УДК 622.271:004.94:004.89
https://www.doi.org/10.47813/rosnio.5.2026.19.4031
EDN CRMSUK

Интеллектуальная система геомеханического и экологического мониторинга карьеров на основе LIDAR и распределённой сети Smart Dust

А.А. Грейс[1*], И.В. Ковалев[1,2], А.А. Ворошилова[1]

[1]Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия
[2]Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия

[*]E-mail: alena.yabl@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке концепции интеллектуальной системы геомеханического и экологического мониторинга карьеров на основе интеграции фотонных LiDAR-технологий и распределённой сети интеллектуальных микросенсорных устройств Smart Dust для контроля устойчивости бортов карьеров в режиме реального времени. Представлены результаты разработки интеллектуальной системы, основанной на совместной обработке пространственных данных лазерного сканирования, телеметрической информации, поступающей от сети Smart Dust, алгоритмов машинного обучения и адаптивной фильтрации облаков точек для автоматического выявления опасных деформационных процессов. Разработанный виртуальный программно-аппаратный комплекс обеспечивает непрерывное формирование цифровой модели карьера, интеграцию данных дистанционного и локального мониторинга, интеллектуальный анализ геомеханического состояния прибортового массива и прогнозирование зон потенциальной нестабильности. Имитационное моделирование показывает, что применение интегрированной LiDAR-Smart Dust системы обеспечивает повышение скорости обработки данных, снижение погрешности пространственных измерений, увеличение достоверности выявления деформационных аномалий и повышение эффективности раннего обнаружения потенциально опасных геомеханических процессов по сравнению с традиционными методами геодезического мониторинга.

Ключевые слова: LiDAR, Smart Dust, геомеханический мониторинг, экологический мониторинг, распределённые сенсорные сети, открытые горные работы.

Intelligent geomechanical and environmental monitoring system for open-pit mines based on LIDAR and a distributed Smart Dust sensor network

A.A. Grace[1*], I.V. Kovalev[1,2], A.A. Voroshilova[1]

[1]Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia
[2]Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049, Russia

[*]E-mail: alena.yabl@yandex.ru

Abstract. This paper presents the concept of an intelligent geomechanical and environmental monitoring system for open-pit mines based on the integration of photonic LiDAR technology and a distributed Smart Dust sensor network for automated real-time monitoring of pit slope stability. The proposed system combines laser scanning point cloud data, telemetry acquired from the Smart Dust sensor network, machine learning algorithms, and adaptive point cloud filtering techniques to enable the automatic detection of hazardous deformation processes. A virtual hardware-software platform has been developed to generate a digital model of the open-pit mine, integrate data obtained from remote and in situ monitoring systems, perform intelligent analysis of the geomechanical condition of pit slopes, and predict zones of potential instability. Simulation results demonstrate that the proposed integrated LiDAR-Smart Dust system improves data processing speed, reduces spatial measurement errors, increases the reliability of deformation anomaly detection, and enhances the early identification of potentially hazardous geomechanical processes compared with conventional geodetic monitoring methods.

Keywords: LiDAR, Smart Dust, geomechanical monitoring, environmental monitoring, distributed sensor networks, machine learning, open-pit mining.

1. Введение

Современный этап развития горнодобывающей промышленности характеризуется активным внедрением цифровых технологий, ориентированных на повышение эффективности производственных процессов, уровня промышленной безопасности и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Увеличение глубины открытых горных работ, усложнение инженерно-геологических условий разработки месторождений, рост производительности горнотранспортных комплексов и ужесточение экологических требований сопровождаются существенным увеличением объёмов пространственной, технологической и экологической информации, подлежащей оперативному контролю. В этих условиях возрастает потребность в интеллектуальных системах, предназначенных для автоматизированного сбора, интеграции, обработки и анализа пространственно-временных данных, формирования цифрового представления объекта наблюдения и поддержки принятия решений в режиме реального времени. Одним из ключевых направлений цифровой трансформации горнодобывающей отрасли является создание интеллектуальных систем геомеханического и экологического контроля, объединяющих современные средства дистанционного зондирования, распределённые сенсорные сети и методы интеллектуального анализа данных [1-4].

Геомеханический мониторинг является одним из ключевых элементов системы промышленной безопасности горнодобывающих предприятий и представляет собой комплекс мероприятий, направленных на оценку, прогнозирование и контроль состояния массива горных пород и прибортового массива карьеров в процессе эксплуатации. При разработке месторождений открытым способом состояние бортов и уступов карьера постоянно изменяется под воздействием перераспределения напряжённо-деформированного состояния породного массива, буровзрывных работ, гидрометеорологических факторов, а также динамических и статических нагрузок, возникающих в ходе функционирования горнотранспортных систем. Своевременное выявление деформационных изменений позволяет снизить риск возникновения аварийных ситуаций, минимизировать экономические потери и повысить безопасность персонала и производственной инфраструктуры [5-7].

Наибольшую опасность при ведении открытых горных работ представляют деформации прибортового массива, проявляющиеся в виде локальных и масштабных смещений, оползневых процессов, осыпей и разрушения уступов карьера. Подобные нарушения приводят к потере устойчивости отдельных участков бортов, нарушению работы транспортно-технологической инфраструктуры, внеплановым простоям оборудования и

снижению общей эффективности горного производства. Увеличение глубины карьеров, усложнение инженерно-геологических условий и интенсификация добычи полезных ископаемых предъявляют повышенные требования к точности, оперативности и регулярности наблюдений за состоянием прибортового массива. Вместе с тем традиционные методы геодезического контроля обладают рядом существенных ограничений, среди которых значительная продолжительность цикла получения и обработки результатов наблюдений, дискретный характер измерений и высокая зависимость достоверности результатов от квалификации обслуживающего персонала. Повышение требований к промышленной безопасности и эффективности открытых горных работ обусловливает необходимость внедрения автоматизированных систем геомеханического контроля, способных выполнять сбор, обработку и интерпретацию пространственно-временной информации практически в режиме реального времени. Использование интеллектуальных технологий позволяет повысить точность оценки состояния прибортового массива, сократить время обработки результатов наблюдений и своевременно выявлять признаки развития деформационных процессов. Одновременно возрастает значение экологического контроля, поскольку эксплуатация карьеров сопровождается трансформацией природных ландшафтов, образованием пылевых выбросов, изменением гидрологического режима, деградацией почвенного и растительного покрова, а также повышением уровня шумового и вибрационного воздействия на окружающую среду. Практическая реализация подобных систем требует объединения средств дистанционного лазерного сканирования и распределённых сенсорных сетей, позволяющих получать пространственную и телеметрическую информацию.

Перспективным направлением решения данной задачи является интеграция фотонных LiDAR-технологий с распределённой сетью интеллектуальных микросенсорных устройств Smart Dust. В предлагаемой архитектуре LiDAR выполняет высокоточное пространственное сканирование поверхности карьера и формирует цифровые модели прибортового массива. Сеть Smart Dust осуществляет локальную регистрацию геомеханических и экологических параметров, включая вибрационные воздействия, микродеформации, температурный режим, концентрацию пылевых аэрозолей и другие характеристики окружающей среды, а также передаёт телеметрические данные в интеллектуальную систему анализа. Совместная обработка пространственной и телеметрической информации повышает полноту геомеханического и экологического контроля, увеличивает достоверность прогнозирования устойчивости прибортового массива и позволяет формировать комплексную цифровую модель состояния карьерного пространства в режиме реального времени [8-10].

2. Цель исследования

Целью данного исследования является разработка архитектуры интеллектуальной системы геомеханического и экологического мониторинга карьеров на основе интеграции фотонных LiDAR-технологий и распределённой сети Smart Dust, обеспечивающей комплексную обработку пространственных и телеметрических данных, интеллектуальный анализ геомеханического состояния прибортового массива, прогнозирование развития деформационных процессов и поддержку принятия решений в режиме реального времени.

3. Материалы и методы исследования

При разработке месторождений открытым способом контроль состояния прибортового массива осуществляется с использованием различных методов геомеханического мониторинга, предназначенных для регистрации пространственных смещений, деформаций и изменений напряжённо-деформированного состояния горных пород. Используемые методы отличаются физическими принципами получения информации, точностью пространственных измерений, периодичностью наблюдений, уровнем автоматизации и эксплуатационными характеристиками, что определяет эффективность их применения при решении задач геомеханического мониторинга. Основные характеристики современных методов мониторинга представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика современных методов геомеханического мониторинга.

Метод мониторинга	Принцип работы	Получаемая информация	Основные преимущества	Основные ограничения	Мониторинг в режиме реального времени
Тахеометрический мониторинг	Измерение углов и расстояний до контрольных марок электронным тахеометром	Координаты контрольных точек, горизонтальные и вертикальные смещения	Высокая точность измерений	Большой объём полевых работ, необходимость прямой видимости, зависимость от погодных условий	Частично
Спутниковый геодезический мониторинг	Определение координат контрольных пунктов по сигналам навигационных спутников	Пространственные смещения, скорость и направление перемещений	Автоматизированный контроль, длительные наблюдения	Экранирование сигнала, атмосферные помехи, снижение точности в сложном рельефе	Да
Маркшейдерский мониторинг	Геодезические съёмки и обследования горных выработок	Геометрия карьерного пространства, деформации бортов и уступов	Высокая достоверность результатов	Периодичность измерений, высокая трудоёмкость, влияние человеческого фактора	Нет

Визуально-инструментальный мониторинг	Визуальные обследования массива с использованием измерительных средств	Трещины, осыпи, локальные деформации	Простота выполнения	Субъективность оценки, невозможность автоматизации	Нет
Аэрофотограмметрический мониторинг с применением БПЛА	Построение цифровых моделей по серии аэрофотоснимков	Ортофотопланы, цифровые модели рельефа, объёмы горных масс	Быстрое обследование больших территорий	Зависимость от погодных условий, освещённости и качества снимков	Частично
Интерферометрический радиолокационный мониторинг (GB-InSAR)	Интерферометрическая обработка радиолокационного сигнала	Карты скоростей деформаций, микросмещения поверхности	Субмиллиметровая точность, круглосуточный контроль	Измерение только вдоль линии визирования, высокая стоимость	Да
Наземное лазерное сканирование	Лазерное сканирование поверхности с построением облака точек	Высокоточная 3D-модель карьера, пространственные смещения	Высокая плотность данных, дистанционный контроль, высокая точность	Чувствительность к пыли, туману и атмосферным воздействиям, большие объёмы данных	Да
Сейсмоакустический мониторинг	Регистрация микро-сейсмических и акустических сигналов	Микросейсмические события, зоны разрушения, развитие трещин	Раннее выявление разрушений внутри массива	Сложность интерпретации, необходимость специализированной сети датчиков	Да
Волоконно-оптический мониторинг	Измерение деформаций и температуры с помощью оптоволоконных датчиков	Деформации, температура, вибрации	Высокая чувствительность, непрерывность измерений	Контроль только вдоль трассы прокладки датчика	Да
Инклинометрический мониторинг	Измерение углов наклона и смещений в скважинах	Внутренние смещения массива	Контроль глубинных деформаций	Локальность измерений, необходимость бурения	Да
Экстензометрический мониторинг	Измерение относительных перемещений между контрольными точками	Раскрытие трещин, локальные деформации	Высокая точность локального контроля	Ограниченная зона измерений	Да
Пьезометрический мониторинг	Измерение уровня и давления подземных вод	Поровое давление, гидрогеологическое состояние массива	Контроль влияния подземных вод на устойчивость	Не измеряет деформации напрямую	Да
Распределённая сеть интеллектуальных микросенсорных устройств Smart Dust	Распределённый сбор данных автономными микросенсорными узлами	Вибрации, микродеформации, температура, концентрация пыли, локальные экологические параметры	Непрерывный локальный мониторинг, высокая масштабируемость, интеграция с интеллектуальными алгоритмами	Ограниченный ресурс питания, требования к беспроводной связи и защите сенсоров	Да

Как следует из таблицы 1, существующие методы геомеханического мониторинга обладают различными преимуществами и ограничениями, определяющими область их

практического применения. Традиционные геодезические методы характеризуются высокой точностью измерений, однако не обеспечивают получения полной информации о состоянии прибортового массива в режиме реального времени. Современные дистанционные технологии, такие как LiDAR, фотограмметрия и GB-InSAR, существенно расширяют возможности пространственного контроля, однако также имеют ряд ограничений, связанных с особенностями физических принципов измерений и условиями эксплуатации. В связи с этим актуальной задачей является разработка интегрированных интеллектуальных систем, объединяющих преимущества различных технологий мониторинга.

Одним из наиболее эффективных средств дистанционного геомеханического мониторинга являются фотонные LiDAR-технологии, основанные на высокоточном лазерном сканировании поверхности карьера с последующим формированием пространственных облаков точек высокой плотности. Одновременно с развитием технологий дистанционного лазерного сканирования широкое распространение получают распределённые сенсорные сети, обеспечивающие непрерывную регистрацию локальных геомеханических и экологических параметров непосредственно в пределах контролируемого объекта. Применение LiDAR обеспечивает построение цифровых моделей прибортового массива, регистрацию пространственных смещений с миллиметровой точностью и дистанционный контроль труднодоступных участков без необходимости присутствия персонала в опасной зоне. Высокая скорость обновления пространственной информации позволяет анализировать динамику деформационных процессов практически в режиме реального времени и своевременно выявлять признаки геомеханической нестабильности. Но несмотря на высокую эффективность фотонных LiDAR-технологий, дистанционное лазерное сканирование характеризует преимущественно геометрию поверхности массива и не позволяет получать информацию о локальных изменениях его физического состояния непосредственно в зоне развития деформационных процессов. Кроме того, качество пространственных данных может снижаться под воздействием пылевых аэрозолей, атмосферных осадков, тумана, вибрационных нагрузок и других факторов, характерных для условий открытых горных работ. Дополнительной проблемой является необходимость обработки больших объёмов пространственной информации, формируемой в процессе высокочастотного лазерного сканирования.

Для устранения указанных ограничений в работе предложена интеграция фотонной LiDAR-системы с распределённой сетью интеллектуальных микросенсорных устройств Smart Dust. В предлагаемой архитектуре LiDAR обеспечивает высокоточное дистанционное

сканирование поверхности карьера и построение цифровых моделей прибортового массива, тогда как сеть Smart Dust осуществляет непрерывную регистрацию локальных геомеханических и экологических параметров, включая вибрационные воздействия, микродеформации, температурный режим и концентрацию пылевых аэрозолей. Интеллектуальные сенсорные узлы объединяются в самоорганизующуюся беспроводную сеть, выполняют предварительную обработку информации и передают телеметрические данные в вычислительный модуль для последующей интеграции с пространственными облаками точек LiDAR.

3.1. Архитектура системы

Архитектура системы содержит фотонный LiDAR, распределённую сеть интеллектуальных сенсорных узлов Smart Dust, подсистему позиционирования и синхронизации, вычислительный модуль обработки пространственных данных, интеллектуальный аналитический блок и программный комплекс визуализации результатов мониторинга. Функционирование системы основано на совместной обработке пространственных данных, получаемых посредством LiDAR-сканирования, и телеметрической информации, поступающей от распределённой сети Smart Dust. Общая архитектура системы представлена на рисунке 1.

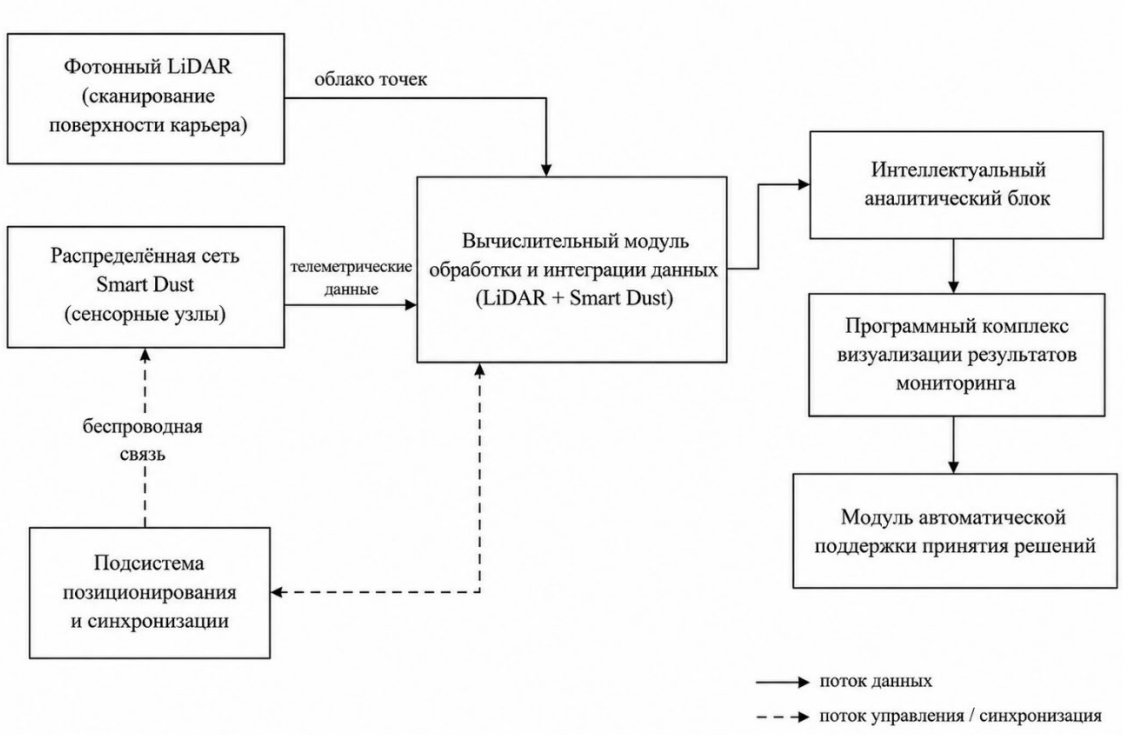

Рисунок 1. Структурная схема интеллектуальной LiDAR-Smart Dust системы.

Фотонный LiDAR-модуль осуществляет генерацию, модуляцию и регистрацию лазерных импульсов, обеспечивая высокоточное определение пространственных координат элементов поверхности прибортового массива на основе анализа параметров отражённого оптического сигнала. Функционирование модуля основано на применении фотонных методов формирования и обработки лазерного излучения, обеспечивающих повышение пространственной разрешающей способности и точности дистанционных измерений в условиях высокоплотного лазерного сканирования. Конструктивно фотонный LiDAR-модуль содержит лазерный излучатель, фотонный приёмник отражённого сигнала, оптическую систему формирования и фокусировки лазерного луча, сканирующий механизм пространственного позиционирования, а также блок цифровой обработки сигналов. Лазерный излучатель обеспечивает генерацию высокочастотных импульсов заданной длины волны, тогда как фотонный приёмник выполняет регистрацию отражённого излучения и преобразование оптического сигнала в цифровую форму. Оптическая система предназначена для формирования направленного лазерного потока и повышения точности пространственного сканирования поверхности карьера. Сканирующий механизм обеспечивает изменение направления лазерного излучения и последовательное покрытие контролируемого участка прибортового массива. Блок цифровой обработки сигналов реализует предварительную фильтрацию измерительной информации, компенсацию шумовых искажений и формирование первичных пространственных данных.

Подсистема Smart Dust представляет собой распределённую сеть автономных интеллектуальных микросенсорных устройств, размещаемых на поверхности уступов и потенциально опасных участках прибортового массива. Каждый сенсорный узел включает измерительные датчики, микроконтроллер, модуль беспроводной связи и автономный источник питания. Узлы выполняют непрерывную регистрацию локальных геомеханических параметров, предварительную обработку информации и обмен данными между соседними устройствами. Полученные сведения передаются в вычислительный модуль, где объединяются с результатами фотонного LiDAR-сканирования для комплексной оценки состояния массива горных пород.

Подсистема позиционирования и синхронизации предназначена для обеспечения высокоточной пространственно-временной привязки результатов лазерного сканирования и согласования параметров регистрации измерительной информации в процессе функционирования LiDAR-комплекса. Основной задачей подсистемы является повышение точности определения координат объектов наблюдения и обеспечение стабильности

пространственной регистрации данных при эксплуатации системы в условиях динамических нагрузок, вибрационных воздействий и изменяющихся параметров внешней среды. Конструктивно подсистема позиционирования и синхронизации включает GNSS-модуль спутниковой навигации, инерциальный измерительный блок, модуль временной синхронизации, датчики пространственной ориентации, а также вычислительный блок интеграции навигационных данных. GNSS-модуль обеспечивает определение глобальных координат LiDAR-системы и формирование навигационной информации, необходимой для пространственной привязки результатов лазерного сканирования. Инерциальный измерительный блок предназначен для регистрации угловых скоростей, линейных ускорений и динамических изменений положения системы в процессе эксплуатации. Модуль временной синхронизации обеспечивает согласование временных параметров генерации лазерных импульсов, регистрации отражённого сигнала и записи пространственных координат, что позволяет повысить точность формирования облаков точек и минимизировать временные рассогласования измерительных данных. Датчики пространственной ориентации обеспечивают контроль положения LiDAR-модуля относительно контролируемой поверхности и позволяют компенсировать ошибки, возникающие вследствие вибрационных и динамических воздействий.

Вычислительный модуль предназначен для регистрации, хранения, синхронизации и совместной обработки пространственных облаков точек, формируемых фотонной LiDAR-системой, и телеметрической информации, поступающей от распределённой сети Smart Dust. Основной задачей модуля является интеграция пространственных и телеметрических данных в единое информационное пространство, пригодное для последующего анализа деформационных процессов и построения цифровых моделей карьера. Конструктивно вычислительный модуль содержит высокопроизводительный процессор обработки данных, графический вычислительный блок, модуль оперативного хранения информации, подсистему предварительной фильтрации облаков точек, а также программный комплекс обработки пространственных данных. Вычислительный процессор обеспечивает выполнение операций регистрации и обработки измерительной информации в режиме реального времени, тогда как графический вычислительный блок предназначен для ускорения параллельной обработки больших массивов пространственных данных. Подсистема предварительной обработки выполняет фильтрацию шумовых искажений, возникающих вследствие воздействия пылевых аэрозолей, атмосферных осадков, вибрационных воздействий и нестабильности отражённого лазерного сигнала. На данном этапе реализуются процедуры удаления выбросов, компенсации

атмосферных помех, нормализации пространственных данных и предварительной сегментации облаков точек. Использование специализированных алгоритмов обработки обеспечивает повышение точности пространственной регистрации объектов и снижение влияния внешних факторов на результаты лазерного сканирования.

Интеллектуальный аналитический блок предназначен для автоматизированного анализа деформационных изменений прибортового массива на основе обработки пространственно-временных данных, формируемых в процессе лазерного сканирования, и применения алгоритмов интеллектуального анализа информации. Основной задачей модуля является выявление закономерностей развития деформационных процессов, оценка динамики смещений и прогнозирование потенциально опасных зон геомеханической нестабильности в режиме реального времени. Конструктивно интеллектуальный аналитический блок включает модуль анализа пространственных данных, подсистему машинного обучения, блок оценки деформационных параметров, систему прогнозирования геомеханических процессов, а также модуль формирования предупреждений и оценки уровня риска.

Модуль анализа пространственных данных обеспечивает совместную обработку результатов фотонного LiDAR-сканирования и информации, поступающей от распределённой сети Smart Dust, сопоставление последовательных цифровых моделей прибортового массива и выявление изменений геометрических и геомеханических параметров контролируемых участков карьера.

Подсистема машинного обучения предназначена для автоматизированного распознавания деформационных аномалий и классификации потенциально опасных изменений состояния массива горных пород. Использование интеллектуальных алгоритмов обработки данных позволяет выявлять скрытые закономерности развития геомеханических процессов, выполнять анализ динамики смещений и адаптировать параметры обработки в зависимости от изменения горно-технических условий эксплуатации системы. Блок оценки деформационных параметров осуществляет расчёт пространственных смещений, скоростей деформации и характеристик изменения геометрии прибортового массива. На основе анализа пространственно-временных данных система прогнозирования геомеханических процессов обеспечивает оценку вероятности развития опасных деформационных явлений и определение зон потенциальной потери устойчивости бортов карьера. Модуль формирования предупреждений предназначен для автоматизированной генерации уведомлений о выявленных деформационных аномалиях и превышении допустимых пороговых значений геомеханических параметров.

3.2. Принципы функционирования системы

Функционирование системы основано на последовательной регистрации, обработке и совместном анализе пространственных данных фотонного LiDAR и телеметрической информации, поступающей от распределённой сети Smart Dust. Принцип работы системы приведен на рисунке 2.

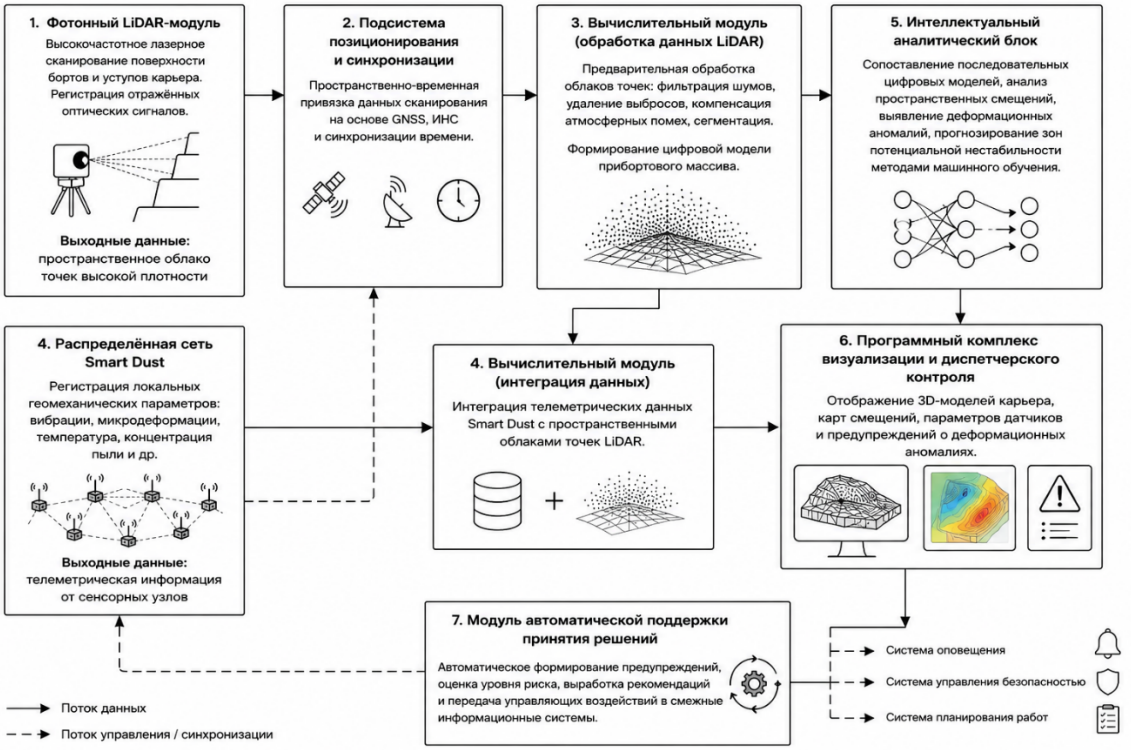

Рисунок 2. Принцип функционирования системы.

На первом этапе LiDAR выполняет лазерное сканирование поверхности карьера, формируя пространственное облако точек, содержащее информацию о геометрии прибортового массива.

На втором этапе подсистема позиционирования и синхронизации осуществляет пространственно-временную привязку данных LiDAR с использованием навигационной и инерциальной информации.

Далее вычислительный модуль выполняет предварительную обработку облаков точек, включая фильтрацию шумов, удаление выбросов, сегментацию и построение цифровой модели прибортового массива.

Параллельно распределённая сеть Smart Dust регистрирует локальные геомеханические и экологические параметры, после чего телеметрические данные интегрируются с пространственной информацией LiDAR.

После объединения данных аналитический модуль анализирует изменения состояния прибортового массива, выявляет деформационные аномалии и прогнозирует развитие геомеханической нестабильности с использованием алгоритмов машинного обучения.

На заключительном этапе результаты анализа отображаются в программном комплексе визуализации в виде цифровой модели карьера, карт деформаций и предупреждений о потенциально опасных участках, формируя основу для автоматической поддержки принятия решений.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Условия проведения имитационного моделирования

Имитационное моделирование выполнялось для цифровой модели участка открытого карьера, сформированной на основе открытых пространственных данных, соответствующих геометрическим характеристикам глубоких карьеров. При моделировании учитывались основные параметры прибортового массива, включая высоту уступов, углы откоса, особенности рельефа, трещиноватость пород, неоднородность геологического строения, а также зоны потенциальной геомеханической нестабильности.

Объектом имитационного моделирования являлся участок открытого карьера протяжённостью около 480 м, шириной 310 м и максимальной глубиной 95 м. Высота прибортового массива составляла 64 м при среднем угле откоса уступов 45°. При моделировании учитывались высота отдельных уступов 16 м, ширина рабочих площадок 14 м, неоднородность рельефа, локальные зоны повышенной трещиноватости, а также участки потенциальной геомеханической нестабильности. Геометрия карьера формировалась на основе цифровой модели рельефа с последующей генерацией облака точек. Общий объём пространственных данных составил около 21 млн точек со средней плотностью порядка 1150 точек/м².

На рисунке 3 представлена цифровая модель карьера, сформированная по результатам совместной обработки пространственных данных фотонного LiDAR и телеметрической информации, поступающей от распределённой сети Smart Dust. Цветовая шкала характеризует величину пространственных смещений прибортового массива, а расположение сенсорных узлов отражает схему локального мониторинга контролируемого участка.

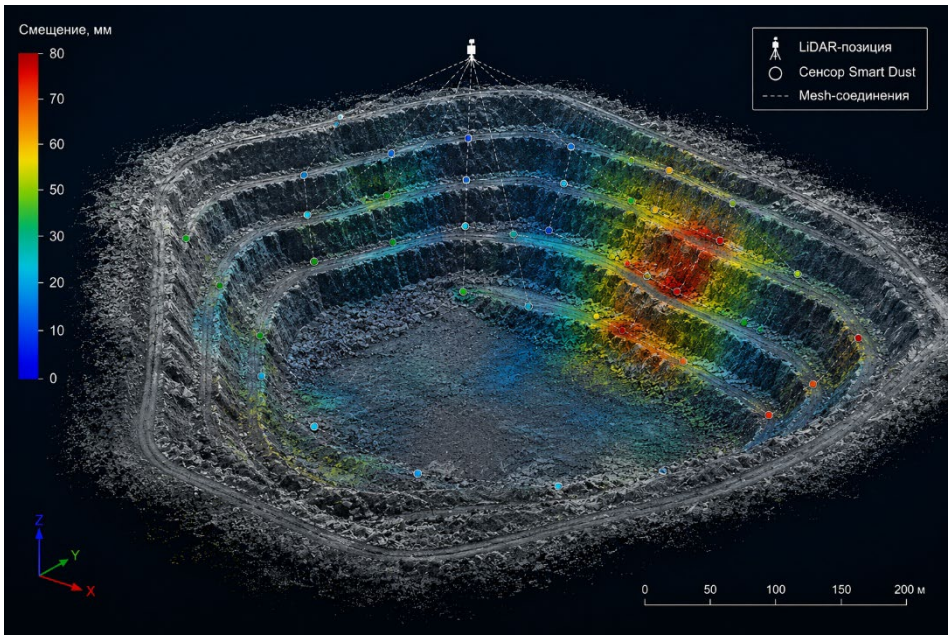

Рисунок 3. Цифровая модель карьера.

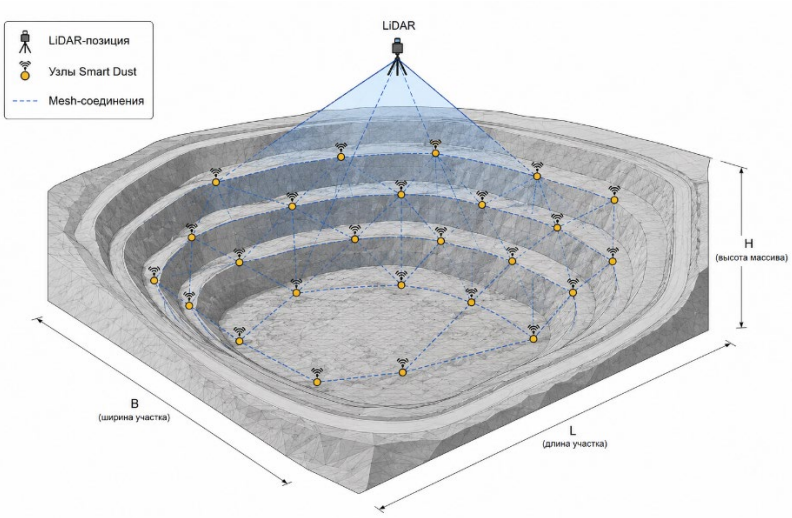

Рисунок 4. Схема размещения LiDAR-комплекса и устройств Smart Dust на моделируемом участке карьера.

На рисунке 4 представлена схема размещения LiDAR-комплекса и распределённой сети устройств Smart Dust на моделируемом участке карьера. LiDAR-комплекс размещён на верхней площадке борта карьера и обеспечивает лазерное сканирование контролируемого участка. Сенсорные узлы Smart Dust распределены по уступам и потенциально опасным зонам прибортового массива, формируя самоорганизующуюся беспроводную сеть для непрерывного сбора и передачи телеметрической информации.

Для имитационного моделирования использовались параметры LiDAR, соответствующие характеристикам современных наземных лазерных сканеров, применяемых

при геомеханическом мониторинге открытых горных работ. Моделирование выполнялось при длине волны лазерного излучения 1550 нм, частоте сканирования 20 Гц, частоте генерации импульсов 400 кГц, угле обзора 120°, максимальной дальности сканирования 350 м, пространственном разрешении 5 мм на расстоянии 200 м, угловом разрешении 0,02°, а также средней плотности облака точек около 1100 точек/м².

LiDAR-комплекс размещался на верхней площадке борта карьера на расстоянии 180-250 м от контролируемого участка. Пространственная привязка результатов сканирования выполнялась с использованием GNSS-модуля с точностью позиционирования ±8 мм и инерциальной измерительной системы с частотой обновления 200 Гц, обеспечивающих корректную регистрацию координат и компенсацию вибрационных воздействий. Среднее время формирования одного облака точек составляло 1 с, а объём данных одного цикла сканирования около 160-180 МБ.

Одновременно моделировалась работа распределённой сети Smart Dust, включающей 128 интеллектуальных сенсорных узлов, размещённых на уступах и участках потенциальной геомеханической нестабильности со средним шагом 25-30 м. Сенсорные узлы регистрировали параметры вибрационных воздействий, микродеформаций, температуры, относительной влажности воздуха и концентрации пылевых аэрозолей с частотой обновления 1 Гц. Передача данных осуществлялась посредством самоорганизующейся mesh-сети с радиусом устойчивой связи до 50 м, после чего телеметрическая информация интегрировалась с пространственными данными LiDAR.

Для оценки эффективности разработанной системы моделировались различные сценарии развития деформационных процессов. В цифровую модель вводились горизонтальные смещения 5-80 мм, вертикальные смещения 3-45 мм, скорость развития деформаций 0,5-6 мм/ч, а также локальные вибрационные воздействия в диапазоне 2-50 Гц, соответствующие работе горнотранспортного оборудования и выполнению буровзрывных работ.

Для оценки устойчивости разработанной системы к внешним воздействиям в модель дополнительно вводились шумовые факторы, соответствующие условиям эксплуатации открытых карьеров. Моделировались пылевые аэрозоли с концентрацией до 0,35 мг/м³, случайные пространственные выбросы до 2 % от общего объёма облака точек, вибрационные смещения LiDAR-комплекса амплитудой до ±4 мм, атмосферные помехи, обусловленные туманом и осадками, потеря до 5 % телеметрических пакетов сети Smart Dust, а также случайные ошибки измерений отдельных сенсорных узлов величиной до ±3 %.

Имитационное моделирование выполнялось в программной среде Python 3.11 с использованием библиотек Open3D, NumPy, SciPy и Scikit-learn. Пространственная регистрация облаков точек осуществлялась алгоритмом ICP, предварительная обработка данных включала статистическое удаление выбросов SOR и воксельную фильтрацию, а визуализация результатов моделирования выполнялась средствами CloudCompare и MATLAB.

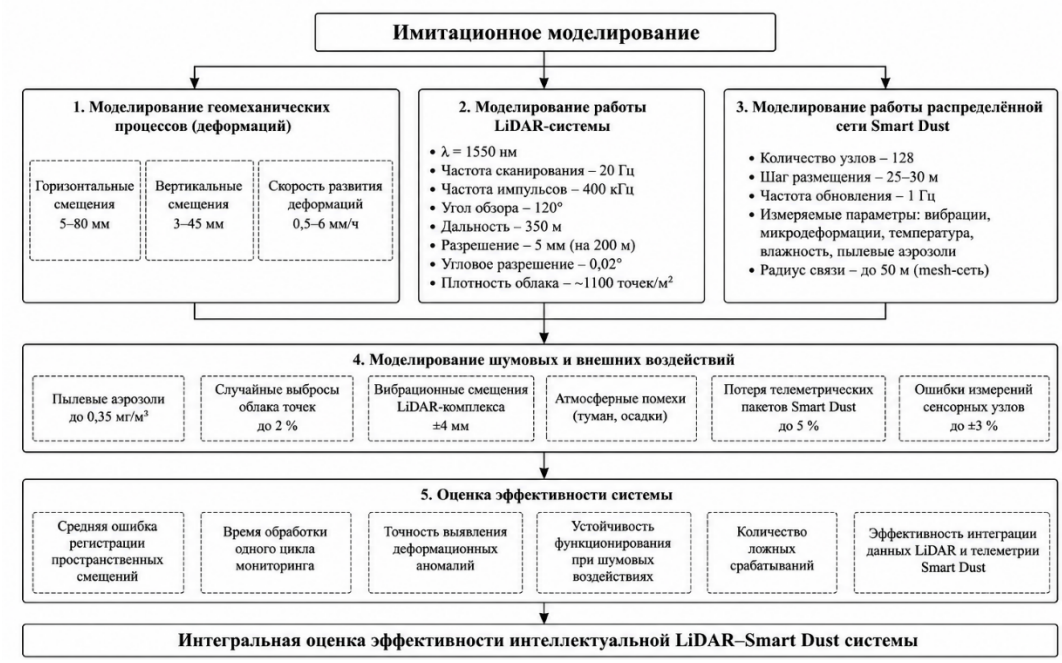

Рисунок 5. Схема имитационного моделирования системы.

На рисунке 5 представлена общая схема имитационного моделирования, включающая моделирование геомеханических процессов, функционирования LiDAR-комплекса и сети Smart Dust, формирование шумовых воздействий, а также оценку эффективности разработанной интеллектуальной системы по основным количественным показателям.

Эффективность системы оценивалась по средней ошибке регистрации пространственных смещений, времени обработки одного цикла мониторинга, точности выявления деформационных аномалий, устойчивости функционирования при шумовых воздействиях, количеству ложных срабатываний, эффективности интеграции пространственных данных LiDAR и телеметрической информации сети Smart Dust.

4.2. Результаты имитационного моделирования

В ходе моделирования было обработано 412 последовательных циклов сканирования, сформировано более 8,6 млрд пространственных точек, а общий объём обработанной информации превысил 72 ГБ.

После выполнения пространственной регистрации, статистического удаления выбросов и воксельной фильтрации количество шумовых точек уменьшилось на 86,3 %, при сохранении средней плотности облака 1087 точек/м². Средняя ошибка регистрации пространственных смещений составила 3,7 мм, среднеквадратическая ошибка – 4,1 мм, а максимальная ошибка при моделировании комплексных шумовых воздействий не превышала 4,9 мм.

Среднее время обработки одного цикла мониторинга составило 1,94 с, включая 0,42 с на предварительную обработку облаков точек, 0,58 с на регистрацию и интеграцию данных, 0,63 с на интеллектуальный анализ и 0,31 с на формирование цифровой модели и визуализацию результатов. Использование графического ускорения позволило сократить общее время вычислений на 52,4 %, а предварительная обработка данных сети Smart Dust уменьшила объём передаваемой телеметрической информации на 34,7 %.

Точность автоматического выявления деформационных аномалий составила 95,4 %, чувствительность – 93,1 %, специфичность – 94,6 %, значение F1-меры – 0,942, а количество ложных срабатываний не превышало 3,8 %. Использование телеметрических данных Smart Dust позволило повысить точность идентификации потенциально опасных участков на 7,6 % по сравнению с моделированием, основанным только на анализе облаков точек LiDAR.

В процессе моделирования максимальные горизонтальные смещения достигали 78 мм, вертикальные – 43 мм, скорость развития деформаций – 5,8 мм/ч. Наиболее интенсивные изменения наблюдались в зонах локального осыпания уступов и развития оползневых процессов. Анализ пространственно-временных данных обеспечил выявление ускорения деформационных процессов за 8,2 часа до достижения критического состояния прибортового массива.

В ходе моделирования также оценивалась эффективность экологического мониторинга. Сеть Smart Dust обеспечивала регистрацию температуры воздуха в диапазоне от 12 до 37 °C, относительной влажности 34-91 % и концентрации пылевых аэрозолей 0,08-0,35 мг/м³. Интеграция экологических параметров с пространственными данными LiDAR позволила учитывать влияние внешних условий на качество лазерного сканирования и повысить устойчивость работы системы при неблагоприятных условиях эксплуатации.

Таблица 2. Основные результаты имитационного моделирования.

Показатель	Значение
Количество циклов LiDAR-сканирования	412
Общее количество обработанных пространственных точек	более 8,6 млрд
Общий объём обработанных данных	более 72 ГБ
Средняя плотность облака точек после фильтрации	1087 точек/м²
Снижение количества шумовых точек	86,3 %
Средняя ошибка регистрации пространственных смещений	3,7 мм
Среднеквадратическая ошибка (RMSE)	4,1 мм
Максимальная ошибка при шумовых воздействиях	4,9 мм
Среднее время обработки одного цикла мониторинга	1,94 с
Сокращение времени обработки при использовании GPU	52,4 %
Снижение объёма передаваемой телеметрии Smart Dust	34,7 %
Точность выявления деформационных аномалий	95,4 %
Чувствительность	93,1 %
Специфичность	94,6 %
F1-мера	0,942
Количество ложных срабатываний	3,8 %
Повышение точности за счёт интеграции Smart Dust	7,6 %
Максимальное горизонтальное смещение	78 мм
Максимальное вертикальное смещение	43 мм
Максимальная скорость развития деформаций	5,8 мм/ч
Время предварительного выявления опасной деформации	8,2 ч

Анализ результатов, представленных в таблице 2, показывает, что наибольшее влияние на повышение эффективности мониторинга оказывает совместная обработка пространственных данных LiDAR и телеметрической информации сети Smart Dust. Использование интегрированной обработки позволило повысить точность выявления деформационных аномалий при сохранении малого времени обработки одного цикла мониторинга, что подтверждает возможность применения разработанной системы для непрерывного автоматизированного контроля состояния прибортового массива.

5. Заключение

По результатам имитационного моделирования установлено, что применение интегрированной LiDAR-Smart Dust системы обеспечивает высокую точность регистрации пространственных смещений, устойчивость функционирования при воздействии шумовых факторов, сокращение времени обработки данных и повышение достоверности выявления потенциально опасных деформационных процессов. Совместная обработка пространственной и телеметрической информации позволила повысить эффективность локализации зон геомеханической нестабильности и обеспечить непрерывный контроль параметров окружающей среды. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной системы при создании интеллектуальных комплексов мониторинга открытых горных работ, ориентированных на повышение уровня промышленной безопасности, своевременное прогнозирование развития опасных геомеханических процессов и снижение негативного воздействия горнодобывающего производства на окружающую среду. Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная апробация предложенной системы на реальных объектах горнодобывающей промышленности, а также разработка интеллектуальных алгоритмов прогнозирования на основе методов глубокого обучения и цифровых двойников карьерного пространства.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-11-20040, https://rscf.ru/en/project/25-11-20040), Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

1. Мониторинг состояния устойчивости карьерных откосов / С. Б. Ожигина, А. Д. Сашурин, С. Г. Ожигин [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 1, № 2. – С. 161-166. – EDN VZDTZL.

2. Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов / Ф. К. Низаметдинов, М. Г. Мустафин, С. Г. Ожигин, А. С. Туякбай // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 176-185. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-176-185. – EDN NJIOIC.

3. Гринберг, Т.В. Горно-металлургическая промышленность в системе устойчивого развития общества / Т.В. Гринберг, С.Ю. Дайман // Горный журнал. – 2009. – № (2). – С. 21-24.

4. Аппаратно-программный комплекс для контроля смещения бортов карьеров / П. Ш. Мади, А. Д. Алькина, А. В. Юрченко [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 3(55). – С. 126-143. – EDN AEKTWH.

5. Kovalev, I.V. On the issue of ensuring the environmental and industrial safety of draft machines of thermal power plants / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1076, No. 1. – P. 012031. – DOI 10.1088/1755-1315/1076/1/012031. – EDN OUFKDS.

6. Tynchenko, Ya.A. Improving the efficiency of technological measurements when monitoring production and environmental indicators of thermal power plants / Ya.A. Tynchenko, I.V. Kovalev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 421. 2020. – P. 62001. – DOI 10.1088/1755-1315/421/6/062001. – EDN EKORMZ.

7. Ковалев, И.В. Математическое моделирование и алгоритмизация функций мониторинга технологических процессов на основе многоточечных измерительных систем / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В. В. Лосев [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 6-1. – С. 29-38. – DOI 10.17513/snt.38693. – EDN ERYLYC.

8. Ворошилова, А.А. Повышение транзакционной надежности передачи данных в интегрированных системах с использованием технологии Smart Dust / А.А. Ворошилова, Е.В. Туева, П.В. Ендуткин // Информатика. Экономика. Управление – Informatics. Economics. Management. – 2025. – № 4(3). – 5008-5017. – DOI 10.47813/2782-5280-2025-4-3-5008-5017.

9. Kovalev, I.V. Monitoring of production processes in the waste processing industry and their impact on the environment / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 677. 2021. – P. 52115. – DOI 10.1088/1755-1315/677/5/052115. – EDN SQKYJB.

10. Nwazor, N. Smart Dust Technologies / N. Nwazor, O. Horsfall // The Journal of Scientific and Engineering Research. – 2022. – Vol. 9. – P. 109-115.