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 622.1:622.271:551.345

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Remizov N.A. Separating Seasonal Movements from Hazardous Deformation of Waste-Dump Slopes in Permafrost Conditions

Разделение сезонных перемещений и опасных деформаций откосов отвалов в условиях многолетнемёрзлых пород

Arno Veronika Vladimirovna
Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
Kolesnichenko Eva Pavlovna
Undergraduate Student, State and Municipal Audit Programme, Higher School of State Audit,
Lomonosov 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.
Remizov Nikita Andreevich,
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и горного дела,
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна
Студентка 4 курса направления подготовки
«Государственный и муниципальный аудит»,
Высшая школа государственного аудита МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
Ломакина Наталья Евгеньевна,
Старший преподаватель кафедры ГиГД
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 4 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *A methodological framework is proposed to distinguish repeatable seasonal movement, background irreversible trends and departures from the established deformation regime of waste-dump slopes in permafrost conditions. A frozen harmonic baseline is compared with a model incorporating an independent, geotechnically assessed control time series. A synthetic three-year dataset contains 157 epochs, with the first 105 reserved for calibration. Four scenarios combine stationary conditions, a 40% increase in seasonal amplitude, additional acceleration, or both changes. Across 1,000 simulations, the illustrative rule of three consecutive positive standardized residuals above 3 is triggered by the amplitude-only scenario in 98.6% of harmonic-model series and in 0 of 1,000 control-model series. This does not imply a zero false-alarm probability in practice. For an additional acceleration of 0.0015 mm/day², the control model has a median detection delay of 105 days, demonstrating limitations rather than an acceptable waiting period. A control series containing the same anomaly can mask it almost entirely. Statistical departures are therefore treated as investigation triggers, not proof of hazardous*

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|

instability. Geotechnical, spatial and thermal-hydrological evidence is required. All calculations are synthetic and do not establish operational thresholds or failure forecasts.

Keywords: *waste dump, permafrost, seasonal movement, frost heave, thaw settlement, irreversible deformation, time series, control site, mine surveying monitoring.*

Аннотация. *Предложена расчётно-методическая схема анализа перемещений откосов отвалов в условиях многолетнемёрзлых пород, разделяющая повторяемый сезонный компонент, фоновый необратимый тренд и отклонение от установленного режима. Сопоставлены замороженная гармоническая модель и модель с независимым геотехнически проверенным контрольным рядом. На трёхлетнем наборе из 157 эпох, из которых первые 105 используются только для калибровки, исследованы неизменный фон, рост сезонной амплитуды на 40 %, дополнительное ускорение и их сочетание. В 1000 реализациях рост амплитуды без ускорения вызывает демонстрационный критерий трёх последовательных превышений у гармонической модели в 98,6 % рядов, у контрольной модели — в 0 из 1000 рядов. Это не нулевая вероятность ошибки в реальных условиях. При дополнительном ускорении 0,0015 мм/сут² медианная задержка контрольной модели составляет 105 суток; столь длительная задержка указывает на ограничения выбранных точности, частоты и критерия, а не на допустимость ожидания. Если контрольный участок полностью содержит ту же аномалию, она практически исчезает из остатка. Статистическая аномалия рассматривается как повод для проверки, а опасность устанавливается по совокупности пространственных, геомеханических и термогидрологических признаков. Все расчёты модельные; прогноз обрушения и проектные пороги безопасности не назначаются.*

Ключевые слова: *отвал, многолетнемёрзлые породы, сезонные перемещения, морозное пучение, оттаивание, необратимые деформации, временные ряды, контрольный участок, маркшейдерский мониторинг.*

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

Введение

В условиях многолетнемёрзлых пород временной ряд перемещений поверхности не равнозначен ряду опасных смещений. Замерзание, оттаивание, миграция воды, уплотнение отсыпанного материала, деградация льдистого основания и гравитационное движение могут накладываться. Одинаковый по величине сдвиг в разные сезоны и в разных частях отвала имеет разную интерпретацию. Ошибка возможна в обе стороны: сезонное изменение принимают за начало потери устойчивости либо реальное накопление необратимых деформаций списывают на повторяемость годового цикла.

Gruber показывает, что пучение и осадка имеют межгодовые, сезонные и более короткие составляющие, а связь с температурой осложняется гидрологическими воздействиями [1]. На материалах внутреннего отвала Wang и соавторы исследуют изменение прочности и деформативности после циклов замерзания–оттаивания при различном увлажнении [2]. Таким образом, даже регулярно повторяющееся воздействие способно изменять свойства материала, и периодичность перемещений не доказывает безопасность.

Chen и соавторы связывают деформации деятельного слоя с фазовыми переходами и водным режимом [3]. Zwieback и Meyer показывают, что позднесезонная осадка в особенно тёплое лето может отражать оттаивание избыточного льда в верхней части мерзлоты [4]. Wang и соавторы [5] и Chen и соавторы [6] разделяют сезонные и

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|

долговременные компоненты по данным InSAR; эти работы относятся преимущественно к природным территориям и инженерным коридорам, поэтому их пороги и амплитуды нельзя переносить на отвал без проверки.

Hu и соавторы демонстрируют возможности многочастотной GNSS-рефлектометрии и отмечают связь летнего поднятия с осадками [7]. Обзор Zwieback и соавторов подчёркивает, что измерения InSAR в мерзлотных условиях содержат сезонные, термокарстовые и склоновые процессы, а также систематические ошибки [8]. Лабораторная работа Li и соавторов показывает накопление остаточных деформаций после циклов промерзания [9]; Zhang и соавторы исследуют ухудшение свойств структурных поверхностей и устойчивости скальных склонов [10]. Скальный склон и рыхлый отвал различаются, поэтому механизмы рассматриваются качественно, без переноса коэффициентов.

Цель статьи — разработать воспроизводимую процедуру выделения сезонно обусловленного фона и проверки остаточного ускорения с учётом погрешностей и риска ошибочного выбора контрольного ряда. Научно-методический результат состоит в сопоставлении двух схем на заранее заданных контрфактических сценариях, количественной оценке их ложных срабатываний и задержек, а также демонстрации маскировки аномалии при движущемся контроле. Работа не заявляет натурную валидацию на конкретном месторождении.

Материалы и методы

Объект интерпретации и независимые признаки опасности

Рассматривается одна заранее выбранная проекция перемещения поверхностного репера вниз по откосу. Температурные деформации также могут иметь компоненту в этом направлении. Геодезическая основа должна быть независимо проверена; сезонно подвижный контрольный грунтовый участок не является исходным опорным пунктом. Высота и угол отвала, мощность мерзлоты и прочность в расчёте не назначаются, поскольку устойчивость по предельному равновесию или численным геомеханическим методам здесь не рассчитывается.

$$y_i = e^T[r_i - r_0] \quad (1)$$

$$y(t) = c + vt + S(t) + D(t) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

e — единичный вектор фиксированной проекции, r — координаты, y — мм. v — фоновая скорость, S — повторяемый или средозависимый компонент, D — дополнительное необратимое изменение режима, ε — ошибка. Фоновый тренд сам может быть связан с уплотнением, ползучестью или деградацией основания. Его включение в модель не означает допустимость такого движения. Остаток D

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|

статистически не отождествляется с опасным скольжением; для этого необходима проверка механизма.

Таблица 1

Различение процессов: статистический признак и инженерная проверка

Процесс	Признак ряда	Что проверять независимо
Сезонное пучение и оттаивание	Повторение фазы; возможное неполное восстановление	Температура грунта, влажность, глубина оттаивания
Уплотнение и долговременная осадка	Фоновый необратимый тренд	Возраст и технология отсыпки, нагрузка, свойства основания
Аномально тёплый или влажный сезон	Изменение амплитуды либо фазы	Термометрия, водный режим, контрольные профили
Изменение механизма деформирования	Остаток, рост скорости, пространственная согласованность	Трещины, уступообразование, инклинометрия, расчёт устойчивости
Ошибка измерения или основы	Скачок, несогласованность независимых каналов	Опорные пункты, ориентация, связь, атмосфера, поверхность отражения

Таблица 1 не является классификатором уровней промышленной опасности. Большая осадка может оказаться локальной консолидацией, а опасное разрушение — развиваться без длительного измеримого предвестника. Общий ряд, его скорость и результаты осмотра сохраняются в параллельном канале независимо от сезонной фильтрации.

Сезонная модель и контрольный ряд

$$H_T(t) = \sum max\{T(\tau) - T_0; 0\}\Delta\tau;\ H_F(t) = \sum max\{T_0 - T(\tau); 0\}\Delta\tau \quad (3)$$

Температурные суммы (3) служат возможными предикторами физически ориентированной сезонной модели, но их коэффициенты требуют местной калибровки; простая зависимость от температуры не охватывает миграцию воды [1, 3, 7]. В вычислительном примере наблюдённых температур нет. Вместо имитации натурной термометрии используются заданные гармоники; поэтому пример проверяет статистическую логику, а не теплофизику отвала.

$$S_H(t) = \sum[b_k sin(k\omega t) + a_k cos(k\omega t)],\ k = 1{,}2;\ \omega = 2\pi/365 \quad (4)$$

$$\hat{y}^H(t) = x^T H(t)\beta^H \quad (5)$$

$$\hat{y}^R(t) = \hat{c} + \hat{v}(t/365) + \hat{\lambda}R(t) \quad (6)$$

Модель H включает свободный член, линейный тренд, годовую и полугодовую гармоники. Модель R использует свободный член, тренд и текущую проекцию перемещения геотехнически проверенного контрольного участка R(t), реагирующего на тот же сезонный фактор, но не содержащего исследуемого дополнительного ускорения. Коэффициенты обеих моделей оцениваются только на калибровочном

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|

периоде и затем фиксируются. Контрольный ряд не берётся из будущего; на текущую дату доступна только текущая синхронная эпоха.

$$\hat{\beta} = (X^{\mathrm{T}}X)^{-1}X^{\mathrm{T}}y;\ s_{cal}^{\ 2} = \frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{n-p};\ V_\beta = s_{cal}^{\ 2}(X^{\mathrm{T}}X)^{-1} \quad (7)$$

В (7) применён МНК с оценкой масштаба по остаткам. Это условная модель, а не доказанная физическая передаточная функция. Контрольный ряд измерен с ошибкой; МНК по шумному предиктору может смещать λ к нулю. В данном примере шум контроля мал относительно сезонного разброса. Для натурной оценки требуются регрессия с ошибками в переменных, инструментальная калибровка или обобщённая модель с ковариацией. Доверительные утверждения на основе обычного МНК без такой проверки ограничены.

Остаток, неопределённость и критерий проверки

$$q(t) = y(t) - \hat{y}(t);\ s_{q,R}^{\ 2} = m_y^{\ 2} + \lambda^2 m_R^{\ 2} + x^{\mathrm{T}}V_\beta x \quad (8)$$

$$Z(t) = \frac{q(t)}{s_q(t)} \quad (9)$$

Для H вместо первых двух слагаемых (8) используется s²cal,H. Для R my = 1,5 мм и mR = 1,0 мм заданы в генераторе данных; независимость текущих ошибок двух каналов принята по построению. Слагаемое xᵀVβx учитывает неопределённость коэффициентов; ошибки предикторов и нелинейные зависимости отражены лишь приближённо. Z используется для сравнительного эксперимента, а не как гарантированно стандартная нормальная статистика всей системы.

$$I_i = 1\{Z_i > 3;\ Z_{i-1} > 3;\ Z_{i-2} > 3\} \quad (10)$$

Критерий (10) — демонстрационное правило трёх последовательных положительных превышений. Направление выбрано заранее; отрицательные скачки также требуют контроля качества и интерпретации. Значение 3 и длина серии не являются нормативными порогами. Из-за общих коэффициентов соседние остатки зависимы; вероятность серии нельзя получать умножением трёх однократных вероятностей. Ни три превышения, ни их отсутствие не устанавливают класс опасности. Для опасных визуальных и геомеханических признаков ожидание серии недопустимо.

$$v_q = \frac{\sum(t_i-\bar{t})(q_i-\bar{q})}{\sum(t_i-\bar{t})^2};\ Var(v_q) = l^{\mathrm{T}}C_q l \quad (11)$$

При оценке остаточной скорости l — вектор весов наклона, Cq — полная ковариация окна. Использование только дисперсии одной эпохи занижает неопределённость, если ошибки фона общие. Окно сглаживания и шаг сбора данных разделяются: длинное окно снижает шум медленного тренда, но способно скрыть начало ускорения. Общий канал контроля перемещений не отключается при сезонной коррекции.

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|

Эксперимент без утечки будущих данных

Таблица 2

Исходные параметры эксперимента

Параметр	Значение	Статус
Эпохи	0, 7, …, 1092 сут; 157 точек	Три модельных года
Калибровка	105 эпох до 730 суток	Без заданного ускорения
Контрольный период	52 эпохи от 735 до 1092 суток	Коэффициенты не переоцениваются
Фон	c = 4 мм; v = 2 мм/год	Необратимый тренд не назван безопасным
Основная гармоника	18 sin[ω(t−40)] + 6 cos[ω(t−40)]	Амплитуда √360 = 18,974 мм
Вторая гармоника	3 sin(2ωt), мм	Асимметрия сезонной формы
Измерительные ошибки	my = 1,5 мм; mR = 1 мм	Нормальные независимые по эпохам и каналам
Начало дополнительного режима	t_0 = 840 сут	Известно только для проверки симуляции
Ускорение	a = 0,0015 мм/сут²	Не параметр конкретного отвала
Изменение амплитуды	Плавный рост до +40 % за 60 суток после t = 730	В обоих рядах — общий сценарный фактор
Генераторы	Пример: seed 20261022; MC: seed 20261023	1000 независимых наборов ошибок

$$S_0(t) = 18sin[\omega(t-40)] + 6cos[\omega(t-40)] + 3sin(2\omega t) \quad (12)$$

$$D(t) = 0{,}5amax(0, t-840)^2 \quad (13)$$

$$m(t) = 1 + 0{,}4clip[(t-730)/60; 0; 1];\ S(t) = m(t)S_0(t) \quad (14)$$

Рассмотрены четыре режима: неизменный фон; дополнительное ускорение; рост сезонной амплитуды без ускорения; совместное изменение. В каждом повторе один и тот же набор ошибок используется для контрфактических режимов, чтобы сравнение не зависело от случайной смены шума. Между 1000 повторами наборы независимы. Пространственный механизм оползня, прочность и коэффициент запаса устойчивости не генерируются; метка «ускорение» не равна метке «аварийно опасный отвал».

$$f_{sig} = \frac{N_{sig}}{N};\ \Delta t_{det} = t_{sig} - t_0 \quad (15)$$

Для режимов без D доля рядов с критерием оценивает ложные срабатывания относительно специально заданной аномалии. В совместном режиме отдельно учитывается сигнал до t_0: он не является обнаружением будущего ускорения. Статистический сигнал, вызванный изменением сезонности, всё равно может потребовать инженерной проверки; термин «ложный» здесь относится к конкретной метке симуляции, а не к отсутствию любых физических последствий.

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

Калибровка и разложение исходного ряда

В демонстрационном наборе для R получены $\hat{c}$ = 4,549671 мм, $\hat{v}$ = 1,414295 мм/год и $\hat{\lambda}$ = 0,991072. СКП параметров по условной МНК-модели равны 0,367562 мм; 0,324497 мм/год и 0,013969. Калибровочное СКО остатка — 1,793394 мм. Отличие $\hat{v}$ от заданных 2 мм/год показывает, что короткая калибровка не восстанавливает медленный тренд точно; коэффициент фона нельзя интерпретировать как достоверный показатель долговременной деградации без более длинного ряда.

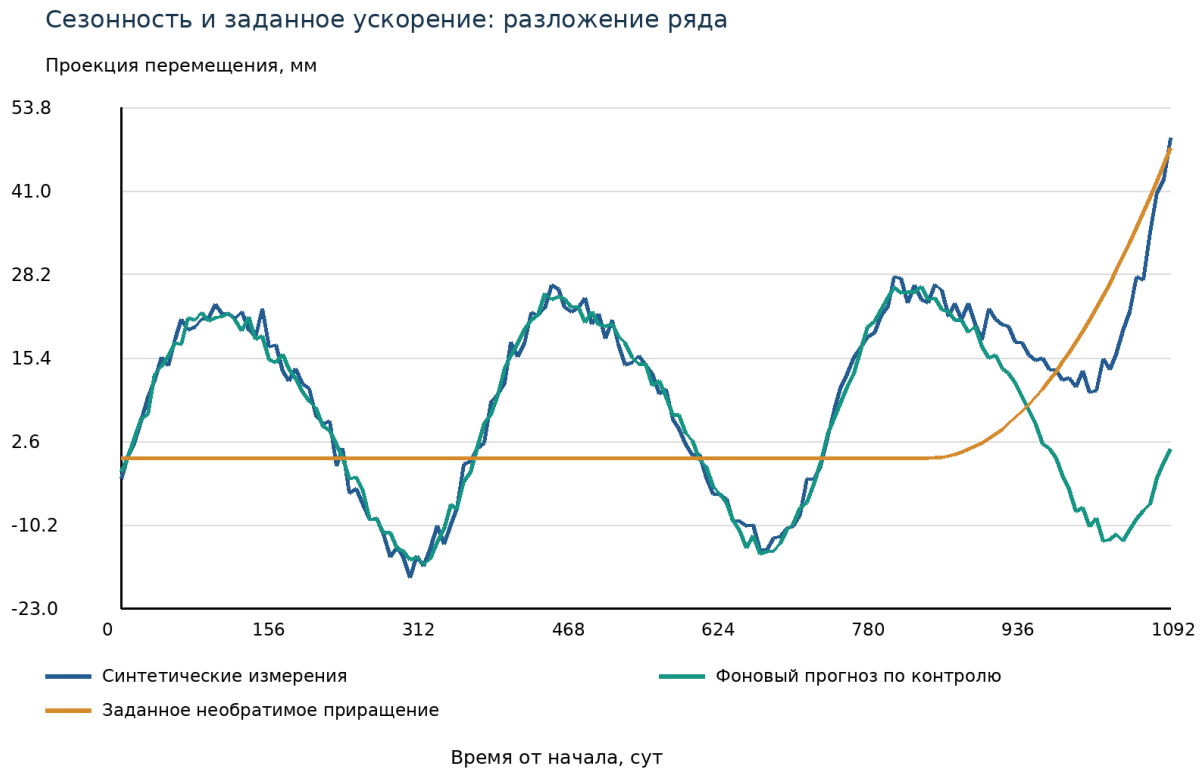


Рисунок 1 — Полный ряд, фоновый прогноз R и заданное дополнительное приращение; пример без роста амплитуды.

На рисунке 1 видны сезонные развороты, фоновое накопление и дополнительный компонент. Сезонный компонент существенно больше раннего D: через 56 суток после t_0 дополнительное приращение равно лишь 2,352 мм. К концу наблюдения оно достигает 47,628 мм. Зрительная оценка полного ряда без разложения может пропустить начало изменения на фоне очередного сезонного хода.

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

Результаты одного набора ошибок: тройной положительный критерий

Сценарий	Первый сигнал H, сут	Первый сигнал R, сут	Эпох ZH > 3 / 52	Эпох ZR > 3 / 52
Неизменный фон	Нет	Нет	0	0
Только ускорение	917	931	28	27
Только рост амплитуды	805	Нет	14	0
Рост амплитуды и ускорение	805 — до t_0	931	42	27

По таблице 3 гармоническая модель раньше фиксирует ускорение в неизменном климатическом режиме, однако при росте амплитуды даёт сигнал до его начала.

Модель R в выбранном примере устойчивее к общему изменению сезонности, но имеет более поздний сигнал.

Число превышающих эпох не равно числу независимых аварийных событий: длинная серия содержит повторные сигналы одного режима.

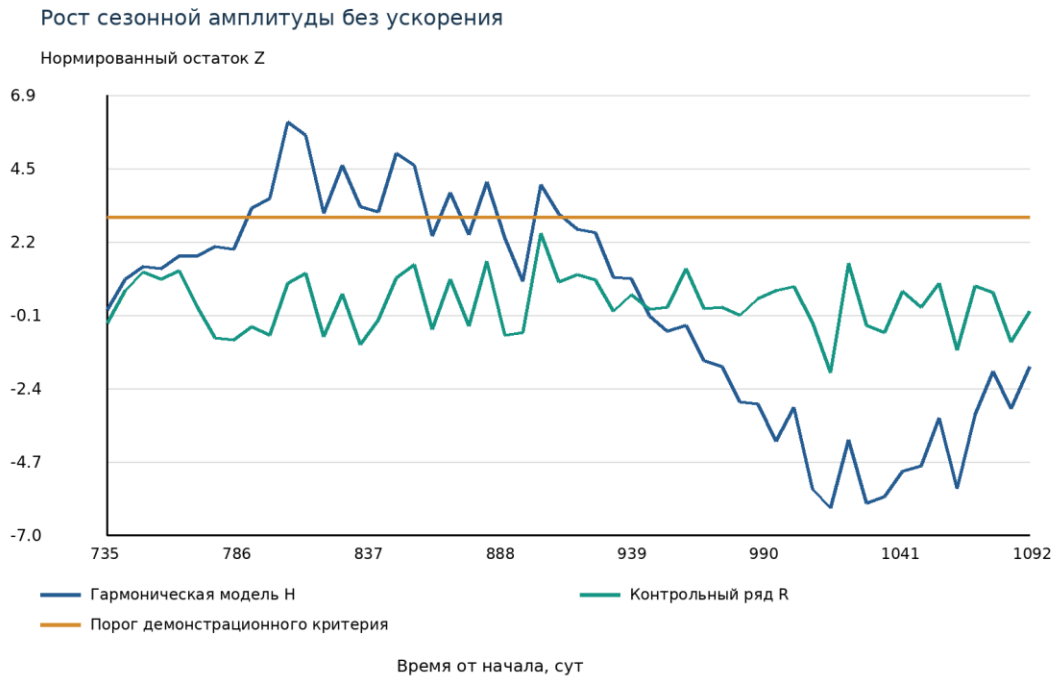


Рисунок 2 — Остатки в сценарии увеличения сезонной амплитуды без дополнительного ускорения.

Рисунок 2 показывает ограничение фиксированного календарного фона: третий год может не повторять первые два.

Контрольная модель корректирует общий сезонный фактор в этом специально согласованном сценарии.

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|

Если фазы, влажность или тепловая инерция контрольного и наблюдаемого участков различаются, такое преимущество не гарантируется; отсутствие сигнала в опыте не заменяет термометрию.

Проверяемый расчёт выделения остатка

Таблица 4

Последовательные эпохи перед первым сигналом R при t_0 = 840 сут

t, сут	qR, мм	sq,R, мм	ZR	Истинное D, мм
903	7,657	1,881	4,070	2,977
910	5,474	1,884	2,905	3,675
917	6,673	1,882	3,547	4,447
924	7,191	1,882	3,821	5,292
931	6,279	1,881	3,338	6,211

По таблице 4 на 903-е сутки ZR = 4,070, но на 910-е сутки ZR = 2,905; поэтому правило серии ещё не выполнено. На 917, 924 и 931-е сутки ZR равен 3,547; 3,821; 3,338. На 931-е сутки y = 19,058503 мм, прогноз R = 12,779663 мм; qR = 6,278841 мм. При sq,R = 1,880804 мм отношение равно 3,338381. Заданное приращение D = 0,5 × 0,0015 × (931−840)² = 6,210750 мм. Первый сигнал серии получен через 91 сутки после t_0.

Задержка 91 сутки — не нормативный срок и не допустимое ожидание на действующем объекте. Она показывает недостаточность демонстрационного недельного шага и выбранного критерия для оперативной защиты при таком сочетании точности и слабого раннего ускорения. Для принятия мер используются более строгие объектовые процедуры и независимые признаки без ожидания этой серии.

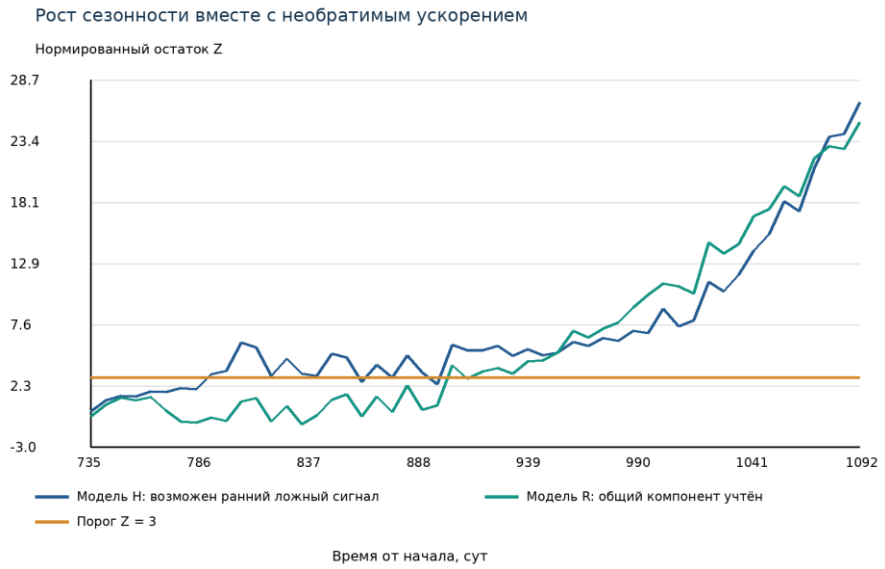


Рисунок 3 — Сравнение Z в совместном сценарии: сигнал H до начала заданного ускорения не считается его обнаружением.

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|

Проверка устойчивости на 1000 реализациях

Таблица 5

Срабатывания за третий год и задержки: 1000 повторов на сценарий

Сценарий	H: рядов с сигналом, %	R: рядов с сигналом, %	H: медиана задержки, сут	R: медиана задержки, сут
Неизменный фон	0,0	0,0	—	—
Только ускорение	100,0	100,0	98	105
Только рост амплитуды	98,6	0,0	—	—
Рост амплитуды + ускорение	100,0	100,0	−35*	105

* В совместном режиме 94,5 % первых сигналов H появляются до t_0. Отрицательная задержка — ложное раннее срабатывание относительно заданного события, а не предсказание будущего. Для R таких сигналов до t_0 в этих 1000 повторах не получено.

Таблица 5 показывает не абсолютное превосходство метода, а обмен между устойчивостью к изменению сезонности и задержкой обнаружения. В 1000 симуляциях медианная задержка R составляет 105 суток. Доля 100 % означает получение критерия до конца заданного горизонта, а не вероятность предотвращения обрушения. Ошибки независимы и нормально распределены только по построению эксперимента; реальный шум может быть существенно сложнее.

$$p^U = 1 - \alpha^{1/N};\ N = 1000;\ \alpha = 0{,}05 \quad (16)$$

Для нуля ложных срабатываний из 1000 независимых повторов односторонняя точная верхняя 95%-ная биномиальная граница по (16) равна около 0,299 %. Даже этот предел относится только к заданному генератору ошибок и общему сезонному отклику. Перенос его на предприятие без валидации не обоснован.

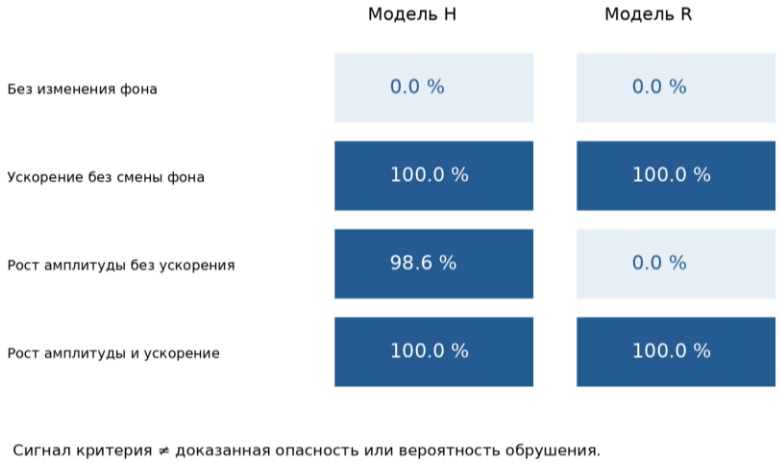


Рисунок 4 — Доля рядов с демонстрационным критерием; без разделения причин этот показатель не является точностью диагностики опасности.

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|

Проверка контрольного участка на загрязнение аномалией

$$R_{bad}(t) = R(t) + fD(t);\ q(t) \approx (1 - \lambda f)D(t) + \varepsilon'(t) \quad (17)$$

Таблица 6

Маскировка дополнительного движения в одном демонстрационном ряду

Доля D в контроле f	Первый сигнал R, сут	Задержка, сут	Остаток в конце, мм
0,00	931	91	47,697
0,25	952	112	35,896
0,50	973	133	24,096
1,00	Нет	—	0,494

По таблице 6 добавление 25 и 50 % того же D в контрольный ряд увеличивает задержку с 91 до 112 и 133 суток. При f = 1 сигнал исчезает, а конечный остаток составляет лишь 0,494 мм вместо 47,697 мм при независимом контроле. Это главный риск автоматического «вычитания сезонности»: участок с тем же механизмом движения может маскировать реальную аномалию. Глубокий опорный пункт, контрольный термогидрологический профиль и наблюдаемый откос должны иметь разные функции.



Рисунок 5 — Ослабление аномалии при включении части D в контрольный ряд; прочие параметры фиксированы.

Обсуждение

Сезонность — описание временной структуры, а не механическое оправдание перемещений. Повторное замерзание не обязательно восстанавливает структуру и прочность материала; лабораторные исследования отвальных грунтов и скальных образцов показывают изменение свойств и накопление остаточных деформаций [2, 9,

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|

10]. Если таяние избыточного льда даёт необратимую позднесезонную осадку, её нельзя целиком удалить как «обычное летнее движение» [4].

В данной постановке модель R работает хорошо при общей форме сезонного воздействия, а именно это допущение является её сильной предпосылкой. Реальные откосы различаются экспозицией, гранулометрией, снегозадержанием, водоснабжением, мощностью деятельного слоя и свойствами основания. Поэтому подбор контроля выполняется по термогидрологическому сходству и геотехнической независимости, а не по максимальной корреляции временных рядов. Высокая корреляция может возникнуть и от общего опасного механизма.

Модель H также не следует отвергать: при стабильной форме сезона она интерпретируема и не требует отдельного перемещающегося контроля. Её недостаток в опыте — фиксация амплитуды по первым двум годам. Более гибкая температурно-влажностная модель может уменьшить число ложных отклонений, однако её калибровка требует действительных измерений и проверки задержек; Gruber [1], Chen и соавторы [3] и Hu и соавторы [7] показывают, почему одна температура недостаточна. Ни одна сезонная модель не должна переобучаться на подозрительном участке без независимого решения: иначе D может быть поглощён обновлённым фоном.

Начальный двухлетний период принят без события только в симуляции. Для натурного объекта нельзя объявлять его «безопасным» по отсутствию зарегистрированного обрушения. Он мог содержать медленную ползучесть, изменение нагрузки или раннюю деградацию. Фон v должен анализироваться отдельно; выделение остатка относительно v не делает этот фон допустимым. Если исходная модель строится на уже деформирующемся режиме, отклонение q может оставаться малым при неблагоприятной абсолютной скорости.

Одна проекция не разделяет осадку, смещение вниз по откосу и изменение положения исходной основы. Для наземных наблюдений необходимы пространственные координаты и контрольные направления; для InSAR — учёт LOS-геометрии, растительности, снега, влажностной фазы и стабильности отражателя [5, 6, 8]. При переходе к TLS сравнение облаков должно включать погрешности регистрации и устойчивость контрольных поверхностей. Универсальный порог из одного метода нельзя переносить на другой.

Отличать опасное развитие следует по согласованным данным: устойчивому росту остаточной и общей скорости, изменению её направления, пространственной связанности соседних реперов, появлению трещин и уступов, поведению глубинных датчиков и давления воды, данным температурного профиля и расчётной геомеханической модели. Даже такой набор не образует универсального логического

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|

условия аварии. Уровни реагирования назначаются проектом и ответственными специалистами; сигнал модели лишь инициирует проверку, а явные признаки угрозы не ждут статистического подтверждения.

Значения Z = 3 и три последовательных эпохи выбраны для демонстрации. Они не оптимизированы по ущербу и времени реакции; семейная частота ложных сигналов для сотен реперов не оценена. Ковариация общих параметров, пропуски, выбросы и автокорреляция могут менять частоту и длительность серий. Оценка по Монте-Карло проверяет поведение заданного алгоритма на заданном шуме, а не устанавливает переносимую эксплуатационную надёжность.

Нарастание сезонной амплитуды на 40 % в модели специально не приводит к D, что позволяет измерить ошибку атрибуции. На реальном отвале потепление или увеличение увлажнения одновременно способны усиливать обратимые движения, деградацию основания и потерю прочности. Поэтому «ложный относительно D» сигнал может быть полезным инженерным предупреждением. Удаление климатической компоненты из сигнала без оценки её воздействия на устойчивость опасно концептуально, даже если статистический остаток уменьшается.

Ограничения: не использованы натурные наблюдения, не определены тепловые свойства и льдистость основания, не рассчитаны коэффициент устойчивости и глубина поверхности скольжения, не учтены изменение отсыпки и пространственная корреляция. Межканальная связь задана упрощённо, а ошибки предиктора не полностью учтены в условной МНК-ковариации. Для апробации необходимы многолетний архив координат, термометрия, влажность и уровни воды, история нагрузок, реперная основа и независимый журнал геотехнических событий. Изученные природные мерзлотные территории [1, 3–8] и скальные склоны [9, 10] не заменяют данные по конкретному рыхлому отвалу.

Выводы

1. Предложена схема разделения сезонного фона, фонового необратимого тренда и дополнительного изменения режима. Ни сезонность, ни статистический остаток сами по себе не определяют опасность: необходимы независимые пространственные и геомеханические признаки.

2. В опыте изменение амплитуды на 40 % вызывает тройной положительный критерий у фиксированной гармонической модели в 98,6 % из 1000 рядов без заданного ускорения. Модель с геотехнически независимым общим контролем не даёт такого сигнала в этих повторах; нулевая выборочная частота не равна нулевому риску.

3. В демонстрационном ряду заданное ускорение 0,0015 мм/сут² выделяется моделью R на 931-е сутки, через 91 сутки после начала. В 1000 повторах медианная

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|

задержка равна 105 суткам. Это ограничение выбранной схемы, а не допустимый срок ожидания при угрозе.

4. При включении 25 и 50 % аномального движения в контроль задержка возрастает до 112 и 133 суток; при 100 % аномалия маскируется. Контрольный ряд и исходная геодезическая основа должны проверяться независимо, а общий ряд перемещений сохраняться без фильтрации.

5. Метод пригоден как расчётная основа для объектовой апробации, но не устанавливает нормативных скоростей, сезонных допусков и критериев обрушения. Его практическая реализация требует калибровки термогидрологической модели, оценки ковариаций и согласования с проектом мониторинга.

References

1. Gruber S. Ground subsidence and heave over permafrost: hourly time series reveal interannual, seasonal and shorter-term movement caused by freezing, thawing and water movement // The Cryosphere. — 2020. — Vol. 14. — P. 1437–1447. — DOI: 10.5194/tc-14-1437-2020.

2. Wang X., Li S., Sun Y., Zhang C., Liu G. Influence of freeze–thaw cycling on the soil mechanical properties of open-pit mine dump under different moisture contents // Environmental Earth Sciences. — 2021. — Vol. 80. — Art. 279. — DOI: 10.1007/s12665-021-09592-9.

3. Chen J., Wu Y., O'Connor M., Cardenas M. B., Schaefer K., Michaelides R., Kling G. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR // Remote Sensing of Environment. — 2020. — Vol. 248. — Art. 112007. — DOI: 10.1016/j.rse.2020.112007.

4. Zwieback S., Meyer F. J. Top-of-permafrost ground ice indicated by remotely sensed late-season subsidence // The Cryosphere. — 2021. — Vol. 15. — P. 2041–2055. — DOI: 10.5194/tc-15-2041-2021.

5. Wang J., Wang C., Zhang H., Tang Y., Duan W., Dong L. Freeze-Thaw Deformation Cycles and Temporal-Spatial Distribution of Permafrost along the Qinghai–Tibet Railway Using Multitrack InSAR Processing // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 23. — Art. 4744. — DOI: 10.3390/rs13234744.

6. Chen J., Wu T., Zou D., Liu L., Wu X., Gong W., Zhu X., Li R., Hao J., Hu G., Pang Q., Zhang J., Yang S. Magnitudes and patterns of large-scale permafrost ground deformation revealed by Sentinel-1 InSAR on the central Qinghai-Tibet Plateau // Remote Sensing of Environment. — 2022. — Vol. 268. — Art. 112778. — DOI: 10.1016/j.rse.2021.112778.

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|

7. Hu Y., Wang J., Li Z., Peng J. Ground surface elevation changes over permafrost areas revealed by multiple GNSS interferometric reflectometry // Journal of Geodesy. — 2022. — Vol. 96. — Art. 56. — DOI: 10.1007/s00190-022-01646-5.

8. Zwieback S., Liu L., Rouyet L., Short N., Strozzi T. Advances in InSAR Analysis of Permafrost Terrain // Permafrost and Periglacial Processes. — 2024. — Vol. 35, no. 4. — P. 544–556. — DOI: 10.1002/ppp.2248.

9. Li C., Zhang R.-t., Zhu J.-b., Lu B., Shen X.-k., Wang X.-w., Liu J.-s., Wu L.-l., Zhang X.-z. Mechanism of progressive failure of a slope with a steep joint under the action of freezing and thawing: model test // Journal of Mountain Science. — 2022. — Vol. 19. — P. 2999–3012. — DOI: 10.1007/s11629-021-7280-7.

10. Zhang P., Bai Y., Meng L., Yan W., Hou J., Yang T. The freeze-thaw weakening of rock structural planes on slope stability: effects of cycle numbers and burial depth // Geomatics, Natural Hazards and Risk. — 2025. — Vol. 16, no. 1. — Art. 2578646. — DOI: 10.1080/19475705.2025.2578646.