Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 622.1:622.271:528.48

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Sharov P.E. Justification of Mine Surveying Observation Intervals for Open-Pit Slopes Considering Deformation Rates and Measurement Precision

Обоснование периодичности маркшейдерских наблюдений за бортами карьера с учётом скорости деформаций и точности измерений

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme,
Moscow State University, Moscow
Garifulina Irina Yurievna,
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State 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 4 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
Шаров Павел Егорович,
Студент 4 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», г. Магадан

Abstract. *A calculation framework is proposed to separate statistical displacement detectability from a scenario-based upper bound on the interval before mandatory reassessment of an open-pit slope. For two independent epochs with a 1 mm standard deviation of a predefined displacement component, the two-sided significance threshold at a = 0.05 is 2.772 mm, whereas a conservative displacement ensuring at least 95% detection power is 5.098 mm. The lower interval bound depends on deformation rate; the upper bound incorporates acceleration, a displacement allowance, a time reserve and response latency. Four hypothetical scenarios illustrate compatible and incompatible interval bounds. At 3 mm/day and 0.5 mm/day², the feasible range is 1.699–2.218 days; a two-day step meets both assumptions. Increasing measurement uncertainty to 2 mm eliminates this range. At 8 mm/day and 4 mm/day², the upper bound decreases to 16.90 hours. Analytical power is checked using 200,000 simulated observation pairs per scenario. The proposed intervals are not regulatory limits or failure-time forecasts and require site-specific calibration, geomechanical interpretation and an approved monitoring design.*

Keywords: *mine surveying, open-pit slope, monitoring interval, measurement uncertainty, displacement rate, acceleration, minimum detectable displacement, statistical power, early warning.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Аннотация. *Предложена расчётная схема обоснования интервала маркшейдерских наблюдений, разделяющая статистическую обнаружимость смещения и сценарное ограничение времени до обязательного пересмотра состояния борта. Для двух независимых эпох при среднеквадратической погрешности одной проекции положения 1 мм порог значимости при α = 0,05 равен 2,772 мм, тогда как смещение, обеспечивающее мощность не менее 95 %, составляет 5,098 мм. Нижняя граница интервала определяется ожидаемой скоростью, верхняя — сценарием ускорения, резервом смещения, временным запасом и задержкой реагирования. На четырёх модельных сценариях показаны совместимость и конфликт этих ограничений. При скорости 3 мм/сут и ускорении 0,5 мм/сут² расчётное окно составляет 1,699–2,218 сут; условный шаг 2 сут удовлетворяет обоим ограничениям. Увеличение погрешности до 2 мм закрывает это окно. Для сценария 8 мм/сут и 4 мм/сут² верхняя граница сокращается до 16,90 ч. Аналитическая мощность проверена моделированием 200 тыс. пар наблюдений на сценарий. Приведены ограничения применимости: интервалы и резерв смещения не являются нормативами или прогнозом разрушения; метод требует объектовой калибровки и не заменяет проект мониторинга.*

Ключевые слова: *маркшейдерские наблюдения, борт карьера, периодичность мониторинга, точность измерений, скорость смещений, ускорение, минимально обнаружимое смещение, мощность критерия, раннее предупреждение.*

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

Введение

Периодичность наблюдений определяет не только объём полевых работ, но и способность системы мониторинга своевременно зафиксировать изменение поведения прибортового массива. Редкие измерения могут скрывать ускорение между эпохами. Чрезмерно короткие интервалы при недостаточной точности, напротив, создают ряды приращений, сопоставимых с шумом. Эти две проблемы нельзя решить назначением одного универсального календарного шага.

Российская нормативная основа включает Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов, утверждённые приказом Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439. Предлагаемый ниже алгоритм является дополнительным расчётным инструментом и не отменяет требований действующей редакции, проектной документации и объектовых процедур реагирования. Приведённые интервалы не следует принимать за установленные Правилами сроки.

Мустафин и Валькова связывают схему наблюдений с геомеханическим механизмом развития оползня и положением потенциально опасной зоны [1]. Кузин и Филиппов исследуют зависимость выбора геодезического метода и оборудования от скорости оползневого движения и точности определения смещений [2]. Хотя второй пример относится к гидротехническому объекту, постановка вопроса полезна для анализа совместимости чувствительности измерений и динамики процесса; числовые требования не переносятся на карьер автоматически.

В работе Ding и соавторов рассматривается объединение скорости, ускорения и изменений тренда для объектовой системы предупреждения [3]. Masood и соавторы

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сравнивают фильтры временных рядов: сглаживание уменьшает шум, но длинное окно способно задерживать выявление изменения режима [4]. Malekian и соавторы исследуют прогноз по временным рядам обратной и безразмерной обратной скорости [5], а Ren и соавторы — совместное использование нескольких радарных точек [6]. Настоящее исследование не прогнозирует момент обрушения, а рассматривает согласование обнаружимости и горизонта следующего пересмотра.

Методика обработки пространственных наблюдений и межэпохового сравнения инженерного объекта представлена Мустафиным, Зубовым и Васильевым [7]. Шабаров и соавторы объединяют контроль устойчивости опорных реперов, спутниковые определения и корректируемый прогноз смещений [8]. Спутниковые исследования Tang и соавторов [9] и Zheng и соавторов [10] показывают значение пространственного охвата и различие LOS-компоненты и восстановленных компонент движения. Эти работы не устанавливают универсальный календарный интервал для всех методов мониторинга.

Цель статьи — разработать воспроизводимую схему расчёта допустимого окна интервалов, показать влияние точности и ускорения и установить действия при несовместимости ограничений. Методический результат состоит в явном разделении порога статистической значимости, смещения заданной обнаружимости, календарного шага получения данных и окна оценки тренда. Все исходные параметры примера синтетические; натурных наблюдений за конкретным карьером не использовано.

Материалы и методы

Измеряемая величина и модель погрешностей

Рассматривается заранее выбранная скалярная проекция положения репера y вдоль ожидаемого направления деформирования. Направление задаётся до проверки гипотез, исходя из кинематики блока. Нельзя автоматически применять приведённый нормальный критерий к длине трёхмерного вектора: распределение его нормы и число степеней свободы отличаются. Для радиолокатора используется измеренная LOS-компонента, а не полный вектор смещения; переход к нему требует обоснованной геометрической модели [9, 10].

$$y_k = s_k + \varepsilon_k;\ E(\varepsilon_k) = 0;\ Var(\varepsilon_k) = m^2 \quad (1)$$

$$\Delta y_k = y_k - y_{k-1};\ \sigma^2\Delta = m^2k + m^2k - 1 - 2Cov(\varepsilon_k, \varepsilon_{k-1}) \quad (2)$$

s — истинная проекция положения, мм; m — СКП одной эпохи для данной проекции, включая вклад сети и способа определения, а не только паспортную точность прибора. В базовом расчёте эпохи независимы, m одинаково и $\sigma\Delta = \sqrt{2}m$. Коррелированная атмосфера, дрейф исходных пунктов и преобразование координат

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

требуют ковариационной модели. Заявлять независимость без контрольных измерений нельзя.

Порог значимости и мощность обнаружения

$$H_0: \Delta s = 0;\ |\Delta y| > d_\alpha;\ d_\alpha = z_{1-\alpha/2}\sigma\Delta \quad (3)$$

$$\pi(\delta) = 1 - \Phi(z_{1-\alpha/2} - \delta/\sigma\Delta) + \Phi(-z_{1-\alpha/2} - \delta/\sigma\Delta) \quad (4)$$

$$d_{min} = (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})\sigma\Delta \quad (5)$$

Φ — функция стандартного нормального распределения; z — её квантиль; α — вероятность ошибки первого рода для одного сравнения; 1 − β — требуемая мощность обнаружения положительного истинного смещения δ. Формула (5) даёт достаточную, слегка консервативную величину для двустороннего теста: второе слагаемое хвоста в (4) положительно. При заданной известной σΔ это обеспечивает мощность не меньше 1 − β. В настоящей модели риски ложного сигнала и пропуска разделены явно; формулы (3)–(5) выведены для заданных нормальных ошибок и не приписываются конкретному объектному исследованию.

В примере приняты α = β = 0,05: z0,975 = 1,959964; z0,95 = 1,644854. При m = 1 мм получаем σΔ = 1,414214 мм, dα = 2,771808 мм, dmin = 5,097982 мм. Порог 2,772 мм не означает 95%-ную вероятность обнаружения смещения такого размера: мощность при истинном сдвиге, равном порогу, близка к 50 %. При оценке дисперсии по малой выборке вместо фиксированных нормальных квантилей требуется учитывать неопределённость этой оценки.

$$h_{\text{обн}} = \frac{d_{min}}{v_L},\ v_L > 0 \quad (6)$$

vL — нижняя сценарная оценка устойчивой положительной скорости за рассматриваемый интервал. Если ускорение неотрицательно и скорость не ниже vL, формула (6) достаточна для обнаружимости. В числовом эксперименте vL равна заданной скорости, поскольку параметры известны по построению. Для реальных наблюдений подстановка шумной оценки скорости без её интервала неопределённости не обоснована. При vL ≤ 0 нижняя граница по этой формуле не определяется: это не разрешение прекращать измерения.

Верхняя граница по горизонту пересмотра

Вводится резерв приращения R до объектового уровня обязательного пересмотра, а не до момента разрушения. Его определяют после учёта неопределённости текущего положения, геомеханического сценария и установленных проектом критериев. В примере R = 20 мм — произвольное исследовательское допущение. Нельзя считать 20 мм допустимым смещением любого борта.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Положительные vU и aU задают условную верхнюю огибающую будущего приращения, а не автоматически доверительный прогноз.

$$\Delta s_U(\tau) = v_U\tau + \frac{1}{2}a_U\tau^2 \quad (7)$$

$$\tau_R = \frac{2R}{v_U + \sqrt{(v^2U + 2a_UR)}} \quad (8)$$

Формула (8) записана в численно устойчивой форме положительного корня квадратного уравнения. При aU = 0 и vU > 0 она даёт τR = R/vU; при vU = 0 и aU > 0 — √(2R/aU). Если обе величины равны нулю, конечный горизонт этой моделью не определяется и сохраняется проектный календарный предел. Если R ≤ 0, планирование очередного цикла по формуле прекращается и применяется установленная процедура реагирования.

$$h_{max} = min\{h_{\text{пр}}, \gamma\tau_R - t_{\text{зад}}\};\ 0 < \gamma < 1 \quad (9)$$

$$h_{\text{обн}} \le h \le h_{max};\ m_{max} = \frac{v_L h_{max}}{\sqrt{2(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})}} \quad (10)$$

hпр — максимальный интервал, допустимый проектом и принятой программой наблюдений; γ — дополнительный сценарный запас по времени; tзад — сумма задержек измерения, передачи, обработки, проверки, оповещения и реализации предусмотренного действия. Условие h + tзад ≤ γτR учитывает случай неблагоприятного изменения сразу после очередной эпохи, но только при справедливости огибающей (7). В примере γ = 0,5; tзад = 4 ч = 0,166667 сут; hпр = 7 сут. Ни одно из этих значений не является нормативом.

Выражение mmax в (10) применимо к независимым равным эпохам и двухэпоховому тесту. Если hобн > hmax, не следует удлинять паузу до накопления смещения: это нарушило бы верхнее ограничение. Надо повысить точность, изменить измерительную геометрию, использовать дополнительный канал или оценивать тренд по нескольким эпохам при сохранении требуемого шага сбора. Непустое окно не является доказательством безопасности: оно показывает только согласованность двух принятых расчётных требований.

Скорость, ускорение и многоэпоховая обработка

$$\hat{v} = \frac{\Delta y}{h};\ \sigma_v = \frac{\sigma\Delta}{h} \quad (11)$$

$$\hat{a} = \frac{y_k - 2y_{k-1} + y_{k-2}}{h^2};\ \sigma_a = \frac{\sqrt{6}m}{h^2} \quad (12)$$

$$\hat{v}_{LS} = \frac{\sum(t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\sum(t_i - \bar{t})^2};\ \sigma_{v,LS} = \frac{m}{\sqrt{(\sum(t_i - \bar{t})^2)}} \quad (13)$$

Формулы (11)–(13) относятся к независимым равным по точности позициям и, для (12), равному шагу. Соседние приращения с общей эпохой уже не независимы. Формула (13) описывает линейную регрессию с оцениваемым свободным членом и известной m;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

при автокорреляции применяется обобщённый МНК. Окно тренда не равно интервалу сбора: частые измерения можно анализировать и по короткому, и по длинному окну. Длинное окно повышает чувствительность к медленному тренду, но задерживает реакцию на смену режима [4–6].

План вычислительного эксперимента

Таблица 1

Общие сценарные допущения

Параметр	Значение	Статус
Проекция и m	Одна заданная компонента; 1 мм	Не паспортная точность конкретного прибора
Ошибки	Нормальные, независимые эпохи	Проверяемая гипотеза модели
α; β	0,05; 0,05	Для одного теста, не всей сети
Резерв R	20 мм	До уровня пересмотра, не до обрушения
Временной запас γ	0,5	Авторское допущение
Задержка tзад	4 ч	Суммарная для цепочки реагирования
Календарный предел hпр	7 сут	Условный проектный предел
Сценарии (v; a)	(0,2; 0); (1; 0,05); (3; 0,5); (8; 4)	мм/сут; мм/сут², не градации опасности

Таблица 1 фиксирует область интерпретации результатов. Ускорение a задаётся как сценарная верхняя граница на ближайшем горизонте. Оно не объявляется статистически оценённым по трём шумным отсчётам. Для проверки вероятности обнаружения используется консервативное приращение $\delta = vh$ без положительного ускорения; влияние a учитывается в верхнем временном ограничении. Поэтому проверка не смешивает разные предпосылки обнаружения и ограничения ожидания.

$$\Delta y_{sim} = \delta + \varepsilon_2 - \varepsilon_1;\ \hat{\pi}_{MC} = \frac{\sum I(|\Delta y_{sim}| > d_\alpha)}{N} \quad (14)$$

Для каждого сценария сгенерированы 200 000 независимых пар $\varepsilon 1$, $\varepsilon 2 \sim N(0; 1$ мм²); инициализация генератора — 20261022. Это моделирование измерительных ошибок при известной траектории, а не статистика реальных оползней. Для каждого сценария применяется один заранее заданный двухэпоховый тест. Монте-Карло проверяет формулу мощности, но не физическую корректность огибающей или вероятность обрушения.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Результаты

Окно допустимых интервалов

Таблица 2

Результаты расчёта при m = 1 мм

Сценарий: v; a	τR, сут	hобн, сут	hmax, сут	Окно двухэпохового теста
0,2; 0,00	100,000	25,490	7,000	Нет
1,0; 0,05	14,641	5,098	7,000	Есть
3,0; 0,50	4,770	1,699	2,218	Есть
8,0; 4,00	1,742	0,637	0,704	Есть

По таблице 2 при скорости 0,2 мм/сут для 95%-ной обнаружимости одной пары требуется не менее 25,490 сут, тогда как верхний календарный предел равен 7 сут. Это означает недостаточную чувствительность отдельной пары к медленному смещению, а не отсутствие движения и не допустимость паузы 25 суток.

Для остальных сценариев окна непустые, но по мере ускорения становятся узкими.

Рисунок 1 показывает, что повышение точности уменьшает нижнюю границу, не изменяя само заданное геомеханическое ограничение. При ухудшении m доступная зона интервалов может исчезнуть. Влияние точности на уточнение текущего резерва R в этой иллюстрации не моделируется: R фиксирован для выделения одного фактора.

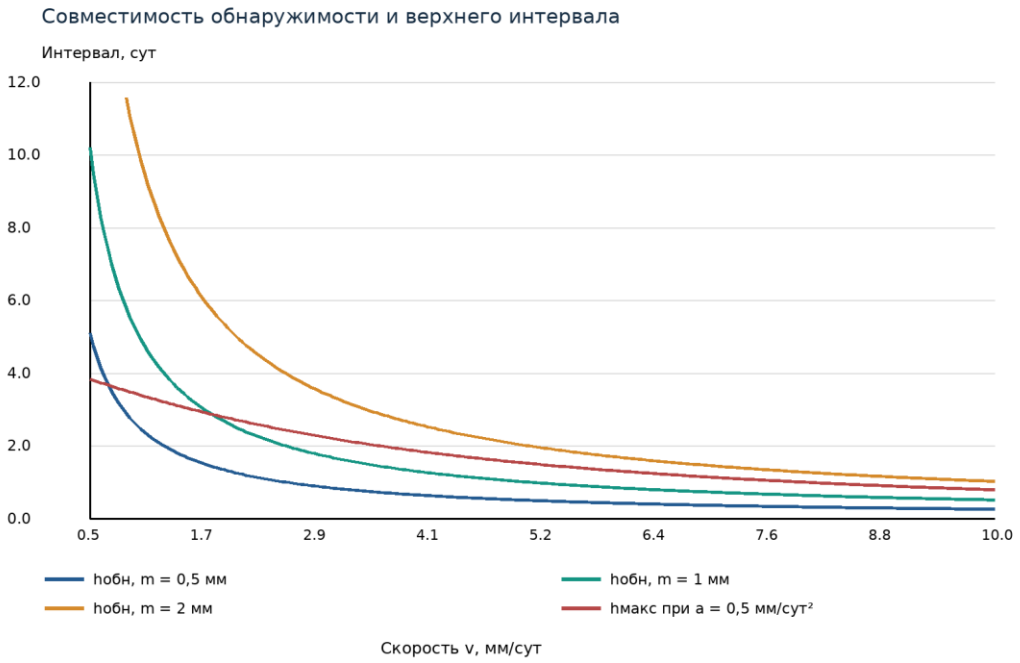


Рисунок 1 — Нижние границы обнаружимости при разной точности и верхняя граница для фиксированного ускорения 0,5 мм/сут².

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

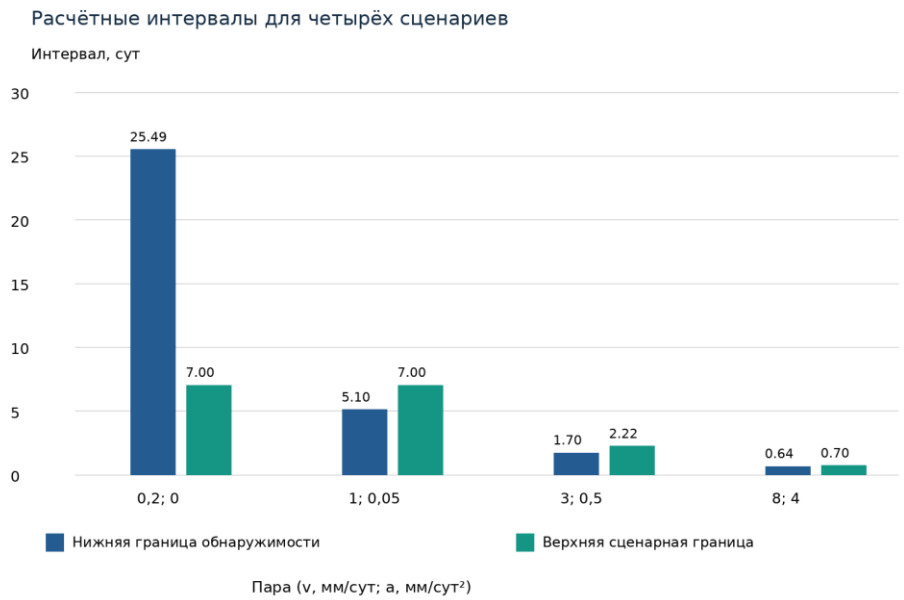


Рисунок 2 — Сопоставление нижней и верхней границ интервала; пары скоростей и ускорений не являются нормативными классами риска.

Рисунок 2 подчёркивает различие между обнаружением медленного тренда и быстрым пересмотром состояния при ускорении. Для сценариев 1; 0,05 и 3; 0,5 приняты демонстрационные шаги 6 и 2 сут; для 8; 4 — 16 ч. Эти значения выбраны внутри расчётного окна и не являются оптимальными или рекомендованными для действующего карьера без объектового обоснования.

Пошаговый расчёт для скорости 3 мм/сут

При m = 1 мм имеем dmin = (1,959964 + 1,644854)√2 = 5,097982 мм. Следовательно, hобн = 5,097982/3 = 1,699327 сут. При aU = 0,5 мм/сут² и R = 20 мм: τR = 40/[3 + √(9 + 20)] = 4,770330 сут. С учётом запаса и задержки hmax = min(7; 0,5 × 4,770330 − 0,166667) = 2,218498 сут.

Шаг h = 2 сут находится внутри интервала.

Минимальное заданное смещение δ = 3 × 2 = 6 мм даёт мощность 98,8775 %. Контроль по верхней огибающей на момент завершения реакции h + tзад = 2,166667 сут даёт приращение 3 × 2,166667 + 0,25 × 2,166667² = 7,673611 мм, меньше заданных 20 мм. Временное условие также выполняется: 2,166667 < γτR = 2,385165 сут.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 3

Проверка выбранных шагов моделированием

v, мм/сут	h, сут	δ = vh, мм	Мощность, %	Монте-Карло, %	СКП МС, п.п.
0,2	7,000	1,400	16,761	16,806	0,084
1,0	6,000	6,000	98,878	98,859	0,024
3,0	2,000	6,000	98,878	98,869	0,024
8,0	0,667	5,333	96,495	96,481	0,041

Таблица 3 показывает согласие аналитики и Монте-Карло в пределах ожидаемой ошибки моделирования.

Для медленного сценария шаг 7 сут обеспечивает только 16,761 % обнаружимости отдельной пары.

Для шагов 6 сут, 2 сут и 16 ч получено 98,878; 98,878 и 96,495 % соответственно по аналитической модели.

Эти проценты относятся исключительно к обнаружению заданного приращения, а не к вероятности своевременной эвакуации или предотвращения аварии.

По рисунку 3 игнорирование ускорения в быстром сценарии даёт $\tau R = 20/8 = 2{,}5$ сут и $h_{max} = 1{,}083333$ сут, или 26,00 ч. При $aU = 4$ мм/сут² получаем $\tau R = 1{,}741657$ сут и $h_{max} = 0{,}704162$ сут, или 16,90 ч. Сокращение верхнего интервала составляет около 35,0 %.

При демонстрационном шаге 16 ч и задержке 4 ч расчётное приращение к завершению реакции равно 8,055556 мм; результат условен относительно постоянной верхней оценки ускорения.

Влияние ускорения и времени реакции

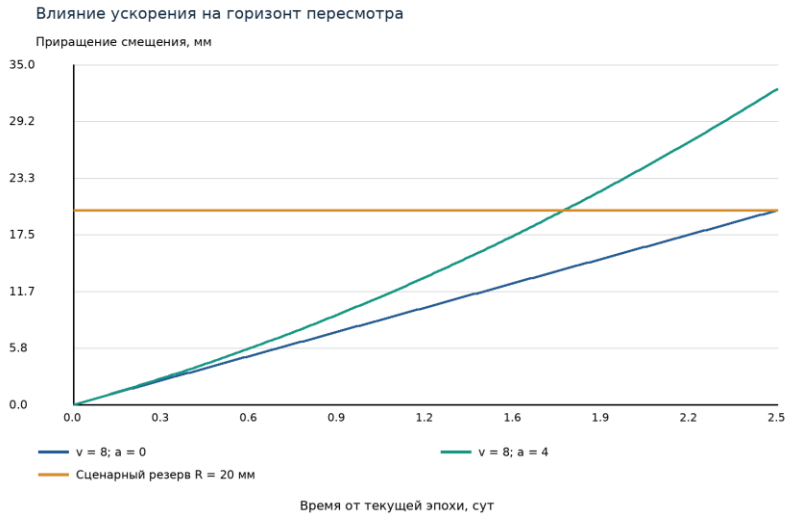


Рисунок 3 — Сценарные траектории при текущей скорости 8 мм/сут; R = 20 мм — условный уровень пересмотра.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 4

Чувствительность быстрого сценария к задержке реакции

tзад, ч	hmax, ч	Совместимость с hобн = 15,294 ч
0	20,900	Есть
4	16,900	Есть
8	12,900	Нет
12	8,900	Нет
24	-3,100	Нет

Из таблицы 4 видно, что при задержке 8 ч верхняя граница около 12,90 ч становится меньше нижней границы обнаружимости 15,294 ч. При 24 ч результат hmax отрицателен: сокращением интервала измерений уже нельзя выполнить заложенное временное условие. Необходим пересмотр всей цепочки получения и использования информации, а не только увеличение числа полевых выездов. Выявленные признаки опасного развития должны отрабатываться по объектовой процедуре без ожидания расчётной даты.

Точность, скорость и альтернативная обработка

Таблица 5

Влияние СКП на обнаружимость при v = 3 мм/сут, aU = 0,5 мм/сут²

m, мм	dα, мм	dmin, мм	hобн, сут	hmax, сут
0,5	1,386	2,549	0,850	2,218
1,0	2,772	5,098	1,699	2,218
2,0	5,544	10,196	3,399	2,218
3,0	8,315	15,294	5,098	2,218

По таблице 5 повышение m с 1 до 2 мм увеличивает hобн с 1,699 до 3,399 сут, тогда как hmax остаётся 2,218 сут при фиксированном R. Пустое окно нельзя устранить удлинением паузы. Максимальная СКП одной эпохи по (10) составляет около 1,306 мм для этого сценария и 1,105 мм для быстрого сценария. Это целевые требования расчётной модели, а не гарантированные возможности конкретного тахеометра или GNSS-приёмника.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

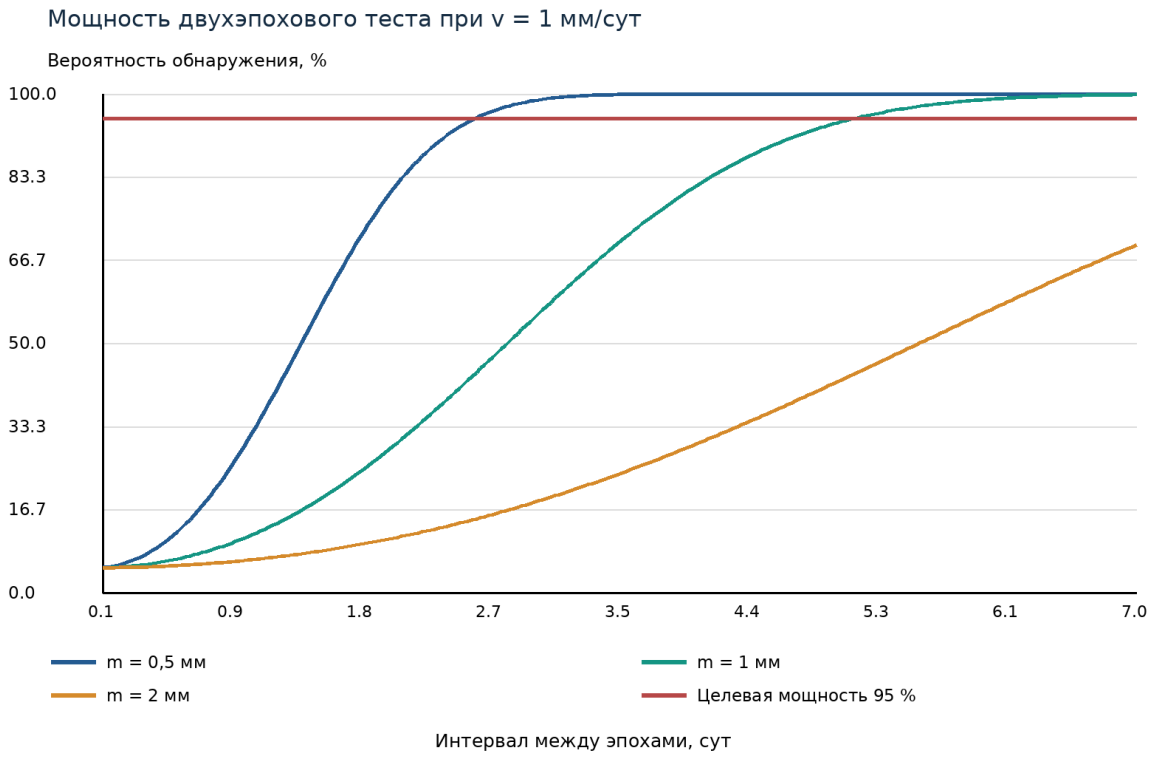


Рисунок 4 — Мощность одного двухэпохового теста при постоянной скорости 1 мм/сут и независимых эпохах. Источник: авторский модельный расчёт.

Рисунок 4 показывает, что суточные измерения с m = 1 мм дают мощность отдельной пары только 10,895 %, а интервал 5 сут — 94,244 %, чуть ниже заданных 95 %. При этом суточный сбор не бесполезен: его данные могут анализироваться многоэпохово. Нельзя путать шаг получения данных с обязательным требованием обнаруживать каждое соседнее приращение.

Для медленного постоянного тренда 0,2 мм/сут пять независимых эпох через 7 сут охватывают 28 суток. Сумма квадратов отклонений времён равна 490 сут²; $\sigma v,LS = 1/\sqrt{490} = 0{,}045175$ мм/сут. Теоретическая мощность теста линейного тренда составляет 99,319 %. Такой результат не разрешает ждать 28 суток при новом ускорении: короткий оперативный канал и контроль причин деформаций сохраняются. Длинное окно пригодно для медленного устойчивого тренда, а не для исключения быстрого изменения режима.

Обсуждение

Главное следствие расчётов — отсутствие единственного «правильного» интервала, зависящего только от скорости. hобн задаёт требование к информативности одной пары, hmax — условный предел ожидания и реакции, а hпр — внешний

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

календарный предел. Большая точность расширяет совместимость требований; ухудшение точности не должно приводить к увеличению опасной паузы. При быстром деформировании даже непустое окно может оказаться непригодным для ручного цикла и потребовать автоматизированного или дополнительного мониторинга [3, 4, 8].

Для практического алгоритма после каждой проверенной эпохи необходимо: подтвердить устойчивость исходных пунктов; оценить качество измеренной проекции и ковариацию; проверить признаки изменения механизма; обновить консервативные vL, vU, aU и R; вычислить границы; выбрать исполнимый шаг не длиннее hmax; проверить время связи и реагирования. При отсутствии обоснованной огибающей, новых трещинах, признаках локального разрушения, резком изменении гидрогеологических условий, взрывном воздействии или отказе канала расчёт не используется как разрешение ждать: применяются более строгие объектовые процедуры.

Оценка скорости сама содержит неопределённость. При m = 1 мм и h = 2 сут СКП двухэпоховой скорости составляет 0,707107 мм/сут, а СКП ускорения по трём эпохам — 0,612372 мм/сут². Поэтому значение 0,5 мм/сут² нельзя считать надёжно установленным по одной второй разности. В статье оно является заданной сценарной границей. В натурном исследовании необходимы более длинный ряд, интервальные оценки параметров, проверка остатков и сопоставление с независимыми признаками. Отдельные границы параметров не образуют автоматически совместную 95%-ную огибающую.

Нормальный тест не устраняет систематические ошибки. Температурные и рефракционные воздействия, смещение опорного пункта, неверная ориентация, потеря закрепления призмы и изменения измерительной геометрии могут имитировать тренд. Коррекция ошибок требует устойчивой основы, контрольных направлений, избыточных наблюдений и независимой верификации. Снижение паспортной СКП прибора без подтверждения качества всей схемы недостаточно. Важность согласования чувствительных зон со сценарием деформирования показана в работе [1].

При сотнях реперов и многократных тестах $\alpha = 0{,}05$ относится только к одному сравнению. Для сети в целом частота ложных сигналов будет иной, а соседние проверки связаны общими эпохами. Следует задавать семейство проверок, учитывать множественность и зависимость, калибровать объектовую процедуру подтверждения. Снижение α уменьшает ложные сигналы, но повышает dmin и может закрыть временное окно. Нельзя объявлять отсутствие статистической значимости доказательством неподвижности борта.

Постоянное ускорение в (7) — локальная аппроксимация; действительный процесс может ускоряться быстрее, ступенчато меняться после взрыва или

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

разрушаться хрупко без длительной измеримой фазы. τR не является прогнозом времени обрушения. При необходимости прогноза по обратной скорости требуется отдельная проверка механизма и чувствительности к фильтрации; высокий коэффициент детерминации сам по себе не гарантирует надёжный срок [4–6]. Объектовые уровни реагирования учитывают геометрию, масштаб и механизм, а не только величину скорости [3, 4].

Для протяжённого борта расчёт выполняется по доменам и реперам с учётом покрытия; различия пространственного охвата наземных и спутниковых методов требуют отдельной оценки [1, 9, 10]. Длинный перерыв в опасной зоне нельзя компенсировать частым измерением соседнего стабильного участка. Номинальная частота автоматической системы должна отличаться от фактически достигнутой: сбои электропитания, связи и обработки увеличивают возраст последнего достоверного результата. Пропуски не заменяются прогнозом под видом измерения; прогнозные значения должны иметь отдельный признак и не подтверждать работоспособность системы.

Практические ограничения исследования: не использованы данные конкретного карьера; не выполнены геомеханическая идентификация и нормативный аудит проекта; не учтены пространственная корреляция, сезонные воздействия и бюджет ошибок времени; не оценены вероятность отказа и фактическая эффективность реагирования. Монте-Карло подтверждает математическую реализацию при принятых нормальных ошибках, но не валидирует реальные пороги безопасности. Для эмпирической статьи необходимы повторные циклы по устойчивым контрольным точкам, полные временные ряды, журналы событий и объектовый план наблюдений.

Выводы

1. Разделены три величины: порог значимости смещения, минимальное приращение заданной обнаружимости и верхний интервал до следующего пересмотра. При $m = 1$ мм, $\alpha = \beta = 0{,}05$ они дают $d\alpha = 2{,}772$ мм и $d_{min} = 5{,}098$ мм; трактовать первое значение как 95%-ную обнаружимость неправильно.

2. Предложено проверять совместимость $h_{обн} \le h \le h_{max}$, где нижняя граница определяется точностью и скоростью, верхняя — локальной огибающей, сценарным резервом, временным запасом и задержкой. При $v = 3$ мм/сут и $aU = 0{,}5$ мм/сут² окно равно 1,699–2,218 сут.

3. В модельных условиях шаг 2 сут обеспечивает мощность 98,878 %; моделирование 200 тыс. пар даёт 98,869 %. Это подтверждение формулы обнаружения, а не вероятности предотвращения аварии.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. При быстром сценарии v = 8 мм/сут, aU = 4 мм/сут² верхняя граница составляет 16,90 ч вместо 26,00 ч без ускорения. Задержка реакции 8 ч делает двухэпоховое окно несовместимым при m = 1 мм. Повышение m до 2 мм также может закрыть окно, что требует изменения измерительной и организационной схемы, а не удлинения паузы.

5. Для медленных трендов допустимо разделять частоту сбора и окно многоэпохового анализа. Все числовые интервалы являются сценарными; применять их на объекте можно только после калибровки, проверки модели и согласования с проектом и процедурами реагирования. Непустое расчётное окно не является доказательством устойчивости борта.

References

1. Мустафин М. Г., Валькова Е. О. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров // Уголь. — 2024. — № 7. — С. 55–61. — DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

2. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Разработка алгоритма выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере Миатлинской ГЭС // Вестник СГУГиТ. — 2023. — Т. 28, № 4. — С. 22–37. — DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-4-22-37.

3. Ding H., Li Q., Zhao L., Qi L., Tang S., Zhang M., Li M., He S. Model and criteria for slope monitoring and early warning in open-pit mines using ground-based real aperture radar // Environmental Earth Sciences. — 2024. — Vol. 83. — Art. 556. — DOI: 10.1007/s12665-024-11863-0.

4. Masood M. M., Verma T., Raju G. Y. Development of a filtered inverse velocity method analyser: A comparative study of smoothing filters in surface mines for optimisation of slope failure predictions // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2025. — Vol. 125, no. 8. — P. 477–484. — DOI: 10.17159/2411-9717/3709/2025.

5. Malekian M., Momayez M., Bellett P., Carrea F., Tennakoon E. Machine Learning for Slope Failure Prediction Based on Inverse Velocity and Dimensionless Inverse Velocity // Mining, Metallurgy & Exploration. — 2023. — Vol. 40. — P. 1557–1566. — DOI: 10.1007/s42461-023-00781-7.

6. Ren Y., Zhang Y., Yu Z., Ma M., Hou S., Ma H. Progressive Landslide Prediction Using an Inverse Velocity Method with Multiple Monitoring Points of Synthetic Aperture Radar // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, no. 13. — Art. 7449. — DOI: 10.3390/app15137449.

7. Mustafin M. G., Zubov A. V., Vasiljev G. E. Deformation estimation procedure for monitoring engineering facilities // Mining Informational and Analytical Bulletin. — 2025. — No. 8. — P. 92–113. — DOI: 10.25018/0236_1493_2025_8_0_92. — (In Russ.).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

8. Шабаров А. Н., Кузин А. А., Филиппов В. Г. Методика маркшейдерско-геодезических наблюдений оползневого процесса склоновой системы на основе данных спутниковых определений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 2. — С. 130–144. — DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_130.

9. Tang W., Motagh M., Zhan W. Monitoring active open-pit mine stability in the Rhenish coalfields of Germany using a coherence-based SBAS method // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2020. — Vol. 93. — Art. 102217. — DOI: 10.1016/j.jag.2020.102217.

10. Zheng Y., Zhao Z., Zeng M., Zhou D., Su X., Liu D. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in the Buzhaoba Open-Pit Mine Based on SBAS-InSAR Technology // Remote Sensing. — 2024. — Vol. 16, no. 22. — Art. 4177. — DOI: 10.3390/rs16224177.