

UDC 622.271:528.8:004.9

# **Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Sharov P.E. Assessment of Deformations of Quarry Walls and Waste Dumps Based on Real-Time Laser Scanning and Photogrammetry Data**

Оценка деформаций бортов карьеров и отвалов на основе данных лазерного сканирования и фотограмметрии в режиме реального времени

**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

**Lomakina Natalia Evgenievna,**

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

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

Ломакина Наталья Евгеньевна,

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 article addresses the assessment of deformations of quarry walls and waste dumps based on the integration of terrestrial laser scanning and photogrammetry data used in near-real-time monitoring. Terrestrial laser scanning provides dense point clouds and highly accurate geometric description of pit walls, benches and dumps, while UAV-based photogrammetry enables rapid coverage of large areas and records texture-related indicators of cracking and local displacements. Current studies treat both methods as complementary monitoring tools, and automated processing of multi-temporal point clouds makes it possible to delineate subsidence zones, landslide processes, surface tilts and curvature anomalies. The paper proposes a calculation framework for combining the outputs of the two methods, considers displacement, deformation-rate and integrated hazard indicators, and presents an illustrative case showing the transition from a stable to a hazardous state.*

**Keywords:** *quarry wall, waste dump, deformation, laser scanning, photogrammetry, real-time monitoring, point cloud, geomechanical hazard, UAV, deformation risk index.*

**Аннотация.** *Статья посвящена оценке деформаций бортов карьеров и отвалов на основе интеграции данных наземного лазерного сканирования и фотограмметрии, применяемых в режиме, близком к реальному времени. Наземное лазерное сканирование обеспечивает плотное облако точек и высокую точность геометрического описания бортов, уступов и отвалов, а фотограмметрия с беспилотных платформ позволяет быстро покрывать значительные площади и фиксировать текстурные признаки трещинообразования и локальных смещений.*

*В современных исследованиях оба метода рассматриваются как взаимодополняющие инструменты мониторинга деформаций, а автоматизированная обработка разновременных облаков точек позволяет выделять зоны оседаний, оползневых процессов, наклонов и кривизны поверхности. В статье предложен расчётный подход к объединению результатов двух методов, рассмотрены показатели смещений, скоростей деформаций и интегрального индекса риска, а также приведён иллюстративный пример оценки перехода от стабильного состояния к опасному.*

**Ключевые слова:** *борт карьера, отвал, деформации, лазерное сканирование, фотограмметрия, мониторинг в реальном времени, облако точек, геомеханический риск, БВС, индекс деформационного риска.*

---

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

### *Введение*

Контроль деформаций бортов карьеров и отвалов относится к числу ключевых задач геомеханического обеспечения открытых горных работ, поскольку развитие смещений, трещинообразования и оползневых процессов непосредственно влияет на промышленную безопасность, устойчивость откосов и непрерывность добычи. Классические маркшейдерские методы обеспечивают высокую точность точечных наблюдений, однако для быстро меняющейся геометрии карьерных откосов и отвалов всё большее значение приобретают технологии, дающие сплошное пространственное описание поверхности - наземное лазерное сканирование и фотограмметрия.

Наземное лазерное сканирование позволяет получать облака точек высокой плотности на расстояниях до нескольких километров и использовать их для построения цифровой модели поверхности, расчёта объёмов, профилей, структурных линий и мониторинга деформаций. Фотограмметрия, в том числе с применением беспилотных воздушных судов, обеспечивает быстрое обновление модели объекта и дополнительную информацию о морфологии поверхности и трещинной структуре, что особенно важно для выявления опасных участков. В современных алгоритмах обработки данных основное внимание уделяется сравнению разновременных облаков точек и автоматизации расчётов смещений, наклонов и кривизны, пригодных для оперативного предупреждения об опасных деформациях [1-4].

Цель статьи - разработать и продемонстрировать подход к оценке деформаций бортов карьеров и отвалов на основе интегрированного использования данных

лазерного сканирования и фотограмметрии в режиме реального времени, включая расчёт показателей смещения, скорости деформации и индекса риска.

### Методы

#### Информационная база и измерительная схема

В опубликованных исследованиях наземное лазерное сканирование рассматривается как эффективный инструмент мониторинга бортов, откосов, уступов и отвалов, в том числе в суровых климатических условиях и на крупных открытых горных выработках. Для фотограмметрического сопровождения используются данные аэрофотосъёмки с БВС, которые позволяют оперативно получать трёхмерную модель больших участков и затем сопоставлять её с эталонной поверхностью или лазерным облаком точек.

Типовая схема мониторинга включает: (1) формирование базовой поверхности, (2) повторные циклы сканирования и фотограмметрии, (3) совмещение наборов данных в единой системе координат, (4) расчёт разностей по высоте и пространственным смещениям, (5) выделение зон превышения порогов по смещению и скорости деформации. Такой подход позволяет анализировать не отдельные реперы, а всю потенциально опасную площадь объекта, что особенно важно для протяжённых бортов карьеров и тел отвалов.[1-3]

#### Расчётные зависимости

Базовый показатель деформации поверхности между двумя циклами съёмки определяется как модуль вектора смещения точки или ячейки модели:

$$D_i = \sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2 + (z_{i2} - z_{i1})^2}$$

где  $D_i$  - смещение  $i$ -й точки, а индексы 1 и 2 соответствуют последовательным циклам наблюдений.[2-4]

Средняя скорость деформации для интервала наблюдений рассчитывается как:

$$V_i = \frac{D_i}{\Delta t}$$

где  $\Delta t$  - интервал между циклами мониторинга в сутках. Для совместного использования результатов лазерного сканирования и фотограмметрии можно принять взвешенную оценку среднеквадратической ошибки:

$$\sigma_c = \left( \frac{1}{\sigma_{TLS}^2} + \frac{1}{\sigma_{PH}^2} \right)^{-1/2}$$

где  $\sigma_{TLS}$  - среднеквадратическая ошибка лазерного сканирования,  $\sigma_{PH}$  - среднеквадратическая ошибка фотограмметрической модели. Такая формула отражает снижение итоговой неопределённости при совместном использовании независимых измерений.

Для оперативной оценки опасности предлагается интегральный индекс деформационного риска:

$$R = 0.6 \cdot \frac{D_{max}}{\sigma_c} + 0.4 \cdot V_{max}$$

где  $D_{max}$  - максимальное смещение в контролируемом секторе,  $V_{max}$  - максимальная скорость деформации. Весовые коэффициенты могут уточняться под конкретный объект, однако приоритет смещения как более устойчивого индикатора обоснован практикой анализа разновременных облаков точек.

Классы опасности

Для целей инженерной интерпретации принят следующий пример классификации:

$R < 2$  - низкий риск;

$2 \leq R < 4$  - средний риск;

$R \geq 4$  - высокий риск.

Такая шкала является расчётной и должна адаптироваться к фактическим геомеханическим условиям месторождения, литологии и истории деформаций.

*Результаты*

Иллюстративный расчёт

Для демонстрации метода рассмотрен условный сектор борта карьера, по которому выполнено шесть циклов мониторинга.

В каждом цикле определены максимальное смещение, скорость деформации, а также типичные ошибки по данным наземного лазерного сканирования и фотограмметрии.

На основе этих параметров рассчитаны комбинированная ошибка и индекс риска.

Такой пример не заменяет натурные наблюдения, но показывает логику интерпретации данных в системе оперативного мониторинга.

Таблица 1

Расчёт показателей деформации и риска

Период	Максимальное смещение, мм	Скорость, мм/сут	RMS E TLS, мм	RMSE фотограмметрии, мм	Комбинированная ошибка, мм	Индекс риска R	Класс риска
T1	6	0.4	7	15	5.76	0.78	Низкий
T2	9	0.6	7	14	5.63	1.20	Низкий
T3	14	0.9	8	14	6.95	1.57	Низкий
T4	22	1.5	8	13	6.81	2.54	Средний
T5	35	2.4	8	13	6.81	4.04	Высокий
T6	58	3.9	9	12	7.20	6.39	Высокий

Рост максимального смещения от 6 до 58 мм при одновременном увеличении скорости деформации от 0,4 до 3,9 мм/сут показывает переход контролируемого участка из стабильного состояния в зону опасного развития деформаций (рис.1).

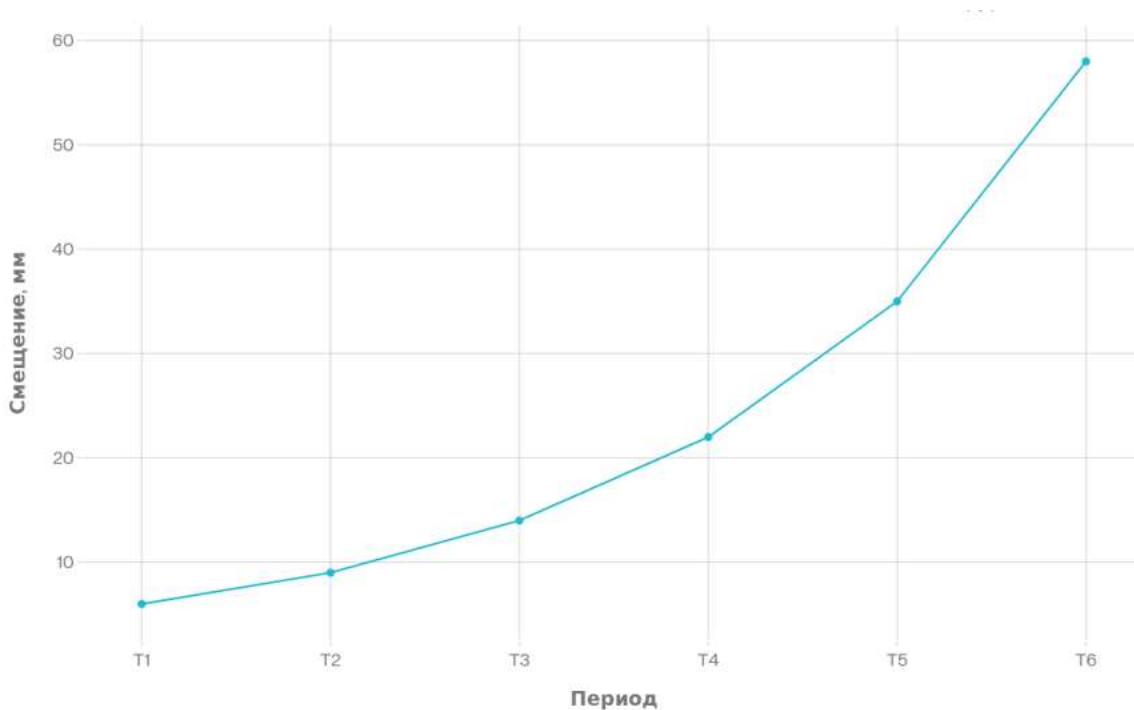


Рисунок 1 – Смещение борта карьера по циклам мониторинга

Практически это означает, что начиная с периода T4 требуется усиленный контроль, а при достижении уровней T5–T6 необходимы инженерные меры реагирования, вплоть до ограничения работ в опасном секторе.

Динамика смещений по циклам мониторинга показывает ускоряющийся характер деформации, что характерно для участков, приближающихся к оползневому или обвальному сценарию (рис.1).

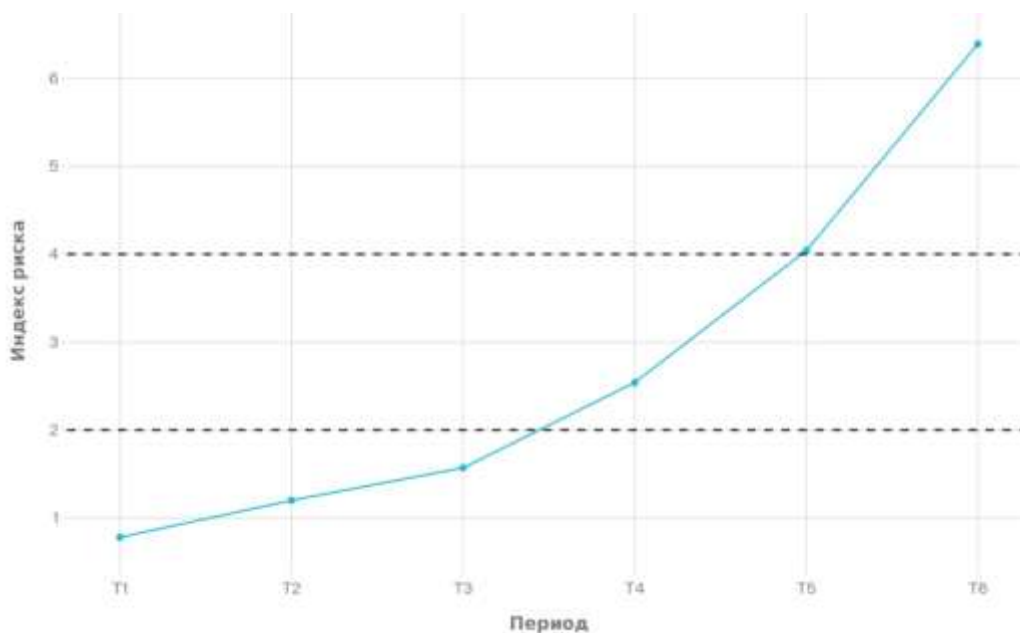


Рисунок 2- Индекс деформационного риска по циклам Т1-Т6

Динамика индекса деформационного риска демонстрирует пересечение порогов среднего и высокого риска между Т4 и Т5, что удобно для системы раннего предупреждения и регламентации действий диспетчерской службы и маркшейдерского контроля (рис.2).

Таблица 2

Сравнение методов мониторинга

Параметр	Наземное лазерное сканирование	Фотограмметрия	Совместное применение
Пространственная детализация	Высокая плотность облака точек и точная геометрия откосов.	Зависит от высоты полёта, камеры и схемы съёмки.	Позволяет объединить точную геометрию и текстурную информацию.
Скорость покрытия территории	Ограничена числом точек стояния и условиями видимости.	Высокая для протяжённых участков и отвалов.	Повышает оперативность и полноту наблюдений
Чувствительность к текстурным признакам	Ниже для визуальных дефектов, но хорошо фиксирует форму поверхности.	Высокая для трещин, выветривания и изменений текстуры.	Улучшает распознавание деформационных признаков.
Работа в режиме, близком к реальному времени	Возможна при стационарных системах или регулярных циклах съёмки.	Возможна при быстрых облётах БВС и автоматизированной обработке.	Наиболее перспективна для непрерывного геотехнического контроля.

### *Обсуждение*

Материалы по мониторингу открытых горных выработок показывают, что наземное лазерное сканирование особенно эффективно в задачах точного геометрического контроля бортов, уступов и отвалов, тогда как фотограмметрия обеспечивает быстрое картирование крупных площадей и повышает информативность за счёт визуальных признаков состояния поверхности.[5-7]. Следовательно, их совместное использование даёт не просто дублирование измерений, а расширение аналитических возможностей системы мониторинга.

Автоматизированный анализ разновременных облаков точек позволяет выделять границы зон оседания, наклонов и потенциального оползневого процесса, а также использовать результаты для проверки математических моделей деформаций и уточнения опасных участков.[7-8]. Для практики это важно потому, что оперативный мониторинг должен не только фиксировать факт смещения, но и обеспечивать раннее предупреждение, когда величина деформации ещё не достигла аварийных значений, но скорость и пространственная локализация уже свидетельствуют о нарастании риска.

Ключевым ограничением остаётся качество привязки, совмещения и фильтрации облаков точек, поскольку ошибки регистрации могут интерпретироваться как ложные смещения.[6,8]. Поэтому интегрированная система контроля должна включать эталонные устойчивые зоны, регулярную калибровку, проверку на независимых реперах и пороговые критерии, учитывающие точность конкретного оборудования и условия объекта.

### *Выводы*

Наземное лазерное сканирование и фотограмметрия являются взаимодополняющими технологиями мониторинга деформаций бортов карьеров и отвалов, обеспечивая как высокоточную геометрию поверхности, так и быстрое покрытие протяжённых участков наблюдений. На основе совместной обработки данных возможно рассчитывать смещения, скорости деформации и интегральный индекс риска, пригодный для раннего предупреждения об опасных изменениях состояния откосов. Иллюстративный расчёт показал, что переход от низкого к высокому риску может быть выявлен по совокупности роста максимального смещения и ускорения деформаций ещё до критического нарушения устойчивости, что делает интегрированный мониторинг эффективным инструментом геомеханического управления.

## References

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю, Миккельсен Е.А. Сканирующая тахеометрия в решении маркшейдерских задач при подземной отработке месторождения «Перевальное». Горная промышленность. 2025 № 3 С.40–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-40-44> EDN: MWJVKL
2. Курбатова В. В. Аппроксимация методики наземной лазерно-сканирующей тахеометрии к съемке подземных выработок // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 3. С. 40–52.
3. Курбатова В. В. Валидность сканирующей тахеометрии в решении комплекса маркшейдерских задач // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 1. С. 8–23.
4. Brown, A., Williams, C. Advances in Scanner Technology for Geological Surveys in Mining Operations. //Journal of Geospatial Engineering. 2020. Vol. 15(1). P. 32–45.
5. Использование технологии лазерного сканирования для наблюдения за состоянием устойчивости прибортовых массивов / Ф. К. Низаметдинов, Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Н. Ф. Низаметдинов, Е. А. Олейникова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 156–160.
6. Исследование процесса деформирования прибортового массива качарского карьера на основе внедрения инновационных технологий / Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Е. А. Олейникова, Е. А. Токкужин // Горные науки и технологии. – 2016. – № 4. – С. 10–20.
7. Решение горно-геометрических задач с использованием программ 3D-моделирования на месторождениях Казахстана / Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Е. А. Олейникова, Н. А. Имранова, Р. В. Синяк // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 175–180.
8. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Бесимбаев Н. Г. Анализ точности инструментальных наблюдений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 15–18.