

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 525.88

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Dolbin I.D. Remote Sensing Methods in Mine Surveying for Open-Pit Mining Operations: Application of GNSS, LiDAR, and UAVs for Monitoring Pit Slope Deformations

Дистанционные методы зондирования Земли в маркшейдерском обеспечении открытых горных работ: применение GNSS, LiDAR и БПЛА для мониторинга деформаций бортов карьеров

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

Garifullina Irina Yurievna,

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

Dolbin Ivan Dmitrievich,

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

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

Долбин Иван Дмитриевич,
Студент 3 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. This article addresses the integration of modern remote sensing methods (RS) – GNSS, LiDAR, and unmanned aerial vehicles (UAVs) – into mine surveying operations for open-pit mining. Using the Natalkinskoe gold deposit (Magadan, Russia) and coal mines in Kuzbass as case studies, we demonstrate the effectiveness of RS methods for real-time monitoring of excavation volumes, bench and pit slope deformations, particularly under permafrost conditions. Analysis of error theory, physical modeling, and practical applications shows that RS reduces labor costs by 67%, collapse risks by 40–

45%, and achieves payback within 3–6 months. We present formulas for volume calculation using digital elevation models (DEM), criteria for selecting positioning correction methods (RTK/PPK), and methodology for geomechanical monitoring using point cloud processing software.

Keywords: remote sensing, GNSS, LiDAR, UAV, mine surveying, deformation monitoring, permafrost, open-pit mining, digital elevation model, pit slope stability.

Аннотация. Статья посвящена интеграции современных дистанционных методов зондирования Земли (ДЗЗ) – GNSS, LiDAR и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – в маркшейдерское обеспечение открытых горных работ. На примере Наталкинского ГОКа (Магадан) и месторождений Кузбасса продемонстрирована эффективность методов для оперативного мониторинга объемов выемки, деформаций уступов и бортов, особенно в условиях многолетней мерзлоты. Анализ теории погрешностей, физического моделирования и практических кейсов показывает, что ДЗЗ снижает трудозатраты на 67%, риски обрушений на 40–45% и окупается за 3–6 месяцев. Представлены формулы расчета объемов по цифровым моделям рельефа (ЦМР), критерии выбора методов коррекции позиционирования (RTK/PPK), и методика геомеханического мониторинга с использованием программ обработки облаков точек.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, GNSS, LiDAR, БПЛА, маркшейдерское обеспечение, мониторинг деформаций, мерзлота, открытые горные работы, цифровая модель рельефа, устойчивость бортов карьеров.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение. Актуальность проблемы - маркшейдерское обеспечение открытых горных работ традиционно опирается на контактные методы измерений (тахеометрия, нивелирование), обеспечивающие точность 20–50 мм. Однако современные карьеры характеризуются критическими условиями: глубина достигает 300–500 м, скорость деформаций бортов 10–40 мм/мес., особенно в зонах многолетней мерзлоты (Колыма, Якутия). Традиционные методы показывают низкую эффективность: трудозатраты на контрольные измерения составляют 40–80 дней/цикл, риск несчастных случаев при работе в каньонах бортов остается высоким. Дистанционные методы зондирования Земли (ДЗЗ) — GNSS в режиме реального времени (RTK), лазерное сканирование (LiDAR) и фотограмметрия с БПЛА — предлагают альтернативу с плотностью облака точек 10–100 тыс./м² и точностью 1–20 мм при снижении трудозатрат на 67%.

Состояние проблемы - в российской маркшейдерской практике ДЗЗ интегрируются фрагментарно. Нормативные документы (РД 07-604-03 «Инструкция по маркшейдерскому учету») не предусматривают стандартизированное применение GNSS и LiDAR для объемных контрольных работ. Зарубежный опыт (шведские рудники Кируна и Мальмбергет, канадские карьеры) демонстрирует успешное применение InSAR и БПЛА для долгосрочного мониторинга, однако адаптация к условиям мерзлоты Магаданской области требует собственных исследований. Теория погрешностей GNSS в условиях каньонов, методология обработки больших облаков точек (10–50 ГБ на цикл) и критерии выбора методов коррекции позиционирования (RTK vs PPK) недостаточно освещены в отечественной литературе [1–3].

Цель: оценить применимость и эффективность интегрированной системы ДЗЗ (GNSS + LiDAR + БПЛА) для маркшейдерского обеспечения глубоких карьеров в условиях мерзлоты на основе анализа точности, затрат, кейсов деформаций и физического моделирования механизмов разрушения [2-5].

Материалы и методы.

Исследование охватывает три основных объекта: - Наталкинское месторождение (Магадан, 62.5°N, 159.5°E): золоторудный карьер, глубина 320 м, площадь 6 км², климат субарктический (средняя T = -8°C, мерзлота мощность 300+ м). - Карьеры Кузбасса (Берязово, Красногорское ЗАО): угольные разрезы, глубина 50–150 м, климат умеренный. - Месторождение Ковдор (Карелия): магнетит-апатитовая руда, глубина 400+ м.

Данные собраны за период 2023–2025 гг. с использованием аппаратуры: - GNSS: EFT RS3 (двухчастотный приемник, точность 10–20 мм горизонталь, 15–30 мм вертикаль в RTK-режиме). - LiDAR: FARO Focus 3D (976 тыс. импульсов/сек, точность 2–5 мм, дальность до 120 м), Leica BLK360 (линзовый сканер, до 100 тыс. точек/сек). - БПЛА: Geoscan Pioneer (RGB + тепловизор, разрешение 1.5 см/пиксель на высоте 100 м). - Программное обеспечение обработки: CloudCompare (фильтрация шума, выравнивание облаков), Metashape (фотограмметрия), LiDAR360, АСНИ “Облако 3D” (мониторинг деформаций), Topcon Tools (обработка GNSS) [3-6].

Теория погрешностей

GNSS-позиционирование: источники ошибок

Полная погрешность GNSS в режиме RTK складывается из компонент ф-ла 1:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{sat}^2 + \sigma_{mult}^2 + \sigma_{iono}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{clk}^2 \quad 1$$

где: - σ_{sat} — ошибка спутника (2–3 мм); - σ_{mult} — многопутность (1–20 см при наличии отражений); - σ_{iono} — ионосферная задержка (1–5 см); - σ_{trop} — тропосферная задержка (0.5–2 см); - σ_{clk} — ошибка определения времени (<0.5 мм).

Эффективная погрешность позиционирования в горах ф-ла 2:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_{sat}^2 + \sigma_{mult}^2}{n}} \cdot \sqrt{PDOP} \quad 2$$

где n — количество спутников (оптимально >8), PDOP — коэффициент разбавления точности позиции. При PDOP = 1.5–2.0 (хорошая геометрия спутников) $\sigma \approx 5$ –10 мм, при PDOP > 3 (плохая геометрия) σ может достигать 50–100 мм.

LiDAR-сканирование: ошибки дальности и регистрации

Ошибка дальности LiDAR ф-ла 3:

$$\delta r = \sqrt{\delta r_{instr}^2 + \delta r_{atm}^2 + \delta r_{target}^2}$$

3

где: - δr_{instr} — инструментальная ошибка (1–3 мм); - δr_{atm} — атмосферная помеха (0.5–2 мм); - δr_{target} — отражательная способность цели (1–5 мм для светлых пород).

Для облака точек плотностью ρ (точки/м²) и сетки высот ЦМР с шагом $\Delta x = 1$ м полная ошибка ЦМР ф-ла 4:

$$\delta Z = \sqrt{\frac{\delta r^2}{\rho} + \frac{(\partial Z / \partial x)^2 \cdot \delta x^2}{12}}$$

4

При стандартных условиях $\delta Z = 2-5$ мм для $\rho = 50000$ точек/м².

Фотограмметрия БПЛА: влияние факторов на точность

Среднеквадратичная погрешность (RMSE) трехмерной модели зависит от ф-ла 5:

$$RMSE = f(GSD, overlap, control_points, height, \sigma_{RTK}) \quad 5$$

Эмпирическая связь (по данным канадских исследований):

$$RMSE_{vertical} \approx 0.5 \times GSD + 0.01 \times H$$

где GSD — размер пиксела на земле (см), H — высота полета (м).

При GSD = 1.5 см (полет на 100 м) и $H = 100$ м: $RMSE \approx 2$ см вертикали.

Методы расчета объемов по ЦМР

Дискретный метод (сетка ячеек)

Объем выемки между двумя ЦМР ($Z_1^{базовая}$ и $Z_2^{текущая}$):

$$\Delta V = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot (Z_{2,ij} - Z_{1,ij})$$

6

где $M \times N$ — размер сетки, $A_{ij} = \Delta x \times \Delta y$ (площадь ячейки, м²).

Для крупной сетки $A_{ij} = 1 \times 1$ м² (стандарт для карьеров 50+ га) на территории 6 км²:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{6000} \sum_{j=1}^{6000} 1 \times (Z_2 - Z_1)$$

Ошибка расчета объема

Полная ошибка объема складывается из ошибок высот и систематических смещений ЦМР:

$$\delta V = \sqrt{\sum_{ij} A_{ij}^2 (\delta Z_{ij})^2 + k_{bias} \cdot |Z_{bias}| \cdot S_{total}}$$

7

где $k_{bias} = 1.5\%$ (коэффициент смещения, эмпирический), S_{total} — общая площадь.

Для объемов $V > 2.2$ млн м³ относительная ошибка: $\epsilon_V = \frac{\delta V}{V} \approx 1.5-2.5\%$ при ДЗЗ против 3–5% при тахеометрии.

Методика геомеханического мониторинга БПЛА

Протокол съемки

Подготовка: установка опорных знаков (100×100 см, шаг 100–200 м) с привязкой GNSS.

Съемка: облет в режиме PPK, интервал фотосъемки 5–7 сек, перекрытие снимков 50–60%.

Обработка: Metashape (выравнивание снимков, построение облака точек плотность 10k–50k точек/м²).

Мониторинг деформаций: загрузка в АСНИ “Облако 3D”, разбиение на ячейки размером $h = l \cdot \tan(\alpha)$, где l — расстояние от точки наблюдения, α — угловое разрешение (0.05–0.1°) [7-8].

Визуализация: цветовая шкала смещений (красный >1 м, зеленый <0.2 м).

Размер ячейки и детализация

Размер ячейки определяет разрешение мониторинга:

$$h = l \cdot \tan(\alpha), \quad h_{typical} = 60 \text{ м} \times \tan(0.1^\circ) \approx 0.1 \text{ м для } l = 100 \text{ м}$$

На высоте откоса 24–30 м ячейка 2×2 м выявляет обрушения объемом >200 м³. Для мелких оползней (<200 м³) размер ячейки уменьшают в 2–3 раза, что требует 4–9× увеличения вычислительной мощности.

Физическое моделирование механизмов разрушения

Использованы результаты экспериментов на эквивалентных материалах (Санкт-Петербургский горный университет, 2019) для бортов с обратной слоистостью (характерны для Магадана). Смесь: чугунная дробь 60%, кварцевый песок 38%, солидол 2%, масштаб 1:0.0012. Механизмы разрушения классифицированы по типам [6, 10-11]:

Изотропный откос ($C_n = 0.53$ МПа, $\phi_n = 32^\circ$): срезное разрушение по плавной поверхности, коэффициент запаса при разрушении $n = 1.0$, угол критический $\theta_{crit} = 49^\circ$.

Слоистый “слабый контакт” ($C_n = 0.07$ МПа, $\phi_n = 19^\circ$): изгиб и опрокидывание слоев, $n = 1.24$, $\theta_{crit} = 39^\circ$.

Слоистый “прочный контакт” ($C_n = 0.20$ МПа, $\phi_n = 23^\circ$): комбинированный механизм (изгиб + подрезка), $n = 1.09$, $\theta_{crit} = 44^\circ$.

Результаты: Сравнение точности методов в полевых условиях (Таблица 1)

Таблица 1

Параметр	GNSS RTK	LiDAR	БПЛА + фото	Традиц. (тахеометр)
Точность позиц. (мм)	10–20/15–30	2–5	10–20/15–25	20–50
Точность деформаций (мм)	5–10	1–3	5–15	10–20
Плотность точек/м ²	1–10	10k–100k	1k–10k	Низкая
Зависимость от погоды	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя
Условия применения	Открытые зоны; в каньонах PDOP>3	Любые (ночь/день)	Ясное небо	Видимость
Диапазон работ RTK	До 6 км от базы	До 50 км**	До 50 км (РПК)	—

*Примечание: ** LiDAR работает на борте карьера; БПЛА – до 50 км с РПК-коррекцией, базовая станция GNSS в центре карьера.

Результаты на Наталкинском ГОКе (2024–2025): - GNSS выявил сдвиги борта уступа №3 на 58 мм (горизонталь) за месяц, ошибка <3%. - LiDAR зафиксировал вертикальное смещение 22 мм/мес., облако точек плотность 60k/м² (разрешение 1.5 см). - БПЛА с РПК обеспечил точность 2.5 см при полете 100 м, обработка облака 50 тыс. снимков — 8 часов на кластере.

Расчеты объемов выемки по ЦМР (Таблица 2). Цикл работ на Наталке (1 месяц).

Таблица 2

Параметр	Значение
Объем взрывной выемки (проект)	1.25 млн м ³
Объем по ЦМР LiDAR	1.23 млн м ³
Отклонение	–1.6%
Объем по ЦМР БПЛА (фото)	1.27 млн м ³
Отклонение	+1.6%
Объем по традиц. тахеометрии (10 профилей)	1.19 млн м ³
Отклонение (по факту)	–4.8%
Ошибка LiDAR (по формуле)	$\delta V = 1.5\% \times \sqrt{S/10^4} = 1.8\%$
Ошибка БПЛА (по формуле)	$RMSE_V \approx 2.2\%$

Формула среднего объема 8:

$$\bar{V} = \frac{1}{3} (V_{LiDAR} + V_{БПЛА} + V_{traditional}) = 1.23 \text{ млн м}^3$$

8

$\sigma = 0.04 \text{ млн м}^3$ (3.3% расхождение)

Мониторинг деформаций бортов (Таблица 3). Наталкинское месторождение, данные за месяц (январь 2026).

Таблица 3

Уступ	GNSS (горизонталь, мм)	LiDAR (вертикаль, мм)	Средняя (мм/мес.)	Геомех. риск (по Fellenius)	Прогноз обрушения
1 (верх)	45	12	28.5	Средний ($n=0.85$)	>6 мес.
2 (середина)	32	18	25	Низкий ($n=0.92$)	>12 мес.
3 (нижняя часть)	58	22	40	Высокий ($n=0.78$)	3–4 мес.

Модель прогноза деформаций (линейная экстраполяция):

$$d(t) = d_0 + v \cdot t, \quad v = 1.2 \text{ мм/день (уступ №3)}$$

При критическом смещении $d_{crit} = 150$ мм (по результатам физического моделирования):

$$t_{collapse} = \frac{d_{crit} - d_0}{v} \approx 90 \text{ дней}$$

Влияние мерзлоты (по БПЛА-мониторингу): - Таяние мерзлоты верхних уступов: 0.7 м/год (средняя для Колымы). - Увеличение деформаций в летний период на 20–30% за счет оттаивания. - Зимние деформации стабильнее (лед цементирует блоки).

Анализ затрат и окупаемости (Таблица 4) Типичный карьер 50 га, цикл контроля 1 месяц.

Таблица 4

Метод	Капитальные затраты (тыс. руб.)	Эксплуатация (чел.-часы/цикл)	Затраты/цикл (тыс. руб.)	Окупаемость (месяцев)
Традиц. (тахеометр + нивелир)	500–1000	200–500	150–300*	— (базовый)
GNSS RTK (база + 2 ровера)	800–1500	50–100	50–100	4–6
LiDAR + БПЛА	2000–5000	20–50	80–150	6–9
Интегрированная ДЗЗ	3000–6000	10–30	40–80	3–5

*Затраты на традиционный метод включают: оплату маркшейдеров (25–40 тыс. руб./мес.), топливо, амортизацию оборудования.

Пример экономии (Наталка, 12 мес.): - Традиционный метод: 150 тыс. × 12 = 1800 тыс. руб./год. - ДЗЗ: 80 тыс. × 12 + 4500 тыс. (капитальные) = 5460 тыс. за первый год, затем 960 тыс./год. - Окупаемость: 4500 / (1800 – 960) ≈ 5.3 месяца. - Доп. выгода: предотвращение аварий (1 авария ≈ 100 млн руб. убытков), снижение рисков на 40–45%.

Кейсы применения ДЗЗ для мониторинга деформаций

Кейс 1: Наталкинское месторождение (Магадан)

Проблема: Борта карьера ползут из-за мерзлоты; традиционный мониторинг занимает 40 дней/цикл; опасность схода пород на рабочих.

Решение: БПЛА (РРК) + LiDAR на фиксированных опорных точках (ежедневный цикл).

Результаты (за 12 мес., 2024–2025): - Выявлено обрушение восточного борта 50×20 м за 5 дней до критического события. - Эвакуирована рабочая бригада, предотвращены потери. - Точность прогноза деформаций: 92% (линейная модель $v=1.2$ мм/день). - Трудозатраты: сокращены с 40 до 8 дней/цикл (80% экономия).

Кейс 2: Кузбасс (угольный разрез Берязово)

Проблема: Просадки почвы на глубоких горизонтах 50–70 м; традиционные реперы недостаточны для полного охвата.

Решение: GNSS + InSAR (спутниковые данные Sentinel-1, 2021–2024).

Результаты: - GNSS выявил просадки 10–20 мм/мес., InSAR подтвердил пространственное распределение. - Раннее предупреждение (8 дней до критического события) снизило аварии на 45%. - Интеграция данных в геомеханическую модель (FEM) позволила оптимизировать параметры взрыва. - Стоимость проекта: 2 млн руб., сэкономлено от аварий: >50 млн руб./год.

Кейс 3: Ковдорское месторождение (магнетит-апатит, Карелия)

Проблема: Глубокий карьер (400+ м); мониторинг устойчивости требует детальных 3D-моделей уступов.

Решение: БПЛА в ручном режиме (РРК + опорные знаки) + программа АСНИ “Облако 3D”.

Результаты: - Построена серия 3D-моделей (еженедельно, полет 30 мин). - Выявлены локальные обрушения объемом 200–1000 м³, 95% достоверности. - Зоны деформирования верхней площадки: 1.6Н (Н — высота уступа) при слабых контактах слоев (соответствует физическому моделированию). - Экономия: замена прецизионных GeomEAR-радаров (30+ млн руб.) на БПЛА (2 млн руб.). Влияние мерзлоты на механизмы разрушения

По результатам физического моделирования и полевых наблюдений

Таблица 5

Фактор	Сценарий зимний	Сценарий летний
Прочность льда в контактах	+40–60%	–40–60% (таяние)
Скорость деформаций	Медленная (1–5 мм/месяц)	Ускоренная (10–40 мм/месяц)
Механизм разрушения	Срезное (слабые контакты стабильны)	Опрокидывание (лед ослабляет)
Критический угол борта	+3–5° (прочнее)	–3–5° (слабее)
Прогнозируемость	Высокая (линейный рост)	Низкая (нелинейные скачки)

Вывод: В Магадане необходимо усилить мониторинг в период май–сентябрь; линейная экстраполяция деформаций зимних данных может недооценить летние риски на 20–30%.

Обсуждение. Результаты показывают, что ДЗЗ превосходят традиционные методы по совокупности критериев:

Точность: LiDAR (1–3 мм вертикали) обеспечивает 3–7× более высокую точность деформаций против тахеометрии (10–20 мм). GNSS RTK (5–10 мм горизонтали) конкурентен тахеометрии.

Плотность данных: облака точек 10–100 тыс./м² позволяют выявлять локальные нарушения размером <0.5 м² при ячейке 2×2 м. Тахеометрия дает точечные замеры, требующие интерполяции.

Скорость сбора: LiDAR-сканирование уступа 30 м — 30 мин (против 1–2 дней тахеометрией).

Безопасность: бесконтактные методы исключают опасность работы в каньонах; ДЗЗ-операторы работают с расстояния, снижая аварийность на 40–50%.

Критические факторы и ограничения

GNSS в условиях карьеров

Проблема: многопутность и потеря сигнала в бортах (каньоны до 500 м при углах 70–80°).

На глубинах >200 м GNSS теряет 50–70% спутниковой геометрии; PDOP растет с 2 до 5–8.

RTK требует линии прямой видимости; РРК более надежен (асинхронная обработка).

Решение: комбинация GNSS (верхние горизонты) + LiDAR/БПЛА (весь карьер) + опорные знаки (база для привязки).

LiDAR: объемы данных и время обработки

Проблема: одно сканирование карьера 6 км² на Наталке — 10–50 ГБ данных; облако содержит 1–3 млрд точек.

Фильтрация шума, выравнивание облаков (ICP-алгоритм): 2–4 часа на рабочей станции.

Построение ЦМР (триангуляция Делоне): 4–8 часов.

Требуется инфраструктура: RAID-массивы, GPU-кластеры, специализированное ПО (CloudCompare, LiDAR360).

Решение: облачные вычисления (AWS, Google Cloud), лицензирование программ с поддержкой многопроцессорности.

БПЛА: погодные ограничения и дрейф

Проблема: БПЛА требует видимости и стабильных условий (ветер <5 м/с).

Магадан: облачность >200 дней/год; сезон полетов апрель–октябрь (6 мес.).

Магнитный компас в карьере дает ошибку позиционирования ± 3 м (мешают стальные экскаваторы, буровые машины).

РРК требует постобработки (задержка 1–2 дня перед получением координат).

Решение: RTK-модули на дроны (точность реал-времени), многоантенные системы для стабилизации.

Интеграция ДЗЗ в системы управления карьером (BIM)

Перспективное направление — автоматизированная система управления горными работами на базе BIM (Building Information Modeling, адаптированная для карьеров как «Mine Information Modeling»):

Ежедневная съемка: БПЛА + LiDAR на фиксированном графике (7:00, 14:00, 21:00).

Автоматическая обработка: облачная платформа (AWS/GCP) с ML-алгоритмами для выявления изменений.

Прогнозирование: ИИ-модель деформаций (LSTM, Random Forest) на базе исторических данных.

Оповещение: при превышении пороговых значений ($n_{\text{Fellenius}} < 1.3$, смещение > 100 мм/неделю) — автоматический сигнал диспетчерскому центру.

Примеры реализации: Газпром (проект “Арктика-LNG”), ALROSA (Мирный, Якутия), anglo american (Южная Африка).

Стандартизация и нормативное регулирование

В России отсутствует стандарт применения ДЗЗ для маркшейдерского контроля объемов. Рекомендуемое нормативное обеспечение:

ГОСТ Р (проект): “Маркшейдерское обеспечение открытых горных работ с использованием дистанционного зондирования. Методы, точность, периодичность”.

РД 07-604-03 (пересмотр): дополнить разделы о допуске на использование облаков точек с точностью <5 мм для контрольных объемов.

Рекомендации по проектированию (СОП): выбор метода в зависимости от глубины карьера, типа грунта, наличия мерзлоты.

Сравнение с зарубежными стандартами приведено в таблице 6.

Таблица 6

Страна/Регион	Нормативная база	Практика
США	ASTM D5923 (электротaxeометрия), нет ДЗЗ-стандартов	БПЛА применяется факультативно, LiDAR редко
Австралия	AS/NZS (объемный контроль), приняты облака точек >5 мм	Активное использование ДЗЗ в рудниках, 95% карьеров >100 га
Канада	CSA (GNSS, точность 5 см), БПЛА в пилотах	Государственный стандарт на БПЛА-съемку (2022)
Россия	РД 07-604-03 (2003), ГОСТ Р 50667 (простая тахеометрия)	Отсутствие норм; практика фрагментарна

Выводы и рекомендации

Научные выводы

Интегрированная система ДЗЗ (GNSS RTK/PPK + LiDAR + БПЛА) обеспечивает точность 1–20 мм для мониторинга деформаций открытых карьеров, превосходя традиционные методы в 2–5 раз при сопоставимых или меньших затратах.

Формулы расчета объемов ($\Delta V = \sum A_i (Z_2 - Z_1)$ с $\epsilon_V \approx 1.5-2.5\%$ для ДЗЗ) позволяют обеспечить аккредитованный учет полезного ископаемого в соответствии с РД 07-604-03.

Механизмы разрушения бортов в условиях мерзлоты определяются сдвиговой прочностью контактов слоев; слабые контакты ($C < 0.1$ МПа) вызывают опрокидывание слоев при критическом угле 39–44°, что на 5–10° ниже допуска для изотропных откосов.

Влияние мерзлоты приводит к 20–30% ускорению деформаций в летний период; линейные прогнозы, основанные на зимних данных, недооценивают летние риски и требуют сезонной корректировки моделей.

Окупаемость ДЗЗ для карьеров 50+ га составляет 3–6 месяцев за счет снижения трудозатрат на 67%, предотвращения аварий (сокращение рисков на 40–45%) и повышения точности геомеханических расчетов.

Практические рекомендации

Для горнодобывающих предприятий Магадана и мерзлотных регионов:

Этап 1 (быстрое внедрение, 3–6 мес.): внедрить GNSS RTK + БПЛА с PPK-коррекцией для ежемесячного мониторинга бортов глубоких карьеров. Инвестиции: 2–3 млн руб./карьер, окупаемость за счет сокращения аварий.

Этап 2 (среднесроч, 6–12 мес.): закупить LiDAR (мобильный FARO или Leica) для еженедельного сканирования критических участков ($n < 1.5$ по Fellenius). Стоимость: 5 млн руб., точность деформаций улучшится до 2–3 мм.

Этап 3 (долгосроч, 1–3 года): разработать локальную систему BIM с автоматизированным прогнозированием, интегрировать в диспетчерский центр. Требуется: облачную платформу (300–500 тыс. руб./год), обучение персонала (40 часов).

Сезонная специфика: усилить мониторинг май–сентябрь (таяние мерзлоты); переходить на еженедельные циклы вместо ежемесячных в летний период.

References

1. Агарков И. Б., Рыльникова М. В., Никифорова И. Л. Разработка методики мониторинга деформаций уступов и бортов карьеров с применением беспилотных летательных аппаратов // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 6. – С. 33–39. – DOI: 10.56195/20793332_2024_6_33_39.
2. Цирель С. В., Павлович А. А., Мельников Н. Я., Зуев Б. Ю. Физическое моделирование процессов деформирования прибортового массива карьера с крутопадающей слоистостью горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 3. – С. 22–30.
3. Дехконова Н. Э. Исследование метода создания опорной маркшейдерской сети с использованием современных технологий на карьере Кальмакыр // Научный журнал Луч. – 2025. – № 6 (46). – С. 199–207.
4. Кручинин В. С., Аметов И. М. Влияние многолетней мерзлоты на устойчивость бортов карьеров : метод. пособие. – [Б. м.] : [б. и.], 2010. – 66 с.
5. Guidelines for open pit slope design / J. Read, P. Stacey (eds.). – London : CRC Press, Balkema, 2009. – 509 p.
6. Goodman R. E., Bray J. W. Toppling of rock slopes // ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. – 1976. – Vol. 2. – P. 201–234.
7. Dudley J., Wesseloo J., Stolz M., Kemp L. InSAR as a practical tool to monitor and understand large-scale mining-induced ground deformations in a caving environment // Natural Resources Research. – 2020. – Vol. 29, № 3. – P. 1625–1641.
8. Петров М. Н., Гсев В. Н. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 1–10. – DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
9. Aeromotus. Фотограмметрия с БПЛА — альтернатива классической наземной съемке : науч. отчет. – 2025.
10. GCS «Облако 3D». Руководство пользователя. – Москва : Геосканерные системы, 2024.