

УДК 624.131.3:681.5:528.8:004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ ПОСТГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ И АВТОНОМНЫХ ДРОНОВ

НИКОЛОВА С.Х.

аспирант, инж. Шуменского университета им. Епископа Константина
Преславского, Факультет технических наук, кафедра «Коммуникационной и
компьютерной техники и технологий безопасности»,
г. Шумен, Болгария

Аннотация: Районы, затронутые подземной добычей полезных ископаемых, представляют собой одни из наиболее рискованных промышленных зон из-за опасности обрушений, провалов грунта, выбросов газов, оползней и нарушений окружающей среды. Существует также риск их превращения в нерегулируемые свалки. Традиционные методы мониторинга таких участков требуют присутствия специалистов на местности, что повышает риск для персонала и снижает эффективность контроля. В настоящей работе предлагается комплексная модель интегрированной системы защиты и наблюдения, сочетающая роботизированную наземную охрану, автономные миссии дронов, спутниковые наблюдения и алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ). Интегрированная система обеспечивает анализ многосенсорных данных в режиме реального времени и автоматизацию процессов обнаружения и реагирования.

Ключевые слова: рекультивация, мониторинг горнодобывающих районов, интеллектуальные системы наблюдения, искусственный интеллект

Abstract: Areas affected by underground mining represent some of the highest-risk industrial zones due to the risk of collapses, sinkholes, gas emissions, landslides, and environmental disturbances. There is also a risk of their transformation into unregulated landfills. Traditional methods for monitoring such sites require the presence of specialists on the ground, which increases the risk to personnel and reduces monitoring effectiveness. This paper proposes a comprehensive model for an integrated protection and surveillance system combining robotic ground security, autonomous drone missions, satellite observations and artificial intelligence (AI) algorithms. The integrated system enables real-time multi-sensor data analysis and automated detection and response processes.

Keywords: reclamation, monitoring of mining areas, intelligent surveillance systems, artificial intelligence

ВВЕДЕНИЕ

Неконтролируемое использование заброшенных или закрытых горнодобывающих участков в качестве свалок является серьезной экологической, технической и социальной проблемой с долгосрочными последствиями. От-

сутствие эффективного контроля и надлежащей рекультивации горнодобывающих участков после прекращения добычи создает предпосылки для незаконного сброса различных видов отходов.

После закрытия шахт подземные штольни, открытые карьеры и хвостохранилища часто остаются без физической защиты и систем мониторинга. Это делает их легкодоступными для неконтролируемого захоронения бытовых, строительных, промышленных и опасных отходов (рис. 1). Экономические мотивы, связанные с уклонением от платы за законный сброс отходов, а также удаленность горнодобывающих районов, еще больше усугубляют проблему.

Экологические риски, возникающие в результате такой практики, значительны. Загрязнение почв и грунтовых вод тяжелыми металлами, нефтепродуктами и токсичными веществами приводит к деградации экосистем и представляет опасность для водных ресурсов. Накопление отходов в подземных пространствах увеличивает риск выбросов газов, самовозгорания и пожаров, а также обрушений и разрушений из-за дополнительной нагрузки на неустойчивые горные конструкции.



Рисунок 1- Начало преобразования старой шахты в свалку



Рисунок 2- Угольная шахта в процессе рекультивации

В контексте современных подходов к управлению рисками внедрение интеллектуальных систем наблюдения и контроля становится эффективным решением [2], [7]. Интеграция видеонаблюдения со встроенным искусственным интеллектом, беспилотными летательными аппаратами, сенсорными сетями и автоматизированными системами сигнализации позволяет заблаговременно выявлять незаконную деятельность и своевременно реагировать ответственным учреждениям. Таким образом, риск неконтролируемого захоронения отходов может быть значительно снижен, а также может быть обес-

печено устойчивое управление и рекультивация бывших горнодобывающих районов (рис. 2).

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА

Проект направлен на разработку и внедрение системы, обеспечивающей непрерывный мониторинг физических, геологических и экологических показателей. Помимо предотвращения несанкционированного доступа на участки [10], она также выявляет ранние признаки обрушений, эрозии, просадки и структурной нестабильности. Разработанная система может контролировать качество воздуха, воды и почвы за счет использования автоматизированных датчиков. Роботизированная система использует дроны для инспекции обширных территорий и поддерживает роботизированные наземные устройства для инспекции опасных участков. Она автоматически реагирует на инциденты или несанкционированную деятельность.

Разработанная система объединяет данные с воздушных (UAV), наземных (UGV), орбитальных (спутников) и стационарных/рассеянных IoT-датчиков (рис. 3) для получения единой, надежной, синхронизированной по времени оперативной картины состояния территории после добычи полезных ископаемых и раннего обнаружения рисков [5], [11].



Рисунок 3- Роботизированная система



Рисунок 4- Беспилотник на привязи

АРХИТЕКТУРА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Интеллектуальная система мониторинга территорий после добычи полезных ископаемых состоит из нескольких ключевых подсистем (рис. 5).

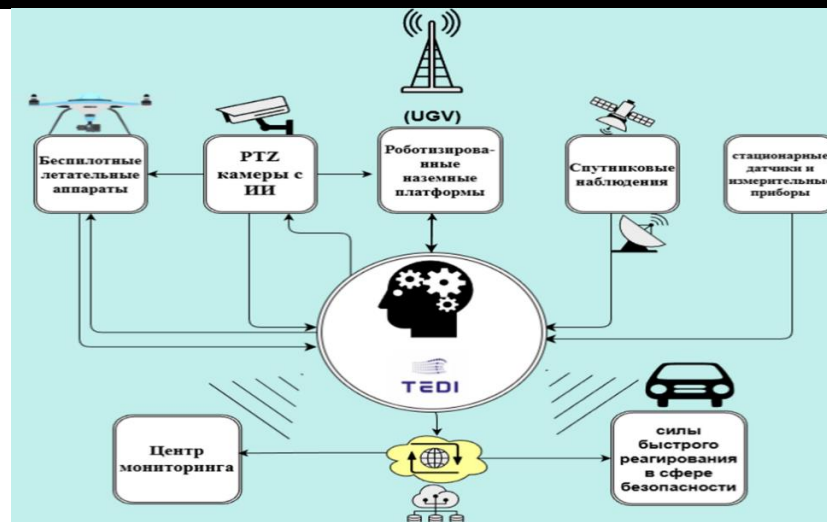


Рисунок 5 - Архитектура интегрированной системы.

1. *Центральный командный модуль TEDI /Technological Digital Intelligent Security/ [7]* – Основной модуль роботизированной системы выполняет обработку данных со всех датчиков, модулей и визуализацию GIS. Благодаря встроенному и обученному искусственному интеллекту для прогнозирования [9], TEDI способен управлять автономными миссиями, принимать решения по тревогам и коммуникациям, а также прогнозировать будущие риски.

2. *Подсистема дронов* - Инфраструктуру для беспилотных летательных аппаратов обеспечивают привязанные дроны (рис. 4). Привязка дрона к наземной электростанции – это способ обеспечения непрерывного и длительного электроснабжения с помощью специального кабеля. Они оснащены лидарами, радаром, тепловизионными камерами, мультиспектральными камерами, газовыми датчиками [1]. Они используются для 3D-картирования, анализа геодинимических изменений, обнаружения тепловых аномалий, а также для обследования труднодоступных районов [11]. При срабатывании любого датчика в конструкции соответствующий дрон поднимается для дополнительной аутентификации.

3. *Роботизированные наземные платформы /РНП/* – По аналогии с принципами системы TEDI, роботы обеспечивают автономную охрану, анализ концентрации газа, видеонаблюдение с использованием ИИ, радио- и инфракрасное обнаружение, и все это в непрерывном режиме работы. РНП заменяют или значительно снижают необходимость присутствия физической охраны.

4. *Спутниковая подсистема* – Согласно интеграционной модели, описанной в отчетах EUROSUR и SkySat [13], эта система обеспечивает наблюдение с высоким разрешением (30–50 см) с помощью SAR в облачную или ночную погоду. Она может обнаруживать изменения рельефа, а также обеспечивать контроль над большими территориями [12]. Спутниковые данные обрабатываются и обогащаются анализами, созданными искусственным интеллектом центрального модуля, который автоматически идентифицирует подозрительные объекты и модели движения [6].

5. *Сенсорная инфраструктура* – территория оснащена камерами с искусственным интеллектом, геодезическими станциями для измерения вертикальных и горизонтальных движений, подземными и наземными датчиками напряжения и вибрации, станциями измерения качества воды и воздуха. Все они работают вместе в сети IoT для передачи данных. Все системы взаимосвязаны посредством внутреннего протокола, а центральный командный модуль подключается к облаку и передает туда данные. При необходимости он передает сигнал в главный центр мониторинга или в силы быстрого реагирования для обеспечения безопасности.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ

Таким образом, предлагаемая система может также использоваться для геотехнической безопасности [3], [4], экологического мониторинга, противодействия несанкционированным проникновениям и действиям. Встроенный искусственный интеллект для распознавания объектов позволяет автоматически подавать сигналы тревоги [8]. Помимо факторов, связанных с несанкционированным проникновением на территорию, алгоритмы искусственного интеллекта анализируют: изменения формы земной поверхности, необычные температурные зоны, необычные концентрации газов, изменения цвета почвы и воды, а также модели передвижения людей или транспортных средств. На основе исторических данных и спутниковых измерений можно создавать модели для прогнозирования обрушений, прогнозирования загрязнения воды и обеспечения раннего предупреждения оползней. Потенциальные области применения этой системы практически безграничны.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Снижение риска инцидентов на 70–90% за счет раннего обнаружения;
- Экономия средств по сравнению с регулярными ручными проверками;
- Возможность непрерывного (24/7) контроля;
- Ограничение экологического ущерба;
- Полностью автоматизированное принятие решений;
- Энергонезависимая и защищенная от атак система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологическая синергия между беспилотными платформами, роботизированной системой безопасности и спутниковой аналитикой доказывает, что мониторинг территорий после добычи полезных ископаемых может осуществляться с высокой эффективностью и предсказуемостью, недостижимыми традиционными методами. Интегрированные роботизированные системы с искусственным интеллектом и беспилотниками представляют собой современный подход к защите территорий после добычи полезных ископаемых. Такое решение обеспечивает безопасность, быстрое реагирование и устойчивое управление окружающей средой. Проект предлагает инновационную и масштабную инфраструктуру, способную адаптироваться к различным типам местности, видам добычи и уровням риска.

Список литературы:

1. Capella Space. Synthetic Aperture Radar (SAR) Technology Overview. — San Francisco, 2024.
2. Garcia M. L. Design and Evaluation of Physical Protection Systems. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2008. — 394 p.
3. Hajiabadi S., Nazari A. Machine learning approaches for prediction of ground subsidence in mining regions // Engineering Geology. — 2023. — Vol. 309. — Art. 106902.
4. Khademi F., Fayyaz R. Deep learning for geotechnical risk prediction in post-mining areas // Computers and Geotechnics. — 2023. — Vol. 159. — Art. 105189.
5. Li X. et al. Multi-sensor data fusion for mining area stability assessment // Remote Sensing of Environment. — 2024. — Vol. 298. — Art. 113838.
6. Maxar Technologies. WorldView-3 Technical Guide. — Westminster, 2024.
7. Nikolova S. Design, development and research of process efficiency in a robotic intelligent security system “TEDI” // Knowledge International Journal Scientific Papers. — 2024. — Vol. 63, No. 3. — P. 289–295.
8. Nikolova S. Exploring artificial intelligence machine learning in video surveillance // MATTEH 2024 Conference Proceedings. — 2024.
9. Nikolova S., Denev D., Tsankov T. Comparative analysis of deep learning-based AI for video cameras working with different databases // Proceedings of CEMA’25. — 2025.
10. Takova I., Nikolova S. Project of a security system for warehouses for hazardous substances and nuclear waste using artificial intelligence and robotic video surveillance for security // Scientific conference "Radiation Safety in the Modern World", National Military University "Vasil Levski" — 2025, ISSN 2738-7607.
11. Zhang W., Lin Q. Autonomous UAV inspection of hazardous industrial sites using AI navigation // Robotics and Autonomous Systems. — 2024. — Vol. 180. — Art. 104679.
12. Zhou Y., Zhang H. AI-driven satellite image analysis for security applications // Journal of Remote Sensing. — 2022. — Vol. 45, No. 3. — P. 221–234.
13. Technology at the Borders: Surveillance, Control and Resistance in EU Migration Governance : [Электронный ресурс] / Fatmanur Delioglu. – Balsillie Papers. – 24 февр. 2025. – URL: <https://balsilliepapers.ca/bsia-paper/technology-at-the-borders-surveillance-control-and-resistance-in-eu-migration-governance/> (дата обращения: 23.11.2025). – Текст: электронный.