ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 9

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 8

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРУШЕНИЙ В ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ

Махмонов Максуд Раббанокулович
Навоийский государственный горно-технологический университет,
Усмонов Фирдавс Розимурод угли
Азиатский международный университет

Аннотация. Разрушение (оползание) бортов (склонов) в открытых карьерах представляет собой серьёзную производственную и проблему безопасности. Это подчёркивает необходимость внедрения эффективных систем мониторинга устойчивости, позволяющих своевременно выявлять опасности, принимать соответствующие меры и снижать риски. В данной систематической работе комплексно обобщены существующие и развивающиеся методы и технологии мониторинга устойчивости бортов в открытых карьерах. К ним относятся методы дистанционного зондирования, методы измерений in situ, а также передовые технологии, такие как искусственный интеллект (AI) и беспроводные сенсорные сети (WSN). Настоящее исследование формирует систематизированную базу знаний о методах, технологиях и технических средствах мониторинга устойчивости бортов в открытых карьерах и служит методической основой для разработки интегрированных, экономически эффективных и масштабируемых систем мониторинга, повышающих безопасность горных работ и эффективность производства.

Ключевые слова: горное дело; мониторинг устойчивости бортов (склонов); дистанционное зондирование; искусственный интеллект; автоматизация; датчики.

Annotatsiya: Ochiq konlarda yonbag‘ir (bort)larning buzilishi (ko‘chishi) muhim ishlab chiqarish va xavfsizlik muammolarini keltirib chiqaradi. Bu esa xavflarni erta aniqlash, o‘z vaqtida choralar ko‘rish hamda xavflarni kamaytirish imkonini beruvchi samarali barqarorlik monitoringi tizimlarini joriy etish zarurligini ta’kidlaydi. Mazkur tizimli sharh ochiq konlarda yonbag‘ir barqarorligini monitoring qilishda qo‘llanilayotgan mavjud va rivojlanayotgan usul hamda texnologiyalarni kompleks tarzda umumlashtiradi. Ular qatoriga masofadan zondlash usullari, joyida (in situ) o‘lchash usullari, shuningdek, sun’iy intellekt (AI), simsiz sensor tarmoqlari (WSN) kabi ilg‘or texnologiyalar kiradi.Mazkur tadqiqot ochiq konlarda yonbag‘ir barqarorligini monitoring qilish usullari, texnologiyalari va texnikalariga oid tizimlashtirilgan bilimlar bazasini taqdim etib, kon xavfsizligi va ishlab chiqarish samaradorligini oshiruvchi integratsiyalashgan,

ISSN 3030-3907

iqtisodiy jihatdan maqbul va kengaytiriladigan monitoring tizimlarini ishlab chiqishda metodik asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: konchilik; yonbag‘ir (bort) barqarorligini monitoring qilish; masofadan zondlash; sun’iy intellekt; avtomatlashtirish; sensorlar

Abstract. Slope (bench) failures in open-pit mines pose significant production and safety challenges. This highlights the necessity of implementing effective stability monitoring systems that enable early detection of hazards, timely intervention, and risk reduction. This systematic review comprehensively summarizes the existing and emerging methods and technologies used for monitoring slope stability in open-pit mines. These include remote sensing techniques, in situ measurement methods, as well as advanced technologies such as artificial intelligence (AI) and wireless sensor networks (WSN). This study provides a systematized knowledge base on methods, technologies, and technical tools for monitoring slope stability in open-pit mines and serves as a methodological foundation for developing integrated, cost-effective, and scalable monitoring systems that enhance mining safety and operational efficiency.

Keywords: mining; slope (bench) stability monitoring; remote sensing; artificial intelligence; automation; sensors.

ВВЕДЕНИЕ.

Открытая разработка месторождений является одним из ключевых направлений ресурсного сектора Узбекистана, обеспечивающим добычу таких ценных полезных ископаемых, как уголь и золото. Открытые карьеры, как правило, формируются в виде поэтапно разрабатываемой системы уступов (карьерных ступеней), углубляющихся в недра, при этом транспортные пути обеспечивают доступ от поверхности до дна карьера (рис. 1).

Формируемые борта карьера или откосы зачастую характеризуются значительной крутизной и геотехнической сложностью и, вследствие наличия в массиве горных пород геологических дисконтиностей — таких как трещины, плоскости напластования и разломы — являются по своей природе неустойчивыми. Указанные структуры выступают в качестве плоскостей ослабления в массиве пород, создавая потенциальные условия для разрушения (смещения) откосов [1].

ISSN 3030-3907

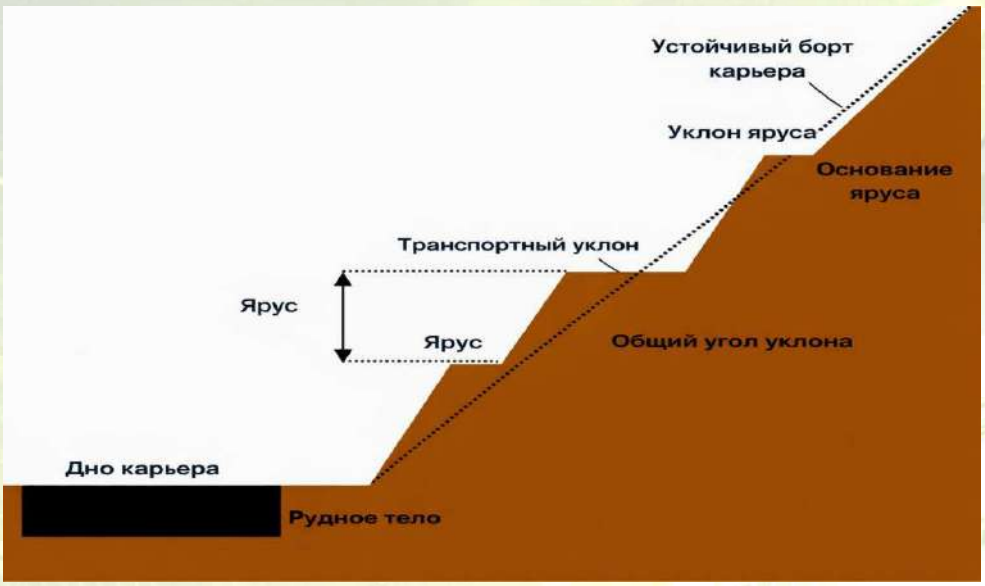


Рисунок 1. Схематическое изображение поперечного сечения борта открытого карьера.

Разрушения откосов могут происходить под воздействием широкого спектра внутренних и внешних факторов. К внутренним факторам относятся геологические дисконтиности, слабый массив горных пород и процессы выветривания, которые снижают естественную прочность откоса. Внешние факторы включают: инфильтрацию воды вследствие интенсивных осадков и изменение уровня подземных вод, что приводит к увеличению порового давления и снижению сопротивления сдвигу; сейсмическую активность, вызывающую колебания в массиве горных пород и нарушающую его устойчивость; а также техногенные воздействия, возникающие в результате горных работ, таких как взрывные и выемочные работы, которые могут подрезать откос снизу или нарушать его равновесие за счёт перегрузки, вызывая смещение [3,4].

Как показано на рисунке 2, под воздействием вышеуказанных факторов в открытых карьерах могут возникать следующие четыре основных механизма разрушения откосов:

1. **Плоскостное скольжение** — характеризуется перемещением значительной части борта карьера вдоль плоской поверхности. Обычно контролируется существующими дисконтиностями, такими как плоскости напластования, трещины или разломы [5];

2. **Клиновидное разрушение** — наиболее распространённый и опасный тип разрушения в открытых карьерах, при котором клиновидный блок горных пород, образованный пересечением двух структурных плоскостей, под действием силы тяжести или внешних факторов отделяется и смещается вниз [6];

ISSN 3030-3907

3. **Круговое (ротационное) разрушение** — при котором масса горных пород перемещается по криволинейной (округлой) поверхности скольжения. Данный тип характерен для однородных (гомогенных) материалов, таких как связные грунты или выветрелые горные породы [7];

4. **Опрокидывание** — тип разрушения, связанный с опрокидыванием вертикально ориентированных столбов или блоков горных пород под действием силы тяжести, подрезки основания, инфильтрации воды или сейсмических воздействий [8].

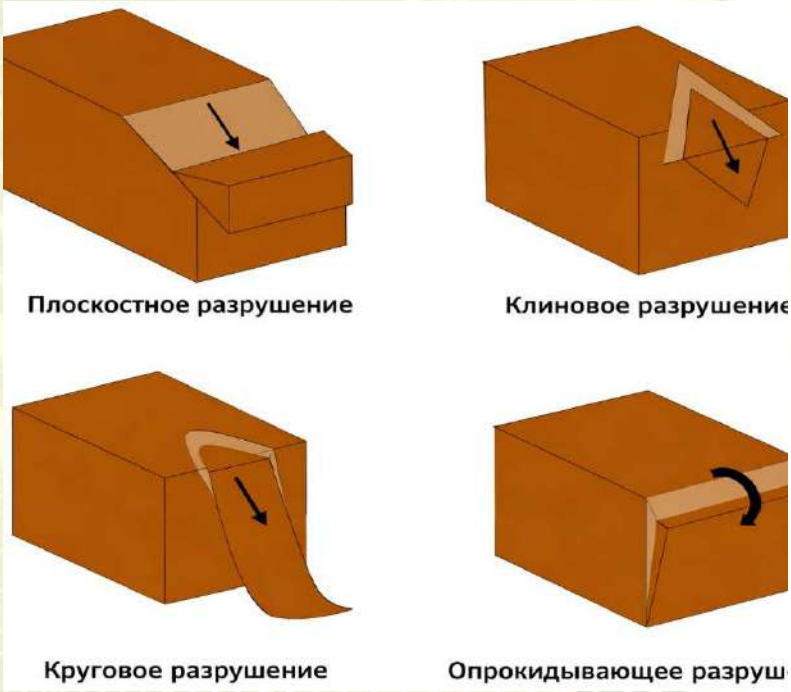


Рисунок 2. Виды механизмов разрушения откосов: плоскостное скольжение (вверху слева), клиновидное разрушение (вверху справа), круговое (ротационное) разрушение (внизу слева) и опрокидывание (внизу справа).

Учитывая указанные риски, эффективный мониторинг устойчивости откосов имеет ключевое значение для обеспечения безопасности горных работ и непрерывности производственного процесса. Основной целью мониторинга откосов является определение и отслеживание скорости их смещения, поскольку увеличение скорости смещения, как правило, является основным признаком приближающегося разрушения. Известно, что разрушения откосов в большинстве случаев происходят не внезапно, а являются результатом постепенного накопления деформаций и смещений во времени. В связи с этим раннее выявление начальных признаков разрушения позволяет горным инженерам своевременно принимать меры и снижать риски [1].

ISSN 3030-3907

Методы мониторинга откосов, в зависимости от способа сбора данных, как правило, подразделяются на следующие основные категории:

1. **Подповерхностный мониторинг** — позволяет измерять смещения, происходящие на глубине в ослабленных слоях откосов открытых карьеров;

2. **Наземный мониторинг** — направлен на выявление визуально наблюдаемых признаков неустойчивости, а также количественную оценку деформаций и смещений на поверхности.

Традиционные методы мониторинга откосов на протяжении длительного времени основывались на применении геотехнических приборов и геодезических измерений для выявления смещений. Несмотря на то, что технологический прогресс существенно усовершенствовал данные процессы, целостная системная картина методов мониторинга устойчивости откосов в открытых карьерах до сих пор окончательно не сформирована. Это объясняется недостатком научных обзоров, содержащих критический анализ как существующих, так и новых методов [4]. В связи с этим возникает необходимость проведения систематического анализа с целью структурирования имеющихся исследований, объективной оценки существующих методов и выявления пробелов для дальнейших научных изысканий. Общей целью является разработка стратегий развития систем мониторинга откосов открытых карьеров, функционирующих в режиме реального времени.[2]

Методы дистанционного зондирования. Первый исследовательский вопрос (RQ1), поставленный в данном систематическом обзоре, направлен на анализ наиболее значимых методов и технологий, применяемых для мониторинга устойчивости откосов, а также на более глубокое понимание их сравнительных преимуществ и недостатков.

Согласно результатам проведённого анализа, первой и наиболее широко распространённой категорией мониторинга устойчивости откосов в открытых карьерах являются методы дистанционного зондирования. Эти методы позволяют с использованием современных сенсоров и технологий дистанционно выявлять смещения за счёт наблюдения изменений на поверхности откосов.

К наиболее широко применяемым методам данной категории относятся:

- спутниковые радиолокационные системы;
- цифровая фотограмметрия;
- наземные радиолокационные системы;
- лазерное сканирование (LiDAR);

ISSN 3030-3907

• геодезические методы измерений;
• тепловизионная съёмка.

Спутниковая радиолокация. Спутниковые радиолокационные системы используют технологию синтезированной апертуры (SAR) для дистанционного обнаружения и мониторинга смещений откосов. С их помощью формируются цифровые модели рельефа (DEM), а также карты скоростей движения земной поверхности.

Технология SAR основана на передаче микроволновых импульсов с орбитальных спутников и регистрации амплитудных и фазовых характеристик отражённого сигнала. Это позволяет получать высокоточные изображения земной поверхности независимо от атмосферных условий (таких как облачность или уровень освещённости).

Для выявления и количественной оценки смещений откосов во времени применяется метод дифференциальной интерферометрии SAR (D-InSAR). Данный метод основан на анализе фазовой компоненты радиолокационного сигнала, поскольку фаза чувствительна к изменениям расстояния между спутником и земной поверхностью.

В технологии D-InSAR используются два или более радиолокационных изображения (SAR), полученных над одной и той же территорией в разное время, которые затем точно совмещаются (ко-регистрируются). После этого рассчитывается разность фаз между соответствующими пикселями, в результате чего формируется интерферограмма.

Общая фазовая разность складывается из следующих составляющих:
• геометрия спутника;
• рельеф (топография);
• смещение земной поверхности;
• атмосферная задержка;
• шум.

В методе D-InSAR с использованием внешней DEM устраняется топографическая составляющая фазы, в результате чего выделяется только компонент, связанный со смещением. Оставшаяся фазовая составляющая пропорциональна изменению расстояния между спутником и земной поверхностью вдоль линии визирования (Line of Sight — LoS), что позволяет определять деформации поверхности с точностью до миллиметров. [9]

ISSN 3030-3907



Рисунок 3. Процесс получения данных с использованием D-InSAR: показано, что разность фаз между двумя SAR-изображениями, полученными при различных проходах спутника, обусловлена сме щением откоса.

Persistent Scatterer Interferometric SAR (PS-InSAR) основан на дальнейшем развитии данной технологии и заключается в выявлении и анализе постоянных отражателей, обладающих временно стабильным фазовым поведением. К таким объектам относятся здания или поверхности обнажённых горных пород, которые устойчиво отражают радиолокационные сигналы, обеспечивая высокую временную когерентность.

На основе нескольких SAR-изображений моделируются и корректируются атмосферные воздействия и орбитальные ошибки, благодаря чему PS-InSAR достигает высокой точности и надёжности, а также позволяет выявлять долгосрочные и малые деформации, которые не обнаруживаются традиционными методами InSAR.[10]

Орбитальные системы спутникового радиолокационного зондирования обеспечивают возможность покрытия больших территорий за один пролёт наблюдения. Их геометрия измерений по линии визирования (LoS — Line of Sight) позволяет обнаруживать высокоточные смещения на обширных территориях.[9,11]

Кроме того, наличие бесплатных данных, таких как миссия спутников Sentinel-1 Европейского космического агентства (European Space Agency), повышает масштабируемость и экономическую эффективность систем мониторинга на основе SAR.[11]

Вместе с тем, практическое применение данных технологий имеет ряд ограничений:

ISSN 3030-3907

- временная точность ограничена интервалом повторного пролёта спутника (обычно несколько дней или недель);
- это снижает возможность обнаружения быстрых или резких смещений склонов;
- SAR-методы подвержены проблеме декорреляции в растительности или быстро изменяющихся районах;
- в таких условиях снижается когерентность сигнала, что ухудшает качество интерферограмм и точность измерений.

Цифровая фотограмметрия. Цифровая фотограмметрия — это метод дистанционного зондирования, основанный на построении трёхмерных (3D) моделей объектов или среды путём объединения изображений, полученных с различных ракурсов.

Одним из наиболее широко применяемых подходов в данной области является метод Structure-from-Motion (SfM), основанный на технологиях компьютерного зрения.

SfM выявляет характерные признаки на перекрывающихся изображениях, полученных с разных точек съёмки, и отслеживает их для восстановления:

- трёхмерной структуры сцены,
- а также траектории движения камеры.

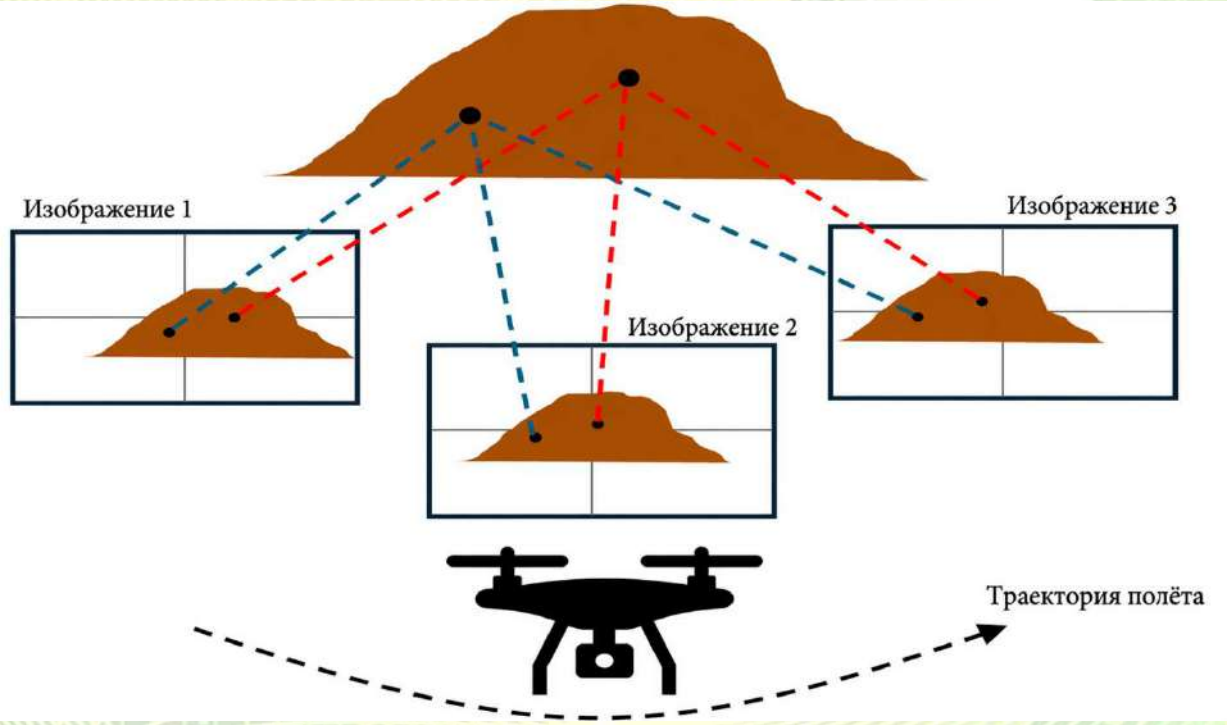


Рисунок 4. Процесс сбора данных с использованием цифровой фотограмметрии.

ISSN 3030-3907

Процесс SfM (Structure-from-Motion) начинается с определения характерных точек на каждом изображении. Эти точки обычно выявляются с помощью встроенных алгоритмов в программных пакетах, таких как Agisoft.

Далее данные точки сопоставляются между различными изображениями, и фотограмметрическое программное обеспечение с использованием алгоритма оптимизации bundle adjustment вычисляет относительное положение и ориентацию камеры. Данный алгоритм основан на минимизации ошибок повторной проекции сопоставленных точек.

После определения положения камеры выполняется триангуляция на основе соответствующих точек, и вычисляются их трёхмерные координаты. В результате формируется трёхмерное облако точек (point cloud). Это облако впоследствии преобразуется в 3D-поверхностную модель или цифровую модель рельефа (DEM).

На следующем этапе, например в программном обеспечении CloudCompare, с использованием алгоритмов C2C (Cloud-to-Cloud) или M3C2 сравниваются облака точек, полученные в разные моменты времени. Это позволяет выявлять и количественно оценивать смещения склонов.[12]

Полученные 3D-модели предоставляют инженерам высокоточные пространственные данные, что обеспечивает возможность определения:

- деформаций,
- трещин,
- геологических структур с точностью до сантиметрового уровня.[12]

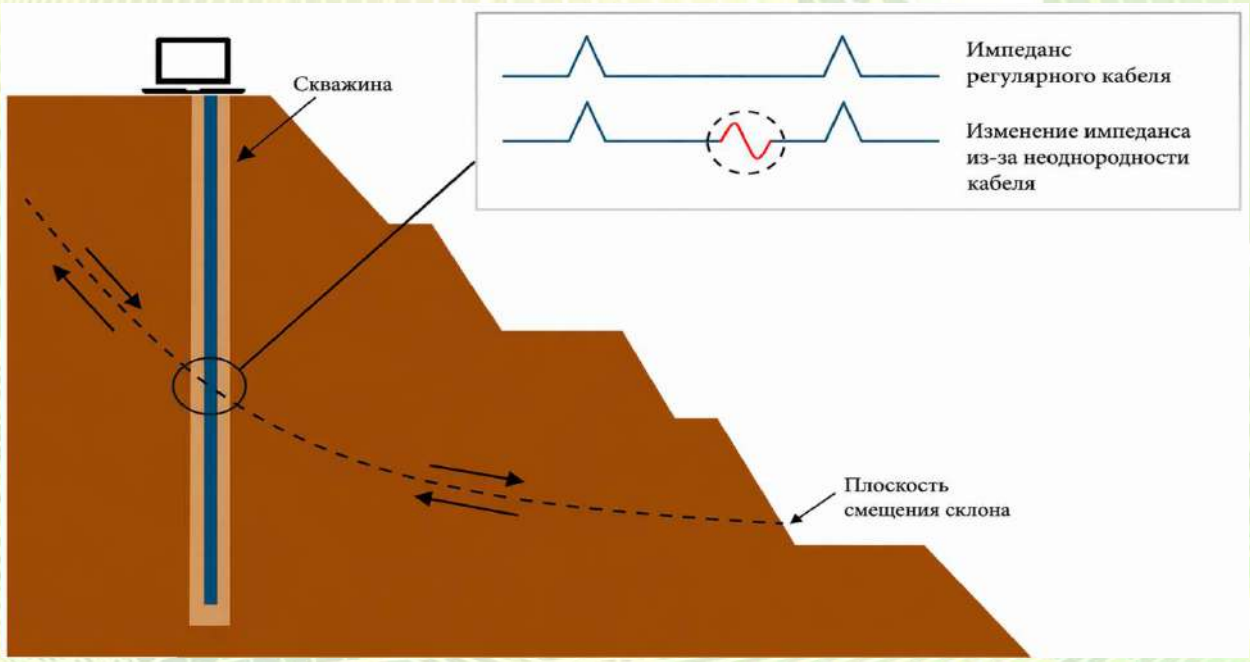


Рисунок 5. TDR-датчик, установленный в буровой скважине на склоне: определение плоскости нарушения по изменению импеданса отражённого сигнала (в правом верхнем углу).

ISSN 3030-3907

Анализ времени распространения отражённого импульса позволяет определить точное расположение смещений с субмиллиметровой точностью. Изменения амплитуды сигнала, в свою очередь, дают возможность оценивать величину деформации.[13]

Благодаря использованию прочных материалов, таких как оптоволоконные кабели, TDR эффективно функционирует в тяжёлых условиях, включая глубокие скважины, и подходит для долгосрочного мониторинга. Поэтому TDR считается относительно экономически эффективным методом наблюдения.[13]

Однако данный метод имеет и ряд недостатков:

- процесс установки является сложным и требует проведения масштабных буровых работ;
- дискретный (точечный) принцип измерения ограничивает пространственное покрытие;
- он не способен полностью отражать распределение деформаций на больших территориях.

Экстензометры. Одним из визуальных признаков разрушения склонов являются растягивающие трещины, которые контролируются методами.

Одним из таких методов являются проволочные экстензометры, которые определяют:

- расширение трещин,
- деформацию путём измерения смещения проволоки. Проволока закрепляется в стабильной точке, и по её перемещению фиксируется смещение нестабильной зоны (рис. 6).

В традиционных методах изменение длины проволоки измерялось вручную. Однако современные датчики, например вибрационные проволочные датчики смещения, оцифровали этот процесс, обеспечив:

- дистанционный мониторинг,
- непрерывное наблюдение.

Экстензометры обладают следующими преимуществами:

- высокая точность (в некоторых системах до субмиллиметрового уровня),
- надёжный контроль деформаций,
- широкая область применения. [10,13]

В то же время они имеют недостатки:

- требуют устойчивых и прочных опорных точек,
- установка является сложной,
- ограниченная гибкость размещения.

ISSN 3030-3907

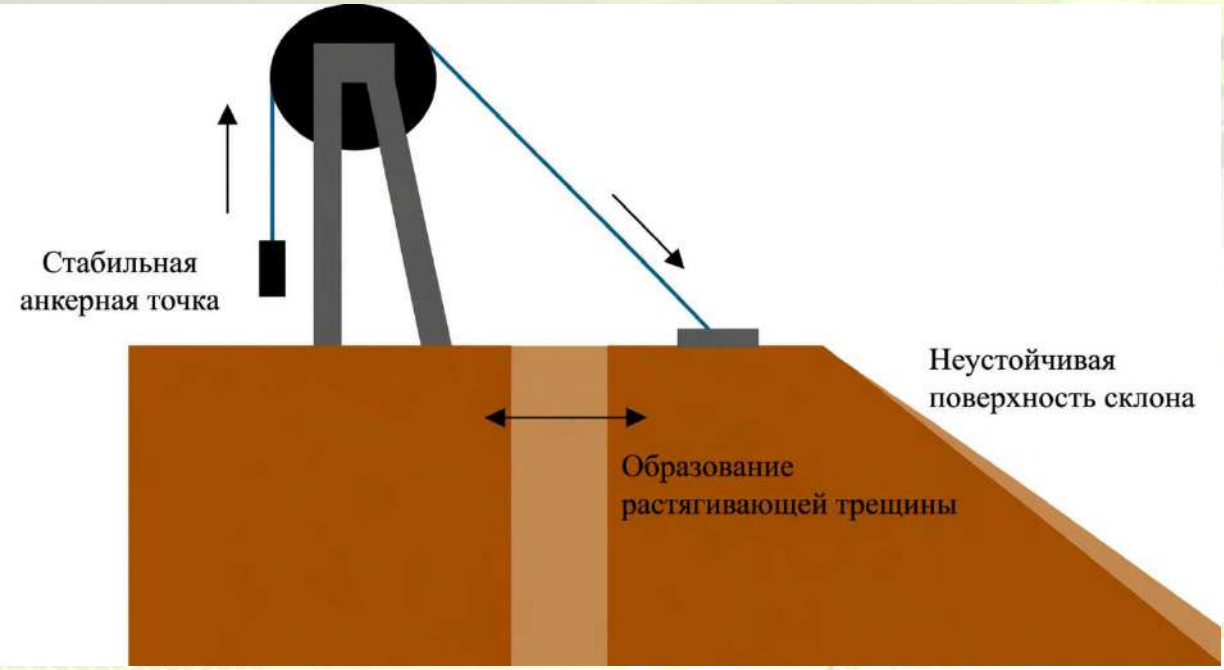


Рисунок 6. Традиционный проволочный экстензометр, предназначенный для определения разрушения склона, возникающего в результате образования растягивающих трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В данной статье обосновано, что обеспечение устойчивости откосов (бортов) в открытых горных выработках является одним из наиболее важных факторов горной безопасности и эффективности производства. Показано, что разрушение откосов может происходить под воздействием различных внутренних (геологическое строение, свойства горных пород) и внешних факторов (климатические условия, вода, сейсмическая и техногенная активность).

Результаты исследования свидетельствуют о том, что для эффективного мониторинга устойчивости откосов необходимо комплексное использование не только традиционных геодезических и геотехнических методов, но и современных технологий дистанционного зондирования, включая спутниковые радиолокационные системы (InSAR), цифровую фотограмметрию, LiDAR и сенсорные системы. В частности, инновационные решения, такие как искусственный интеллект и беспроводные сенсорные сети, позволяют автоматизировать процессы мониторинга, получать данные в режиме реального времени и прогнозировать потенциальные риски.

Вместе с тем каждый метод имеет свои преимущества и ограничения, и их отдельное применение может не обеспечивать достаточной эффективности. Поэтому наиболее целесообразным подходом является внедрение интегрированных, многоканальных систем мониторинга.

В целом современные подходы к мониторингу устойчивости откосов в открытых горных работах играют важную роль в повышении уровня

ISSN 3030-3907

безопасности, снижении риска аварий и обеспечении непрерывности производственного процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geotechnical Considerations in Open Pit Mines. Available online: https://www.worksafe.wa.gov.au/publications/geotechnicalconsiderations-open-pit-mines-guideline (accessed on 26 February 2025).
2. Mines Safety Bulletin, No. 171 Pit Wall Failure Management. Available online: https://www.worksafe.wa.gov.au/publications/mines-safety-bulletin-no-171-pit-wall-failure-management (accessed on 26 February 2025).
3. Narendranathan, S.; Nikraz, H. Optimal System Design for Instrumented Slope Monitoring in Open Pit Mines. In Proceedings ofthe International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), Perth, Australia, 7–9 November 2011.
4. Mohammed, M.M. A Review on Slope Monitoring and Application Methods in Open Pit Mining Activities. Int. J. Sci. Technol.Res. 2021, 10, 181–186.
5. Raghuvanshi, T.K. Governing factors influence on rock slope stability—Statistical analysis for plane mode of failure. J. King Saud Univ. Sci. 2019, 31, 1254–1263.
6. Singh, B.; Goel, R.K. Chapter 17–Types of Failures of Rock and Soil Slopes. In Engineering Rock Mass Classification, 1st ed.; Singh, B., Goel, R.K., Eds.; Elsevier: Boston, MA, USA, 2011; pp. 211–230.
7. Mohtarami, E.; Jafari, A.; Amini, M. Stability analysis of slopes against combined circular–toppling failure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2014, 67, 43–56.
8. Bobet, A. Analytical solutions for toppling failure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1999, 36, 971–980.
10. Wei, L.; Liu, S.; Mao, Y.;Wang, R.; Wu, L.; Xu, J. Joint application of DInSAR and ground measurements: A case study on dump stability analysis. In Proceedings of the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10–15 July 2016; pp. 6002–6005.
11. Lee, H.; Moon, J.; Lee, H. Activity of Okgye Limestone Mine in South Korea Observed by InSAR Coherence and PSInSAR Techniques. Remote Sens. 2022, 14, 6261.
12. Haupt, S.; Engelbrecht, J.; Sibolla, B.; Mdakane, L.W. Time Series Insar Analysis for Slope Stability Monitoring Using Sentinel-1 in Open Pit Mining. ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci. 2023, XLVIII-1/W, 945–951.

ISSN 3030-3907

13. Preston, R.P. Implementation of a Pit Slope-Monitoring Network for Inactive Open-Pit Mines Using Photogrammetry. Rock Mech. Rock Eng. 2021, 54, 3377–3385.
14. Osasan, K.S.; Afeni, T.B. Review of surface mine slope monitoring techniques. J. Min. Sci. 2010, 46, 177–186.

ISSN 3030-3907