

UDC 622.882:528.48

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Mine Surveying Support for Land Reclamation at the Alluvial Gold Deposit of the Bilir Stream: Survey Methodology and Volume Estimation for Grading Works

Маркшейдерское обеспечение рекультивации нарушенных земель на россыпном золотодобывающем месторождении руч. Билир: методика съёмки и подсчёта объёмов планировочных работ

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

Garifulina Irina Yurievna,

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

Remizov Nikita Andreevich,

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет»

Abstract. *The article deals with methodological aspects of mine surveying support for the engineering stage of land reclamation at the alluvial gold deposit of the Bilir stream (Verkhnye-Indigirsky district, Republic of Sakha (Yakutia)). The site features a large disturbed land area (~85 ha), complex terrain, permafrost, and specific technogenic landforms: gravel and slime dredge tailings and bulldozer excavations. Three mine surveying methods are examined: electronic total station, RTK GNSS, and UAV-based aerial photography with SfM processing. Accuracy, labour intensity and applicability are assessed for each method. Volume estimation was performed using the cross-section method and DEM differencing. UAV/SfM with DEM differencing provides the best accuracy-to-productivity ratio for areas exceeding 10 ha. Total grading volume amounted to 1,248,000 m³. Findings are applicable to reclamation design for analogous alluvial deposits in the permafrost zone.*

Keywords: mine surveying, land reclamation, alluvial deposit, UAV, SfM photogrammetry, RTK GNSS, digital elevation model, cross-section method, permafrost, gold mining.

Аннотация. Статья посвящена методическим аспектам маркшейдерского сопровождения горнотехнического этапа рекультивации нарушенных земель на россыпном золотодобывающем месторождении ручья Билир (Верхне-Индигирский район, Республика Саха (Якутия)). Объект характеризуется значительной площадью нарушенных земель (~85 га), сложным рельефом, наличием многолетнемёрзлых пород и специфическими типами техногенного рельефа: галечными и эфельными отвалами дражных полигонов, а также бульдозерными выемками. В работе рассмотрены три метода маркшейдерской съёмки: электронная тахеометрия, спутниковое позиционирование в режиме RTK ГНСС и аэрофотосъёмка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с обработкой по технологии SfM. Для каждого метода дана оценка точности, трудоёмкости и области применения. Подсчёт объёмов планировочных работ выполнен методом поперечных профилей и методом ЦМР-разности. Установлено, что применение БПЛА в сочетании с методом ЦМР-разности обеспечивает наилучшее соотношение точности и производительности при площади свыше 10 га. Суммарный объём планировочных работ составил 1 248 тыс. м³. Результаты применимы при проектировании рекультивации аналогичных россыпных месторождений в криолитозоне.

Ключевые слова: маркшейдерская съёмка, рекультивация нарушенных земель, россыпное месторождение, БПЛА, SfM-фотограмметрия, RTK ГНСС, цифровая модель рельефа, метод поперечных профилей, вечная мерзлота.

Введение. Разработка россыпных месторождений золота относится к числу наиболее экологически травматичных видов горнодобывающей деятельности. По различным оценкам, в России ежегодно в результате открытой разработки россыпей нарушается свыше 20 тыс. га земель, из которых восстанавливается не более 30–40% [1]. Открытые способы добычи — дражный и бульдозерный — неизбежно сопряжены с полным нарушением почвенно-растительного покрова, деформацией русел водотоков, формированием масштабных техногенных ландшафтов в виде галечных гряд, эфельных отвалов и выемок [1, 2]. Для регионов криолитозоны, в частности Республики Саха (Якутия), нарушение деятельного слоя вечномёрзлых пород дополнительно инициирует термоэрозийные процессы и существенно затрудняет естественное самовосстановление экосистем [3]. Таким образом, проведение горнотехнического этапа рекультивации является безальтернативным условием экологического восстановления нарушенных территорий.

Нормативными документами — Федеральным законом «Об охране окружающей среды» (№ 7-ФЗ от 10.01.2002), Постановлением Правительства РФ от 10.07.2018 № 800 «О проведении рекультивации и консервации земель», а также РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» — предусмотрено обязательное маркшейдерское сопровождение горнотехнического этапа рекультивации [4]. Согласно п. 53 РД 07-603-03, маркшейдерские работы при рекультивации включают: подготовку графической документации для проектирования, маркшейдерское обеспечение

непосредственно горнотехнических работ и исполнительную съёмку рекультивированных территорий.

В последнее десятилетие широкое распространение в маркшейдерской практике получила аэрофотосъёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с алгоритмами Structure from Motion (SfM). Данная технология позволяет в короткие сроки создавать высокоточные цифровые модели рельефа (ЦМР) обширных территорий и проводить автоматизированный подсчёт объёмов планировочных операций при рекультивации [5–7]. Вместе с тем практика маркшейдерского обеспечения рекультивации на россыпных месторождениях Якутии остаётся недостаточно освещённой в специальной литературе в части сравнительной оценки точности альтернативных методов съёмки и специфики подсчёта объёмов планировки на объектах с дифференцированным техногенным рельефом.

Цель настоящей работы — разработка и обоснование методики маркшейдерской съёмки и подсчёта объёмов планировочных работ при рекультивации нарушенных земель месторождения ручья Билир с оценкой точности и производительности применяемых методов.

Материалы и методы

Описание объекта исследования

Месторождение россыпного золота ручья Билир расположено в Верхне-Индигирском районе Республики Саха (Якутия), в 47 км к юго-востоку от п. Усть-Нера (63°52' с.ш., 143°18' в.д.). В геоморфологическом отношении район относится к среднегорью Верхоянской горной системы (отметки водоразделов 1 050–1 380 м, долин — 640–780 м). Долина ручья Билир имеет ящикообразное сечение шириной 180–320 м. Мощность многолетнемёрзлых пород составляет 100–250 м, среднегодовая температура грунта на глубине 10 м — минус 4,5...минус 6,2 °С. Деятельный слой оттаивает на глубину 0,6–1,4 м в зависимости от типа грунта и экспозиции склона [3].

Россыпь разрабатывалась в 1978–2009 гг. До 1991 г. применялся дражный способ (протяжённость хода 4,2 км, ширина промывки 55–80 м); в дальнейший период — бульдозерный на фланговых и техногенных участках. По результатам маркшейдерской инвентаризации 2023 г. общая площадь нарушенных земель составила 85,3 га (таблица 1).

Таблица 1

Распределение нарушенных земель по типам

Тип нарушения	Площадь, га	Мощность тела, м
Галечные отвалы дражных полигонов	42,7	1,5–8,4
Эфельные отвалы	18,6	0,4–2,1
Дражные пруды и обводнённые выемки	9,4	—
Бульдозерные выемки и берма	14,6	—
Итого	85,3	—

Методы маркшейдерской съёмки

Съёмка выполнялась в три этапа (2023–2024 гг.) тремя методами.

Тахеометрическая съёмка производилась прибором Leica TS06 plus (угловая точность 5"). Съёмочное обоснование создавалось методом разомкнутого теодолитного хода от пунктов ГГС. СКО определения координат съёмочного обоснования: плановое $\pm 0,04$ м, высотное $\pm 0,05$ м. Производительность — до 1,5 га/смену.

Спутниковая съёмка в режиме RTK ГНСС выполнялась комплектом Trimble R10 (базовый + ровер). Точность фиксированного решения: в плане $\pm 0,02$ м, по высоте $\pm 0,03$ м. Производительность — до 4 га/смену.

Аэрофотосъёмка с БПЛА производилась мультикоптером DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse P1 (45 Мп, объектив 35 мм). Высота полёта 80–120 м, продольное перекрытие 80%, поперечное 75%, GSD 1,7–2,5 см/пиксель. Координаты опорных точек (ОТ) определялись методом RTK ГНСС (5–12 ОТ на участок, периметральное размещение). Обработка в Agisoft Metashape 2.0 (технология SfM + Dense Stereo Matching), шаг сетки ЦМР 10 см. Производительность — до 40 га за один вылет (~60 мин).

Методы подсчёта объёмов

Метод поперечных профилей применялся на участках с вытянутой формой в плане. Профили разбивались с шагом 25–50 м. Объём между смежными профилями вычислялся методом среднего сечения ф-ла. 1:

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

1.

где $F(i)$ — площадь поперечного сечения (разность проектной и фактической поверхностей), $l(i,i+1)$ — расстояние между профилями. Погрешность при шаге 25 м — 5–8%.

Метод ЦМР-разности основан на вычитании ЦМР исходного рельефа и проектного рельефа: $\Delta Z = Z(\text{факт}) - Z(\text{проект})$. Объём срезки и засыпки вычислялись суммированием значений ΔZ по ячейкам сетки (шаг 0,10 м). Погрешность метода при данном шаге сетки — 2–4%. Расчёт выполнялся в QGIS 3.28 (растровый калькулятор) и Agisoft Metashape 2.0.

Результаты

Сравнение точности методов съёмки

Точностные характеристики оценивались по 36 контрольным точкам (12 — галечные отвалы, 8 — эфельные отвалы, 10 — бульдозерные выемки, 6 — заболоченная пойма), измеренным нивелиром Leica DNA03 и GPS-приёмником в режиме статики.

Таблица 2

Сравнение точностных и производственных характеристик методов маркшейдерской съёмки

Параметр	Тахеометрия	RTK ГНСС	БПЛА / SfM
СКО плановое, м	0,025	0,022	0,048
СКО высотное, м	0,030	0,035	0,065
Макс. погрешность по высоте, м	0,065	0,078	0,142
Производительность, га/смена	1,5	4,0	35–40
Штат, чел.	2–3	1–2	1–2
Затраты, руб./га	12 500	6 800	1 200

Примечание: производительность БПЛА — при высоте 100 м, GSD 2,5 см/пиксель, 5–7 ОТ на участок.

Все три метода при соблюдении требований к плановому обоснованию обеспечивают точность, достаточную для маркшейдерского учёта (СКО по высоте $\leq 0,10$ м для масштаба 1:2000 с сечением рельефа 1,0 м) [4].

Точность ЦМР по данным БПЛА при различных высотах

Экспериментальные полёты на высотах 80, 100, 120 и 150 м показали линейный рост СКО по высоте: 0,045; 0,065; 0,088 и 0,115 м соответственно (рисунок 1). При этом площадь покрытия за один маршрут при 150 м в 3,5 раза превышает таковую при 80 м. Оптимальной для условий данного объекта признана высота 100 м (GSD 2,5 см/пиксель, СКО $\approx 0,065$ м).

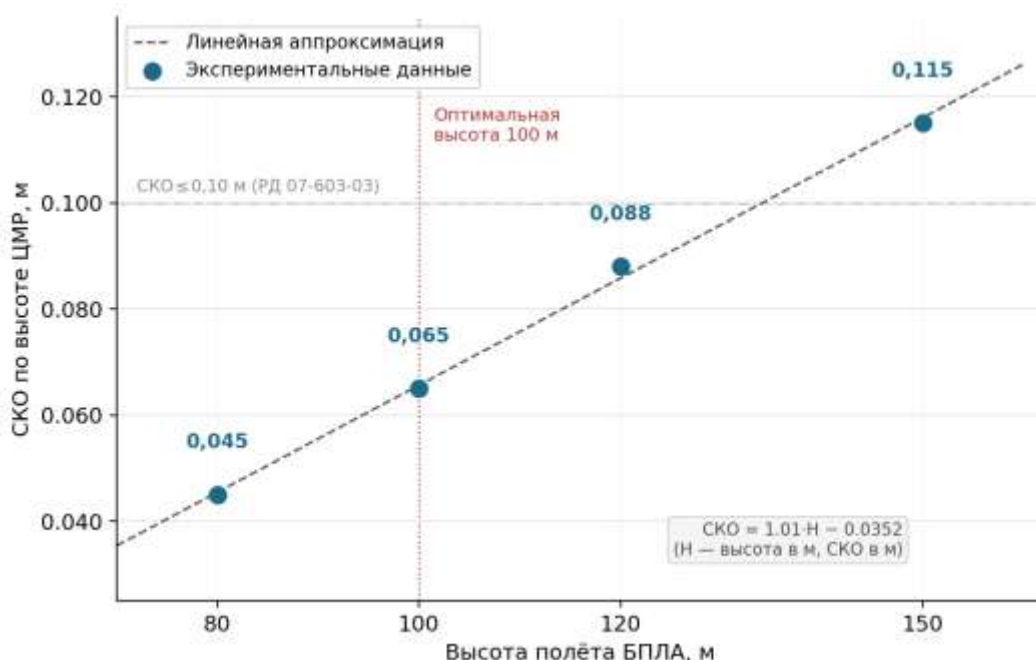


Рисунок 1 — Зависимость СКО по высоте ЦМР от высоты полёта БПЛА

Подсчёт объёмов планировочных работ

Для дражного полигона № 3 (14,8 га, длина 1 240 м) разбито 49 поперечных профилей с шагом 25 м. Фрагмент ведомости приведён в таблице 3.

Таблица 3

Фрагмент ведомости подсчёта объёмов (полигон № 3, ПК0 — ПК+100)

№ профиля	Расстояние, м	F срезки, м ²	F насыпи, м ²	V срезки, м ³	V насыпи, м ³
ПК0	—	38,4	12,6	—	—
ПК+25	25	41,2	10,8	997	293
ПК+50	25	55,7	8,3	1 211	239
ПК+75	25	63,1	6,9	1 485	190
ПК+100	25	58,4	9,4	1 519	204
Итого ПК0–ПК+100				5 212	926

Примечание: объём насыпи включает коэффициент откоса K = 1,15.

По всему объекту (85,3 га, 4 выдела) суммарный объём планировочных работ: срезка — 876 тыс. м³, засыпка — 372 тыс. м³, итого — 1 248 тыс. м³. По методу ЦМР-разности: срезка — 871 тыс. м³, засыпка — 376 тыс. м³, итого — 1 247 тыс. м³. Расхождение между методами составило 0,08%, что подтверждает корректность расчётов. Наибольшая доля планировочных работ приходится на галечные отвалы дражных полигонов (67% общего объёма) [8].

Обсуждение

Сравнение методов по критериям точности, трудоёмкости и стоимости

Полученные результаты подтверждают тенденцию, отмечаемую в отечественной и зарубежной литературе: метод БПЛА/SfM существенно превосходит традиционные методы наземной геодезии по производительности и экономической эффективности при сопоставимой точности [5–7, 9]. При площади менее 2 га тахеометрия остаётся предпочтительной ввиду высокой точности и независимости от погодных условий. В диапазоне 2–10 га экономически целесообразен RTK ГНСС. Свыше 10 га оптимально применение БПЛА: стоимость снижается в 5–10 раз, производительность возрастает на порядок [10].

Установлено, что оптимальная плотность ОТ для БПЛА-съёмки составляет 0,6–0,8 точки/га при периметральном размещении с дополнительными точками в центральной части. Дальнейшее увеличение сверх 8 ОТ на 10 га не даёт значимого повышения точности.

Метод ЦМР-разности обеспечивает точность 2–4% против 5–12% при методе профилей (шаг 25 м) и является предпочтительным при наличии БПЛА-данных. Применение материалов БПЛА-съёмки для официальных маркшейдерских планов масштаба 1:2000 не противоречит требованиям РД 07-603-03 [4].

Особенности применения методов в условиях вечной мерзлоты

Условия многолетней мерзлоты накладывают принципиальные ограничения на все методы. Для тахеометрии и RTK ГНСС основная проблема — нестабильность грунта в основании штативов: смещения временных ориентиров до 1–3 см за рабочую смену в тёплый период. Для БПЛА-съёмки ключевым ограничением является короткий безморозный период (середина июня — середина сентября), что требует обязательного резервирования полётных окон.

При повторных съёмках зафиксированы расхождения ЦМР до 0,12–0,18 м в пределах вегетационного сезона за счёт неравномерного оттаивания деятельного слоя. Плановая и контрольная съёмки для подсчёта объёмов должны выполняться в сопоставимые фазы сезона. Сезонное пучение эфельных и галечных отвалов (0,05–0,08 м за зимний период) рекомендуется учитывать поправочным коэффициентом 1,05–1,08.

Рекомендации по выбору метода

На основании проведённого исследования предлагается следующая схема маркшейдерского обеспечения рекультивации:

1. Исходная инвентаризационная съёмка (>20 га) — БПЛА/SfM, шаг ЦМР 0,1–0,2 м, ≥ 8 ОТ, конец июня — июль.

2. Детальная съёмка сложных элементов (откосы, дренажные канавы, плотины) — тахеометрия или RTK ГНСС.

3. Оперативный контроль объёмов (ежемесячно, 2–15 га) — RTK ГНСС, шаг профилей 25 м; при наличии ОТ допустимо БПЛА.

4. Итоговая исполнительная съёмка — БПЛА/SfM с контролем по 10–15 независимым точкам.

Заключение

1. Маркшейдерская съёмка тремя методами показала, что все три при соблюдении требований к плановому обоснованию обеспечивают точность, достаточную для задач рекультивационного проектирования: СКО по высоте 0,030; 0,035 и 0,065 м соответственно.

2. Метод БПЛА/SfM наиболее экономически эффективен при площади свыше 10 га: стоимость ~1 200 руб./га, производительность в 20–25 раз выше тахеометрии. Применение в условиях криолитозоны требует привязки съёмки к одинаковым фазам сезонного оттаивания.

3. Общая площадь нарушенных земель — 85,3 га, суммарный объём планировочных работ — 1 248 тыс. м³ (876 тыс. м³ срезки и 372 тыс. м³ засыпки). Расхождение между результатами методов поперечных профилей и ЦМР-разности составило 0,08%.

4. В условиях многолетней мерзлоты при планировании насыпных работ рекомендуется применять поправочный коэффициент на сезонное пучение 1,05–1,08.

5. Предложенная методика применима при проектировании рекультивации аналогичных россыпных месторождений в Арктической и Субарктической зонах России.

References

1. Михайлов А. Г., Зайцева Н. В. Экологические последствия освоения россыпных месторождений золота в бассейне Индигирки // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 72–78. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.13

2. Голубев В. Н., Сметанников А. Ф. Рекультивация нарушенных земель на предприятиях россыпной золотодобычи: состояние и перспективы // Цветные металлы. — 2020. — № 3. — С. 23–30. DOI: 10.17580/tsm.2020.03.03

3. Федоров А. Н., Боескоров В. С. Реакция мерзлотных экосистем на техногенное воздействие в Якутии // Криосфера Земли. — 2021. — Т. XXV. — № 4. — С. 45–56. DOI: 10.15372/KZ20210405

4. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Госгортехнадзор России. — Москва, 2003. — 160 с.

5. Колесатова О. А., Матвеев А. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для маркшейдерской съёмки объектов открытых горных работ // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 14–22. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-14-22

6. Трегуб А. И., Стукалов Д. А. Точностные характеристики RTK ГНСС при геодезическом обеспечении горных работ // Маркшейдерский вестник. — 2021. — № 2. — С. 35–42.

7. Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms // Geomorphology. — 2016. — Vol. 260. — P. 4–15. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011

8. ГОСТ 17.5.3.04-83. Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 8 с.

9. Carbonneau P. E., Dietrich J. T. Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS // Earth Surface Processes and Landforms. — 2017. — Vol. 42. — № 3. — P. 473–486. DOI: 10.1002/esp.4012

10. Guo Q., Su Y., Hu T. LiDAR and its applications in mining operations // International Journal of Mining Science and Technology. — 2018. — Vol. 28. — № 3. — P. 537–544. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.03.001