

DOI: 10.5281/zenodo.15708904

Link: <https://zenodo.org/records/15708904>

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЗБЕКИСТАНА НА БАЗЕ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОМ И ГИС ТЕХНОЛОГИЙ

Расулов Абдулла Хайитбой угли – докторант, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: abdulladjanrasulov1995@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5847-3044

Махмадиев Достон Рустамжон угли - ассистент, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: dmaxmadiyev@gmail.ru, ORCID ID: 0009-0001-6255-3300

Акбархонов Саидбурхон Козимхон угли – ассистент, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Республика Узбекистан; e-mail: akbarxonovs@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-2343-9960

Аннотация. В результате интенсивного развития горно – металлургической промышленности объем промышленных отходов неуклонно увеличивается из года в год. В составе этих отходов содержатся высокотоксичные тяжёлые металлы, агрессивные химические реагенты и другие экологически опасные компоненты, представляющие серьёзную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Особенно опасными, но в то же время важными инфраструктурными объектами в горнодобывающей отрасли являются шламохранилища – сооружения, предназначенные для накопления промышленных отходов (в частности, пульпы) и строящиеся, как правило, на основании земляных масс. Проектирование, строительство и эксплуатация таких объектов зачастую осуществляется без достаточных технических и инвестиционных ресурсов, что превращает их в объекты повышенного риска. Осадка фундамента, внутренняя эрозия, фильтрация, угроза прорыва и сейсмическая нестабильность — всё это факторы, требующие постоянного мониторинга и обеспечения безопасности отходохранилищ. Традиционные геодезические и маркшейдерские наблюдения обеспечивают такой мониторинг в недостаточном объеме. В современных условиях эти методы должны быть дополнены геоинформационными технологиями (ГИС, ДЗЗ, БПЛА), обладающими пространственным охватом, оперативностью и возможностью комплексного анализа. В данной статье на примере Навоийского горно – металлургического комбината (НГМК) проводится глубокий анализ структуры различных отходохранилищ, степени их опасности и методов их мониторинга на основе ГИС.

Ключевые слова: отходы горно– металлургической промышленности, геоинформационные технологии, маркшейдерский мониторинг, ГИС, дистанционное зондирование, шламохранилища, беспилотные летательные аппараты, цифровая модель рельефа, экологический риск пространственно – временной анализ.

Введение. За последние десятилетия наряду с бурным развитием горно– металлургической промышленности резко возросли и присущие этой отрасли экологические риски. В частности, непрерывный рост объемов промышленных отходов, наличие в их составе высокотоксичных тяжёлых металлов, агрессивных химических реагентов и радиоактивных компонентов представляют собой одну из актуальнейших научно– практических проблем, угрожающих окружающей среде и здоровью человека.

Как правило, отходы накапливаются на обширных площадях вблизи мест добычи, где для их хранения и управления строятся специальные гидротехнические сооружения — отходохранилища (шламохранилища,

хвостохранилища). Эти сооружения предназначены для временного или постоянного хранения жидких или пластичных остатков переработанных руд и нередко обладают недостаточной устойчивостью, сейсмической безопасностью и эксплуатационной надежностью. Недостаточная инвестиционная обеспеченность таких объектов, а также несоответствие современным инженерным стандартам в ряде случаев делают их одними из самых уязвимых и опасных элементов инфраструктуры горнодобывающей отрасли. В результате они подвержены рискам внутренней эрозии, просадок, фильтрации, наводнений и сейсмических воздействий, что требует постоянного мониторинга.

В последние годы геоинформационные технологии (ГИС), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), цифровые модели рельефа (ЦМР) и глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) — стали перспективной альтернативой и дополнением традиционного маркшейдерского мониторинга. Возможности ГИС позволяют определять пространственно–временную динамику распространения отходов, моделировать зоны риска, разрабатывать системы предупреждения в реальном времени и визуализировать результаты мониторинга в интерактивной форме.

Основная часть. Горно – промышленный сектор Республики Узбекистан включает в себя объекты, которые требуют особого внимания в рамках обеспечения экологической безопасности и систем управления отходами. Эти объекты преимущественно расположены в Навоийской, Самаркандской, Джизакской и Хорезмской областях и служат местами накопления различных видов отходов, образующихся в результате промышленной деятельности (рис.1). Среди них-шламы (пульпа), твердые и жидкие бытовые отходы, нетоксичные и нерадиоактивные промышленные отходы, а также шламы, содержащие взвешенные вещества в составе сточных вод. Каждый из этих объектов обладает индивидуальными параметрами: местоположение, площадь, дата начала эксплуатации, объём накапливаемых отходов и другие характеристики, что требует их отдельного научно–практического анализа с точки зрения экологического мониторинга и региональной политики безопасности.

Такой подход позволяет комплексно оценить потенциальные риски для окружающей среды, сформировать приоритеты для государственного и корпоративного экологического надзора, а также выработать эффективные меры по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

В частности, объекты по хранению пульпы, расположенные в промышленной зоне «Мурунтау» Навоийской области и принадлежащие Центральному руда управлению (2-е ГМЗ), относятся к числу крупнейших оттохохранилищ в Узбекистане. Эти сооружения были введены в эксплуатацию в 1969 и 1975 годах и занимают общую площадь более 3452 гектаров. В настоящее время в них накоплено свыше 2,5 миллионов тонн промышленных пульп. В пределах близлежащей промышленной зоны «Бесапан» также функционирует централизованный полигон для твердых бытовых и промышленных отходов, где в общей сложности сосредоточено около 79 тысяч тонн отходов. Для обоих объектов установлены санитарно–защитные зоны

шириной 300 метров, что является важной эпидемиологической и профилактической мерой для охраны окружающей среды и здоровья населения.

Кроме того, объекты по хранению отходов Северного руда управления, расположенные в Учкудукском районе, также представляют значительный экологический интерес. Площадки для накопления пульпы и полигоны для захоронения промышленных отходов, введённые в эксплуатацию в 1995 и 2000 годах, обладают внушительным объёмом: в них хранится более 142 тысяч тонн пульпы и свыше 400 тонн промышленных отходов. Для данных объектов предусмотрены санитарно– защитные зоны до 1000 метров, что служит ключевым фактором ограничения потенциального вредного воздействия на окружающую среду.

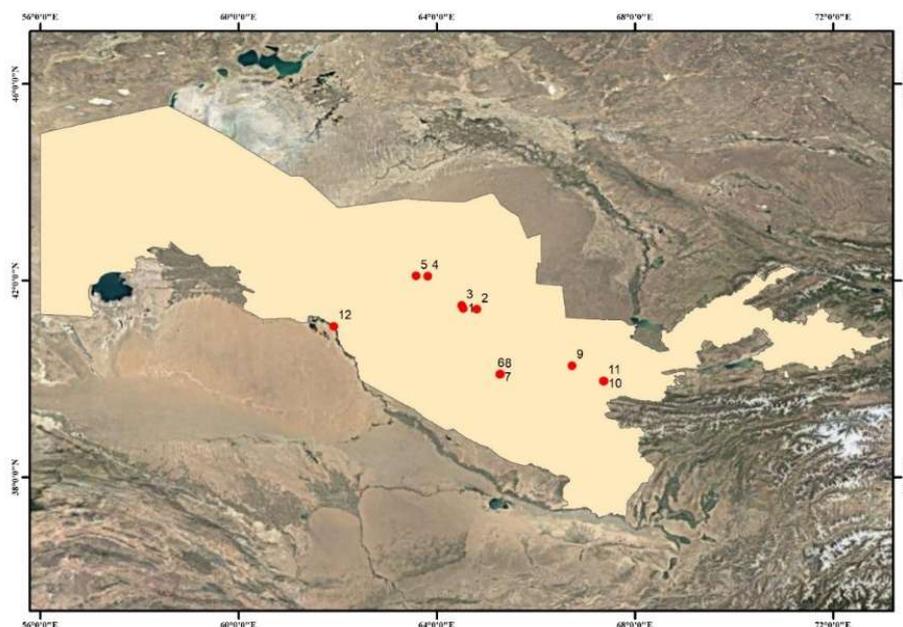


Рис.1. Расположение хвостохранилища НГМК на территории Республики Узбекистан.

Помимо этого, три объекта по хранению отходов, принадлежащие 1– му руда управлению (ГМЗ) в городе Навои, являются одними из главных центров накопления отходов горнодобывающей отрасли. Эти объекты функционируют с 1964 года и содержат радиоактивные, токсичные и нетоксичные промышленные отходы, строительный и бытовой мусор, а также металлы, извлечённые из промышленных фильтров. На некоторых участках накоплено свыше 85 тысяч тонн отходов, при этом санитарно– защитные зоны достигают 800 метров, что особенно важно с точки зрения обеспечения экологической безопасности в условиях близости к городской застройке (Рис.2).



Рис.2. Хвостохранилищ промышленных отходов рудоуправления №4 "ГМЗ"

Объекты Южного руда управления, расположенные в Самаркандской и Джизакской областях, являются относительно новыми сооружениями, введёнными в эксплуатацию в 2017–2020 годах. В частности, отделения по хранению отходов в промышленной зоне «Маржонбулок» представляют собой инфраструктуру, соответствующую современным экологическим стандартам. Объем хранимых отходов здесь составляет около 35 тысяч тонн, а установленная санитарно – защитная зона ограничена 100 метрами, что позволяет отнести данные объекты к категории относительно безопасных. (Рис.3).

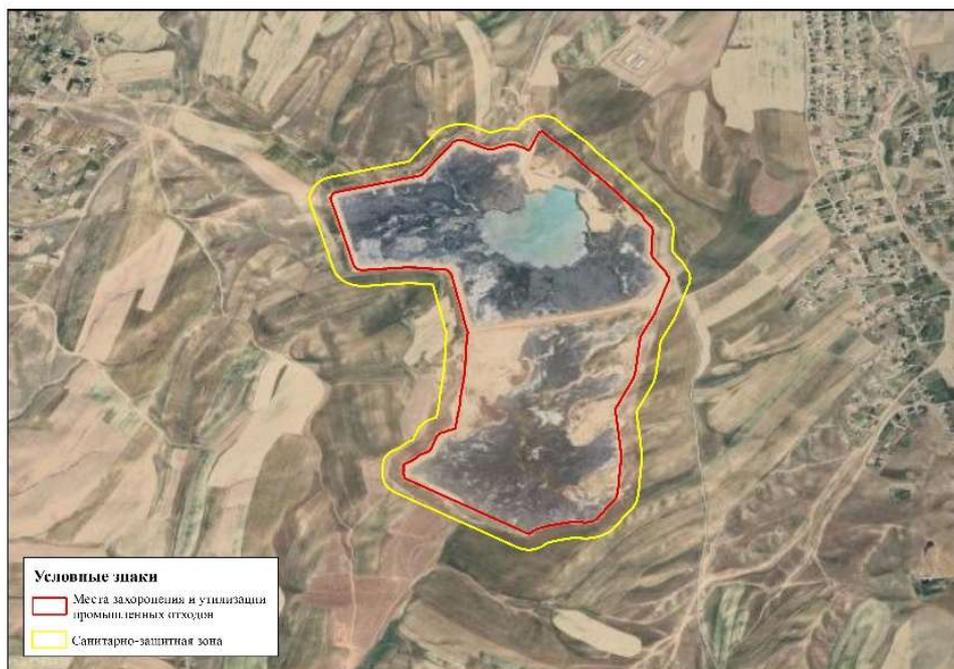


Рис.3. Хвостохранилищ промышленных отходов рудоуправления №1 "ГМЗ"

На территории Тупроккалинского района Хорезмской области расположен ещё один экологически значимый объект Центрального руда управления, где с 1986 года осуществляется хранение шламов, образующихся после осаждения

взвешенных веществ из вод Амударьи. Этот объект занимает площадь 15 гектаров и содержит около 15 тысяч тонн отходов. Подобные сооружения играют важную роль в сохранении водных ресурсов и предотвращении загрязнения гидросферы.

В настоящее время на указанных участках в соответствии с действующими «Правилами»[3] осуществляется регулярный и надёжный контроль за состоянием устойчивости промышленных шламо и хвостохранилищ с использованием традиционных методов. Основная цель этих мероприятий — своевременное выявление опасных геодинамических процессов, способных привести к нарушению устойчивости дамб.

Для этого предусмотрено проведение маркшейдерских наблюдений за вертикальными и горизонтальными смещениями тела дамбы. Эффективная и целенаправленная организация наблюдений за деформационными процессами требует предварительного глубокого изучения проектной документации на строительство и эксплуатацию дамбы, основных геотехнических условий (инженерно– геологических и гидрогеологических характеристик), а также её геометрических параметров. На основе этих данных оценивается уровень устойчивости дамбы и определяются наиболее вероятные зоны деформаций, что позволяет точно установить места размещения измерительных приборов и точек наблюдений.

Опорные и исходные пункты устанавливаются в районах, свободных от потенциальных деформаций, с учётом максимальных размеров сооружения. На каждом увлажнённом слое сооружаются рабочие реперы, размещённые по продольным и поперечным профилям. Расстояние между реперами определяется геологическими, гидрогеологическими и технологическими факторами, и выбирается таким образом, чтобы обеспечить сбор достаточного объёма информации о деформационных процессах.

Практические наблюдения показывают, что в наиболее опасных зонах это расстояние составляет около 50 метров, а в периферийных участках — от 150 до 200 метров.

Наряду с традиционными методами мониторинга, во многих странах мира внедрены широкомасштабные научные исследования и практические системы, направленные на контроль отходов горно – металлургической промышленности. Использование геоинформационных технологий в таких направлениях, как геотехнический риск, экологический мониторинг и дистанционное управление промышленными отходами, внесло коренные изменения в отрасль.

Международный опыт показывает, что интеграция геоинформационных технологий является важным инструментом в мониторинге, оценке и управлении рисками, связанными с отходами горно – металлургического производства. Адаптация таких технологий, как БПЛА, дистанционное зондирование и цифровое моделирование, с учетом национальных условий может существенно повысить безопасность хранения отходов [4,5]

Результаты. Рассмотрим преимущества и недостатки приведённых выше методов.

Таблица 1.

Основные сравнительные параметры

Показатель	Традиционные маркшейдерские методы	Современные подходы на основе ГИС
Точность координат	Достигается миллиметровая точность, но ограничена локальными точками	Высокая точность на основе GNSS, но при ДЗЗ точность снижается (10–30 м, Sentinel-2)
Охват территории	Ограниченный; требуется отдельный выезд на каждый объект	Возможность охвата больших территорий (до 1000 км ²) одним снимком
Оперативность и повторяемость	Каждый мониторинг требует экспедиции; ежемесячная или годовая частота	Sentinel-2: каждые 5 дней, БПЛА – в реальном времени; часто и автоматически
Анализ данных	Ручной или в Excel; пространственный анализ отсутствует	Многослойный анализ на платформах ГИС, 3D-моделирование, пространственно-временные тренды
Анализ экологических рисков	Субъективный; на основе визуального осмотра на месте	Анализ запыленности, влажности, изменений растительности через спектральные индексы (NDWI, SAVI, MSI)
Деформации в глубине	Определяются только верхние слои, глубинные смещения трудно фиксируются	Технология InSAR позволяет выявлять глубинные деформации (осадка фундамента)
Затраты и ресурсы	Первоначально дешево, но затратно по времени и трудозатратам	Высокие начальные затраты, но экономия в долгосрочной перспективе (автоматизация, скорость)
Визуализация и отчетность	На основе 2D-графиков и копий карт	Интерактивные Web-GIS, 3D-анализ, инфографика, панели мониторинга в реальном времени
Зависимость от человеческого фактора	Высокая; возможны ошибки и субъективные оценки	Низкая; автоматизированные системы снижают субъективность
Частота мониторинга	Периодический (ежемесячно, ежеквартально), требует времени и бюрократических ресурсов	Еженедельный, ежедневный, вплоть до режима реального времени

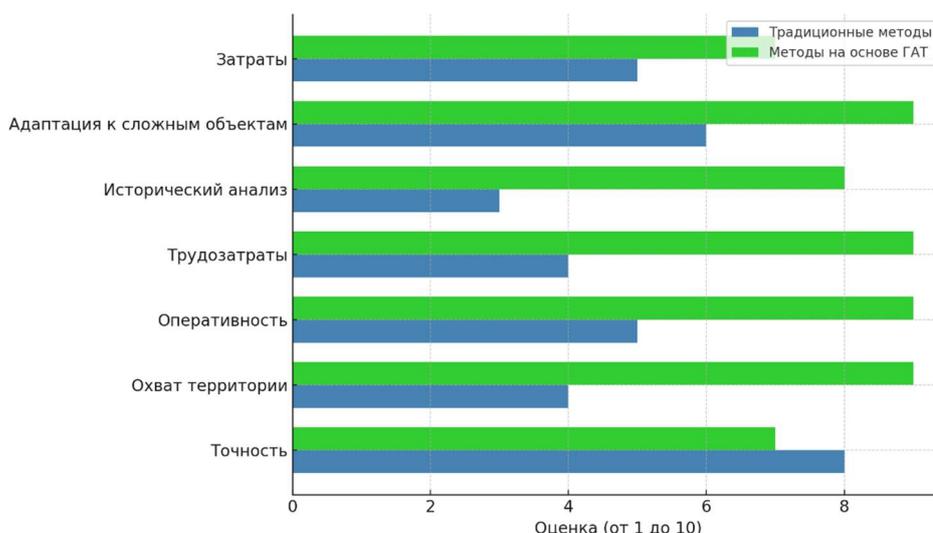


Рис.4. Сравнение традиционного и ГИС-мониторинга в горно-металлургической промышленности.

Методологический анализ, проведённый в рамках исследований по мониторингу промышленных отходов в горно – металлургической промышленности, показал, что эффективность применения существующих подходов напрямую зависит от характера целей мониторинга, геофизических особенностей территории, степени сложности объектов и уровня техногенного риска. В ходе исследования были сопоставлены традиционные маркшейдерско – геодезические подходы с современными методами мониторинга на основе геоинформационных технологий (ГИС), при этом системно проанализированы возможности каждого подхода, уровень их оперативности и пределы применения [6].

Традиционные геодезические методы мониторинга позволяют с высокой точностью фиксировать физические изменения на поверхности земли. Эти подходы особенно эффективны при проведении локального мониторинга на небольших участках и при выявлении конструктивных деформаций. Однако данные методы обладают существенными ограничениями в выявлении пространственно– временной динамики, организации мониторинга в реальном времени и оценке экологических факторов [7].

С другой стороны, подходы на основе ГИС, ДЗЗ, БПЛА, ЦМР и ГНСС – поднимают мониторинг на принципиально новый уровень. Эти технологии не только обеспечивают широкий охват по площади и во времени, но и позволяют моделировать результаты мониторинга в цифровой среде, выполнять автоматический анализ, прогнозирование и интеграцию с системами управления. Особенно незаменимыми являются ГИС – инструменты при выявлении зон риска, связанных с пульпой и токсичными отходами, моделировании геодинамики и сейсмической нестабильности. Вместе с тем, внедрение этих систем требует предварительной технологической базы, наличия высококвалифицированных специалистов и финансовых ресурсов [8].

На основе вышеизложенного были сделаны следующие стратегические методологические выводы:

- традиционные маркшейдерские подходы, несмотря на обеспечение точной геодезической основы и высокоточного локального мониторинга, в большинстве случаев являются реактивными и фрагментарными по своей сути. Они недостаточно эффективны в условиях сложного рельефа или экологически опасных зон;
- геоинформационные технологии (ГИС) кардинально повышают эффективность мониторинга за счёт автоматизации процессов, визуализации пространственных и временных изменений, прогнозирования рисков факторов и интеграции с системами управления;
- наиболее целесообразным подходом является создание гибридной системы мониторинга, которая сочетает точность традиционных измерений с широким охватом, оперативностью и аналитическими возможностями методов ГИС.

Эта система предназначена для безопасного и эффективного контроля промышленных отходов, обеспечивая наблюдение за деформациями, просадками

и другими опасными явлениями в промышленных зонах в режиме, близком к реальному времени.

Гибридный подход к мониторингу позволяет в реальном времени оценивать устойчивость отходов в горно-металлургической промышленности, своевременно выявлять опасные зоны и интегрировать данные в автоматизированные системы управления. В перспективе целесообразно расширить эту модель за счет технологий Digital Twin и прогнозного мониторинга на базе искусственного интеллекта [9,10].

Модель мониторинга, разработанная на основе таких гибридных систем, позволяет не только обеспечить безопасность отходов горно-металлургической промышленности, но и поддерживать их под экологическим контролем, интегрировать с цифровыми системами управления и отслеживать динамику отходов в режиме реального времени. В перспективе этот подход можно расширить до полностью автоматизированной цифровой геосистемы мониторинга посредством интеграции с платформами «цифрового двойника» (Digital Twin) [11,12].

Заключение. В контексте современных глобальных экологических проблем особенно актуальной является задача выявления рисков, связанных с промышленными отходами в горно-металлургической отрасли, и их системного управления. Проведённые в рамках данного исследования анализы на примере Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК) показали, что, несмотря на высокую точность, традиционные маркшейдерские подходы теряют эффективность при широкомасштабном пространственном мониторинге. Это влечёт за собой значительные ограничения при оценке безопасности и прогнозировании в режиме реального времени.

В противоположность этому, современные геоинформационные технологии – такие как ГИС, ДЗЗ, БПЛА, ЦМР и ГНСС – открыли качественно новый этап в мониторинге промышленных объектов. Эти технологии позволяют выполнять пространственно-временной анализ изменений, выявлять зоны риска, осуществлять интерактивную визуализацию и интеграцию с системами управления.

На основании анализа был предложен гибридный мониторинговый подход, объединяющий традиционные геодезические методы с возможностями ГИС. Эта модель позволяет оценивать устойчивость шламовых дамб не только на уровне наблюдений, но и с использованием передовых цифровых аналитических инструментов в режиме реального времени. Кроме того, с учётом международного опыта, внедрение технологий «цифрового двойника» (Digital Twin) и автоматизированных Web-GIS-систем может обеспечить высокий уровень безопасности и эффективности экологического мониторинга в инфраструктуре горнодобывающей отрасли Узбекистана.

Таким образом, результаты данного исследования предлагают научно обоснованные, технологически прогрессивные и практически значимые решения в области управления отходами горно-металлургической промышленности. Это,

в свою очередь, способствует формированию стратегий экологически устойчивого развития отрасли в долгосрочной перспективе.

Литература

1. Clarkson L. *Comprehensive Monitoring Strategy for Tailings Dams*. University of Queensland, 2021.
2. Vick S.G. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Vancouver: BiTech Publishers Ltd., 1990.
3. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления и контроля в сфере геологического изучения, использования и охраны недр».
4. Rauhala A., Tuomela A., Davids C., Rossi P.M. UAV Remote Sensing Surveillance of a Mine Tailings Impoundment in Sub-Arctic Conditions // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9(12), Article 1318. DOI: [10.3390/rs9121318](https://doi.org/10.3390/rs9121318).
5. 3D Visualization Monitoring and Early Warning System of a Tailings Dam—Gold Copper Mine Tailings Dam in Zijinshan, Fujian, China // *Frontiers in Earth Science*, 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.800924.
6. С.С. Саидқосимов. *Маркшейдерияда геоахборот тизимлар*. Ташкент, 2021.
7. Scaioni M., Marsella M., Crosetto M., Tornatore V., Wang J. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring // *Sensors*. 2018. Vol. 18(11), Article 3682. DOI: 10.3390/s18113682.
8. Национальный комитет Республики Узбекистан по статистике. Официальный сайт: <https://stat.uz/ru/> (дата обращения: 17.06.2025).
9. Rojas L., Peña Á., Garcia J. A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning. [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/381111111), 2024.
10. Rojas L., Peña Á., Garcia J. AI-Driven Predictive Maintenance in Mining: A Systematic Literature Review on Fault Detection, Digital Twins, and Intelligent Asset Management // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(6), Article 3337. DOI: [10.3390/app15063337](https://doi.org/10.3390/app15063337).
11. *Digital Twins for Tailings Dams*. Water Power Magazine. URL: <https://www.waterpowermagazine.com/analysis/digital-twins-for-tailings-dams> (дата обращения: 17.06.2025).
12. *Digital Twins and Enabling Technology Applications in Mining: Research Trends, Opportunities and Challenges*. [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/381111111), 2025.