования Земли при трехмерном моделировании естественных ландшафтных сцен // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 5 (57). С. 136-144.
6. Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Бом Я. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение. – М.: Ленанд, 2018. - 704 с.
7. Григорьев А.А., Шалаумова Ю.В., Болотник Е.В. Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на

- примере массива Ирмель) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2022. Т. 15. № 2. С. 148-166. DOI: [10.17516/1997-1389-0380](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0380)
8. Барабин Г.В. Фотограмметрический метод построения единого изображения при спутниковой съемке секционированным датчиком изображений // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46740>
9. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75632>
10. Муналбаева Н.Р. Технология lidar: обзор применяемых датчиков // Конференция «Глобальная экономика в XXI веке: роль биотехнологий и цифровых технологий» (Москва, 15–16 мая 2020): сборник трудов. – М.: Изд-во «Конверт», 2020. С. 89-91.
11. Айрумян В.В. Развитие лазерного сканирования в России и актуальность лидарной съемки // Международная научно-практическая конференция «Интеграция современных научных исследований в развитие общества» (Кемерово, 28–29 декабря 2016): сборник трудов. – Кемерово: Изд-во "Западно-Сибирский научный центр», 2016. С. 15-19.
12. Крючкова Т.Н., Ефимов А.И. Совмещение трехмерных облаков точек: итеративный алгоритм ближайших точек // Методы и средства обработки и хранения информации. Межвузовский сборник научных трудов. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2022. С. 123-128.

13. Вальдман В.В. Возможность использования беспилотного летательного аппарата для целей воздушного лазерного сканирования промышленных территорий горнодобывающих предприятий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 1. № 3. С. 206-209.
14. Лурье И.К., Лурье М.В. Моделирование 3D-изменений рельефа местности вследствие склоновой эрозии // Геодезия и картография. 2023. Т. 84. № 3. С. 35-42.
15. Ямпольский С.М., Наумов А.И., Кичигин Е.К. Статистическая модель прогнозного профиля рельефа местности в задаче выполнения маловысотного полета воздушного судна по цифровой карте высот // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=50096>
16. Дяченко С.А. Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91966>
17. Торопов И.С. Оценка точности создания модели местности на основе аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата с помощью Agisoft Metashape // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 1. С. 195-199.
18. Алексеев Е.П. Построение 3d-модели растений // Международная научно-практическая конференция «Научно-образовательная среда как основа развития интеллектуального потенциала сельского хозяйства регионов России» (Чебоксары, 09 сентября 2022): сборник трудов. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2022. С. 303-305.

19. Мальцева Е.И., Озерова М.И. Особенности создания 3D-моделей в Blender // V Всероссийская молодежная научно-технической конференция «Информационные технологии в науке и производстве» (Омск, 25–26 апреля 2018): сборник трудов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. С. 105-111.
20. Цапко И.В., Омелянюк М.Ю. Совмещение трехмерных изображений, полученных в результате ручного лазерного сканирования // Вестник науки Сибири. 2014. № 4 (14). С. 112-116.

References

1. Costa D.G., Vasques F., Portugal P., Aguiar A. On the Use of Cameras for the Detection of Critical Events in Sensors-Based Emergency Alerting Systems, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2020, vol. 9 (4), pp. 1-24. DOI: [10.3390/jsan9040046](https://doi.org/10.3390/jsan9040046)
2. Moskaleva S.A., Kelina N.A. *XLVIII Ogarevskie chteniya: sbornik trudov*. Saransk, Natsional'nyi issledovatel'skii Mordovskii gosudarstvennyi universitet im. N.P. Ogareva, 2020, pp. 204-209.
3. Chibunichev A.G., Guk A.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2016, no. 2, pp. 3-9.
4. Ryzhkov K.A., Gorina A.V., Nesterenko I.V. et al. *Student i nauka*, 2019, no. 1, pp. 83-87.
5. Tkacheva A.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2014, no. 5 (57), pp. 136-144.

6. Lumann T., Robson S., Kail S., Bom Ya. *Blizhnyaya fotogrammetriya i 3D-zrenie* (Near photogrammetry and 3D vision), Moscow, Lenand, 2018, 704 p.
7. Grigor'ev A.A., Shalaumova Yu.V., Bolotnik E.V. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 148-166. DOI: [10.17516/1997-1389-0380](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0380)
8. Barabin G.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 71. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46740>
9. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75632>
10. Munalbaeva N.R. *Konferentsiya «Global'naya ekonomika v XXI veke: rol' biotekhnologii i tsifrovyykh tekhnologii»*: sbornik trudov. Moscow, Izd-vo «Konvert», 2020, pp. 89-91.
11. Airumyan V.V. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Integratsiya sovremennykh nauchnykh issledovaniy v razvitie obshchestva»*: sbornik trudov. Kemerovo, Izd-vo "Zapadno-Sibirskii nauchnyi tsentr", 2016, pp. 15-19.
12. Kryuchkova T.N., Efimov A.I. *Metody i sredstva obrabotki i khraneniya informatsii*: Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Ryazan', Ryazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet, 2022, pp. 123-128.
13. Val'dman V.V. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2013, vol. 1, no. 3, pp. 206-209.
14. Lur'e I.K., Lur'e M.V. *Geodeziya i kartografiya*, 2023, vol. 84, no. 3, pp. 35-42.
15. Yampol'skii S.M., Naumov A.I., Kichigin E.K. *Trudy MAI*, 2014, no. 76. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=50096>

16. Dyachenko S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91966>
17. Toropov I.S. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2020, vol. 1, pp. 195-199.
18. Alekseev E.P. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauchno-obrazovatel'naya sreda kak osnova razvitiya intellektual'nogo potentsiala sel'skogo khozyaistva regionov Rossii»*: sbornik trudov. Cheboksary, Chuvashskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2022, pp. 303-305.
19. Mal'tseva E.I., Ozerova M.I. *V Vserossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskoi konferentsiya «Informatsionnye tekhnologii v nauke i proizvodstve»*: sbornik trudov. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018, pp. 105-111.
20. Tsapko I.V., Omel'yanyuk M.Yu. *Vestnik nauki Sibiri*, 2014, no. 4 (14), pp. 112-116.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023

Одобрена после рецензирования 04.07.2023

Принята к публикации 28.08.2023

The article was submitted on 28.06.2023; approved after reviewing on 04.07.2023; accepted for publication on 28.08.2023