УДК 622.831

Елкин Иван Сергеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Исамбетов Александр Вячеславович, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
группа ИИб-251
Нусс Артем Викторович, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Чернышев Егор Алексеевич, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Соколов Валерий Алексеевич, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Elkin Ivan Sergeevich, associate professor, Ph.D.
(KuSTU, Kemerovo)
Isambetov Alexander Vyacheslavovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Nuss Artem Viktorovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Chernyshev Egor Alekseevich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Sokolov Valery Alekseevich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ANALYSIS AND FORECASTING OF COAL AND GAS OUTBURSTS USING AUTOMATED DATA COLLECTION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Аннотация. Приведён анализ существующих методов прогноза выбросоопасности угольных шахт и установлены их ключевые ограничения: контроль одного фактора выбросоопасности и зависимость от достоверности показаний датчиков. Предложена многоуровневая интеллектуальная система, построенная по принципу «защиты в глубину» и объединяющая детерминированные правила на основе ФНиП, статистический анализ временных рядов и большую языковую модель. Система апробирована на реконструированных данных аварии шахты «Листвяжная» (25 ноября 2021

г.): опасная ситуация выявлена за 65 минут до взрыва, признаки искажения показаний датчиков – за 95 минут, когда ни один параметр не превышал нормативного порога.

Ключевые слова. Искусственный интеллект, внезапные выбросы угля и газа, прогноз выбросоопасности, языковая модель, статистический анализ, защита в глубину, мониторинг шахт, шахта «Листвяжная».

Abstract. This paper analyses existing outburst hazard forecasting methods in coal mines and identifies their key limitations: single-factor control and dependence on sensor data integrity. A multi-level intelligent system is proposed based on the defense-in-depth principle, combining deterministic regulatory rules, statistical time-series analysis, and a large language model. The system was validated against reconstructed data from the Listvyazhnaya mine disaster (25 November 2021): a high-risk alert was generated 65 minutes before the explosion, and anomalous sensor readings were detected 95 minutes prior, when no individual parameter exceeded regulatory thresholds.

Keywords. artificial intelligence, coal and gas outbursts, outburst hazard forecasting, large language model, statistical analysis, defense in depth, mine monitoring, Listvyazhnaya mine.

Угольная промышленность остаётся одной из самых опасных отраслей. Внезапные выбросы угля и газа относятся к числу наиболее тяжёлых газодинамических явлений (ГДЯ). Их последствиями становятся не только разрушение горных выработок, но и массовая гибель шахтёров. Только в Кузнецком угольном бассейне по данным комиссий по расследованию несчастных случаев зарегистрирован 271 случай ГДЯ [1 – 3]. Наиболее резонансной аварией последних лет стал взрыв метана 25 ноября 2021 г. на шахте «Листвяжная» (Беловский район Кемеровской области), унёсший жизни 51 человека. По материалам расследования Ростехнадзора одной из причин аварии явилось занижение показаний датчиков метана, не позволившее системе мониторинга своевременно остановить работы.

Несмотря на наличие действующих геофизических и газоаналитических методов прогноза выбросоопасности, ни один из них в отдельности не обеспечивает требуемой надёжности, а часть из них требует остановки технологических процессов, что несовместимо с современной высокопроизводительной добычей. Это формирует запрос на принципиально новое решение – интеллектуальную систему, способную в реальном времени учитывать совокупность факторов выбросоопасности и при этом контролировать достоверность самих исходных данных.

Решение указанных проблем видится в построении многоуровневой интеллектуальной системы, объединяющей нормативные правила, статистический анализ временных рядов и языковую модель в единый контур принятия решений по принципу «защиты в глубину».

В рамках исследования используется комплексный подход, объединяющий физические модели газодинамических процессов и методы интеллектуального анализа данных. Основной задачей является выявление закономерностей, предшествующих внезапным выбросам газа и угля, на основе многопараметрических данных, получаемых в режиме реального времени [3].

В Кузбассе на данный момент на 39 шахтах ведется отработка пластов с выполнением мероприятий по прогнозированию и предотвращению внезапных выбросов угля и газа. Прогноз выбросоопасности угольных пластов основывается на контроле трёх основных факторов: напряжённого состояния массива, давления свободного метана в пласте и прочности наиболее перемятой угольной пачки [1].

Метод основан на бурении контрольных шпуров в забое и измерении начальной скорости газовыделения. а влияние на выбросоопасность горного давления и прочности угля дополнительно может быть оценено путем учета объема штыба, выбуренного с соответствующего интервала контроля. Метод продолжителен и трудоемок, что сдерживает темпы ведения подготовительных выработок и не позволяет использовать его в лавах. Кроме того, поскольку метод учитывает только газовый фактор выбросоопасности, достоверность прогноза невысока [1].

Газоаналитический метод основан на измерении концентрации метана в атмосфере выработки вблизи опасного по выбросам забоя, с помощью аппаратуры контроля метана (АКМ). Прост в реализации, автоматизирован и не мешает ведению горных работ. Однако контролирует исключительно газовый фактор, в силу чего обладает низкой надёжностью прогноза и требует завышенного «запаса надёжности» во избежание ошибки первого рода (внезапного выброса) [1]. Кроме того, метод полностью зависит от исправности и достоверности показаний датчиков – обстоятельство, ставшее принципиальным в случае аварии шахты «Листвяжная» [4, 5].

Геофизические методы импульсного электромагнитного зондирования (метод акустической эмиссии) основаны на регистрации естественного акустического излучения горного массива при развитии трещин под действием напряжений. Широко применяется за рубежом и позволяет анализировать ситуацию по всей длине очистной выработки [1].

Современные геофизические наблюдения проводятся с помощью аппаратурных комплексов типа АЭШ, «АНГЕЛ» по схемам продольного

электропрофилирования и дипольного электромагнитного зондирования. Метод позволяет регистрировать импульсные электромагнитные излучения на удалении до 50 м от точек регистрации и оценивать напряжённое состояние массива по относительному параметру F, равного соотношению амплитуд регистрируемых электромагнитных импульсов соответственно в плоскости, перпендикулярной оси выработки (Vxx), в направлениях бок – бок (Vyy) и кровля – почва (Vzz) [2]. Принципиальным ограничением метода является необходимость остановки технологического оборудования – возникающие при работе техники «шумы» не позволяют разделить сигналы массива и технологические импульсы. В условиях современных высокопроизводительных шахт это приводит к существенным экономическим потерям и фактически делает метод малоприменимым [2].

На основании выводов первой части предлагается интеллектуальная система анализа данных шахтного мониторинга, построенная по принципу «защиты в глубину» (defense in depth) и объединяющая три независимых уровня анализа. Применение языковой модели не рассматривается как самодостаточное решение; модель является одним из компонентов системы и работает совместно с детерминированными правилами и статистическим анализом, что обеспечивает устойчивость к ошибкам и галлюцинациям отдельных компонентов.

Система состоит из четырёх логических уровней. Первые три выполняют независимый анализ одних и тех же входных данных, четвёртый – агрегирует их решения. Архитектура обеспечивает работоспособность системы даже при отказе или некорректной работе любого одного из уровней.

- Уровень 1 - детерминированные правила. Реализует пороговые проверки в соответствии с Федеральными нормами и правилами «Правила безопасности в угольных шахтах» (утв. приказом Ростехнадзора № 507 от 08.12.2020). Применяются нормативные пороги по концентрации метана: 1,0% в исходящей струе участка, 2,0% для местного скопления (требует остановление работ), 5,0% – нижний концентрационный предел взрываемости метана в воздухе. Уровень даёт гарантированный отклик на явное превышение порогов и не зависит от обучения.
- Уровень 2 - статистический анализ временных рядов. Вычисляет линейные тренды по каждому параметру (наклон регрессии), выявляет резкие отклонения через Z-оценку и диагностирует правдоподобие самих показаний. Последнее свойство позволяет обнаруживать неисправности и преднамеренные искажения работы датчиков по аномально малой дисперсии показаний при активной добыче.
- Уровень 3 - большая языковая модель (LLM). Реализован на основе модели семейства Transformer [6] через API-интерфейс. Модели

передаются как сами данные, так и выводы первых двух уровней; её задача - сформировать качественную физическую интерпретацию наблюдаемой картины на естественном языке для горного диспетчера. Решения LLM не имеют приоритета над уровнями 1 и 2; при сетевом отказе уровень считается недоступным, и система продолжает работу на двух оставшихся.

• Уровень 4 - агрегация. Итоговый уровень риска принимается равным максимальному среди трёх уровней (принцип защиты в глубину). Дополнительно вычисляется согласованность решений: при расхождении более чем на одну ступень итоговая уверенность снижается на 30 %, что сигнализирует диспетчеру о неоднозначной ситуации.

Сравнение функциональных ролей уровней приведено в таблице 1.

Таблица 1.

Уровни системы анализа и их роли

Уровень	**Метод**	**Сильная сторона**	**Слабая сторона**
1	Детерминированные правила (ФНиП)	Мгновенный отклик; нормативное соответствие; не зависит от обучения	Не видит зарождающихся трендов; не объясняет
2	Статистический анализ временных рядов	Раннее обнаружение трендов и аномалий; диагностика датчиков	Зависит от длины окна наблюдения
3	Большая языковая модель (LLM)	Физическая интерпретация; объяснение на естественном языке	Вероятностна; возможна галлюцинация

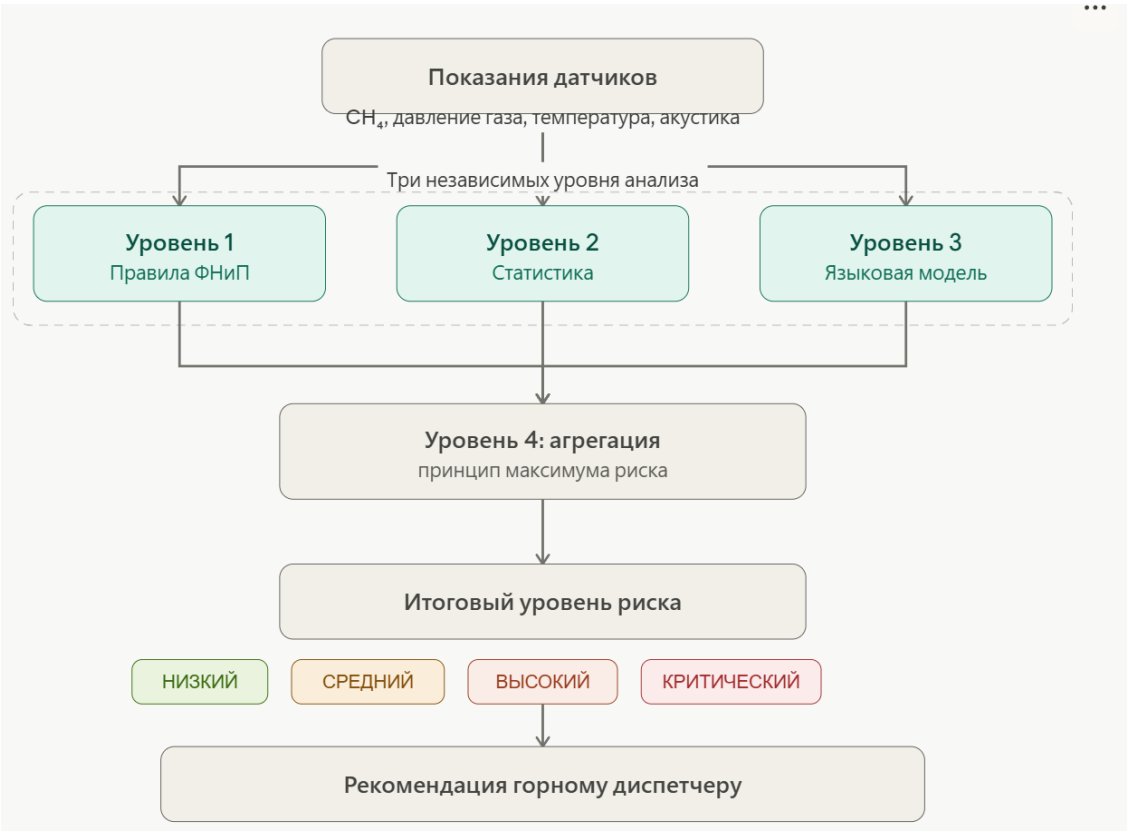

Рис. 1. Блок-схема. Архитектура многоуровневой системы анализа выбросоопасности

Модуль реализован на языке Python. Основной класс анализатора содержит четыре функциональные единицы: layer1_rules() – детерминированные проверки; layer2_statistics() – расчёт трендов, Z-оценок и диагностику датчиков; layer3_llm() – формирование запроса к API языковой модели и парсинг JSON-ответа; aggregate() – агрегацию по принципу максимального риска. Данные в систему подаются в виде последовательности структур SensorReading, каждая из которых описывает показания всех датчиков в один момент времени с привязкой к временной метке.

Взаимодействие с языковой моделью осуществляется по протоколу HTTP через сервис OpenRouter, что даёт возможность подключения произвольной модели (GPT-4, Claude, DeepSeek и др.) без изменения кода. Системный промпт содержит инструкцию модели вернуть результат строго в формате JSON с фиксированной структурой полей, что исключает свободный текст и упрощает программную обработку. Температура генерации установлена в ноль для обеспечения детерминированности ответов.

В работе проведён анализ существующих методов прогноза выбросоопасности угольных шахт, установлены их общие ограничения – контроль преимущественно одного фактора выбросоопасности и отсутствие

защиты от недостоверных показаний датчиков. В качестве решения предложена многоуровневая интеллектуальная система, реализующая принцип «защиты в глубину»: три независимых уровня анализа – нормативные правила, статистика временных рядов и языковая модель – объединены агрегатором, принимающим решение по принципу максимального риска.

Апробация на реконструированных данных аварии шахты «Листвяжная» подтвердила практическую работоспособность системы: предупреждение высокого уровня опасности было сформировано за 65 минут до взрыва, а аномалия показаний датчиков – за 95 минут, в период, когда значения метана не превышали нормативного порога. Уникальным свойством системы, отличающим её от традиционных методов, является диагностика правдоподобия показаний датчиков на основе статистического анализа их дисперсии.

Направлением дальнейших исследований является испытание системы на реальных потоковых данных шахтного мониторинга и включение модуля прогнозирования на основе рекуррентных нейронных сетей LSTM в качестве дополнительного аналитического уровня.

Список литературы

1. Шадрин А. В., Дегтярева М. В., Бирева Ю. А. Актуальные вопросы обеспечения угольных шахт средствами автоматизированного мониторинга внезапных выбросов угля и газа // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 2. – С. 70–77.

2. Ларин М. К. Анализ способов и средств прогноза и предотвращения внезапных выбросов угля и газа на угольных шахтах // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – № 3 (25). – С. 54–57.

3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 507. – Москва: Ростехнадзор, 2020.

4. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 25 ноября 2021 г. на шахте «Листвяжная» АО «СУЭК-Кузбасс» / Сибирское управление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – Кемерово, 2022.

5. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2014.

6. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2017. – Vol. 30. – P. 5998–6008.