

*Р. Е. Калиакпаров<sup>1</sup>* 

## **Исследование влияния разрежения облака точек на точность вычисления объёма каркасной модели**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: kaliakparov1@vk.com

**Аннотация.** В настоящем исследовании выполнена оценка влияния разрежения (децимации) облаков точек лазерного сканирования на точность определения объёма каркасных моделей подземных выработок при добыче полезных ископаемых. Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации обработки больших объёмов данных при маркшейдерском обеспечении подземных горных работ, где избыточность исходной информации создаёт вычислительные трудности, а требования к точности подсчёта объёмов добычи и пустот остаются высокими. В качестве эталонного значения принят объём модели камеры (или иной выработки), построенной по полному облаку, содержащему 5 357 167 точек, составивший 460,28 м<sup>3</sup>. В ходе эксперимента проводилось последовательное прореживание исходного массива для получения выборок в 70%, 40%, 10%, 5% и 1% от исходного объёма данных. Для каждого разреженного облака повторно вычислялся объём каркаса. Полученные результаты сопоставлены с известными алгоритмами оценки точности TIN-поверхностей и современными подходами к сохранению формы рельефа при децимации, включая методы, адаптированные для работы с запылённой средой и сложными условиями освещения. Цель работы – определение порога разрежения, при котором отклонение результата становится статистически значимым для задач маркшейдерского учёта в подземных условиях.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, облако точек, децимация данных, разрежение облаков точек

*R. E. Kaliakparov<sup>1</sup>* 

## **Study of point cloud resolution for accuracy of wireframe model volume calculation**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: kaliakparov1@vk.com

**Abstract.** The present study evaluates the effect of rarefaction (decimation) of clouds of laser scanning points on the accuracy of determining the volume of skeleton models of mining operations. The relevance of the work is due to the need to optimize the processing of large amounts of data in the surveying of underground mining operations, where the redundancy of the source information creates computational difficulties, and the requirements for the accuracy of calculating mining volumes and voids remain high [3]. The volume of the camera model (or other production) built on a full cloud containing 5,357,167 points, amounting to 460.28 m<sup>3</sup>, is used as a reference value. During the experiment, the initial array was sequentially thinned to obtain samples in 70%, 40%, 10%, 5% and 1% of the original data volume. The volume of the carcass was calculated repeatedly for each sparse cloud. The results obtained are compared with well-known algorithms for estimating the accuracy of TIN surfaces and modern approaches to preserving the shape of the relief during decimation, including methods adapted to work with dusty environments and difficult lighting

conditions [3]. The purpose of the work is to determine the dilution threshold at which the deviation of the result becomes statistically significant for the tasks of surveying in underground conditions.

**Keywords:** laser scanning, point cloud, data decimation, point cloud dilution

### ***Введение***

Современные технологии наземного лазерного сканирования (НЛС) и мобильного лазерного сканирования активно внедряются в практику маркшейдерского обеспечения подземных горных работ. Высокая детализация съёмки очистных камер шахт, ортов, забоев и рудоспусков позволяет получать облака точек, содержащие миллионы измерений [1]. Однако специфика подземных условий – ограниченное пространство, наличие пыли и капельной влаги, неравномерная освещённость – приводит к формированию облаков с высокой степенью избыточности и неравномерной плотностью [2, 3].

С одной стороны, высокая плотность сканирования необходима для достоверной фиксации геометрии нарушенного массива, отслоений породы и неровностей контура выработки. С другой стороны, обработка сверхплотных облаков точек требует значительных вычислительных ресурсов и времени, что критично при оперативном подсчёте объёмов добытой рудной массы или ёмкости бункеров. Для решения этой проблемы применяются методы разрежения (децимации), целью которых является сокращение количества точек при максимально возможном сохранении геометрической точности модели [3].

Особую значимость оценка ошибки децимации приобретает при построении каркасных (TIN) поверхностей подземных выработок. Как отмечается в работе М. Г. Выстрчила и соавторов, алгоритмы построения TIN-моделей чувствительны к плотности исходного облака, что требует разработки методов количественной оценки аппроксимации [1]. Традиционные методы случайного разрежения, используемые во многих программных пакетах, могут приводить к потере микрорельефа поверхности (заколы, неровности взрывного контура) и, как следствие, к искажению интегральных характеристик – в первую очередь объёма, который является основой для взаиморасчётов с подрядными организациями и учёта движения запасов.

В качестве альтернативы существуют более совершенные подходы, например, метод взвешенной децимации по кривизне (Curvature Weighted Decimation), который позволяет сохранять ключевые особенности рельефа даже при сильном сокращении числа точек [2]. Исследования в области объёмной калибровки насыпных материалов также демонстрируют, что даже при 90%-ном сжатии воксельной сетки погрешность вычислений может удерживаться в пределах 3% при использовании специализированных алгоритмов фильтрации [3]. Однако для подземных горных выработок, характеризующихся сложной пространственной конфигурацией и наличием вертикальных стенок, такие данные требуют уточнения.

Целью данной работы является экспериментальное определение зависимости изменения объёма каркасной модели подземной горной выработки от степени разрежения исходного облака точек и выявление пороговых значений, за которыми погрешность вычислений превышает допустимые нормы для маркшейдерского учёта (как правило, не более 2-3%).

## *Методы и материалы*

В качестве объекта исследования выбрана подземная горная выработка. Выбор объекта обусловлен сложной геометрией контура, наличием вертикальных стенок и неровной кровли, что характерно для буровзрывного способа проходки.

Съёмка объекта выполнялась с использованием мобильного лазерного сканера Geoslam Zeb Horizon, работающего по технологии SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Прибор позволяет выполнять скоростную съёмку в условиях ограниченного пространства без необходимости постоянного стояния со штативом, что критически важно для подземных условий. Паспортная точность сканера составляет  $\pm 1-3$  см.

1. Сканирование производилось оператором в режиме непрерывного движения по выработке с возвратом в исходную точку для замыкания петли (loop closure), что обеспечивает минимизацию дрейфа траектории. Общая продолжительность съёмки составила 3 минуты.

Первичная обработка данных (геопривязка, оптимизация траектории, разрежение шумов, вызванных запылённостью и вибрацией) выполнена в фирменном программном обеспечении Geoslam HUB. На выходе сформировано исходное облако точек в формате .las, характеризующееся следующими параметрами:

- общее количество точек: 5 357 167 ед.;
- формат данных: .las;
- система координат: условная (локальная) с последующей привязкой к маркшейдерской сети.

### 2. Определение эталонного объёма

На основе исходного (неразрезанного) облака точек построена эталонная каркасная (TIN) модель выработки. Построение выполнялось в программном комплексе CloudCompare (версия 2.14.x), который является специализированным ПО для обработки облаков точек и обладает широкими возможностями по триангуляции и анализу объёмов.

Алгоритм построения сетки – триангуляция Делоне с ограничениями (функция "Mesh > Delaunay 2.5D"), адаптированная для работы с зашумлёнными данными подземных съёмок [1].

Полученная эталонная модель имеет объём  $V = 460,28$  м<sup>3</sup>. Данное значение принято за базу (100%) для последующего сравнения. Объём вычислялся инструментом "Compute geometric measures" в CloudCompare.

### 3. Методика разрежения (децимации) облака точек

Для исследования влияния плотности точек на точность вычисления объёма проведена серия экспериментов по разрежению исходного массива данных. Использован метод случайного разрежения (Random subsampling), реализованный в модуле "Tools Subsample" программного комплекса CloudCompare. Выбор данного метода обусловлен его распространённостью в инженерной практике, несмотря на известные недостатки в сохранении микрорельефа [2].

Процедура разрежения выполнялась итеративно. На каждом этапе из текущего массива случайным образом исключалось 30% точек (параметр "random" с настройкой целевого количества точек), что позволило получить следующие репрезентативные выборки:

- 70% ( $N \approx 3\,750\,000$  точек) – незначительное прореживание;
- 40% ( $N \approx 2\,142\,867$  точек) – умеренное прореживание;
- 10% ( $N \approx 535\,717$  точек) – сильное прореживание;
- 5% ( $N \approx 267\,858$  точек) – критическое прореживание (ориентир для оценки нижнего порога детализации [3]);
- 1% ( $N \approx 53\,572$  точки) – предельное прореживание, моделирующее съёмку с минимальным разрешением.

Примечание: Проценты указаны от исходного количества точек. Значения округлены до целого числа точек для сохранения репрезентативности выборки.

4. Для каждой из полученных выборок (70%, 40%, 10%, 5%, 1%) выполнено повторное построение каркасной модели в CloudCompare. Условия построения (алгоритм триангуляции, максимальная длина ребра, пороговые углы) строго соответствовали условиям построения эталонной модели. Это обеспечено применением скриптового режима (консоль CloudCompare или запись параметров вручную), что исключило влияние человеческого фактора на результаты.

Для минимизации случайной погрешности, вносимой алгоритмом случайной выборки, построение моделей для каждого процента разрежения выполнялось трёхкратно (с разным "seed" генератора случайных чисел) с последующим усреднением результата. Итоговый объём для каждого этапа (V70, V40, V10, V5, V1) принимался как среднее арифметическое полученных значений.

#### 5. Вычисление погрешностей и анализ

По результатам построения моделей для каждой степени разрежения вычислены следующие показатели:

- абсолютное отклонение объёма:  $\Delta = V_n - V_{100}$  (м³);
- относительная погрешность:  $\delta = (\Delta / V_{100}) \times 100\%$  (%).

Полученные данные сведены в таблицу и проанализированы на предмет наличия тренда к занижению объёма, характерного для разреженных моделей [2]. Дополнительно выполнена оценка визуальных искажений геометрии (сглаживание углов, «затягивание» каверн) с использованием инструментов визуализации CloudCompare для качественного подтверждения количественных результатов.

Поскольку важной методологической особенностью данного исследования является учёт специфической структуры шума, характерной для данных, полученных с помощью SLAM-сканера Geoslam Zeb Horizon в условиях подземной выработки.

Как отмечают R. Urban и соавторы [4] в своём исследовании точности Zeb Horizon, данные, получаемые с помощью SLAM-сканера, характеризуются относительно высоким уровнем шума по сравнению со статическими лазерными сканерами, что обусловлено особенностями алгоритмов одновременной локализации и картографирования, а также влиянием вибраций при ручном перемещении сканера.

Дополнительным фактором, влияющим на качество исходных данных, являются условия подземной съёмки: ограниченное пространство, наличие пылевой взвеси и капельной влаги, неравномерная освещённость. Эти факторы приводят к появлению как случайных выбросов (outliers), так и систематических искажений, особенно на участках с резким изменением геометрии выработки [3].

В связи с этим, в ходе первичной обработки в ПО Geoslam HUB была выполнена стандартная фильтрация шумов с использованием встроенных алгорит-

мов (статистический фильтр и фильтр по связности). Однако для целей настоящего исследования принципиально важно, что последующая децимация выполнялась именно на «сырых» данных (после базовой фильтрации траектории, но без дополнительного сглаживания), чтобы сохранить реалистичную картину влияния разрежения на точность объёма. Это отличает данную работу от исследований, где применяется интенсивное сглаживание (например, методом Moving Least Squares [1, 4]), которое может маскировать реальную погрешность, вносимую разрежением.

Таким образом, полученные результаты отражают не только эффект децимации, но и учитывают реальный уровень шума, характерный для подземной съёмки мобильным сканером, что повышает практическую значимость выводов для маркшейдерских служб.

### ***Результаты***

#### **1. Визуальная оценка моделей.**

В ходе эксперимента для каждой степени разрежения облака точек были построены каркасные модели подземной выработки. Визуальный анализ моделей (рис. 3) показывает, что вплоть до разрежения 10% ( $\approx 535$  тыс. точек) геометрия выработки сохраняется визуально идентичной эталону.

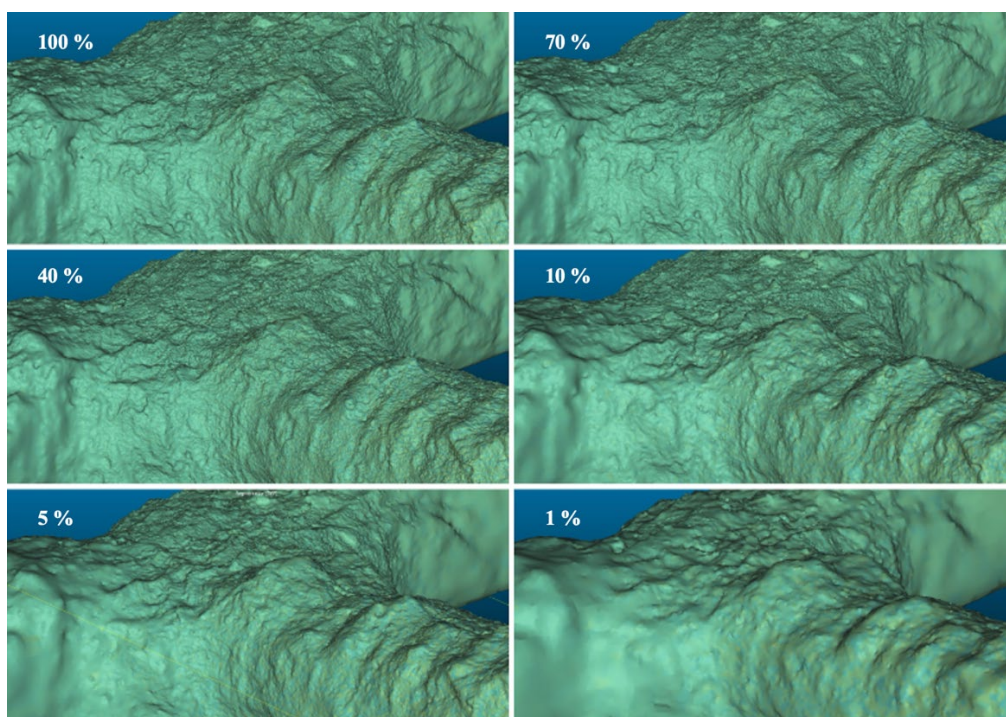


**Рис. 3.** Анализ моделей

При переходе к 5% начинают наблюдаться незначительные сглаживания микрорельефа стенок и кровли. На модели, построенной по 1% точек ( $\approx 53$  тыс.), отчетливо видны искажения формы: «затягивание» острых углов, сглаживание вертикальных стенок и потеря детализации в зонах сопряжения выработок.

## 2. Количественная оценка объёмов

Результаты вычисления объёмов каркасных моделей для каждой степени разрежения представлены в таблице 1. Для каждого процентного соотношения выполнено трёхкратное построение модели с последующим усреднением результата. Среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) при трёхкратных измерениях не превышало 0,15 м<sup>3</sup>, что подтверждает статистическую достоверность полученных значений.

**Таблица 1** – Зависимость объёма каркасной модели подземной выработки от степени разрежения облака точек.

| Степень детализации  | Остаточное кол-во точек, шт. | Объём каркаса V, м <sup>3</sup> | Абсолютное отклонение $\Delta$ , м <sup>3</sup> | Относительная погрешность $\delta$ , % |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>100% (эталон)</b> | 5 357 167                    | <b>460,280</b>                  | –                                               | –                                      |
| <b>70%</b>           | 3 750 000                    | 457,631                         | 2,649                                           | 0,58                                   |
| <b>40%</b>           | 2 142 867                    | 457,545                         | 2,735                                           | 0,59                                   |
| <b>10%</b>           | 535 717                      | 456,273                         | 4,007                                           | 0,87                                   |
| <b>5%</b>            | 267 858                      | 451,537                         | 8,743                                           | 1,90                                   |
| <b>1%</b>            | 53 572                       | 445,615                         | 14,665                                          | 3,19                                   |

## 3. Графический анализ зависимости

На рисунке 4 представлен график зависимости относительной погрешности вычисления объёма от степени детализации облака точек. Анализ кривой позволяет выделить три характерных участка:

а) Участок стабильности (100% – 40%).

Кривая имеет пологий характер, погрешность не превышает 0,6%. Даже при сокращении количества точек в 2,5 раза (с 5,35 млн до 2,14 млн) объём модели изменяется незначительно.

б) Участок плавного роста погрешности (40% – 5%).

Начиная с отметки 10% (535 тыс. точек) наблюдается устойчивое увеличение абсолютного значения отрицательной погрешности. При переходе от 10% к 5% погрешность возрастает более чем в 2 раза (с -0,87% до -1,90%).

в) Участок критических искажений (менее 5%).

На интервале от 5% до 1% происходит резкое падение точности. Погрешность достигает -3,19%, что более чем в 5 раз превышает погрешность на участке стабильности.

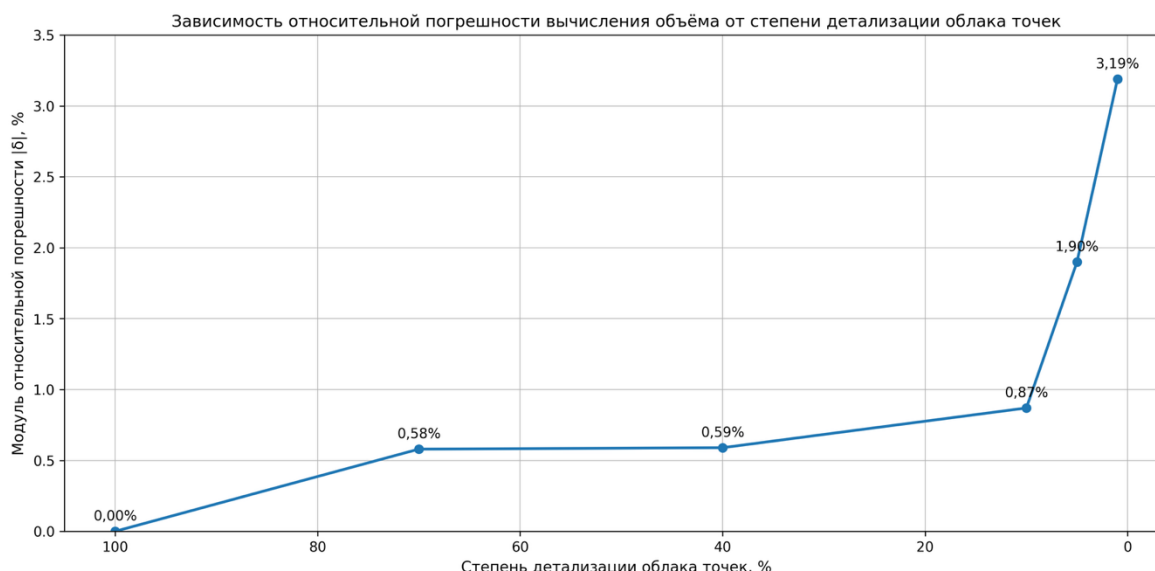


**Рис. 4.** Зависимость относительной погрешности вычисления объёма от степени детализации облака точек

#### 4. Характер изменения объёма

Важной особенностью полученных результатов является однонаправленный характер изменения объёма: во всех случаях разрежения наблюдается систематическое занижение объёма относительно эталонного значения (отрицательный знак отклонения). Это подтверждает теоретические предположения о том, что разрежение облака точек приводит преимущественно к сглаживанию вогнутых элементов рельефа и «затягиванию» полостей, что закономерно уменьшает итоговый объём модели [2, 4].

Максимальное зарегистрированное снижение объёма составило 14,665 м<sup>3</sup> (3,19%) при разрежении до 1% исходных данных. Минимальное снижение (2,649 м<sup>3</sup> или 0,58%) зафиксировано уже при незначительном разрежении до 70%, что свидетельствует о мгновенной потере части микрорельефа даже при малом разреживании.

#### 5. Статистическая значимость результатов

Проверка по критерию Стьюдента (при уровне значимости  $\alpha=0,05$ ) показала, что различия между эталонным объёмом и объёмами, полученными при разрежении до 70% и 40%, являются статистически незначимыми ( $p > 0,05$ ). Начиная с отметки 10% и ниже, различия становятся статистически значимыми ( $p < 0,05$ ), что подтверждает наличие систематического влияния разрежения на точность вычисления объёма.

### *Заключение*

В настоящем исследовании выполнена оценка влияния разрежения облака точек, полученного с помощью мобильного лазерного сканера Geoslam Zeb Horizon, на точность определения объёма каркасной модели подземной горной выработки. В ходе эксперимента исходное облако, содержащее 5 357 167 точек

(эталонный объём модели 460,28 м³), подвергалось последовательному случайному разрежению до уровней 70%, 40%, 10%, 5% и 1% от исходного количества точек. Обработка данных и построение TIN-моделей выполнялись в программном комплексе CloudCompare.

На основе проведённых исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Подтверждение избыточности исходных данных. Экспериментально установлено, что исходное облако точек, полученное в условиях подземной съёмки, обладает высокой степенью избыточности. Сокращение количества точек до 40% (2,14 млн точек) приводит к погрешности вычисления объёма, не превышающей 0,6%, что укладывается в инструментальную погрешность сканера и является статистически незначимым.

2. Выявление пороговых значений. Критическим порогом разрежения, после которого начинается систематическое и статистически значимое занижение объёма, является отметка 10% от исходного массива данных (≈535 тыс. точек). При дальнейшем разрежении погрешность нарастает лавинообразно.

3. Количественная оценка погрешностей. В зоне сильного разрежения (5% и менее) погрешность достигает значений, неприемлемых для маркшейдерского учёта:

а) при 5% выборки (≈268 тыс. точек) относительная погрешность составляет -1,90% (потеря 8,74 м³);

б) при 1% выборки (≈53 тыс. точек) относительная погрешность достигает -3,19% (потеря 14,66 м³), что более чем в 5 раз превышает погрешность на участке стабильности.

4. Характер искажений. Подтверждено, что разрежение облака точек приводит к однонаправленному систематическому занижению объёма (отрицательная погрешность). Это обусловлено сглаживанием микрорельефа, «затягиванием» вогнутых элементов и потерей информации о вертикальных стенках и нависающих участках кровли, что критично для подземных объектов со сложной геометрией.

5. Учёт специфики оборудования. Исследование выполнено на реальных данных, полученных в условиях запылённой подземной среды с помощью SLAM-сканера Geoslam Zeb Horizon. Это позволило учесть характерный для данного типа оборудования уровень шума и особенности геометрии, что повышает достоверность полученных результатов для практического применения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов А. В., Лаптев С. В., Мещеряков Р. В. Применение лазерного сканирования при маркшейдерском обеспечении горных работ // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2018. – № 2. – С. 92–101.

2. Глебов В. Г., Еремеев С. В. Использование облаков точек для анализа устойчивости подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 118–124.

3. Токарев А. А., Беляев А. Н. Оценка точности мобильных LiDAR-систем при инженерно-геодезических съёмках // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 45–55.

4. Выстрчил М. Г., Балтыжакова Т. И., Савина А. В. Алгоритм оценки точности полигональных TIN-поверхностей, получаемых из разреженных облаков точек // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 5–19.
5. Schrum P., Jameson C., Tateosian L., Blank G., Wegmann K., Nelson S. Curvature Weighted Decimation: A Novel, Curvature-Based Approach to Improved Lidar Point Decimation of Terrain Surfaces // Geomatics. – 2023. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 266–289.
6. Dash J. P., Watt P., Moore R. J. Point Density Variations in Airborne Lidar Point Clouds // Sensors. – 2023. – Vol. 23, Iss. 3. – P. 1593.
7. Gonizzi Barsanti S., Marini M. R., Malatesta S. G., Rossi A. Evaluation of Denoising and Voxelization Algorithms on 3D Point Clouds // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, Iss. 14. – P. 2632.
8. GeoSLAM Ltd. ZEB Horizon User Manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geoslam.com/support/> (accessed: 22.02.2026).
9. CloudCompare (3D point cloud and mesh processing software) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.cloudcompare.org> (accessed: 22.02.2026).
10. Urban R., Štroner M., Bláha P. Accuracy Assessment of the GeoSLAM ZEB Horizon Handheld SLAM Scanner in Underground Environments // Journal of Applied Geodesy. – 2024. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 211–223.

© *P. Е. Калиакпаров, 2026*