

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.721.221.6

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63>

Методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации

Н. И. Хушт¹, М. Я. Брынь²

¹ АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

Аннотация. В ходе решения задачи по совершенствованию методов обработки данных лазерного сканирования предложена методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. Необходимость прореживания облаков точек в первую очередь продиктована проблемой по ускорению процессов обработки больших массивов данных без существенной потери информативности. Предложена формула из ГОСТ Р 70690-2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги». – URL: <https://docs.cntd.ru>. – Текст: электронный) для расчета минимального допустимого количества точек лазерного отражения после прореживания. Разработана и написана программа на языке программирования Python по выделению сегментов в исходном облаке точек и автоматизированному расчету размера вокселя воксельной решетки для каждого из выделенных сегментов. Произведено сравнение результирующего количества точек в облаке точек после прореживания с минимальным допустимым количеством точек лазерного отражения на 1 м² для съемки масштаба 1 : 500 равнинного участка местности с высотой сечения рельефа 0,5 м, а также рассчитан процент прореживания.

Ключевые слова: облако точек, воздушное лазерное сканирование, вокселизация, сегментация, воксельная решетка, воксель, прореживание, трехмерная модель

Для цитирования:

Хушт Н. И., Брынь М. Я. Методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 5. С. 53–63. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63>

An integrated voxelization-segmentation framework for adaptive thinning of airborne LiDAR point clouds

N. I. Khusht¹, M. Ya. Bryn²

¹Polymetal Engineering JSC, St. Petersburg, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: nafset-khusht@yandex.ru

Abstract. The authors present a methodology for thinning airborne laser scanning point clouds by integrating voxelization and segmentation techniques to enhance the efficiency of large-scale geospatial data processing. The proposed approach addresses the critical challenge of reducing computational load while maintaining the informational integrity of point cloud datasets. The minimum permissible point density after thinning was established in accordance with GOST R 70690-2023 (“Public Highways. Laser Scanning. Requirements for Laser Scanning Data at Various Stages of the Life Cycle of a Public Highway”). A Python-based software tool was developed to perform automated segmentation of the original point cloud and to calculate optimal voxel sizes for each identified segment. The effectiveness of the methodology was evaluated by comparing the resulting point density against the minimum required density for topographic surveying at a scale of 1:500 over flat terrain with a 0.5 m contour interval.

Keywords: point cloud, airborne laser scanning, voxelization, segmentation, voxel grid, voxel, downsampling, 3D model

For citation:

Khushht N. I., Bryn M. Ya. (2026). An integrated voxelization-segmentation framework for adaptive thinning of airborne LiDAR point clouds. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 53–63. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-53-63>

Введение

С ростом темпов строительства промышленных и гражданских объектов в рамках комплексного и устойчивого развития территорий и повышения требований к качеству исходных данных для проектирования, в том числе для создания моделей местности, рельефа и различных объектов, возникает задача по совершенствованию оперативных и обеспечивающих необходимую точность методов съемки.

Одним из таких методов является лазерное сканирование, суть которого заключается в фиксации лазерным лучом форм физических объектов и их представлении в виде облаков точек с высокой плотностью. При этом выделяют три основных вида лазерного сканирования: воздушное, наземное и мобильное [1–15]. Каждый из перечисленных видов лазерного сканирования обладает своими преимуществами и недостатками, однако при необходимости получения оперативных и точных данных об объектах на больших площадях наиболее целесообразно использовать воздушное лазерное сканирование [1–8].

Вместе с тем, массивы облаков точек, получаемых посредством воздушного лазерного сканирования, объем которых велик, требуют последующей тщательной обра-

ботки, от качества проведения которой зависит точность формируемой на основе этих точек моделей местности, рельефа и объектов. В качестве первостепенной проблемы обработки такого типа данных выступает их избыточность для большинства программных комплексов, что увеличивает время обработки данных и требует уменьшения количества точек в облаках без существенной потери информативности и сохранения при этом основных характеристик объектов съемки [1–2, 16].

Методы и материалы

Для ускорения процесса обработки предлагаются различные методы прореживания облаков точек лазерного сканирования, такие как метод ближайших соседей, метод итеративного упрощения, метод вокселизации и др. [3–8].

Основным недостатком метода ближайших соседей является потеря информативности на участках облаков с малой плотностью распределения точек ввиду постоянного фактора прореживания (в случае метода ближайших соседей это границы окрестности поиска ближайших соседей-точек), причиной которого является неоднородность облаков точек по плотности.

Этот недостаток также характерен и для метода вокселизации, широко используемом в области системного анализа для упрощения

работы с точками путем замены облачной трехмерной модели объекта на упрощенную трехмерную модель, которая строится на основе замещающих укрупненных кубиков – вокселей [3]. Так, данный метод, согласно проведенным исследованиям зарубежных ученых Biao Xiong, Weize Jiang, Dengke Li и Man Qi из Уханьского технологического

университета и Педагогического университета Центрального Китая и N. Stelling, K. Richter из Дрезденского технического университета, эффективен для упрощения облачной трехмерной модели при работе с моделями зданий и сооружений, состоящими только из простых конструктивных элементов (рис. 1) [3, 9].

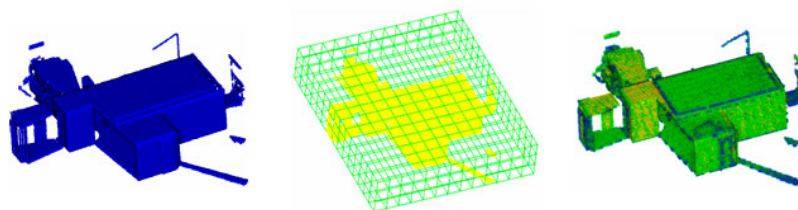


Рис. 1. Вокселизация облака точек здания с простыми конструктивными элементами

Для рельефа и зданий, обладающих сложными архитектурными элементами (барельефы, выступающие части и т. д.), в процессе вокселизации возникает обозначенная выше проблема потери информатив-

ности при уменьшении объема обрабатываемых трехмерных данных, в результате чего итоговая модель представляет собой сильно упрощенную версию исходного объекта (рис. 2) [9].

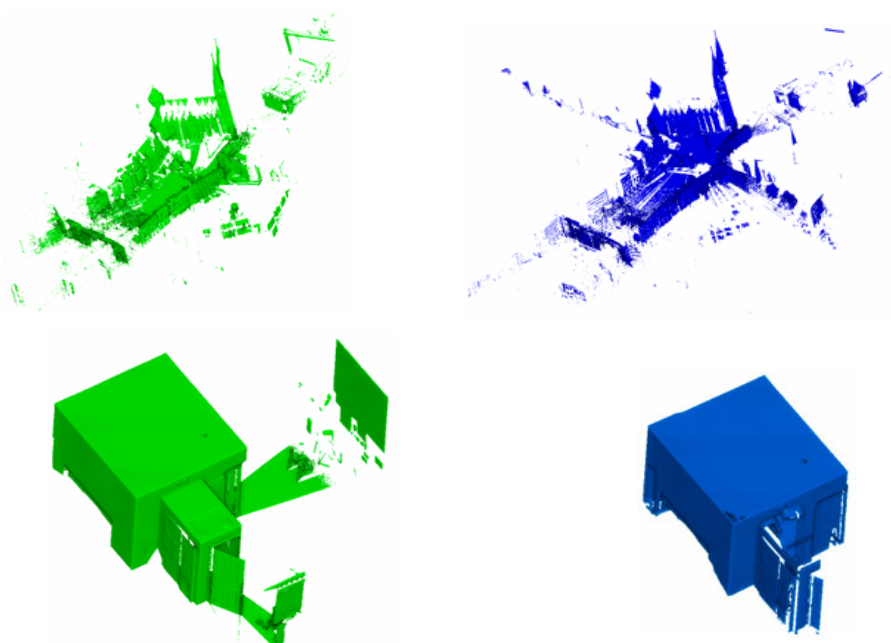


Рис. 2. Результаты вокселизация облака точек здания с сложными конструктивными элементами

Для устранения отмеченного недостатка предлагается усовершенствовать метод вокселизации и применять его не для замены

облачной трехмерной модели объекта на упрощенную трехмерную модель из кубиков-вокселей, а для формирования «воксельной

решетки», для которой прореживание производится внутри каждого вокселя с сохранением точки, которая может быть выражена и как центр тяжести вокселя, и как его геометрический центр. При этом будет

$$\left[\frac{\max X - \min X}{V_s} \right] \times \left[\frac{\max Y - \min Y}{V_s} \right] \times \left[\frac{\max Z - \min Z}{V_s} \right], \quad (1)$$

где V_s – размер вокселя в воксельной решетке; $\max X$ – максимальное значение координаты X облака точек; $\min X$ – минимальное значение координаты X облака точек; $\max Y$ – максимальное значение координаты Y облака точек; $\min Y$ – минимальное значение координаты Y облака точек; $\max Z$ – максимальное значение координаты Z облака точек; $\min Z$ – минимальное значение координаты Z облака точек.

Для удобства можно переопределить координаты каждой точки в новой системе координат воксельной решетки по следующим формулам [9]:

$$\begin{aligned} V_{ix} &= \left[\frac{X_i - \min X}{V_s} \right] \\ V_{iy} &= \left[\frac{Y_i - \min Y}{V_s} \right], \\ V_{iz} &= \left[\frac{Z_i - \min Z}{V_s} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

где V_s – размер вокселя в воксельной решетке; V_{ix} – координата X точки в системе координат воксельной решетки; V_{iy} – координата Y точки в системе координат воксельной решетки; V_{iz} – координата Z точки в системе координат воксельной решетки.

Ключевым параметром при построении воксельной решетки в данном случае выступает размер V_s вокселя воксельной решетки.

Однако при таком прореживании для соблюдения принципа минимальной потери информативности модели важно также учесть необходимость сохранения характерных линий и точек местности и различных объектов.

производиться исключение из облака избыточных точек.

Так, формула размерности воксельной решетки может быть выражена для трехмерного облака точек в следующем виде [9]:

Это позволяет сделать вывод, что некое облако точек, представляющее собой модель местности или объекта, не может быть прорежено через общую воксельную решетку определенной размерности. Вместо этого предлагается выделить из общего облака точек участки (сегменты), содержащие важные характерные линии и точки модели местности и объектов, а также «плоские» участки, и для каждого такого сегмента построить отдельные воксельные решетки с меньшей размерностью (для более детализированных участков модели местности и объектов) или большей размерностью (для «плоских» участков) для исключения потери информативности после прореживания.

Таким образом, метод вокселизации предлагается дополнить методом сегментации. Комбинация этих методов позволит за счет сегментации выделять в конечном облаке модели местности и объектов области, обладающие примерно однородной плотностью в своих пределах и содержащие как важные характерные линии и точки модели местности и объектов, так и малоинформативные «плоские» участки, а за счет метода вокселизации – строить отдельные воксельные решетки и прореживать через них каждую выделенную в процессе сегментации область единого облака точек модели.

Таким образом, предлагаемая методика прореживания облаков точек будет состоять из следующих этапов:

– выделение сегментов в исходном облаке точек, обладающих примерно однородной плотностью и содержащих в себе важные характерные линии и точки местности и объектов (рис. 3);

Укрупненная сегментация рельефа

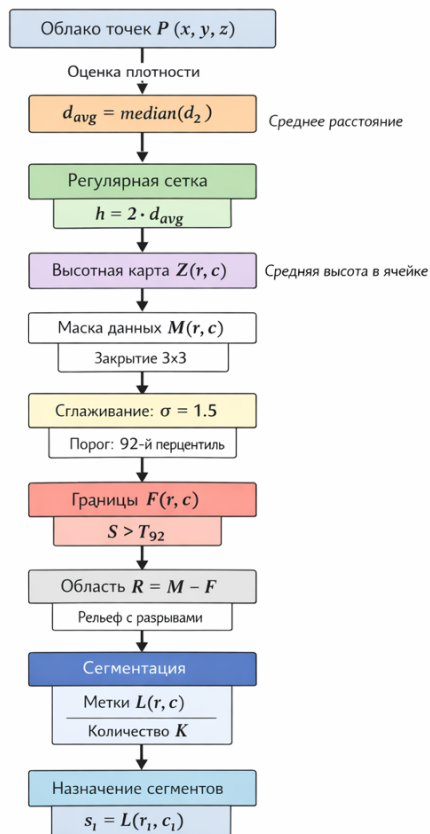


Рис. 3. Алгоритм укрупненной сегментации облака точек

– автоматизированный подбор размера V_s воксельной решетки для каждого выделенного сегмента по формуле адаптивного подбора размера вокселя через функцию ограничения значения (clip) [7]:

$$V_s = \text{clip} \left(d_{avg} \cdot \frac{15}{1 + 2 \cdot \frac{\sigma_z}{d_{avg}}}, 2d_{avg}, 20d_{avg} \right), \quad (3)$$

где d_{avg} – среднее расстояние между точками в сегменте (показатель плотности), м; σ_z – среднеквадратическое отклонение по распределению высот точек в сегменте;

– построение отдельных воксельных решеток для выделенных сегментов в облаке точек и осуществление их прореживания.

На взгляд авторов, эффективность предложенной методики будет зависеть от ряда факторов:

– от учета однородности областей облака по показателю плотности и их выделения в сегменты за счет применения известных алгоритмов пространственного анализа облака точек;

– оптимального для сегмента облака точек с некоторой однородной плотностью размера вокселя воксельной решетки;

– способа расчета положения результирующей точки, остающейся после прореживания облака внутри каждого вокселя;

– итогового количества результирующих точек, остающихся после прореживания сегментов облака точек.

Требования к минимальному количеству результирующих точек связаны с требованиями к минимальной плотности облака точек лазерного отражения.

Так, для расчета минимального количества результирующих точек предлагается применять формулу, приведенную в ГОСТ Р 70690–2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги». – URL: <https://docs.cntd.ru>. – Текст: электронный):

$$P_{\min} = \left(\frac{1}{k} + 1 \right)^2, \quad (4)$$

где $P_{\min}$ – минимальное количество точек лазерного отражения на 1 м²; k – допуск погрешности измерений в соответствии с видом проводимых работ, м. В тех случаях, когда $k \geq 1$, минимальное количество точек должно составлять не менее 10 на 1 м².

По мнению авторов, под видом проводимых работ при этом подразумевается вид съемки (с учетом ее масштаба, типа местности и т. п.), а под допуском погрешности понимается средняя квадратическая погрешность съемки.

Согласно СП 317.1325800.2017 (СП 317.1325800.2017 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». – URL: <https://docs.cntd.ru>. – Текст: электронный) среднюю квадратическую погрешность съемки следует рассчитывать по формуле

$$m = 1,25\zeta_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где m – среднеквадратическая погрешность съемки; $\zeta_{\text{ср}}$ – средняя погрешность съемки.

При этом средняя погрешность съемки рельефа относительно ближайших точек геодезического обоснования не должна превышать по высоте согласно СП 47.13330.2016 (СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96». – URL: <https://docs.cntd.ru>. – Текст: электронный):

– 1/4 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона до 2°;

– 1/3 принятой высоты сечения рельефа при углах наклона от 2 до 6° для планов масштабов 1 : 5 000, 1 : 2 000 и до 10° для планов масштабов 1 : 1 000 и 1 : 500;

– 1/3 при сечении рельефа через 0,5 м на планах масштабов 1 : 5 000 и 1 : 2 000.

На основе проведенного анализа была составлена таблица минимального количества точек лазерного отражения в зависимости от масштаба съемки, типа местности и высоты сечения рельефа (табл. 1).

Таблица 1. Минимальное количество точек лазерного отражения в зависимости от типа местности, масштаба съемки и высоты сечения рельефа

Масштаб \ Высота сечения рельефа	1 : 5 000	1 : 2 000	1 : 1 000 1 : 500
Рельеф равнинный с углами наклона до 2°			
0,5 м	$\zeta_{\text{ср}} = 0,17$ м $m = 0,21$ м $P_{\text{min}} = 34$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,17$ см $m = 0,21$ см $P_{\text{min}} = 34$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,13$ см $m = 0,16$ см $P_{\text{min}} = 53$
1,0 м	$\zeta_{\text{ср}} = 0,25$ м $m = 0,31$ м $P_{\text{min}} = 18$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,25$ м $m = 0,31$ м $P_{\text{min}} = 18$	-
Всхолмленный с углами наклона до 4°			
0,5	-	$\zeta_{\text{ср}} = 0,17$ см $m = 0,21$ см $P_{\text{min}} = 34$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,17$ см $m = 0,21$ см $P_{\text{min}} = 34$
1,0	$\zeta_{\text{ср}} = 0,33$ м $m = 0,42$ м $P_{\text{min}} = 11$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,33$ м $m = 0,42$ м $P_{\text{min}} = 11$	-
2,0	$\zeta_{\text{ср}} = 0,67$ м $m = 0,83$ м $P_{\text{min}} = 5$ (10)	$\zeta_{\text{ср}} = 0,67$ м $m = 0,83$ м $P_{\text{min}} = 5$ (10)	-
Пересеченный с углами наклона до 6°			
0,5	-	-	$\zeta_{\text{ср}} = 0,17$ см $m = 0,21$ см $P_{\text{min}} = 34$
1,0	-	$\zeta_{\text{ср}} = 0,33$ м $m = 0,42$ м $P_{\text{min}} = 11$	$\zeta_{\text{ср}} = 0,33$ м $m = 0,42$ м $P_{\text{min}} = 11$
2,0	$\zeta_{\text{ср}} = 0,67$ м $m = 0,83$ м $P_{\text{min}} = 5$ (10)	$\zeta_{\text{ср}} = 0,67$ м $m = 0,83$ м $P_{\text{min}} = 5$ (10)	-
5,0	$\zeta_{\text{ср}} = 1,67$ м $m = 2,08$ м $P_{\text{min}} = 3$ (10)	-	-

Результаты и обсуждение

Для апробации предложенной методики была осуществлена съемка участка производственной территории нефтеперерабатывающего завода на территории Краснодарского края с применением воздушного лазерного сканирова-

ния. В соответствии с техническим заданием масштаб съемки составлял 1 : 500, высота полета составляла 500 м. Для получения исходного облака точек при производстве воздушного лазерного сканирования применялся сканер Leica ALS80-HP, основные метрологические характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Метрологические характеристики сканеров Leica ALS80-CM, Leica ALS80-HP, Leica ALS80-UP

Наименование характеристики	Значение		
	Leica ALS80-CM	Leica ALS80-HP	Leica ALS80-UP
Диапазон рабочих высот, м	От 100 до 1600	От 100 до 3500	От 100 до 5000
Предел допускаемого СКО измерений координат точек земной поверхности в заданной системе координат, м:	Диапазон рабочих высот, м		
	100–800 / 800–1 600	100–1 600 / 1 600–3 500	100–2 500 / 2 500–5 000
	— в плане;	0,10 / 0,23	0,23 / 0,41
	— по высоте	0,08 / 0,12	0,12 / 0,20
Пределы допускаемой абсолютной погрешности определения координат точек земной поверхности в заданной системе координат, м:	Диапазон рабочих высот, м		
	100–800 / 800–1 600	100–1 600 / 1 600–3 500	100–2 500 / 2 500–5 000
	— в плане;	0,18 / 0,41	0,41 / 0,74
	— по высоте	0,14 / 0,21	0,21 / 0,36
Угловое поле сканирования (от вертикали), градус, не менее	±36,0		
Максимальная частота сканирования, Гц	200		
Максимальная частота импульсов, кГц	1 000		

Так как участок местности по типу рельефа относился к равнинному с углами наклона до 2°, а требуемый масштаб съемки в соответствии с техническим заданием был принят равным 1 : 500, то высота сечения рельефа в соответствии с таблицей В.1 СП 47.13330.2016 была принята 0,5 м. Следовательно, для съемки масштаба 1 : 500 с принятой высотой сечения рельефа 0,5 м допустимая средняя погрешность съемки рельефа по высоте составляет около 13 см, средняя квадратическая погрешность – 16 см, а минимальное количество точек лазерного отражения должно составлять 53.

Для реализации предложенной методики прореживания облаков точек на основе усовершенствованного метода вокселизации и сегментации была написана специализированная программа на языке программирования Python.

Исходное облако точек, полученное по результатам воздушного лазерного сканирования, состоящее из 150 885 точек, представлено на рис. 4.

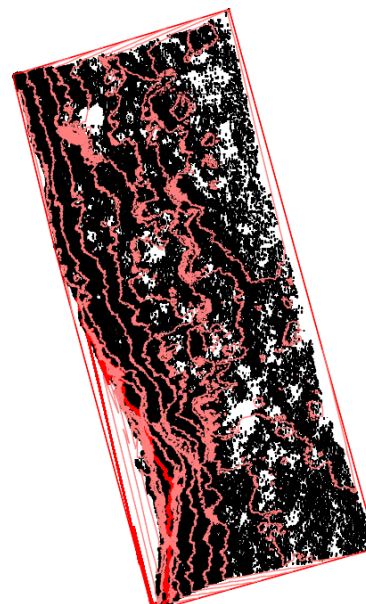


Рис. 4. Исходное облако точек, полученное по результатам воздушного лазерного сканирования с построенной поверхностью с горизонталями через 0,1 м (вид сверху), масштаб 1 : 2 000

С помощью написанной специализированной программы было выделено в исходном облаке точек 344 сегмента по показателю плотности (рис. 5).

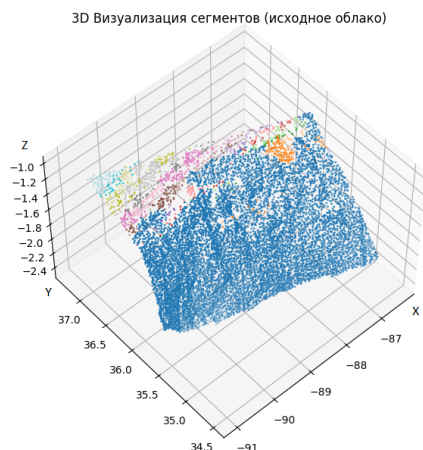


Рис. 5. Визуализация сегментов в исходном облаке точек, изометрический вид в осях XYZ

Для каждого сегмента с применением формулы адаптивного подбора размера вокселя с помощью специализированной программы на языке программирования Python был рассчитан размер воксельной решетки, визуализация которой для одного из сегментов была осуществлена для наглядности в программном комплексе Civil 3D с встроенным модулем Dynamo (рис. 6).

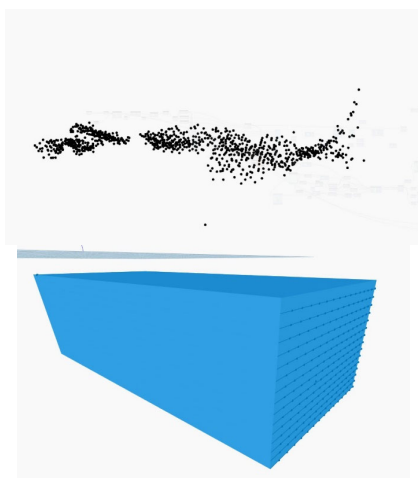


Рис. 6. Визуализация воксельной решетки для выделенного сегмента из исходного облака точек, состоящего из 1 500 точек

Civil 3D – это программный продукт, используемый для инженерного проектирования и создания трехмерных моделей объектов промышленной и гражданской инфраструктуры, а модуль Dynamo – это надстройка для визуального объектно-ориентированного программирования, позволяющая автоматизировать проектирование в Civil 3D за счет создания алгоритмов выполнения дополнительных команд.

Внутри каждого вокселя было произведено прореживание, по итогам которого на основе оставшихся результирующих точек во всех выделенных 344 сегментах была еще раз построена TIN-поверхность с выделением горизонталей с высотой сечения рельефа 0,1 м, представленная на рис. 7.

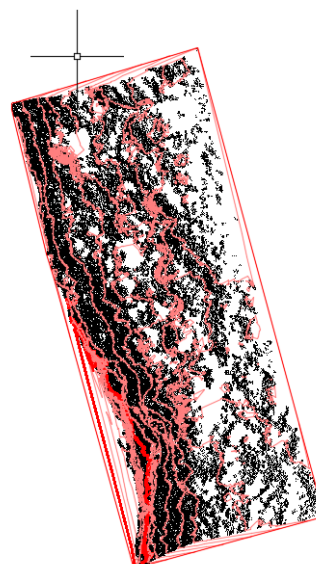


Рис. 7. Облако точек после прореживания с построенной поверхностью с горизонталями через 0,1 м (вид сверху), масштаб 1 : 2 000

Итоговое количество результирующих точек составило 96 421 на 8 м² (12 051 точек на 1 м²), что удовлетворяет требованиям к минимально допустимому количеству точек лазерного отражения для данного вида работ (53 точки на 1 м²).

При этом процент прореживания (p) составил

$$p = \frac{150\,885 - 96\,421}{150\,885} \times 100 = 36 \%. \quad (6)$$

Заключение

Предложена методика прореживания облаков точек воздушного лазерного сканирования на основе сочетания методов вокселизации и сегментации. Показана эффективность использования метода сегментации в прореживании единого облака точек модели местности для выделения из общего облака точек участков (сегментов), содержащих важные характерные линии и точки модели местности, а также «плоских» участков, с целью дальнейшего построения отдельных воксельных решеток для каждого из выделенных сегментов, чтобы исключить потери информативности после прореживания.

Предложено использовать формулу из ГОСТ Р 70690–2023 (ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги»). – URL: <https://docs.cntd.ru>. – Текст:

электронный) для расчета минимального допустимого количества точек лазерного отражения на 1 м² в зависимости как от вида сканирования (с учетом технических характеристик сканера), так и от типа местности и масштаба съемки.

Для реализации предложенной методики прореживания облаков точек на основе комбинации методов вокселизации и сегментации произведено выделение сегментов в облаке точек тестового участка местности и построение воксельной решетки, а также дальнейшее прореживание каждого из выделенных сегментов с помощью специализированной программы, написанной на языке Python. Произведено сравнение результирующего количества точек облака точек после прореживания с минимальным допустимым количеством точек лазерного отражения на 1 м² для съемки масштаба 1 : 500 равнинного участка местности с высотой сечения рельефа 0,5 м, а также рассчитан процент прореживания, который составил 36 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Axelsson P. E. Processing of laser scanner data – Algorithms and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and RemoteSensing. 1999. № 54. P. 138–147.
2. Axelsson, P. E. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. № 33. P. 110–117.
3. Stelling N., Richter K. Voxel based representation of full-waveform airborne laser scanner data for forestry applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial In-formation Sciences. Prague: XXIII ISPRS Congress, 2016. P. 41–50.
4. Blender Foundation. Blender Foundation URL: <https://www.blender.org/about/foundation/> (дата обращения: 18.09.2025).
5. Chen Z., Gao B., Devereux B. State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. Sensors. 2017. №17. P. 150–159.
6. Haugerud R. A., Harding D. J. Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2001. № 34. P. 211–218.
7. Sithole G., Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. № 59. P. 85–101.
8. Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. № 33. P. 935–942.
9. Xiong B., Jiang W., Li, D., Qi, M. Voxel Grid-Based Fast Registration of Terrestrial Point Cloud. Remote Sens. 2021. № 13. P. 190–203.
10. Bienert, A., Hess C., Maas H.-G., von Oheimb G. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. XL-5. P. 101–106.

11. Buddenbaum, H., Seeling S., Hill J. Fusion of full-waveform LiDAR and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands. *International Journal of Remote Sensing*. 2013. Vol. 34, no. 13. P. 4511–4524.
12. Gupta, S., Weinacker H., Koch B. Single tree detection using full waveform laser scanner data. *Proceedings of Silvilaser 2010*. P. 368–376.
13. Heinzl, J., Koch B. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011. Vol. 13, no. 1. P. 152–160.
14. Richter, K., Blaskow B., Stelling N., Maas H.-G. Reference value provision schemes for attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. II-3/W5. P. 65–72. DOI 10.5194/isprsannals-II-3-W5-65-201.
15. Schilling, A., Schmidt A., Maas H.-G. Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2012. Vol. 78, no. 4. P. 383–392.
16. Wu, J., van Aardt J. A. N., McGlinchy J., Asner G. P. A Robust Signal Preprocessing Chain for Small-Footprint Waveform LiDAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012. Vol. 50, no. 8. P. 3242–3255.

REFERENCES

1. Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data—algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Pp. 138–147. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00008-8).
2. Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 33(4). Pp. 110–117. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019600405>.
3. Stelling, N. & Richter, Katja. (2016). Voxel based representation of full-waveform airborne laser scanner data for forestry applications. *ISPRS- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLI-B8. Pp. 755–762. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-755-2016>.
4. Blender Foundation. (2018). Official website.
5. Chen, Ziyue & Gao, Bingbo & Devereux, Bernard. (2017). State-of-the-Art: DTM Generation Using Airborne LIDAR Data. *Sensors*. 17. 150. <https://doi.org/10.3390/s17010150>.
6. Haugerud, R. & Harding, David. (2001). Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LiDAR topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Pp. 211–218.
7. Sithole, George & Vosselman, George. (2004). Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 59. Pp. 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>.
8. Vosselman, George. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *IAPRS*. XXXIII. Pp. 935–942.
9. Xiong, Biao & Jiang, Weize & Li, Dengke & Qi, Man. (2021). Voxel Grid-Based Fast Registration of Terrestrial Point Cloud. *Remote Sensing*. 13. 1905. Pp. 190–203. <https://doi.org/10.3390/rs13101905>.
10. Bienert, A., Hess, C., Maas, H.-G., von Oheimb, G. (2014). A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, pp. 101–106.
11. Buddenbaum H., Seeling S., Hill J. (2013). Fusion of full-waveform lidar and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), pp. 4511–4524.

12. Gupta, S., Weinacker, H., Koch, B. (2010). Single tree detection using full waveform laser scanner data. *Proceedings of Silvilaser 2010*, pp. 368–376.
13. Heinzl, J., Koch, B. (2011). Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), pp. 152–160.
14. Richter, K., Blaskow, B., Stelling, N., Maas, H.-G. (2015). Reference value provision schemes for attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2015), II- 3/W5, pp. 65–72. DOI 10.5194/isprsannals-II-3-W5-65-201.
15. Schilling, A., Schmidt, A., Maas, H.-G. (2012). Tree Topology Representation from TLS Point Clouds Using Depth-First Search in Voxel Space. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78 (4), pp. 383–392.
16. Wu, J., van Aardt, J. A. N., McGlinchy, J., Asner, G. P. (2012). A Robust Signal Preprocessing Chain for Small-Footprint Waveform LiDAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 50 (8), pp. 3242–3255.

Об авторах

Нафсет Инвербиевна Хушт – старший инженер отдела генеральных планов и транспорта Дирекции по проектированию.

Михаил Ярославович Брын – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геодезии.

Author details

Nafset I. Khusht – Senior Engineer, General Plans and Transport Department of the Design Directorate.

Mikhail Ya. Bryn – DSc, Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy.

Получено / Received 29.01.2026

Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2026

Принята к публикации / Accepted 24.08.2026