НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 528.44:622.1
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 528.44:622.1

Сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек

М. Г. Выстрчил[1], М. В. Романов[2], Л. А. Рамирес-Мелендес[1]✉
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Акционерное общество «Артемовский рудник», г. Красноярск, Российская Федерация
✉ *s243021@stud.spmi.ru*

Резюме. Выполнен сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек в условиях открытых горных работ. Исходные пространственные данные получены по результатам UAV-фотограмметрии и обработаны в программном комплексе Agisoft Metashape с формированием плотного облака точек, цифровой модели поверхности и ортофотоплана. Для оценки влияния степени детализации пространственных данных исходное облако точек подвергалось последовательному прореживанию с увеличением шага между точками. Подсчет объемов выполнялся тремя подходами: методом TIN-поверхностей в AutoCAD Civil 3D, методом разности цифровых моделей поверхности в ГИС-среде и методом воксельного моделирования. Для каждой конфигурации пространственных данных определялись абсолютные отклонения и относительные погрешности объемных расчетов относительно базовой конфигурации с максимальной плотностью облака точек. Установлено, что при шаге прореживания до 10 м значения относительной погрешности для САПР- и ГИС-подходов не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %, однако при дальнейшем увеличении шага в ГИС-среде наблюдается ускоренный рост погрешности. Показано, что TIN-моделирование характеризуется большей устойчивостью к снижению плотности пространственных данных, тогда как воксельный подход демонстрирует стабильные результаты при анализе локальных участков. Полученные результаты могут быть использованы при выборе алгоритмов пространственного моделирования и параметров обработки UAV и LiDAR данных для производственного маркшейдерского контроля в условиях открытых горных работ.

Ключевые слова: облако точек, UAV-фотограмметрия, подсчет объемов, открытые горные работы, TIN-моделирование, ГИС, воксельное моделирование, пространственные данные

Для цитирования: Выстрчил М.Г., Романов М.В., Рамирес-Мелендес Л.А. Сравнительный анализ устойчивости методов подсчета объемов горной массы при изменении плотности облака точек. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 43-49. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49.

Comparative analysis of the stability of rock mass volume calculation methods under varying point-cloud density

M. G. Vystrchil1, M. V. Romanov2, L. A. Ramirez-Melendez[1]✉
1 Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation
2 JSC "Artyomovsky Mine", Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ *s243021@stud.spmi.ru*

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the stability of rock mass volume estimation methods under varying point-cloud density in open-pit mining conditions. The initial spatial data were obtained from UAV photogrammetry and processed in Agisoft Metashape to generate a dense point cloud, a digital surface model, and an orthomosaic. To evaluate the influence of spatial data density, the original point cloud was progressively decimated by increasing the spacing between neighbouring points. Volume calculations were performed using three approaches: TIN-based modelling in AutoCAD Civil 3D, digital surface difference analysis in a GIS environment, and voxel-based modelling. For each spatial-data configuration, absolute deviations and relative errors of volume estimation were determined with respect to the reference configuration corresponding to the maximum point-cloud density. The results show that for point spacings up to 10 m, the relative errors of both CAD- and GIS-based approaches remain within the allowable limit of σallow=1%. However, further increase in spacing leads to accelerated error growth in the GIS environment. The study demonstrates

© Выстрчил М. Г., Романов М. В., Рамирес-Мелендес Л. А., 2026

that TIN-based modelling exhibits higher stability under reduced spatial-data density, whereas the voxel-based approach provides comparatively stable results for local-scale analysis. The obtained results can be applied for selecting appropriate spatial-modelling algorithms and processing parameters for UAV- and LiDAR-based mine surveying in open-pit mining operations.

Keywords: point cloud, UAV photogrammetry, volume estimation, open-pit mining, TIN modelling, GIS, voxel modelling, spatial data

For citation: Vystrchil M.G., Romanov M.V., Ramirez-Melendez L.A. Comparative analysis of the stability of rock mass volume calculation methods under varying point-cloud density**.** *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 43-49. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-43-49.

Введение

Цифровые методы пространственного моделирования активно применяются при мониторинге устойчивости горных выработок, геомеханическом анализе и автоматизации горного производства [1, 2]. Подсчет объемов вынутой горной массы является одной из ключевых задач маркшейдерского обеспечения открытых горных работ, поскольку точность объемных расчетов непосредственно влияет на производственный учет, планирование горных работ, контроль технологических процессов и экономические показатели горнодобывающего предприятия [3]. В условиях современной цифровизации горного производства особую актуальность приобретает применение методов пространственного моделирования, основанных на данных дистанционного зондирования, фотограмметрии беспилотных летательных аппаратов, лазерного сканирования и геоинформационных технологий [4–10].

В последние годы технологии UAV-фотограмметрии и LiDAR-сканирования получили широкое распространение при решении задач определения объемов горной массы и мониторинга состояния открытых горных работ [4–8, 11–13]. Основными преимуществами цифровых методов являются высокая оперативность получения пространственных данных, возможность автоматизации вычислений и снижение трудоемкости маркшейдерских работ [12, 14]. При этом точность итоговых объемных расчетов зависит не только от качества исходной съемки, но и от особенностей алгоритмов пространственного моделирования, используемых при обработке облаков точек и построении цифровых моделей поверхности [5, 7, 15].

На практике для подсчета объемов наиболее широко применяются методы, основанные на построении TIN-поверхностей в САПР-средах, а также подходы, использующие растровые цифровые модели местности в геоинформационных системах [7, 12]. Одновременно прогрессирует направление воксельного моделирования, обеспечивающее пространственную дискретизацию облаков точек с дальнейшей локальной аппроксимацией геометрии изучаемой поверхности. Ряд исследований демонстрирует перспективность использования моделей на основе вокселей при работе с неоднородными пространственными данными и сложными геометрическими объектами [15], но стоит отметить, что вопросы устойчивости подобных подходов при варьировании плотности облака точек остаются недостаточно изученными.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных оценке точности UAV-фотограмметрии и цифровых методов подсчета объемов [4, 6, 8, 11, 13, 16], большая часть опубликованных работ ориентирована преимущественно на сравнение результатов цифровых измерений с традиционными геодезическими методами на анализ общей точности цифровых моделей местности. При этом существенно меньше внимания уделяется исследованию влияния степени прореживания облаков точек на устойчивость результатов объемных расчетов в различных программных средах и при использовании различных алгоритмов пространственного моделирования [7, 12, 15].

Особенно недостаточно изучены различия в чувствительности TIN-, raster- и voxel-based-подходов к снижению плотности пространственных данных в условиях открытых горных работ, где при выполнении регулярного производственного контроля маркшейдерская служба вынуждена балансировать между детализацией пространственной модели, вычислительными затратами и скоростью получения результата [3, 12]. В производственной практике уменьшение плотности облака точек позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку и ускорить обработку данных, однако при этом возникает риск накопления ошибок при определении объемов горной массы.

Научная проблема исследования заключается в недостаточной изученности влияния степени прореживания пространственных данных на устойчивость результатов подсчета объемов при использовании различных алгоритмов цифрового моделирования поверхности в условиях открытых горных работ.

Цель исследований: установление закономерностей изменения точности и устойчивости подсчета объемов горной массы при снижении плотности пространственных данных для различных подходов цифрового моделирования с целью оптимизации выбора метода в производственной практике.

Материал и методы исследования

Исходные данные для настоящего исследования получены по результатам аэросъемки участка открытых горных работ с использованием беспилотного летательного аппарата. Аэросъемка выполнялась с использованием БПЛА DJI Mavic 2 на территории угольного разреза «Тугнуйский». Фотограмметрическая обработка данных выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape [17]. Исходное плотное облако точек содержало около 57 млн точек при среднем шаге между точками 0,38 м.

Фотограмметрическая обработка первичных материалов выполнена в программном комплексе Agisoft Metashape, в результате чего сформированы плотное облако точек, цифровая модель поверхности и ортофотоплан, использованные в качестве единой пространственной основы для дальнейшего сравнительного анализа [4, 6, 8].

Применение единой исходной пространственной базы позволило исключить влияние различий между независимыми съемками и сосредоточить исследование на оценке устойчивости методов подсчета объемов при изменении плотности пространственных данных и использовании различных алгоритмов моделирования поверхности [7, 12].

Аэросъемка выполнялась с перекрытием снимков, обеспечивающим формирование высокоплотного облака точек и корректное восстановление геометрии исследуемого участка. При фотограмметрической обработке использовались стандартные процедуры выравнивания изображений, построения плотного облака точек и генерации цифровой модели поверхности, рекомендованные для задач маркшейдерского обеспечения открытых горных работ [4]. Пространственная детализация исходного облака точек соответствовала среднему шагу между точками около 0,38 м, который в рамках настоящего исследования принят в качестве базовой конфигурации пространственных данных.

Для оценки влияния плотности пространственных данных на устойчивость объемных расчетов выполнялось последовательное контролируемое прореживание исходного облака точек с увеличением среднего расстояния между соседними точками. Выбор последовательности шагов прореживания обусловлен необходимостью поэтапной оценки влияния снижения плотности пространственных данных на устойчивость объемных расчетов при постепенном уменьшении детализации цифровой модели поверхности и снижении вычислительной нагрузки при обработке пространственных данных. В исследовании использовались значения шага 0,38; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60 и 70 м для анализа всего исследуемого участка. Выбор указанного диапазона обусловлен необходимостью оценки поведения алгоритмов как в условиях высоко детализированных пространственных данных, так и при существенном снижении плотности облака точек, характерном для ускоренной производственной обработки и ограниченных вычислительных ресурсов.

Для локального участка использовались меньшие значения шага (0,38; 1; 2,5 и 5 м), что связано с ограниченными размерами исследуемой области и необходимостью сохранения геометрической представительности модели при сравнительно малой площади анализируемого объекта.

Подсчет объемов выполнялся тремя независимыми подходами:

1. Первый подход был реализован в программном комплексе AutoCAD Civil 3D и основан на построении триангулированных нерегулярных сетей (TIN-поверхностей) с последующим определением объема как разности поверхностей в пределах заданного контура [7]. Данный подход широко применяется в маркшейдерской практике благодаря высокой адаптивности TIN-моделей к сложной геометрии рельефа и возможности локального сохранения характерных морфологических элементов поверхности.

2. Второй подход был реализован в ГИС-среде «Спутник», где расчет объема выполнялся на основе анализа разности цифровых моделей поверхности в пределах исследуемого полигона [10]. При этом цифровая модель поверхности использовалась в качестве основы численного определения объема, а ортофотоплан применялся для визуального контроля границ исследуемой области.

3. Третий подход был основан на воксельном моделировании пространственных данных. В данном случае облако точек дискретизировалось в виде регулярной трехмерной структуры, состоящей из элементарных пространственных ячеек – вокселей. В пределах каждого вокселя выполнялась локальная плоскостная аппроксимация распределения точек, после чего интегральный объем определялся суммированием частных объемов всех элементов расчетной области [7, 15]. При воксельном моделировании использовалось пространственное разрешение воксельного элемента 15 м. В процессе вокселизации пространство исследуемого объекта разделялось на регулярные трехмерные элементы фиксированного размера. После сегментации облака точек внутри каждого вокселя выполнялась локальная плоскостная аппроксимация распределения точек, что позволяло уменьшить влияние неоднородной плотности пространственных данных, локальных шумов и отдельных выбросов.

Интегральная оценка объема при воксельном подходе определялась выражением

$$V = \sum_{j=1}^{n} V_j \quad (1)$$

где V_j – объем j-го элемента; n – общее число вокселей, участвующих в расчете.

В отличие от методов, основанных на непрерывной интерполяции поверхности, воксельный подход снижает влияние локальной неоднородности распределения точек и обеспечивает устойчивость пространственной дискретизации при изменении плотности исходных данных.

В качестве базовой конфигурации для сравнительного анализа использовались расчеты с минимальным шагом между точками (0,38 м), соответствующим максимальной плотности облака, относительно которой определялись абсолютные отклонения и относительные погрешности объемных расчетов для каждого варианта прореживания как

$$\varepsilon_i = V_i - V_{\text{ref}}, \quad (2)$$

где V_i – объем, вычисленный при шаге i; V_{ref} – объем, полученный для базовой конфигурации пространственных данных.

Относительная погрешность определялась выражением

$$\sigma_i = \frac{|V_i - V_{\text{ref}}|}{V_{\text{ref}}} * 100\ \%, \quad (3)$$

где σ_i – относительная погрешность, %.

Сопоставление результатов выполнялось как для всего исследуемого участка, так и для локального фрагмента, что позволило оценить особенности поведения различных алгоритмов пространственного моделирования при изменении масштаба изучаемой области. При анализе соответствия нормативным требованиям использовалось предельное значение допустимой относительной погрешности $\sigma_{доп}$ = 1 % для объемов свыше 2 млн м³.

Результаты исследований

На основании полученных расчетных данных были построены зависимости объема выемки от шага прореживания пространственных данных для САПР- и ГИС-подходов (рис. 1).

При минимальных значениях шага результаты расчетов в обеих программных средах практически совпадают. По мере увеличения расстояния между точками наблюдается постепенное расхождение вычисленных значений объема. Наиболее существенные различия фиксируются при шагах свыше 20 м, когда снижение плотности пространственных данных приводит к заметному изменению результатов расчета.

Для количественной оценки изменения результатов относительно базовой конфигурации пространственных данных был выполнен расчет абсолютных отклонений и относительных погрешностей объемов (табл. 1).

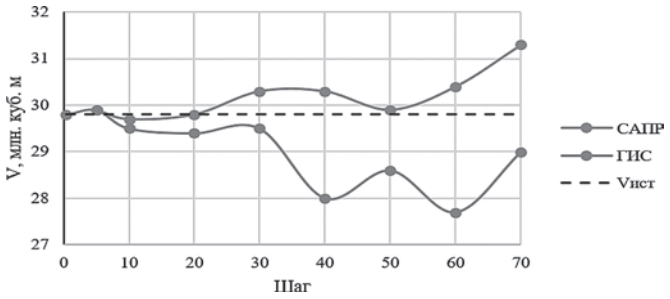


Рис. 1. **Зависимость объема выемки от величины шага (САПР и ГИС) /**
Fig. 1. **Dependence of the recess volume on the pitch size (CAD and GIS)**

Таблица 1 / Table 1

Отклонения и погрешности определения объемов /
Deviations and errors in volume determination

Шаг, м	Количество точек, млн точек	V выемки, млн м³		ε, млн м³		σ, %	
		Civil	ГИС	Civil	ГИС	Civil	ГИС
0,38	57	-	29,8	-	0	-	0
5	0,32	29,9	29,9	0,1	0,1	0,3	0,3
10	0,078	29,7	29,5	-0,1	-0,3	0,3	1,0
20	0,019	29,8	29,4	0	-0,4	0	1,3
30	0,008	30,3	29,5	0,5	-0,3	1,7	1,0
40	0,005	30,3	28	0,5	-1,8	1,7	6,0
50	0,003	29,9	28,6	0,1	-1,2	0,3	4,0
60	0,002	30,4	27,7	0,6	-2,1	2,0	7,0
70	0,0015	31,3	29	1,5	-0,8	5,0	2,7

На основании вычисленных значений отклонений были построены зависимости изменения абсолютного отклонения объема от величины шага прореживания пространственных данных (рис. 2).

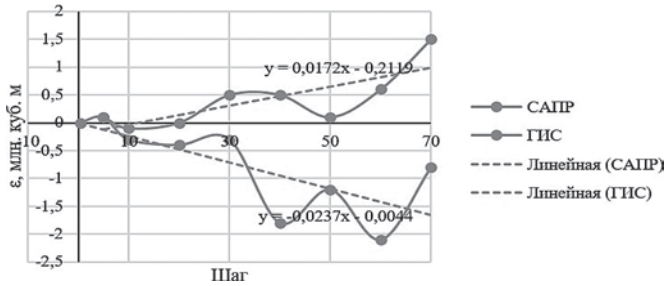


Рис. 2. **Зависимость отклонений объема от величины шага /**
Fig. 2. **Dependence of volume deviations on step size**

Для САПР-подхода наблюдается преимущественно положительное отклонение результатов относительно базовой конфигурации, тогда как для ГИС-подхода характерно преобладание отрицательных отклонений. С увеличением величины шага абсолютные значения отклонений возрастают в обеих программных средах.

Зависимости относительной погрешности определения объемов от величины шага представлены на рисунке 3.

Установлено, что при шаге до 10 м значения относительной погрешности для обоих подходов не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %. При дальнейшем увеличении шага наблюдается ускоренный рост погрешности для ГИС-подхода, тогда как результаты САПР сохраняют допустимый уровень точности в более широком диапазоне значений шага.

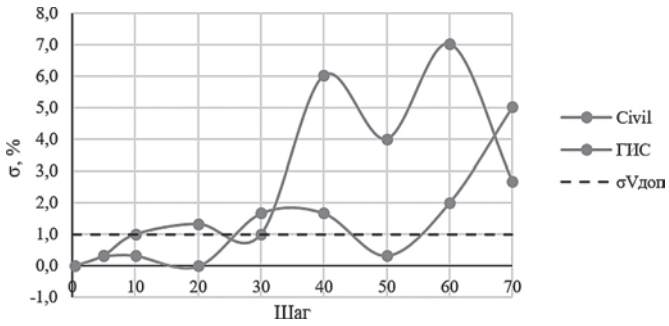


Рис. 3. **Зависимость относительной погрешности σ от величины шага ($\sigma_{доп}$ = 1 %) /**
Fig. 3. **Dependence of the relative error σ on the step value (σ_{dop} = 1 %)**

Результаты расчетов для локального участка

Для дополнительного анализа устойчивости методов был выделен локальный участок в пределах ограниченной области исследования (рис. 4).

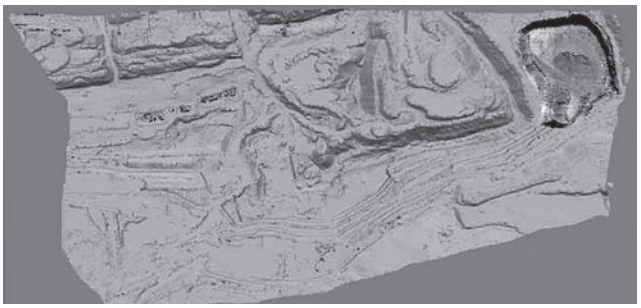


Рис. 4. **Ограничение области исследования (локальный участок) /**
Fig. 4. **Limitation of the research area (local area)**

Локальный участок характеризуется меньшими пространственными размерами по сравнению с основным полигоном исследования, что позволило выполнить сопоставление результатов при более детализированных значениях шага прореживания.

Результаты вычисления объемов, абсолютных отклонений и относительных погрешностей для локального участка представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Отклонения и погрешности определения объемов /
Deviations and errors in volume determination

Шаг, м	V, млн м³			ε, млн м³			σ, %		
	САПР	ГИС	Voxel	САПР	ГИС	Voxel	САПР	ГИС	Voxel
0,38	4,55	4,54	4,53	0	0,01	0,02	0	0,2	0,4
1	4,53	4,53	4,54	0,01	0,02	0,01	0,3	0,4	0,3
2,5	4,53	4,51	4,55	0,02	0,03	0,00	0,4	0,7	0
5	4,53	4,52	4,54	0,02	-0,03	0,01	0,4	0,7	0,2

По результатам расчетов построены зависимости объема локального участка от величины шага прореживания пространственных данных (рис. 5).

Даже при минимальных значениях шага расчетные объемы, полученные различными подходами, не совпадают полностью. По мере увеличения шага различия между результатами становятся более выраженными.

Зависимости абсолютных отклонений объема локального участка от величины шага представлены на рисунке 6.

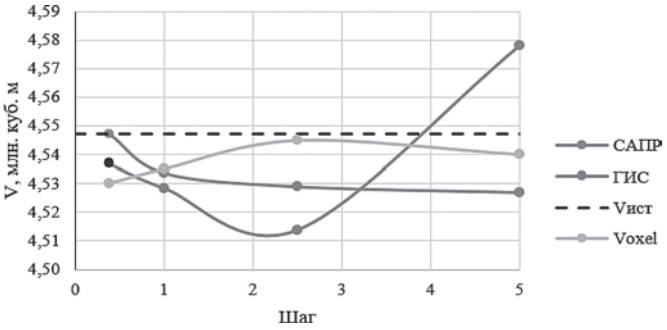


Рис. 5. **Зависимость объема локального участка от величины шага /**
Fig. 5. **Dependence of the volume of the local area on the step size**

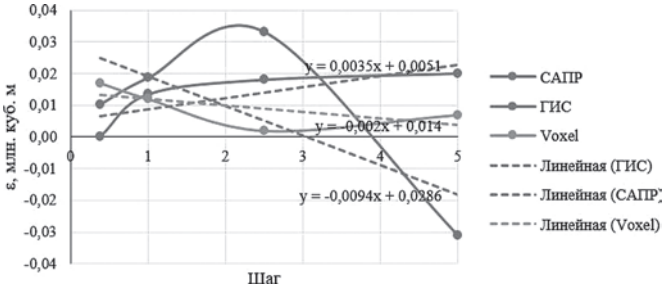


Рис. 6. **Зависимость отклонений объема локального участка от величины шага /**
Fig. 6. **Dependence of deviations of the volume of the local area on the step size**

Для САПР-подхода наблюдается постепенное увеличение отклонений с ростом шага прореживания. Для ГИС-подхода характерны более высокие значения отклонений, тогда как воксельный подход демонстрирует сравнительно стабильные результаты в пределах исследуемого диапазона значений шага.

Зависимости относительной погрешности определения объема локального участка представлены на рисунке 7.

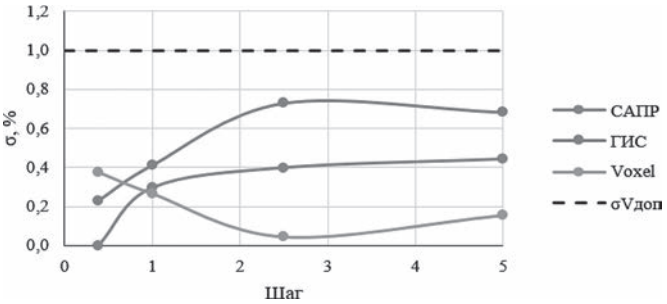


Рис. 7. **Зависимость погрешности σ локального участка от величины шага ($\sigma_{доп}$ = 1 %) /**
Fig. 7. **Dependence of the error σ of the local area on the step value (σ_{dop} = 1 %)**

Во всех исследованных вариантах значения относительной погрешности не превышают допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %. При этом минимальные значения погрешности при увеличении шага наблюдаются для воксельного подхода, тогда как максимальные значения характерны для ГИС-моделирования.

Обсуждение результатов

Влияние алгоритмов моделирования на устойчивость объемных расчетов

Полученные результаты показывают, что устойчивость объемных расчетов существенно зависит от алгоритма пространственного моделирования.

Наиболее стабильные результаты при увеличении шага прореживания продемонстрировал САПР-подход на основе TIN-поверхностей. Это обусловлено использованием нерегулярной триангуляции Делоне, обеспечивающей адаптивное представление локальной геометрии и лучшее сохранение морфологических особенностей рельефа при снижении плотности данных.

Для ГИС-подхода наблюдается более быстрый рост погрешности из-за растровой интерполяции и эффекта сглаживания при утрате локальных особенностей рельефа. В то же время воксельное моделирование демонстрирует стабильность на локальных участках за счет пространственной дискретизации в объемных элементах, в которых влияние топологии поверхности менее выражено по сравнению с TIN- и растровыми моделями.

Влияние прореживания облака точек на результаты расчетов

Анализ показывает, что снижение плотности облака точек существенно влияет на точность определения объемов горной массы: при увеличении шага прореживания уменьшается пространственная детализация модели и возрастает риск потери локальных геометрических элементов рельефа. Эти результаты согласуются с исследованиями о влиянии плотности пространственных данных на точность фотограмметрических измерений и расчетов объемов [4, 8, 13], а также с работами по обработке данных UAV-фотограмметрии и цифрового моделирования горных объектов [7, 11].

При этом чувствительность алгоритмов к прореживанию существенно различается: для ГИС-подхода критический рост погрешности наблюдается при шагах свыше 10–20 м, тогда как TIN-моделирование сохраняет устойчивость при дальнейшем снижении плотности данных.

Практическое значение результатов

Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров обработки пространственных данных для производственного маркшейдерского контроля в условиях открытых горных работ. Установлено, что TIN-подход позволяет сохранять допустимый уровень точности в более широком диапазоне шага прореживания при ускоренной обработке и снижении вычислительной нагрузки, тогда как ГИС-подход эффективен лишь при высокой плотности данных и демонстрирует повышенную чувствительность к снижению детализации.

Воксельное моделирование является перспективным направлением для анализа локальных объектов и неоднородных облаков точек, но для промышленного применения требуется дальнейшая разработка алгоритмов пространственной аппроксимации и дополнительная экспериментальная валидация. Ограничением исследования является использование данных одного объекта и экспериментальная реализация воксельного алгоритма, нуждающаяся в оптимизации и расширенной валидации на различных горнотехнических объектах.

Заключение

1. Установлено, что увеличение шага прореживания облака точек вызывает рост абсолютных отклонений и относительных погрешностей объемных расчетов из-за снижения пространственной детализации цифровой модели поверхности.

2. Сопоставление методов показало, что TIN-подход в AutoCAD Civil 3D обладает большей устойчивостью к снижению плотности данных по сравнению с raster-моделированием в ГИС, в то время как воксельный подход продемонстрировал стабильность при анализе локального участка.

3. Определено, что при шаге до 10 м относительная погрешность для САПР- и ГИС-подходов не превышает допустимого уровня $\sigma_{доп}$ = 1 %, но при дальнейшем увеличении шага в ГИС-среде наблюдается ускоренный рост погрешности.

4. Установлено, что выбор алгоритма пространственного моделирования существенно влияет на устойчивость объемных расчетов в условиях открытых горных работ, что подтверждает необходимость обоснованного выбора параметров обработки данных при производственном маркшейдерском контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Afanasiev P.I., Medina S.Ya., Savon V.Yu. et al. The Analysis of Slope Stability of the Mining Road of the Camarioca Este Deposit of the Comandante Ernesto Che Guevara Company. *Occupational Safety in Industry*. 2024; 4: 78-84. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-4-78-84.
2. Хохлов С.В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы. *Записки Горного института*. 2025; 275: 196-204.
   Khokhlov S.V. Application of digital simulation methods for predicting parameters of blasted rock muckpile. *Journal of Mining Institute.* 2025; 275: 196-204. (In Russ.).
3. Alsayed A., Nabawy M.R.A. Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review. *Drones*. 2023; 8 (7): 537. https://doi.org/10.3390/drones7080537.
4. Ajayi O.G., Ajulo J. Investigating the Applicability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry for the Estimation of the Volume of Stockpiles. *Quaestiones Geographicae*. 2021; 1 (40): 25-38. https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0002.
5. Gusev V.N., Filippov A.A. Application of GNSS, LiDAR and UAVs for monitoring open-pit mine volumes. *Journal of Mining Institute*. 2026; (278): 123-135. https://doi.org/10.31897/PMI.2026.12.
6. Kim Y.H., Shin S.S., Lee H.K. et al. Field Applicability of Earthwork Volume Calculations Using Unmanned Aerial Vehicle. *Sustainability*. 2022; 15 (14): 9331. https://doi.org/10.3390/su14159331.
7. Meng X., Wang T., Cheng D. et al. Enhanced Point Cloud Slicing Method for Volume Calculation of Large Irregular Bodies: Validation in Open-Pit Mining. *Remote Sensing*. 2023; 20 (15): 5006. https://doi.org/10.3390/rs15205006.
8. Voloshina E.A., Novozhenin S.Yu., Kelekhsaev S.K. Substantiation of use of unmanned aerial vehicles in volume evaluation of mineral storages. *MIAB*. 2023; 11-1: 305-321. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_305.
9. Wen Y., Yao X., Li C. et al. Calculation of Excavation Volume in Open-Pit Mines Under Complex Conditions Based on Multi-Source Stereo Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2026; 4 (18): 654. https://doi.org/10.3390/rs18040654.
10. Курбатова В.В., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю. и др. Параметрическая сходимость результатов съемки беспилотных воздушных аппаратов «Геоскан 401» и GNSS при выполнении маркшейдерских работ на месторождении «Наталка» Магаданской области. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 2 (124): 76-80. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_76_80.
    Kurbatova V.V. Lomakina N.E., Garifulina I.Y. et al. Parametric convergence of survey results from Geoscan 401 unmanned aerial vehicles and GNSS during mine surveying works at the Natalka deposit in the Magadan Oblast. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2023; 2 (124): 76-80. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_76_80. (In Russ.).
11. Dhakal S., Manandhar A., Shah A. et al. Integrating UAS Remote Sensing and Edge Detection for Accurate Coal Stockpile Volume Estimation. *Remote Sensing*. 2025; 18 (17): 3136. https://doi.org/10.3390/rs17183136.
12. Szafarczyk A., Siwek M. GIS-Based Process Automation of Calculating the Volume of Mineral Extracted from a Deposit. *Geosciences*. 2025; 8 (15): 315. https://doi.org/10.3390/geosciences15080315.
13. Yin C. Wen Q., Liu S. et al. Volume Estimation of Land Surface Change Based on GaoFen-7. *Remote Sensing*. 2025; 7 (17): 1310. https://doi.org/10.3390/rs17071310.
14. Выстрчил М. Г., Мукминова Д. З., Балтыжакова Т. И. и др. Алгоритм вычисления деформаций подземных горных выработок на основании данных лазерно-сканирующей съемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025; 11-1: 57-76. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.
    Vystrchil M. G., Mukminova D. Z., Baltyzhakova T. I. et al. Algorithm for calculating deformations of underground mine workings based on laser scanning survey data. *MIAB.* 2025; 11-1: 57-76. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_111_0_57.
15. Ivanov S.P., Petrova E.M. Point cloud algorithms for rock mass volume estimation. *Eurasian Mining*. 2026; 1: 34-45. https://doi.org/10.17580/em.2026.01.04.
16. Lee S.B., Han D., Song M. Calculation and Comparison of Earthwork Volume Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry and Traditional Surveying Method. *Sensors and Materials*. 2022; 12 (34): 4737. https://doi.org/10.18494/SAM4192.
17. Колесатова О.С., Колкова М.С., Горбатова Е.А. и др. Анализ структурной неоднородности массива горных пород карьера Юбилейного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 38-46. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46.
    Kolesatova O.S., Kolkova M.S., Gorbatova E.A. et al. Analysis of rock mass structural heterogeneity in the open pit of the Yubileynoye deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 38-46. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-38-46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Георгиевич Выстрчил –
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры маркшейдерского дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0002-1669-7776;
e-mail: ratven@yandex.ru

Михаил Вячеславович Романов –
начальник ПТО АО «Артемовский рудник», г. Красноярск, Российская Федерация;
e-mail: mihail.romanov@sngoldmining.ru

Луис Альберто Рамирес-Мелендес –
аспирант кафедры маркшейдерского дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;
https://orcid.org/0000-0002-6459-8975;
e-mail: s243021@stud.spmi.ru

Критерии авторства:
Авторы заявляют о равном вкладе в работу.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 03.06.2026
Поступила после рецензирования: 13.09.2026
Принята к публикации: 19.09.2026

ABOUT THE AUTHOR

Mikhail G. Vystrchil –
Cand. (Sci.) Eng. Department of Mine Surveying. "Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University", Saint Petersburg, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0002-1669-7776;
e-mail: ratven@yandex.ru

Mikhail V. Romanov –
Head of Vocational Training Department of JSC "Artyomovsky Mine", Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: mihail.romanov@sngoldmining.ru

Luis Alberto Ramirez-Melend –
Postgraduate student, "Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University", Saint Petersburg, Russian Federation;
https://orcid.org/0000-0002-6459-8975;
e-mail: s243021@stud.spmi.ru

Contribution:
The authors declare the equal contribution to the work in the article.

Conflicts of Interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 03.06.2026
Revised: 13.09.2026
Accepted: 19.09.2026