

## ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОТВАЛ – ОСНОВАНИЕ»

С.П. Бахаева<sup>1</sup>, Е.В. Ананенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
Кемерово, Россия, e-mail: ananenko\_ev@mail.ru

**Аннотация:** Повсеместное увеличение высоты отвалов, интенсивность их отсыпки и расположение на неблагоприятных с позиции устойчивости площадках приводит к оползням. В этой связи возникает необходимость геомеханического сопровождения процесса формирования отвалов. При этом следует рассматривать природно-техническую систему «отвал–основание», так как, по исследованиям ряда ученых, характеристики пород основания оказывают большее влияние на ее устойчивость, чем отвальная масса. Исходя из требований нормативных документов, реальной возможности обеспечения точности наблюдений за деформациями и вероятности распределения случайных погрешностей установлена предельная погрешность измерений, превышение которой свидетельствует о начале деформации отвала. Из условия обеспечения требуемой точности в определении положения репера разработана методика геомеханического мониторинга природно-технической системы «отвал–основание», включающая информацию о способах наблюдений за деформациями, формулы и номограммы, по которым, в зависимости от точности средств измерения, можно оперативно определять допустимое удаление рабочего репера относительно станции следующими способами: прямая геодезическая засечка, тригонометрическое нивелирование, спутниковое определение координат и лазерное сканирование. На основании опыта эксплуатации и результатов геомеханического мониторинга обоснованы качественные и количественные критериальные показатели для оценки уровня геомеханического риска, характеризующие природно-техническую систему «отвал–основание» от начальной стадии деформации до недопустимого (аварийного) состояния и позволяющие прогнозировать ее устойчивость.

**Ключевые слова:** природно-техническая система «отвал–основание», погрешность измерений, деформации отвала, методы наблюдений, номограммы погрешности положения репера, уровень геомеханического риска, скорость смещения полного вектора, критерии оценки, напряженно-деформируемое состояние.

**Для цитирования:** Бахаева С. П., Ананенко Е. В. Обоснование критериев прогноза устойчивости природно-технической системы «отвал – основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_122\_0\_5.

### Substantiation of stability criteria for waste dump–foundation natural–technical system

S.P. Bakhaeva<sup>1</sup>, E.V. Ananenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia, e-mail: ananenko\_ev@mail.ru

---

**Abstract:** The commonly increasing heights and rates of dumping on the areas which are unfavorable in terms of stability result in dump slides. Thus, the process of dump piling requires a geomechanical supervision. Here, it is necessary to consider a natural–technical system representing a dump and its foundation since, according to some researchers, the characteristics of the foundation have a greater effect on the dump stability than the dump mass. On the basis of normative standards, and actually ensured accuracy of deformation observations and probability density of random errors, the limit measurement error is determined, and the overshoot of this limit implies the start of deformation of a dump. From the condition of position fixing of a check point at the required precision, the geomechanical monitoring procedure is developed for the dump–foundation natural–technical system, including information about deformation observation methods, and formulas and nomograms which, depending on the accuracy of measurement means, allow rapid determination of an allowable remoteness of a check point from a station using such methods as: geodetic position fixing, trigonometric levelling, satellite-based position fixing and laser scanning. On the basis of operating practice and geomechanical monitoring results, the qualitative and quantitative criteria are substantiated for estimating a geomechanical risk level. These criteria describe the dump–foundation natural–technical system, from the initial stage of its deformation and to the impermissible (emergency) condition, and make it possible to predict stability of the system.

**Key words:** dump–foundation natural–technical system, measurement error, dump deformation, observation methods, check point positioning error nomogram, geomechanical risk level, full vector displacement rate, estimate criteria, stress–strain behavior.

**For citation:** Bakhaeva S. P., Ananenko E. V. Substantiation of stability criteria for waste dump–foundation natural–technical system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):5-20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_122\_0\_5.

---

## Введение

Существующие методы контроля (инженерно-геологический, гидрогеологический, тензометрический, геофизический и др.) геомеханического состояния техногенного массива горных пород позволяют установить характеристики, влияющие на устойчивость природно-технической системы (ПТС) «отвал – основание». При этом только метод маркшейдерско-геодезического контроля дает возможность определять величину и скорость смещения отвала для оценки его состояния и прогноза устойчивости.

В настоящее время помимо традиционных маркшейдерско-геодезических методов наблюдений за деформациями техногенных массивов [1 – 3] активно развиваются дистанционные методы,

позволяющие определять их смещения: лазерное сканирование [4], наземная радарная интерферометрия [5], фотограмметрия с применением беспилотных авиационных систем БАС [6 – 9], а также использование космоснимков [10 – 12]. Вместе с тем, как подтверждают упомянутые исследования, наиболее точными и оперативными остаются геодезические методы. При этом допустимые и критические значения деформаций отвалов в данных работах не приводятся.

Деформации отвалов имеют свои особенности, которые связаны с типом отвальной массы и пород основания, рельефом местности, влиянием нагрузок и воздействий на напряженно-деформированное состояние сооружений. Настоящая статья является завершаю-

щим этапом десятилетних исследований, выполняемых сотрудниками научно-исследовательских лабораторий «Устойчивость бортов карьеров» СФ АО ВНИМИ и Кузбасского технического университета имени Т.Ф. Горбачева, особенностей деформаций ПТС «отвал – основание», основанных на натуральных экспериментах, результаты которых приводились ранее в статьях [13–15].

Проведенный комплекс исследований позволил решить следующие задачи:

- методом системного анализа выполнена типизация отвалов по условиям формирования, влияющим на их устойчивость, методом «Анализ дерева событий» установлены возможные сценарии развития деформаций и их вероятности [13];

- определена степень влияния нагрузок и воздействий на устойчивость ПТС «отвал – основание» [14];

- показана оценка уровня риска развития деформаций и нарушения устойчивости по результатам натуральных наблюдений [15].

Вместе с тем для оценки степени опасности смещения массива необходимо иметь обоснованные критерии, определяющие уровень геомеханического риска, обеспечивающие прогноз устойчивости и управление состоянием ПТС «отвал – основание».

Цель исследований – оценка состояния ПТС «отвал – основание» и прогноз устойчивости на основе геомеханического мониторинга, обеспечивающий повышение технической безопасности при формировании отвалов.

Задачи исследований:

- разработать методику геомеханического мониторинга, соответствующую нормативным требованиям к точности;

- обосновать критерии, характеризующие уровень геомеханического риска, для оценки состояния ПТС «отвал – основание» и прогноза ее устойчивости.

### **Определение допустимой и предельной погрешностей измерений при инструментальных наблюдениях**

Точность инструментальных наблюдений регламентируется нормативной документацией. При этом исходят из целесообразности ориентироваться на минимальные значения, которые поддаются интерпретации, а также на реально возможную точность определения смещений реперов наблюдательной станции имеющимися средствами и методами измерений. Для ПТС «отвал – основание», в соответствии с требованиями ГОСТ 24846-2019, класс точности измерений вертикальных и горизонтальных перемещений определяется как IV, для которого допустимая погрешность измерения перемещений в вертикальной плоскости составляет  $\pm 10$  мм; в горизонтальной  $\pm 15$  мм. Федеральными нормами и правилами («Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов») определена рекомендуемая точность определения положения реперов при мониторинге отвалов – не больше  $\pm 30$  мм. В этой связи при выборе контрольно-измерительной аппаратуры и методов наблюдений необходимо руководствоваться среднеквадратической погрешностью определения положения репера, которая зависит от точности средств измерений, удаленности рабочего репера относительно опорного. При наблюдениях за деформациями отвалов погрешность положения реперов не должна превышать в плане и по высоте  $\pm 30$  мм. Исходя из требований ГОСТ 24846-2019 и ФНиП «Правила обеспечения устойчивости...», реальной возможности современных высокоточных и точных средств измерений, анализа экспериментальных данных по наблюдениям за объектами на горнодобывающих предприятиях,

средняя квадратическая погрешность определения смещения репера из двух серий наблюдений при мониторинге отвалов в плане и по высоте не должна превышать  $m_{\Delta} = 30\sqrt{2} = 42$  мм.

Говорить о начале процесса сдвижения массива можно в том случае, когда величина смещения репера превзойдет предельное значение случайных погрешностей измерений, описываемых функцией [16]

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad t = \frac{\delta}{m}, \quad (1)$$

где  $\delta$  и  $m$  — случайная и средняя квадратическая погрешности измерений.

Исходя из вероятности распределения случайных погрешностей измерения (рис. 1) и доверительных интервалов установим допустимую и предельную погрешности измерений при наблюдениях за деформациями ПТС «отвал — основание».

При определении допустимой погрешности измерения в маркшейдерской практике принимают доверительный интервал  $(-2m) \div (+2m)$ , в который попадает 95,5% случайных погрешностей измерений.

Исходя из требований к точности геомеханического мониторинга отвалов допустимая погрешность определения смещения репера из двух серий наблюдений в плане и по высоте составит:

$$m_{\text{доп}} = tm_{\Delta} = 2 \cdot 30\sqrt{2} = 85 \text{ мм.} \quad (2)$$

В качестве предельной погрешности измерений в маркшейдерской практике принимается доверительный интервал  $(-3m) \div (+3m)$ , в который попадает 99,7% случайных погрешностей измерений:

$$m_{\text{пред}} = tm_{\Delta} = 3 \cdot 30\sqrt{2} = 127 \text{ мм.} \quad (3)$$

Таким образом, при смещении репера из двух серий наблюдений, превышающем предельную погрешность, следует говорить о начале деформаций ПТС «отвал — основание», при меньших значениях — о погрешности маркшейдерских измерений.

### Методы наблюдений за деформациями отвалов

Выбор метода наблюдений зависит от схемы деформирования ПТС «отвал — основание», скорости развития деформаций, возможности доступа к рабочим реперам наблюдательной станции, рельефа местности.

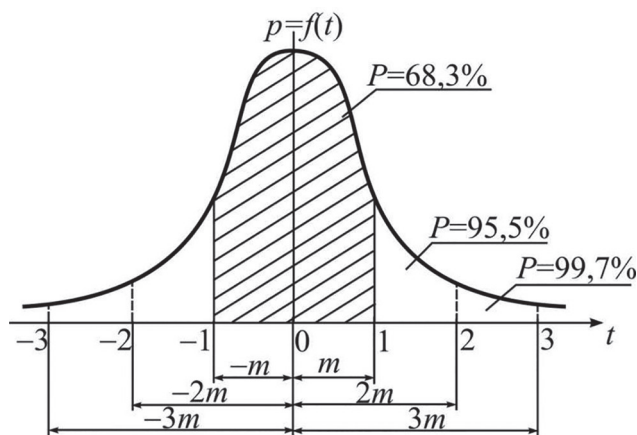
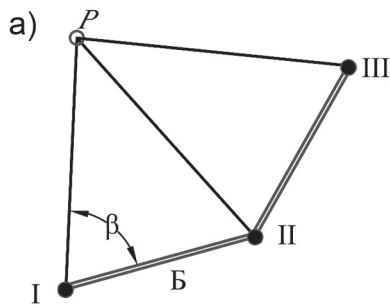
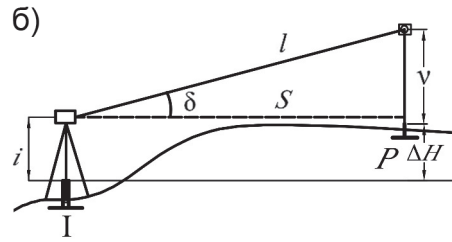


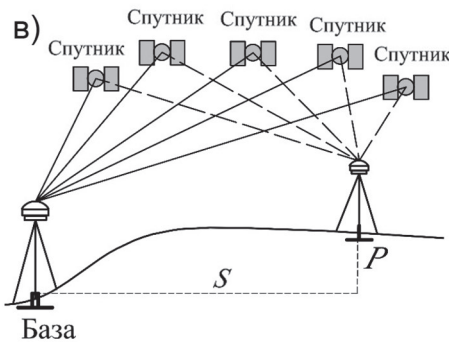
Рис. 1. Вероятность распределения случайных погрешностей измерений  
Fig. 1. Probability distribution of random measurement errors



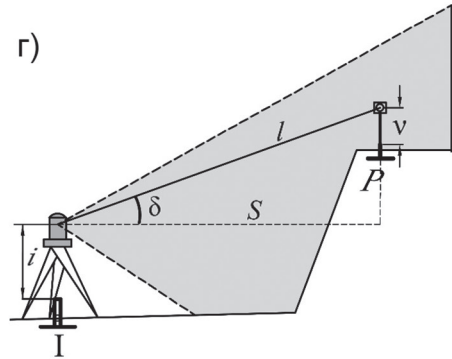
$$m_n = \frac{m_\beta B}{2\rho \cos\beta \sin 2\beta \sqrt{1 + \cos^2 2\beta}}$$



$$m_b = \sqrt{m_l^2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{m_\delta^2 S^2}{\rho^2 \cos^4 \delta} + m_i^2 + m_v^2 + \frac{m_k^2 S^4}{4R^2}}$$



$$m_{n,b} = a \pm b \cdot S$$



$$m_n = \sqrt{\frac{m_\beta^2}{\rho^2} l^2 + m_l^2}, \quad m_\beta - \text{см. схему (б)}$$

Рис. 2. Схемы к определению погрешности положения репера  $P$  способами прямой угловой геодезической засечки (а), тригонометрического нивелирования (б), спутниковой геодезии (в) и лазерного сканирования (г)

Fig. 2. Schemes for determining the error in the position of the reference point  $P$  by methods of direct angular geodetic intersection (a) trigonometric leveling (b), satellite geodesy (v) and laser scanning (g)

Информация об основных методах и способах наблюдений за деформациями, формулы и номограммы для оперативного определения удаленности рабочего репера от опорного пункта при условии обеспечения средней квадратической погрешности (СКП) положения реперов приведены на рис. 2–6. На рисунках  $m_n$  – погрешность положения рабочего репера в плане, мм;  $m_\beta$  – погрешность измерения горизонтального угла, с;  $B$  – длина базиса между опорными реперами, м;  $\rho$  – коэффициент для перехода из градусной меры в ради-

анную;  $\beta$  – измеренный горизонтальный угол, град;  $m_b$  – погрешность положения рабочего репера по высоте, мм;  $m_l$  – погрешность измерения длины, мм;  $l$  – измеренное расстояние, м;  $\delta$  – измеренный вертикальный угол, град;  $m_\delta$  – погрешность измерения вертикального угла, с;  $S$  – горизонтальное проложение, мм;  $m_i$  – погрешность измерения высоты инструмента, мм;  $m_v$  – погрешность измерения высоты визирирования, мм;  $m_k$  – погрешность за кривизну Земли и рефракцию, мм;  $R$  – радиус Земли 6370 км;  $a$  и  $b$  – коэффициенты

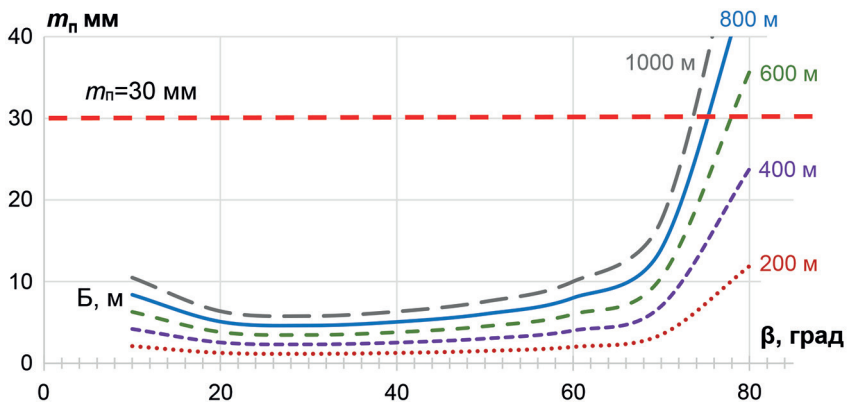


Рис. 3. Зависимость погрешности положения репера в плане ( $m_n$ ) от угла  $\beta$  и длины базиса  $B$  при  $m_\beta = 2''$  для способа прямой угловой геодезической засечки

Fig. 3. Dependence of the error in the position of the reference point in the plan ( $m_n$ ) on the angle  $\beta$  and the length of the base  $B$  at  $m_\beta = 2''$  for the method of direct angular geodetic intersection

дальномера, определяемые по паспорту прибора.

Оперативная обработка результатов инструментальных наблюдений маршейдерско-геодезическими методами и спутникового определения координат обеспечивается использованием программы «Deformation control» [17].

Плановое ( $\Delta_n$ ) и высотное ( $\Delta_b$ ) смещения репера характеризуют механизм деформирования массива: если  $\Delta_n < \Delta_b$ , говорят о процессе самоуплотнения отвальной массы, при  $\Delta_n \geq \Delta_b$  — о развитии деформации сдвига.

Скорости векторов смещения указывают на развитие либо затухание деформационных процессов, по их величинам на качественном и количественном уровнях можно прогнозировать вероятность обрушения (ВО) отвала.

При этом важно понимать, что для свежесыпанной отвальной массы характерны просадки, связанные с уплотнением разрыхленных пород, которые не представляют опасности. На основе наших экспериментальных исследований установлены закономерности просадок отвальной массы.

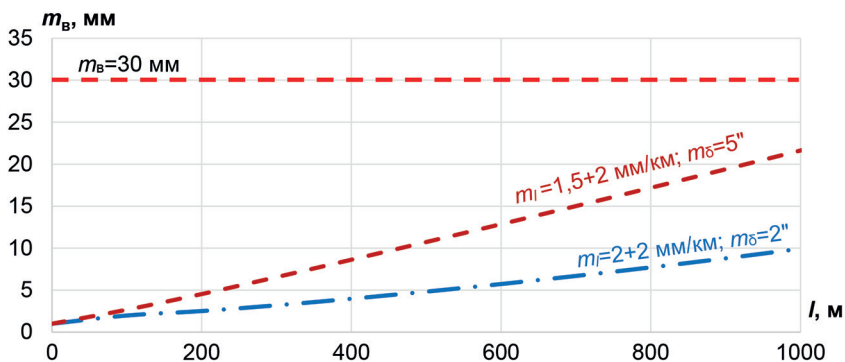


Рис. 4. Зависимость погрешности положения репера по высоте ( $m_b$ ) от расстояния  $l$  между опорным и рабочим реперами для способа тригонометрического нивелирования

Fig. 4. Dependence of the reference point height error ( $m_b$ ) on the distance  $l$  between the reference and working reference points for the trigonometric leveling method

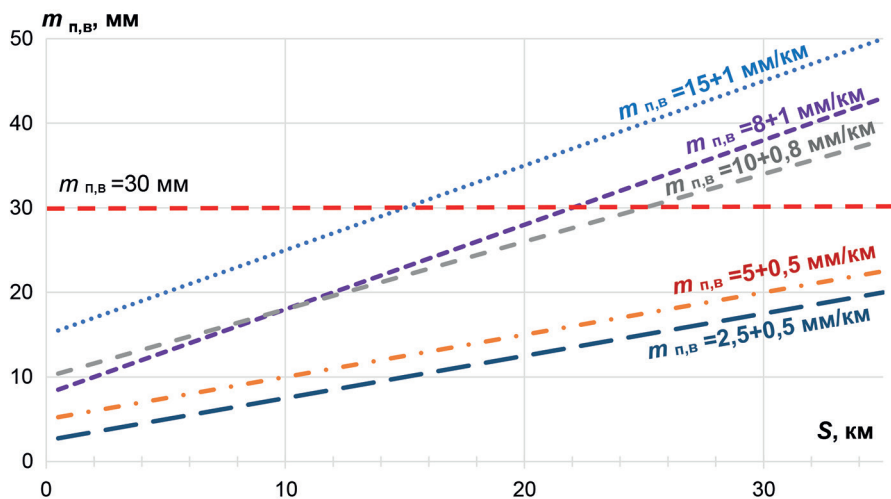


Рис. 5. Зависимость погрешности положения репера в плане ( $m_n$ ) и по высоте ( $m_b$ ) от расстояния  $S$  до «базовой станции» для метода спутникового определения координат приборами различной точности  
 Fig. 5. Dependence of the error in the position of the reference point in the plan ( $m_n$ ) and the reference point height error ( $m_b$ ) on the distance  $S$  to the reference point for the method of satellite determination of coordinates by instruments of varying accuracy

По результатам геомеханического мониторинга установлено, что в первый год после отсыпки отвала происходило уплотнение свежесыпанной отвальной массы. Максимальные осадки реперов более чем в 2 раза превышали плановые смещения. Скорость смещения полного вектора достигала 10 мм/сут. На второй

год ранней весной смещения возрастали. Пиковый период отмечен в середине апреля, скорости смещений полного вектора достигали 5 мм/сут, при этом визуально на поверхности отвала трещины отсутствовали. В последующий период напряженно-деформируемое состояние ПТС «отвал – основание» изме-

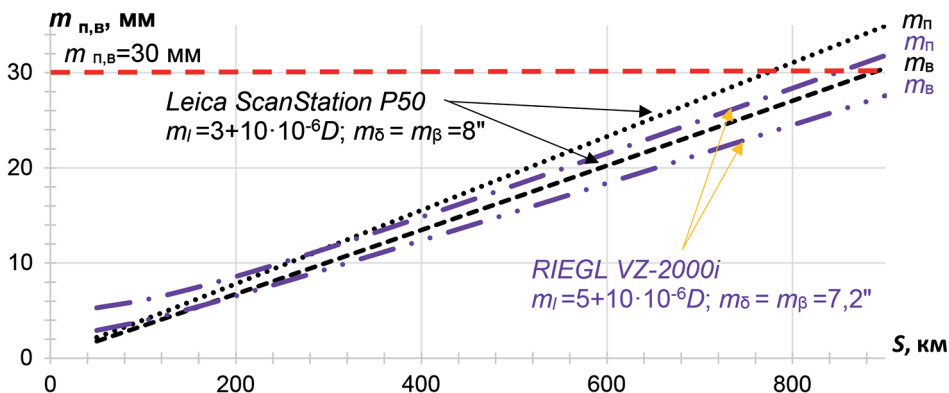


Рис. 6. Зависимость погрешности положения репера в плане ( $m_n$ ) и по высоте ( $m_b$ ) от расстояния  $S$  до станции для метода лазерного сканирования приборами различной точности  
 Fig. 6. Dependence of the error in the position of the reference point in the plan ( $m_n$ ) and the reference point height error ( $m_b$ ) on the distance  $S$  to the reference point for the method of laser scanning by instruments of varying accuracy

нялось в зависимости от времени года: смещения увеличивались только в период активного снеготаяния до 0,7 мм/сут, их величины не превышали погрешности измерений. Процесс уплотнения отвальной массы завершился в течение одного года при максимальной скорости 10 мм/сут.

### **Определение начальной стадии деформации ПТС «отвал–основание»**

При расхождении координат репера из двух серий наблюдений не больше допустимой погрешности измерений — 85 мм (периодичность измерений 10 сут, скорость полного вектора меньше 13 мм/сут) и отсутствии визуальных признаков деформаций в приоткосной части отвала ПТС «отвал — основание» находится в работоспособном и исправном состоянии. Опасность деформаций отсутствует. Уровень геомеханического риска весьма низкий. Работу по отвалообразованию следует вести в проектном режиме.

В случае превышения предельной погрешности измерений — 127 мм (скорость полного вектора  $13 \div 20$  мм/сут), появлении на поверхности приоткосной части отвала мелких (до 10 см) продольных трещин следует говорить о возможности начальной стадии деформаций. Состояние ПТС «отвал — основание» характеризуется как работоспособное, но неисправное. Уровень опасности — 0 — нормальный. Уровень геомеханического риска низкий. Работы по формированию отвалов ведут в проектном режиме. При этом нужно продолжить визуальные наблюдения и провести контрольные инструментальные измерения через 7—10 дней для выяснения причины увеличения скорости смещения техногенного массива.

При появлении на поверхности приоткосной части отвала крупных продоль-

ных трещин, заколов, просадок состояние ПТС «отвал — основание» переходит в частично неработоспособное — предельно допустимое состояние. Уровень опасности 1-й — **ВНИМАНИЕ**. На основании визуальных наблюдений нужно уточнить конструкцию наблюдательной станции (НС) и периодичность наблюдений в соответствии с характером и скоростью смещений отвала. Уровень геомеханического риска средний. Работы по формированию отвалов допустимо продолжить при условии разработки противооползневых мероприятий по снижению уровня риска [18—20] и инструментального контроля эффективности принятых мер реагирования.

### **Определение критических деформаций внутреннего отвала «Северный» по экспериментальным данным**

Для установления критических значений скорости смещения отвального массива, расположенного на почве угольного пласта, сложенной алевролитами, проанализированы результаты точных инструментальных наблюдений.

Наблюдения (2018—2020 гг.) проводились по 25 рабочим реперам методом спутникового определения координат геодезической аппаратурой Leica GS14 в режиме «статика» (погрешность определения координат: в плане —  $5 + 0,5$  мм/км, по высоте —  $10 + 0,5$  мм/км) от опорного репера, расположенного на расстоянии 1,1 км. При этом наиболее информативным в части характеристики процесса сдвижения оказался репер Rp 5-3, расположенный на верхнем ярусе отвала (гор. +338 м).

Высота многоярусного отвала, расположенного на наклонном основании ( $\beta \geq 5^\circ$ ), составляла 100—120 м, угол откоса — 20—21°. В отвал складирова-

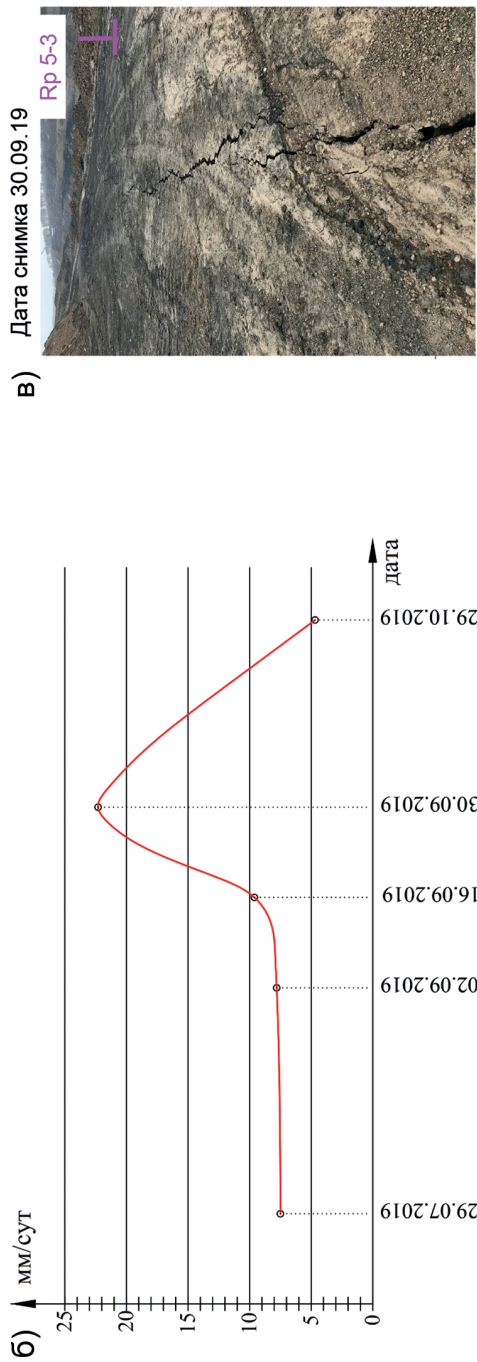
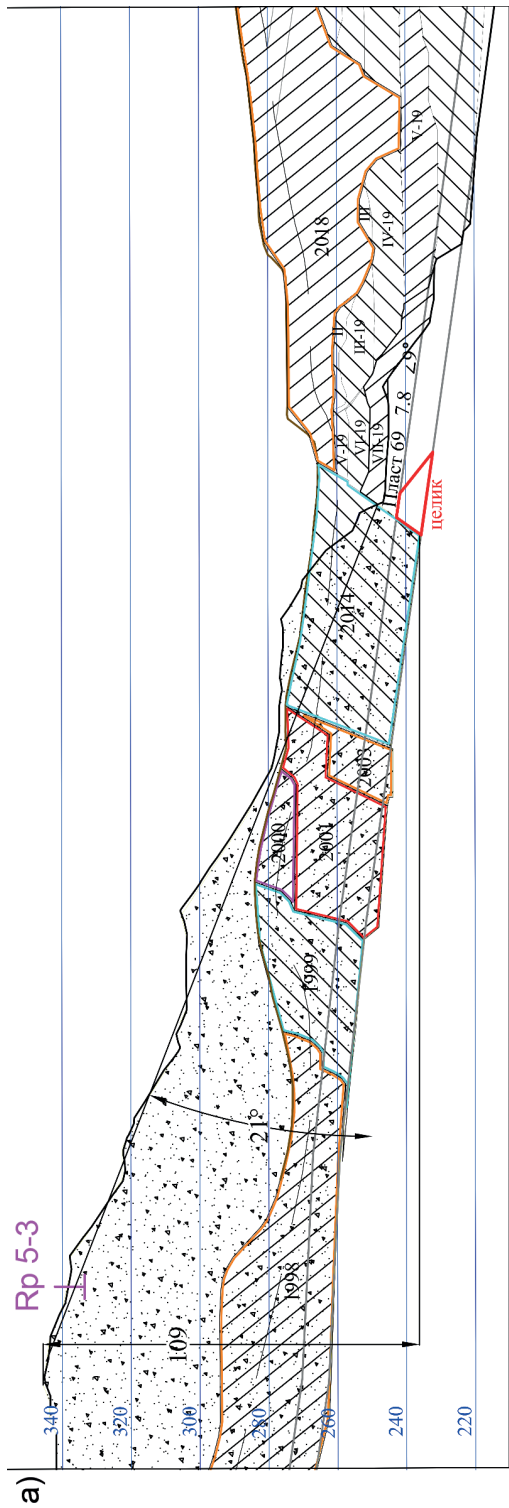


Рис. 7. Внутренний отвал «Северный»: профиль по внутреннему отвалу (а); график смещения полного вектора Rp 5-3 (б); фотоснимок (в)  
 Fig. 7. The Northern internal dump: profile along the inner dump «3-C» (a); full vector displacement graph Rp 5-3 (b); photograph (v)

лась смесь песчано-глинистых и скальных пород (соотношение 20/80%).

В июле 2018 г. горные работы продвинулись к основанию внутреннего отвала, который был расположен поверх планируемых к отработке запасов угля. Для сокращения работ по переэкскавации был оставлен углепородный целик (рис. 7, а).

По мере приближения вскрышных и добычных работ к углепородному целику скорость смещения репера Рр 5-3 увеличивалась, а вектор смещения имел направление в сторону выработанного пространства. При этом визуальные признаки деформаций не наблюдались.

Первые трещины криволинейного очертания с замыканием на откос на верхнем ярусе отвала (рис. 7, б) вблизи рабочего репера Рр 5-3 были обнаружены во время проведения 5-й серии наблюдений — 30.09.2019 (рис. 7, в). Ширина трещин составляла 10 см, скорость полного вектора смещения 22 мм/сут. При остановке работ по формированию отвала отмечалось снижение скорости смещения до 4,7 мм/сут.

Через год на этом же отвале в 700 м от репера Рр 5-3 образовались трещины с раскрытием до 0,5 м (рис. 8).

Скорости смещения за период с мая по август 2020 г. по реперам 2-7 и г-5,

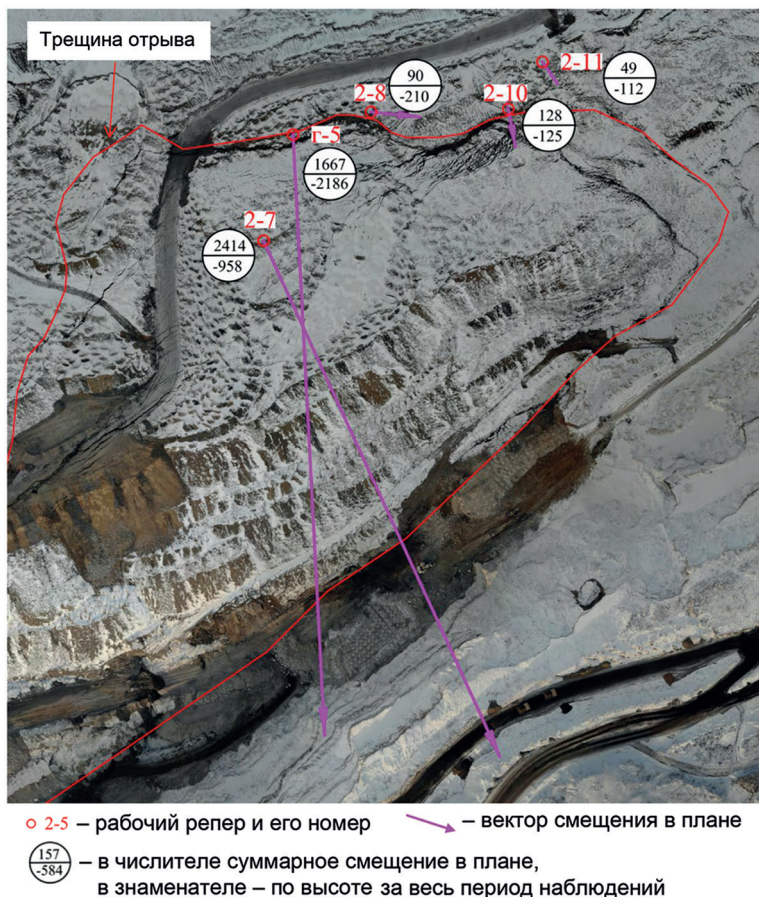


Рис. 8. Ортофотоплан внутреннего отвала «Северный» с положением реперов и векторов смещения  
Fig. 8. Orthophotoplan of Northern internal dump with the position of reference points and displacement vectors

расположенным на верхнем ярусе отвала, активно нарастали и в сентябре достигли значений 86,6 и 91,6 мм/сут соответственно. Руководство предприятия было уведомлено об активной стадии деформации отвала, персонал и оборудование выведены из опасной зоны, горные работы остановлены. В ноябре 2020 г. произошел отрыв призмы обрушения массива. В зоне деформаций за трещиной отрыва оказались реперы наблюдательной станции 2-7 и г-5, в призме возможного обрушения — реперы 2-8, 2-10 и 2-11, до деформации скорости смещения по ним не превышали 7,6 мм/сут.

По результатам инструментальных наблюдений по реперам, размещенным на поверхности отвала «Северный», установлено:

- видимые признаки деформаций отвального массива появились при скорости полного вектора смещения более 20 мм/сут;
- в начальный период смещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях были практически одинаковые, при увеличении плановых смещений в 2 раза по отношению к высотным массив оказался в состоянии предельного равновесия;
- при скорости полного вектора смещения больше 92 мм/сут произошел отрыв массива по трещине, ширина призмы обрушения составляла 100—150 м.

Таким образом, натурными экспериментальными наблюдениями установлено: при скорости полного вектора смещения больше 90 мм/сут, появлении в приоткосной части трещин большой протяженности с замыканием на откос, вертикальных ступенек и нарастающей скорости смещения массива ПТС «отвал — основание» переходит в частично неработоспособное, предаварийное состояние. Уровень геомеханического риска в таком случае высокий. Поэтому

необходимо приостановить работы на участке.

Из опыта эксплуатации ряда отвалов на угольных и рудных месторождениях учеными ВНИМИ было рекомендовано критическое значение скорости смещений, при которой требовалось прекращение работ на отвале и вывод людей и оборудования — 300 мм/сут (Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. — Л.: ВНИМИ, 1987).

Анализ экспериментальных данных показал, что при скорости полного вектора смещения больше 300 мм/сут на ряде отвалов произошли крупные оползни, в результате чего были уничтожены объекты инфраструктуры (ЛЭП, автомобильные и железные дороги, малоэтажные здания), засыпаны оползшей отвальной массой земельные участки, реки и водоемы [1, 3].

Таким образом, основываясь на реальных ситуациях, связанных с отрывом призмы обрушения, можно принять, что недопустимое (аварийное) состояние отвала из смеси песчано-глинистых и скальных (при содержании глинистой фракции не больше 20%) пород, расположенного на наклонном (при условии  $\beta < \varphi$ ) слабом контакте наступает при скорости смещения больше 300 мм/сут.

#### **Определение качественных и количественных критериев оценки аварийного состояния отвала**

На основании опыта эксплуатации отвалов; анализа оползней, произошедших на отвалах в последние годы (2015—2025 гг.), а также с учетом экспериментальных данных по результатам геомеханического мониторинга за состоянием отвалов установлены качественные критериальные показатели (наличие механических повреждений в приоткосной части отвала, характер

**Итоговая оценка состояния ПТС «отвал — основание» по результатам геомеханического мониторинга**  
**Final assessment of the state of the natural-and-technical «dump-foundation» system based on the results of geomехanical monitoring**

Состояние ПТС «отвал—основание»	Работоспособное		Частично работоспособное		Неработоспособное
	исправное	неисправное	предельно допустимое	предаварийное	
Уровень опасности	–	0 – нормальный	1 – ВНИМАНИЕ	2 – ОПАСНО	3 – СТОП
1	2	3	4	5	6
<b>1. Качественные критерии</b>					
Наличие механических повреждений в приоткосной части отвала	отсутствие визуальных признаков деформаций	мелкие (до 10 см) продольные трещины	крупные (больше 10 см) продольные трещины, заколы, просадки	трещины большой протяженности с замыканием на откос, вертикальные ступеньки	отрыв призмы обрушения; локальные оползны
Характер изменения скорости		затухающий	равномерный	нарастающий	
Смещения в горизонтальной плоскости		меньше просадок	равны просадкам	превышают просадки	
2. Действия по результатам анализа инструментальных наблюдений	проводить постоянные визуальные наблюдения	провести контрольные инструментальные наблюдения	уточнить конструкцию НС и периодичность наблюдений	определить границу опасной зоны, сократить срок между сериями наблюдений	перейти на дистанционный контроль в режиме реального времени
<b>3. Количественные критерии</b>					
Средняя скорость ( $V_p$ ) полного вектора смещения ( $\Delta P$ ), мм/сут	$V_p < 13$	$13 < V_p < 20$	$20 < V_p < 90$	$90 < V_p < 300$	$V_p > 300$
Периодичность наблюдений, сут	30	23	15	3	1
4. Уровень геомеханического риска	весьма низкий	низкий	средний	высокий	очень высокий
5. Меры реагирования в соответствии с уровнем геомеханического риска	мероприятия не требуются	разработать противооползневые мероприятия по снижению уровня риска до низкого	приостановить работы на участке	запретить ведение горных работ	

изменения скорости и соотношение смещений в горизонтальной и вертикальной плоскостях), характеризующие уровень опасности в части нарушения устойчивости ПТС «отвал – основание»:

- 2-й уровень **ОПАСНО** – трещины большой протяженности с замыканием на откос, вертикальные ступеньки; нарастающий характер изменения скорости смещения; плановые смещения превышают просадки;

- 3-й уровень **СТОП** – отрыв приемы возможного обрушения, локальные оползни.

Аналитическими расчетами, требованиями нормативных документов к точности определения смещений на отвалах, рекомендациями по их критическим значениям, а также результатами фактических значений смещений, при которых происходило обрушение отвала, установлены также количественные критерии для оценки уровня опасности в части нарушения устойчивости ПТС «отвал – основание» по результатам инструментальных наблюдений – смещения реперов ( $\Delta P$ ), полученные из двух серий измерений за 10 сут при средней скорости полного вектора смещения  $V_p$  мм/сут:

- 2-й уровень – **ОПАСНО** – при  $V_p > 90$  мм/сут;  $\Delta P > 900$  мм;

- 3-й уровень – **СТОП** – при  $V_p > 300$  мм/сут.

Для предупреждения нарушения устойчивости ПТС «отвал – основание» важно выдерживать периодичность наблюдений – интервал между сериями наблюдений, который устанавливается с таким расчетом, чтобы за этот промежуток времени полный вектор смещения массива не достиг критического значения.

Руководствуясь требованиями нормативных документов, научными разработками [15, 21, 22], качественными и количественными критериями, выде-

ляют три состояния ПТС «отвал – основание»:

- работоспособное:
  - исправное;
  - неисправное;
- частично неработоспособное:
  - предельно допустимое;
  - предаварийное;
- недопустимое:
  - аварийное.

Итоговая оценка состояния ПТС «отвал – основание» по уровню опасности и геомеханического риска нарушения устойчивости по результатам натурных наблюдений заключается в сопоставлении фактических показателей с качественными и количественными критериальными значениями и установлении на этой основе периодичности наблюдений и мер реагирования в соответствии с уровнем геомеханического риска (см. таблицу).

### **Выводы**

По результатам многолетних экспериментальных исследований, проводимых авторами на отвалах различных горнодобывающих предприятий, обоснованы критериальные диагностические характеристики уровня геомеханического риска:

- качественные – наличие механических повреждений в приоткосной части отвала, характер изменения скорости и соотношение смещений в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

- количественная – средняя скорость смещения  $V_p$  мм/сут полного вектора в сутки.

Внедрение результатов проведенного исследования в практику геомеханического обеспечения отвалообразования позволит оценивать состояние ПТС «отвал – основание», прогнозировать ее устойчивость и своевременно разрабатывать меры реагирования по предотвращению деформаций на ранней стадии их проявления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кретов С. И., Исмагилов Р. И., Бадтиев Б. П., Шарковский Д. О., Павлович А. А., Свириденко А. С. Организация комплексного мониторинга устойчивости внешних отвалов, сложенных породами с низкой несущей способностью, на слабом основании в условия ПАО «Михайловский ГОК» // Горная промышленность. – 2019. – № 3(145). – С. 15–19.
2. Шевченко Г. Г., Брынь М. Я., Гура Д. А. Геодезический мониторинг зданий и сооружений: монография. – Краснодар: КубГТУ, 2022. – 199 с.
3. Adamcová D., Bartoň S., Osiński P., Pasternak G., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. Analytical modelling of MSW landfill surface displacement based on GNSS monitoring // Sensors. 2020, vol. 20, no. 21, article 5998. DOI: 10.3390/S20215998.
4. Pasternak G., Zaczek-Peplinska J., Pasternak K., Józwiak J., Pasik M., Koda E., Vaverková M. D. Surface monitoring of an MSW landfill based on linear and angular measurements TLS, and LIDAR UAV // Sensors (Basel). 2023, vol. 23, no. 4, article 1847. DOI: 10.3390/s23041847.
5. Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 7. – С. 40–46. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46.
5. Kalyuzhny A. S., Rozanov I. Yu. Causes of pit wall failure in Zhelezny Mine by radar monitoring and stability calculations // Journal of Mining Science. 2024, vol. 60, no. 1, pp. 36–44. DOI: 10.1134/S1062739124010058.
6. Курков М. В., Семенов А. Е., Котов А. А. Применение технологий Геоскан для маркшейдерских работ // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 3. – С. 42–48.
7. Исмагилов Р. И., Захаров А. Г., Бадтиев Б. П., Сенин Н. В., Шариков И. С., Павлович А. А., Шепель А. М. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 26–30.
8. Гусев В. Н., Блищенко А. А., Санникова А. П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 173–179. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
9. Pasternak G., Pasternak K., Koda E., Ogrodnik P. Unmanned aerial vehicle photogrammetry for monitoring the geometric changes of reclaimed landfills // Sensors (Basel). 2024, vol. 24, no. 22, article 7247. DOI: 10.3390/s24227247.
10. Филатов А. В., Калашник А. И., Максимов Д. А. Оценка горизонтальных смещений бортов карьера «Железный» Ковдорского ГОКа с использованием данных спутниковой радиолокационной съемки // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 1. – С. 36–41.
11. Акматов Д. Ж., Николайчук В. В., Тихонов А. А., Шевчук Р. В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за движением земной поверхности // Горная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 144–147.
12. Васильев Ю. В., Филатов А. В. Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 3. – С. 38–45.
13. Бахаева С. П., Ананенко Е. В. Мониторинг природно-технических систем «отвал – основание» // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 6(134). – С. 67–80. DOI: 10.56195/20793332\_2024\_6\_67\_76.
14. Ананенко Е. В., Бахаева С. П. Оценка влияния нагрузок и воздействий на напряженно-деформированное состояние природно-технических систем «отвал – основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_5.
15. Ананенко Е. В., Бахаева С. П. Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал – основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9. – С. 5–21. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_5.
16. Гордеев В. А. Уравнительные вычисления по МНК: монография. – Краснодар: ОО «Издательский Дом – Юг», 2024. – 264 с.
17. Сиводедова М. В., Черепанов П. В. Построение графиков в настольном приложении: интеграция MATPLOTLIB/Россия молодая: Сборник материалов XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2025.

18. Жабко А. В. О причинах и способах предотвращения техногенных катастроф, произошедших вследствие разрушения откосных сооружений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2024. — № 4. — С. 69–85. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-69-85.

19. Kumar A., Nainegali L., Das S. K., Reddy K. R., Mishra A. Slope stabilization of coal mine overburden dumps: life cycle environmental sustainability assessment of alternatives // Environmental Earth Sciences. 2024, vol. 83, no. 385, article 14. DOI: 10.1007/s12665-024-11691-2.

20. Chaturvedi A., Singh G. S. P., Sharma S. K. Stabilization of mine waste dumps through bio-engineering // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2024, vol. 105, pp. 1319–1330. DOI: 10.1007/s40033-023-00524-4.

21. Жабко А. В., Жабко Н. М. Расчет критериев безопасности и критических значений контролируемых показателей при мониторинге безопасности намывных гидротехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-2. — С. 25–38. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_25.

22. Малаханов В. В. Классификация состояний и критерии эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. — 2000. — № 11. — С. 8–14. **МИАБ**

## REFERENCES

1. Kretov S. I., Ismagilov R. I., Badtiev B. P., Sharkovsky D. O., Pavlovich A. A., Sviridenko A. S. Organization of complex monitoring of the stability of external dumps composed of rocks with low bearing capacity, on a weak foundation in the conditions of PJSC Mikhailovskaya Mining and Processing Plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 3(145), pp. 15–19. [In Russ].

2. Shevchenko G. G., Bryn' M. Ya., Gura D. A. *Geodezicheskiy monitoring zdaniy i sooruzheniy: monografiya* [Geodetic monitoring of buildings and structures: monograph], Krasnodar, KubGTU, 2022, 199 p.

3. Adamcová D., Bartoň S., Osiński P., Pasternak G., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. Analytical modelling of MSW landfill surface displacement based on GNSS monitoring. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 21, article 5998. DOI: 10.3390/S20215998.

4. Pasternak G., Zaczek-Peplinska J., Pasternak K., Józwiak J., Pasik M., Koda E., Vaverková M. D. Surface monitoring of an MSW landfill based on linear and angular measurements TLS, and LIDAR UAV. *Sensors (Basel)*. 2023, vol. 23, no. 4, article 1847. DOI: 10.3390/s23041847.

5. Rozanov I. Yu., Zavyalov A. A. Application of IBIS FM radar to pit wall monitoring at Zhelezny open pit mine of Kovdor Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 7, pp. 40–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46.

5. Kalyuzhny A. S., Rozanov I. Yu. Causes of pit wall failure in Zhelezny Mine by radar monitoring and stability calculations. *Journal of Mining Science*. 2024, vol. 60, no. 1, pp. 36–44. DOI: 10.1134/S1062739124010058.

6. Kurkov M. V., Semenov A. E., Kotov A. A. Application of Geoscan technologies for mine surveying operations. *Mine Surveying Bulletin*. 2017, no. 3, pp. 42–48. [In Russ].

7. Ismagilov R. I., Zakharov A. G., Badtiev B. P., Senin N. V., Sharikov I. S., Pavlovich A. A., Shepel A. M. The use of unmanned aerial vehicles for the prompt solution of scientific and industrial tasks in the conditions of the A.V. Varichev Mikhailovsky Mining and Processing Plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 3, pp. 26–30. [In Russ].

8. Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a complex of factors influencing the error of mine surveying of mining objects using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 173–179. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.

9. Pasternak G., Pasternak K., Koda E., Ogrodnik P. Unmanned aerial vehicle photogrammetry for monitoring the geometric changes of reclaimed landfills. *Sensors (Basel)*. 2024, vol. 24, no. 22, article 7247. DOI: 10.3390/s24227247.

10. Filatov A. V., Kalashnik A. I., Maksimov D. A. Evaluation of horizontal displacements of the walls of the Zhelezny open-pit of the Kovdorsky Mining and Processing Plant using satellite radar survey data. *Mine Surveying Bulletin*. 2017, no. 1, pp. 36–41. [In Russ].

11. Akmatov D. Zh., Nikolaychuk V. V., Tikhonov A. A., Shevchuk R. V. Radar in-terferometry as a supplement to classical methods of observing the Earth's surface movement. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 144–147. [In Russ].

12. Vasiliev Yu. V., Filatov A. V. Identification of local deformation zones by radar interferometry based on the results of monitoring at the Samotlor geodynamic testing ground. *Mine Surveying Bulletin*. 2016, no. 3, pp. 38–45. [In Russ].

13. Bakhaeva S. P., Ananenko E. V. Monitoring of natural-and-technical «dump-foundation» systems. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024, no. 6(134), pp. 67–80. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332\_2024\_6\_67\_76.

14. Ananenko E. V., Bakhaeva S. P. Assessment of influence of loads and impacts on stress-strain behavior of natural-technical dump-its foundation system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 10, pp. 5–21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_5.

15. Ananenko E. V., Bakhaeva S. P. Deformation risk analysis and geomechanical monitoring for the natural-technical system of a spoil dump and its foundation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 5–21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_5.

16. Gordeev V. A. *Uravnitel'nye vychisleniya po MNK: monografiya* [OLS equalization calculations: monograph], Krasnodar, 2024, 264 p.

17. Sivodedova M. V., Cherepanov P. V. Plotting in a Desktop Application: MAT-PLOTLIB Integration. *Rossiia molodaya: Sbornik materialov XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Young Russia: Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Kemerovo, 2025.

18. Zhabko A. V. On the causes and methods of preventing man-made disasters that occurred as a result of the destruction of slope structures. *Minerals and Mining Engineering*. 2024, no. 4, pp. 69–85. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-69-85.

19. Kumar A., Nainegali L., Das S. K., Reddy K. R., Mishra A. Slope stabilization of coal mine overburden dumps: life cycle environmental sustainability assessment of alternatives. *Environmental Earth Sciences*. 2024, vol. 83, no. 385, article 14. DOI: 10.1007/s12665-024-11691-2.

20. Chaturvedi A., Singh G. S. P., Sharma S. K. Stabilization of mine waste dumps through bio-engineering. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2024, vol. 105, pp. 1319–1330. DOI: 10.1007/s40033-023-00524-4.

21. Zhabko A. V., Zhabko N. M. Calculation of safety criteria and critical values of controlled indicators during safety monitoring filling hydrotechnical structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11-2, pp. 25–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_25.

22. Malakhanov V. V. Classification of conditions and criteria for operational reliability of hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*. 2000, no. 11, pp. 8–14. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бахаева Светлана Петровна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru,

*Ананенко Елена Владимировна*<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: ananenko\_ev@mail.ru,

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева.

**Для контактов:** Ананенко Е.В., e-mail: ananenko\_ev@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*S.P. Bakhaeva*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: bsp.mdg@kuzstu.ru,

*E.V. Ananenko*<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: ananenko\_ev@mail.ru,

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia.

**Corresponding author:** E.V. Ananenko, e-mail: ananenko\_ev@mail.ru.

Получена редакцией 19.08.2025; получена после рецензии 01.11.2025; принята к печати 17.11.2025.

Received by the editors 19.08.2025; received after the review 01.11.2025; accepted for printing 17.11.2025.