

UDC 622.882:528.48

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Semykin E.S., Sharov P.E.
**Evaluation of the accuracy of determining the volumes of
overburden and production sands during bulldozer development
of a placer deposit using GNSS surveying
and digital terrain modeling**

Оценка точности определения объёмов вскрыши и добычных песков при
бульдозерной разработке россыпи методами ГНСС-съёмки и цифрового
моделирования рельефа

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Semykin Evgeny Sergeevich

Senior Lecturer of the Department of Hygiene and Public Health,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-
Восточный государственный университет, г. Магадан

Арно Вероника Владимировна

Колесниченко Ева Павловна,

Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»

ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Семькин Евгений Сергеевич,

Старший преподаватель кафедры ГиГД

ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Шаров Павел Егорович,

Студент 3 курса

Политехнический институт

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. The paper presents a comparative accuracy assessment of overburden and pay gravel volume determination at an alluvial gold placer polygon using three mine surveying methods: total station surveying (reference method), RTK GNSS kinematic surveying, and UAV-based aerial photogrammetry with Structure-from-Motion (SfM) processing. The study site is the Darpir Creek alluvial deposit (Yagodninskiy District, Magadan Oblast), worked by bulldozer mining. The study area covers 38.4 ha with a 1,680 m working face. Digital elevation models (DEMs) were produced before and after excavation for each method; volumes were computed by the average cross-section method and by DEM differencing.

DEM accuracy was validated at 48 checkpoints. RTK GNSS yielded volume errors $\leq 1.0\%$ for overburden and $\leq 1.0\%$ for pay gravels at a DEM grid step of 0.5–1.0 m. UAV/SfM photogrammetry at 90 m flight altitude produced pay-gravel volume errors of 3.0–3.5% for seam thickness below 1.5 m, exceeding the $\pm 2\%$ tolerance prescribed by RD 07-603-03. Combined use of RTK GNSS and DEM differencing reduces mine-survey labour costs by a factor of 2.8–3.2 compared with conventional total-station surveys while maintaining regulatory accuracy.

Keywords: GNSS survey, RTK, digital elevation model, bulldozer mining, alluvial deposit, mine surveying, volume accuracy, overburden.

Аннотация. Статья посвящена сравнительной оценке точности определения объёмов вскрыши и добычных песков на россыпном золотоносном полигоне при использовании трёх методов маркшейдерской съёмки: тахеометрии (эталонный метод), кинематической спутниковой съёмки RTK ГНСС и аэрофотосъёмки с БПЛА в режиме структуры из движения (SfM). Объектом исследования послужило россыпное месторождение ручья Дарпир (Ягоднинский район, Магаданская область), разрабатываемое бульдозерным способом. Площадь исследуемого участка составила 38,4 га, длина – 1 680 м. Для каждого метода построены цифровые модели рельефа (ЦМР) до и после выемки горной массы; объёмы определены методом среднего сечения и методом ЦМР-разности. Точность ЦМР верифицирована по 48 контрольным точкам. Показано, что метод RTK ГНСС обеспечивает погрешность объёма вскрыши не более 1,0% и объёма добычных песков не более 1,0% при шаге сетки ЦМР 0,5–1,0 м. Метод БПЛА/SfM при высоте съёмки 90 м даёт погрешность объёма добычных песков 3,0–3,5% при мощности пласта менее 1,5 м, что превышает нормативный допуск $\pm 2\%$ по РД 07-603-03. Применение RTK ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить трудозатраты на маркшейдерский учёт в 2,8–3,2 раза по сравнению с традиционной тахеометрией при сохранении нормативной точности.

Ключевые слова: ГНСС-съёмка, RTK, цифровая модель рельефа, бульдозерная разработка, россыпное месторождение, маркшейдерский учёт, точность определения объёмов, вскрыша.

Введение. Маркшейдерский учёт объёмов горных работ является обязательным условием безопасной и экономически обоснованной добычи на россыпных месторождениях. При бульдозерном способе разработки, преобладающем на россыпных полигонах Магаданской области и Северо-Востока России в целом, точный подсчёт объёмов вскрыши и добычных песков непосредственно определяет достоверность горно-геологической документации, плановые показатели горного отвода и расчёты по договорам подряда. Действующая нормативная база — РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» (пп. 34–38) [4] и Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 550 [2-5] — устанавливает допуск относительной погрешности подсчёта объёмов не более $\pm 2\%$ и требует регулярного маркшейдерского контроля горных работ с периодичностью, соответствующей утверждённому проекту.

Традиционно объёмы на россыпных полигонах определяются методом поперечных профилей с применением электронных тахеометров. Этот метод отличается высокой точностью, однако весьма трудоёмок: съёмка участка площадью 38–40 га требует 3–4 смен работы бригады из двух человек, а обработка профилей в условиях пересечённого бульдозерного микрорельефа сопряжена с субъективными ошибками интерполяции [1, 6]. Развитие кинематической спутниковой геодезии (RTK

ГНСС) и беспилотной аэрофотосъёмки (БПЛА/SfM) открыло принципиально новые возможности для маркшейдерии открытых горных работ: автоматизированное построение плотных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и подсчёт объёмов методом ЦМР-разности [2, 3, 7, 8]. Однако для условий бульдозерной разработки россыпей, характеризующейся интенсивным пересечённым микрорельефом (борозды, гребни, насыпи отвалов высотой более 3 м), точность указанных методов изучена недостаточно [10].

Цель настоящего исследования — выполнить сравнительную оценку точности и трудоёмкости методов RTK ГНСС и БПЛА/SfM при подсчёте объёмов вскрыши и добычных песков на бульдозерном полигоне россыпного месторождения ручья Дарпир и выработать рекомендации по выбору метода маркшейдерской съёмки в соответствии с нормативными требованиями.

Материалы и методы. Объект исследования - россыпное месторождение ручья Дарпир расположено в Ягоднинском районе Магаданской области (59°42' с.ш., 151°18' в.д.) и относится к типичным долинно-террасовым россыпям Северо-Востока России [10]. Долина ручья имеет трапециевидное поперечное сечение шириной 80–120 м; уклон плотика — 0,008–0,012. Мощность торфов (вскрышных пород) составляет 2,8–7,4 м, мощность пласта добычных песков — 0,6–2,2 м. Коэффициент вскрыши — 3,8 м³/м³. Добыча ведётся бульдозерами CAT D9T и Komatsu D375A с промывкой на промприборе ПГШ-50.

Объектом полевых исследований стал отработанный в полевой сезон 2023 г. горный блок длиной 1 680 м и средней шириной 22,8 м; площадь участка — 38,4 га. Съёмка выполнена в два цикла: первый цикл (до/после снятия торфов) — определение объёма вскрыши; второй цикл (до/после добычи песков) — определение объёма добычных песков.

Методы съёмки

Тахеометрическая съёмка (эталонный метод) выполнена прибором Leica TS06 plus (угловая точность 5"). Метод поперечных профилей с шагом 20 м; пикеты фиксировались через 1–3 м в зависимости от сложности микрорельефа. Общее число пикетов за оба цикла — 28 430. Привязка к пунктам ГГС 3-го класса.

Кинематическая спутниковая съёмка RTK ГНСС выполнена приёмником Trimble R10 (двухчастотный, L1/L2/L5; точность в режиме RTK: плановая ±8 мм + 1 ppm, высотная ±15 мм + 1 ppm). Базовая станция установлена на пункте ГГС; расстояние до ровера не превышало 4,2 км. Точки съёмки — по регулярной сетке 5×5 м на профилях

с шагом 20 м. ЦМР строились в Trimble Business Center 5.4 с шагами ячейки 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 м.

Аэрофотосъёмка с БПЛА выполнена комплексом DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse P1 (45 МПикс, фокусное расстояние 35 мм). Высота полёта 90 м, GSD 2,3 см/пиксель, перекрытие 80%/75%, 8 опорных точек. Обработка в Agisoft Metashape Professional 2.0 (SfM + Dense Stereo Matching), шаг ЦМР 0,05 м; для сравнительного анализа строились ЦМР с шагами 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 м.

Методы подсчёта объёмов

Метод среднего сечения применялся для данных тахеометрии и RTK-профилей. Объём горной массы между двумя смежными профилями определяется по формуле (1):

$$V_{i,i+1} = \frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \cdot l_{i,i+1}, \quad 1.$$

где F_i, F_{i+1} — площади поперечных сечений на смежных профилях i и $i+1$, м²; $l_{i,i+1}$ — расстояние между профилями, м. Суммарный объём по блоку: $V = \sum V_{i,i+1}$.

Метод ЦМР-разности применялся для RTK-ЦМР и БПЛА-ЦМР. Объём вычисляется по формуле (2):

$$V = \sum (\Delta Z_k \cdot S_k) \quad 2.$$

где $\Delta Z_k = Z_{\text{факт}(k)} - Z_{\text{проект}(k)}$ — разность отметок ЦМР k -й ячейки, м; S_k — площадь k -й ячейки, м².

Для количественного сравнения методов использована формула относительной погрешности (3):

$$\delta V = |V_m - V_{\text{эт}}| / V_{\text{эт}} \cdot 100\% \quad 3.$$

где $V_{\text{метод}}$ — объём, определённый исследуемым методом; $V_{\text{эталон}}$ — объём по тахеометрии (эталон), тыс. м³.

Контрольные измерения

Для независимой верификации точности ЦМР заложены 48 контрольных точек (шаг ~90 м). Координаты определены статическим GPS (точность ±5 мм), отметки — нивелированием III класса (Leica DNA03, точность ±1,5 мм/км). По контрольным точкам вычислены СКО планового и высотного положения, а также максимальная погрешность по высоте для каждого метода.

Результаты

Точностные характеристики ЦМР - равнение ЦМР трёх методов с 48 контрольными точками показало следующие результаты (таблица 1). Максимальные погрешности по высоте для БПЛА/SfM (до 0,134 м) локализованы в зонах крутых

откосов отвалов (угол откоса $>30^\circ$) вследствие эффекта затенения в плотном облаке точек SfM [7, 9].

Таблица 1

Точностные характеристики методов маркшейдерской съёмки

Параметр	Тахеометрия (эталон)	РТК ГНСС	БПЛА/SfM
СКО плановое, м	0,020	0,018	0,041
СКО высотное, м	0,025	0,032	0,058
Макс. погрешность по высоте, м	0,052	0,071	0,134
Производительность, га/смену	1,2	3,5	28–32
Затраты, руб./га	15 800	7 200	1 450

Сравнение объёмов вскрыши

Суммарный объём вскрышных торфов (38,4 га, 1 680 м × 22,8 м), определённый эталонным методом тахеометрии, составил 892 тыс. м³. Результаты по остальным методам: РТК ГНСС (профили) — 889 тыс. м³ ($\delta V = -0,3\%$); РТК ЦМР-разность — 895 тыс. м³ ($\delta V = +0,3\%$); БПЛА ЦМР-разность — 901 тыс. м³ ($\delta V = +1,0\%$). Все значения не выходят за пределы нормативного допуска $\pm 2\%$ по РД 07-603-03 [4].

Сравнение объёмов добычных песков

Суммарный объём добычных песков (эталон): 134 тыс. м³. Результаты: РТК ГНСС (профили) — 133 тыс. м³ ($\delta V = -0,7\%$); РТК ЦМР-разность — 135 тыс. м³ ($\delta V = +0,7\%$); БПЛА ЦМР-разность — 138 тыс. м³ ($\delta V = +3,0\%$). Результат БПЛА/SfM для добычных песков (+3,0%) превысил нормативный допуск $\pm 2\%$. Для участков с мощностью пласта менее 1,5 м погрешность БПЛА достигает 3,5%.

Таблица 2

Сравнение результатов подсчёта объёмов по блоку № 1 (длина 420 м)

Метод съёмки	V вскрыши, тыс. м ³	Отклонение, %	V песков, тыс. м ³	Отклонение, %
Тахеометрия (эталон)	198,4	—	28,6	—
РТК профили	197,8	-0,3	28,4	-0,7
РТК ЦМР-разность	199,1	+0,4	28,8	+0,7
БПЛА ЦМР-разность	200,6	+1,1	29,5	+3,1

Зависимость погрешности от шага сетки ЦМР

Исследование влияния шага сетки ЦМР на относительную погрешность объёма показало закономерное нарастание ошибки при укрупнении шага (рисунок 1). При шаге сетки $\leq 1,0$ м оба метода удовлетворяют нормативному допуску $\pm 2\%$ для объёмов

вскрыши. Для объёмов добычных песков при шаге $\geq 2,0$ м оба метода выходят за пределы допуска; при шаге 1,0 м БПЛА-SfM не соответствует требованиям для пластов мощностью $< 1,5$ м.

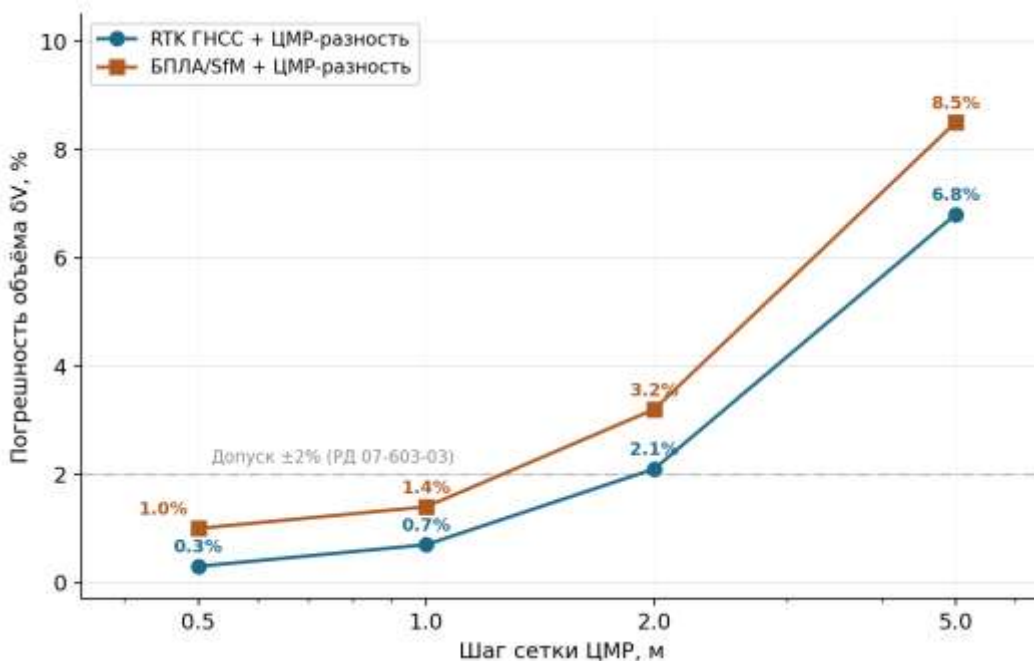


Рисунок 1 — Зависимость погрешности объёма от шага сетки ЦМР

Сравнительная диаграмма объёмов

Диаграмма объёмов вскрыши и добычных песков по четырём методам приведена на рисунке 2. Горизонтальными линиями обозначены границы допуска $\pm 2\%$ от эталонного значения. Видно, что метод БПЛА/SfM незначительно выходит за допуск по объёму добычных песков.

Обсуждение

Точность методов для объёмов вскрыши

Для крупных объектов (объём вскрыши > 100 тыс. м³) все три метода продемонстрировали относительную погрешность менее 2%, что соответствует нормативному допуску РД 07-603-03 [4] и согласуется с результатами аналогичных исследований на карьерах [8]. При экономическом сравнении метод RTK ГНСС в 2,2 раза дешевле тахеометрии, а БПЛА/SfM — в 10,9 раза дешевле при практически одинаковой точности для вскрыши.

Точность методов для добычных песков

Добычные пески представляют особый случай: мощность пласта 0,6–2,2 м значительно меньше мощности вскрыши, а после отработки вскрыши поверхность плотика сохраняет бульдозерные борозды с амплитудой до 0,15–0,20 м. В таких

условиях высотная ошибка ЦМР составляет значимую долю от мощности объекта. Для БПЛА/SfM при высоте полёта 90 м СКО высотного положения 0,058 м при мощности пласта 0,6–1,5 м порождает погрешность объёма 3,0–3,5%, превышающую допуск [4, 5].

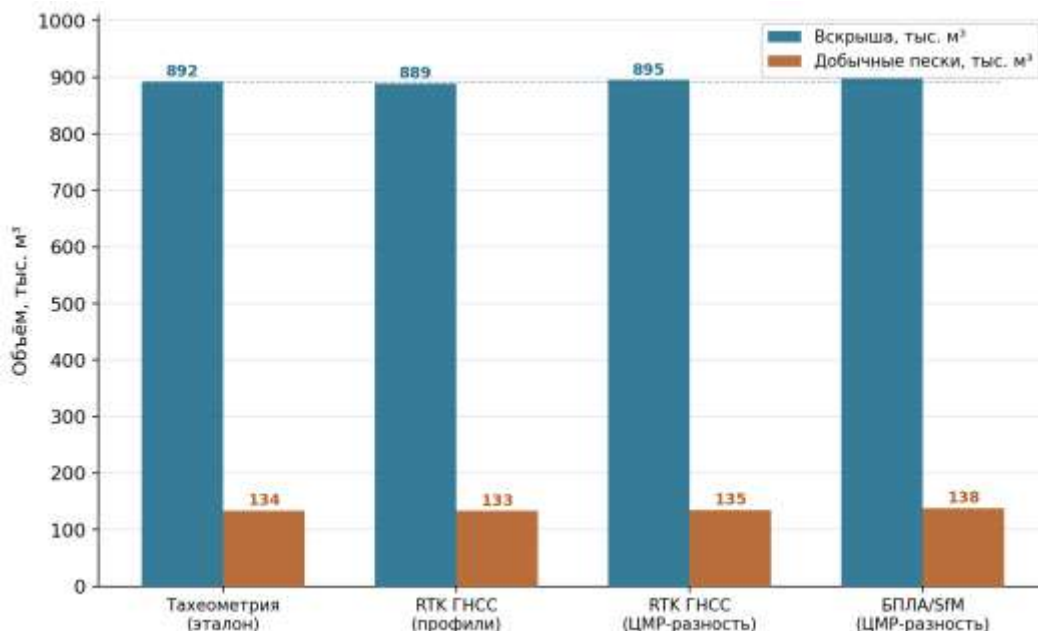


Рисунок 2 — Сравнение объёмов вскрыши и добычных песков по методам

RTK ГНСС при шаге сетки $\leq 1,0$ м обеспечивает погрешность $\leq 1,0\%$ для добычных песков при всех значениях мощности пласта в исследованном диапазоне, что согласуется с рекомендациями Трегуба и Стукалова [2].

Ограничения метода БПЛА при бульдозерных работах

Специфика бульдозерного микрорельефа — борозды глубиной 0,10–0,20 м, поперечные валы высотой до 0,50 м, откосы отвалов крутизной 28–34° — существенно снижает точность SfM-реконструкции. При вертикальной съёмке боковые поверхности откосов видны лишь с одного-двух маршрутов, образуя «тени» в плотном облаке точек [7]. Применение наклонных маршрутов (15–20° от надира) или увеличение бокового перекрытия до 85% может снизить высотную погрешность до 0,030–0,040 м на крутых откосах.

Рекомендации по выбору метода

На основании полученных результатов предлагается следующая схема применения методов маркшейдерской съёмки:

1. РТК ГНСС — основной метод официального маркшейдерского учёта объёмов как вскрыши, так и добычных песков; шаг сетки ЦМР 0,5–1,0 м; рекомендуется для обоих циклов съёмки.

2. БПЛА/SfM — вспомогательный метод для оперативного мониторинга и инвентаризации; допустим для учёта вскрыши, но не рекомендован для учёта добычных песков при мощности пласта <1,5 м.

3. Тахеометрия — применяется при разногласиях между методами, в труднодоступных зонах и при необходимости повышенной точности.

Экономический эффект

Применение РТК ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить общее время маркшейдерского цикла с 16–18 чел.-часов (тахеометрия) до 5,5–6,5 чел.-часов (РТК). Коэффициент снижения трудозатрат — 2,8–3,2. При стандартной частоте замеров 2 раза в месяц за полевой сезон (5 месяцев) экономия составляет 96 000–112 000 руб. на один участок (в ценах 2023 г.).

Заключение

1. СКО высотного положения ЦМР составила: тахеометрия — 0,025 м, РТК ГНСС — 0,032 м, БПЛА/SfM — 0,058 м. Все три метода соответствуют нормативам топографической съёмки масштаба 1:2000 для открытых площадей, что подтверждает их принципиальную пригодность для маркшейдерских работ.

2. Точность объёмов вскрыши (>100 тыс. м³) для всех методов не превышает допуска $\pm 2\%$ по РД 07-603-03: РТК ГНСС — $\leq 1,0\%$, БПЛА/SfM — $\leq 1,5\%$. Оба метода могут применяться для официального маркшейдерского учёта вскрышных работ на бульдозерных полигонах.

3. Точность объёмов добычных песков при мощности пласта <1,5 м: БПЛА/SfM (высота полёта 90 м) — погрешность 3,0–3,5%, превышает допуск $\pm 2\%$; РТК ГНСС при шаге сетки $\leq 1,0$ м — погрешность $\leq 1,0\%$, соответствует нормативным требованиям. РТК ГНСС является единственным из рассмотренных современных методов, обеспечивающим нормативную точность для учёта добычных песков при малых мощностях пласта.

4. Оптимальный шаг сетки ЦМР: для РТК ГНСС — 0,5–1,0 м; для БПЛА/SfM при высоте полёта 90 м — 0,2–0,3 м (что требует снижения высоты полёта до 40–50 м для достижения GSD 1,0–1,2 см/пиксель).

5. Применение РТК ГНСС совместно с методом ЦМР-разности позволяет сократить трудозатраты на маркшейдерский учёт объёмов в 2,8–3,2 раза по сравнению с тахеометрическим методом поперечных профилей при полном соблюдении нормативной точности по РД 07-603-03 и Приказу Ростехнадзора № 550 (2020).

References

1. Выстрчил М. Г. Методика оптимизации вскрышных работ с использованием системы автоматизированного позиционирования бульдозера / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, В. В. Пименов, С. Ю. Новоженин, А. А. Боголюбова // Вестник СГУГиТ. — 2023. — Т. 28, № 4. — С. 12–21. — DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-4-12-21.
2. Hugenholtz C. H. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model / C. H. Hugenholtz, K. Whitehead, O. W. Brown, T. E. Barchyn // *Geomorphology*. — 2013. — Vol. 194. — P. 16–24. — DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.03.023.
3. Siebert S. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system / S. Siebert, J. Teizer // *Automation in Construction*. — 2014. — Vol. 41. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004.
4. Uysal M. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill / M. Uysal, A. S. Toprak, N. Polat // *Measurement*. — 2015. — Vol. 73. — P. 539–543. — DOI: 10.1016/j.measurement.2015.06.010.
5. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ [Электронный ресурс] / Госгортехнадзор России. — М., 2003. — URL: <http://enis.gosnadzor.ru/activity/control/geology/РД%2007-603-03.pdf> (дата обращения: 12.04.2026).
6. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом [Электронный ресурс] : утв. приказом Ростехнадзора от 06.06.2003 № 74 (с изм. на 24.01.2018). — URL: <https://docs.cntd.ru/document/901865300> (дата обращения: 11.04.2026).
7. Hugenholtz C. H., Whitehead K., Brown O. W. et al. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model // *Geomorphology*. — 2013. — Vol. 194. — P. 16–24. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.03.023
8. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // *Automation in Construction*. — 2014. — Vol. 41. — P. 1–14. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.01.004
9. Uysal M., Toprak A. S., Polat N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill // *Measurement*. — 2015. — Vol. 73. — P. 539–543. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.06.010