

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.831.32; 004.942

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-110-120

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Бессарабова Алина Андреевна*,
Фомин Анатолий Иосифович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: a.bessarabova@ro.ru

Аннотация.

В работе рассматриваются современные проблемы прогнозирования и предупреждения геодинамических явлений на угольных шахтах в условиях углубления горных работ и роста напряженности углепородного массива Кузбасса. Актуальность исследования обусловлена высокой аварийностью при проявлениях горных ударов, внезапных выбросов угля и газа, выдавливания угольного пласта и динамического разрушения пород почвы, а также необходимостью повышения промышленной безопасности на глубоко залегающих, метанообильных пластах. Целью работы является обобщение существующих представлений о механизме геодинамических явлений и анализ современного состояния методов их прогноза и мониторинга с учетом многофакторности и нелинейности процессов в породном массиве. В качестве методов использованы аналитический обзор нормативных документов и научных публикаций, анализ теоретических геомеханических моделей напряженно-деформированного состояния (НДС), рассмотрение практического опыта применения микросейсмического, акустико-эмиссионного и деформационного мониторинга, а также подходов на основе машинного обучения. Показано, что многофакторность и нелинейность процессов, пространственная неоднородность массива и зашумленность регистрируемых сигналов существенно ограничивают надежность однофакторных и локальных методик, повышая долю ложных срабатываний и пропусков опасных зон. Обоснована необходимость перехода к комплексным, адаптивным системам прогнозирования, включающим интеграцию различных каналов мониторинга, построение цифровых двойников горного массива, использование интеллектуальных алгоритмов обработки данных и риск-ориентированного подхода к управлению безопасностью. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании нормативно-методической базы, проектировании геодинамических полигонов, модернизации систем мониторинга и при разработке программно-аппаратных комплексов для оценки и управления геодинамической обстановкой на угольных шахтах.



Информация о статье

Поступила:

20 февраля 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

геодинамические явления,
угольные шахты, горные
удары, внезапные выбросы,
геомеханический мониторинг

Для цитирования: Бессарабова А.А., Фомин А.И. Обзор современных проблем прогнозирования и предупреждения геодинамических явлений на угольных шахтах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 110-120. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-110-120, EDN: UYRHZP

Введение

GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Активная подземная разработка угольных пластов является одним из мощнейших видов техногенного воздействия на геологическую среду. Создание сети горных выработок коренным образом нарушает естественное напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива, провоцируя сложные и зачастую опасные геодинамические процессы. Наибольшую угрозу представляют динамические явления – внезапные, быстропротекающие формы разрушения массива, такие как горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, внезапное выдавливание угля, внезапное динамическое разрушение пород почвы [1].

Углубление горных работ и переход к разработке глубоко залегающих, метанообильных и структурно сложных пластов усиливают как напряженное состояние массива, так и газодинамическую опасность, что приводит к росту частоты и энергии горных ударов и внезапных выбросов. В этих условиях традиционные подходы, основанные преимущественно на анализе единичных параметров (скорости бурения, начальной скорости газоотдачи, отдельных геофизических индикаторов), оказываются недостаточно надежными и требуют дополнения многофакторными методами, цифровыми технологиями и системами комплексного мониторинга.

Настоящая работа посвящена анализу современных проблем прогнозирования и предупреждения геодинамических явлений на угольных шахтах с акцентом на углубление горных работ, многофакторность и нелинейность процессов, трудности интерпретации данных мониторинга, ограниченность существующих методов прогноза выбороопасности, а также

перспективы интеграции цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Особое внимание уделяется обоснованию необходимости перехода от разрозненных локальных методик к комплексным, адаптивным системам геодинамической безопасности, основанным на совмещении геомеханических моделей, инструментального мониторинга и интеллектуальной обработки данных.

Для обеспечения промышленной безопасности на потенциально удароопасных шахтах нормативными документами регламентирован мониторинг состояния краевых частей горного массива. Его целью является прогнозирование и предупреждение следующих видов динамических явлений, представленных на Рис. 1.

Согласно Приложению № 2 к Приказу Ростехнадзора от 15.08.2016 № 339 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности...», действующие нормативные документы определяют признаки динамических явлений и события, которые им предшествуют.

Признаки динамических явлений в горных выработках:

1. Горный удар:

- стремительное разрушение угольного целика или краевой зоны пласта вместе с вмещающими породами в забое или внутри целика;
- формирование ударной воздушной волны в горной выработке и сейсмических колебаний в породном массиве;
- отброс или выдавливание угля, основную массу которого составляют крупные обломки;
- возникновение зазора (щели) между угольным пластом и породами кровли;

- интенсивное пылеобразование;
- повреждение (сдвиг) крепи выработки, выход из строя машин и оборудования;
- усиленное выделение метана на газоносных пластах.

2. Внезапный выброс угля и газа:

- интенсивное разрушение призабойной зоны угольного пласта;
- отброс угля от забоя на дистанцию, большую, чем возможная длина его откоса под углом естественного откоса;
- образование в пласте полости (выработки), чья ширина меньше ее глубины;
- превышение относительного газовыделения из разрушенного угля над его естественной газоносностью;

3. Внезапное выдавливание угольного пласта:

- стремительное смещение призабойной зоны угольного пласта в сторону горной выработки;

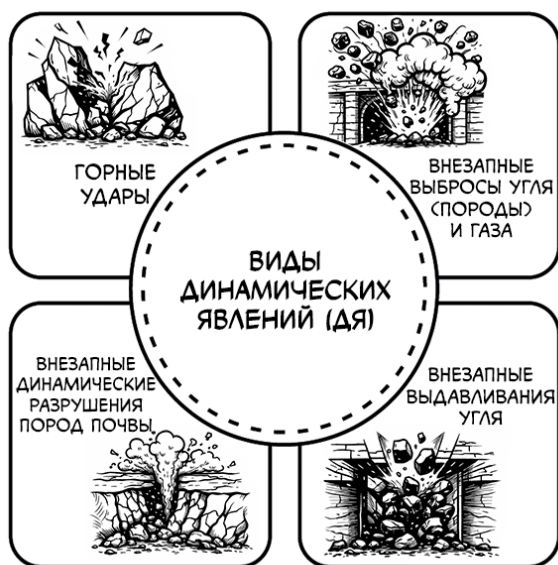


Рис. 1. Виды динамических явлений (ДЯ)

Fig. 1. Types of dynamic phenomena (DP)

- образование полости, у которой ширина превосходит ее глубину;
- появление трещин на контакте между угольным пластом и вмещающими породами;
- газовыделение, не достигающее разницы между естественной и остаточной газоносностью.

4. Динамическое разрушение пород почвы:

- разрушение почвы горной выработки, сопровождающееся образованием разломов в породном массиве;

- интенсивное выделение газа из газоносных пластов при их подработке;

5. Общие предвестники для всех типов динамических явлений:

- изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород;
- аномальные показания геофизических методов контроля (сейсмоакустического, электромагнитного, газогеохимического);
- изменение характера деформаций контура выработок;
- повышение уровня сейсмической активности в районе ведения горных работ [2].

Важно: Наличие одного признака не всегда указывает на непосредственную опасность, но комбинация нескольких признаков требует немедленного прекращения работ и проведения дополнительных исследований для оценки уровня опасности. Регулярный мониторинг и своевременное распознавание этих признаков являются основой системы предупреждения динамических явлений на угольных шахтах.

События, предшествующие динамическим явлениям:

1. Горный удар:

- усиление горного давления на крепь выработки;
- звуковые эффекты в массиве: удары, треск, толчки различной силы и периодичности;
- отстрел (стреляние) отслоившихся кусков угля или породы;
- увеличенный выход буровой мелочи и заклинивание бурового инструмента.

2. Внезапный выброс угля и газа:

- звуковые явления в массиве (удары, треск);

- выдавливание и осыпание угля из забоя, откалывание кусков угля;

- вынос буровой мелочи и газа при бурении скважин;

- самопроизвольное выталкивание или втягивание бурового инструмента, его зажатие;

- снижение прочности и изменение структуры угля;

- шелушение поверхности забоя.

3. Внезапное выдавливание угольного пласта:

- рост давления на крепь выработки;

- увеличенный выход буровой мелочи;

- звуковые явления (шумы, треск) в породном массиве.

4. Динамическое разрушение пород почвы:

- удары в породах почвы;

- интенсивное пучение (поднятие) почвы выработки;

- повышенное давление на крепь [2].

Методы

Геодинамическая безопасность угольных шахт остается одной из ключевых задач горной промышленности. Основные опасные явления включают горные удары, внезапные выбросы угля и газа, выдавливание угольного пласта и динамическое разрушение пород почвы [2]. Ниже представлены ключевые проблемы современного этапа:

1. Углубление горных работ и рост напряженности массива горных пород.

Современная угольная промышленность России вынуждена осваивать все более глубокие горизонты в связи с истощением запасов на мелких глубинах.

К сожалению, в открытых источниках нет единого официального реестра с глубинами отработки для всех шахт Кузбасса. Такие данные обычно считаются и публикуются лишь для отдельных объектов, чаще всего при установлении рекордов.

На основе предоставленных результатов поиска можно собрать статистику лишь по нескольким предприятиям. В таблице ниже собраны данные, подтвержденные достоверными источниками (Таблица 1).

Для шахты «Осинниковская» указаны две глубины (850 м и 900 м). В июне 2025 года

Таблица 1. Глубина отработки на некоторых шахтах Кузбасса

Table 1. The depth of mining in some Kuzbass mines

Предприятие	Глубина отработки (м)
«Осинниковская» (Распадская УК)	900 м
«Осинниковская» (Распадская УК)	до 850 м
«Чертинская-Коксовая»	626 м
«Байдаевская»	655 м

работы велись на горизонте до 850 м, а к декабрю того же года была введена новая, рекордная лава на глубине 900 м [3].

Углубление приводит к фундаментальным изменениям напряженно-деформированного состояния (НДС) массива.

Вертикальное горное давление на глубине H рассчитывается по классической формуле:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \quad (1)$$

где σ_v — вертикальное (литостатическое) напряжение, измеряемое в Па или МПа. 1 МПа = 10^6 Па = 1 Н/мм²; γ — средний удельный вес горных пород, Н/м³ или кН/м³; H — глубина от поверхности до расчетной точки, м.

Как определяется γ : удельный вес γ связан с плотностью ρ и ускорением свободного падения g соотношением:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2)$$

где ρ — плотность пород, кг/м³; g — ускорение свободного падения ($\approx 9,81$ м/с²) [4].

Пример расчета:

Если $\rho = 2500$ кг/м³, то

$$\gamma = 2500 \cdot 9,81 = 24525 \text{ Н/м}^3 \approx 24,5 \text{ кН/м}^3,$$

Этот диапазон соответствует плотности пород $\rho \approx 2450\text{--}2650$ кг/м³, что типично для угленосных толщ региона:

Песчаники: $\rho \approx 2500\text{--}2700$ кг/м³ $\rightarrow \gamma \approx 24,5\text{--}26,5$ кН/м³

Алевриты: $\rho \approx 2400\text{--}2600$ кг/м³ $\rightarrow \gamma \approx 23,5\text{--}25,5$ кН/м³

Аргиллиты: $\rho \approx 2400\text{--}2500$ кг/м³ $\rightarrow \gamma \approx 23,5\text{--}24,5$ кН/м³

Угольные пласты (с учетом вмещающих пород): усредненный $\gamma \approx 24\text{--}26$ кН/м³

В Кузбассе преобладают терригенные отложения с плотностью 2400 – 2700 кг/м³. Значение $\gamma = 25$ кН/м³ часто используют как усредненное для предварительных расчетов.

Дано:

$$H = 800 \text{ м}; \gamma = 25 \text{ кН/м}^3 = 25\,000 \text{ Н/м}^3.$$

Решение:

$$\gamma = \rho \cdot g = 25\,000 \cdot 800 = 20\,000\,000 \text{ Па} = 20 \text{ МПа}$$

Ответ: вертикальное напряжение на глубине 800 м составляет 20 МПа.

Накопленная упругая энергия в массиве пропорциональна квадрату напряжения ($E \propto \sigma^2$) [5]. Это означает, что при переходе от глубины 500 м ($\sigma \approx 12,5$ МПа) к глубине 800 м ($\sigma \approx 20$ МПа) потенциальная энергия разрушения возрастает примерно в 2,6 раза. Соответственно, энергия горных ударов на глубинах свыше 800 – 1000 м достигает $10^6\text{--}10^7$ Дж и выше, тогда как на мелких глубинах (до 300 м) преобладают слабые проявления с энергией менее 10^4 Дж.

По классификации И. М. Петухова и А. М. Линькова горные удары подразделяются по энергии:

– слабые: $< 10^4$ Дж;

– средние: $10^4\text{--}10^5$ Дж;

– сильные: $10^5\text{--}10^6$ Дж;

– очень сильные: $> 10^6$ Дж [6].

В разных изданиях границы могут слегка варьироваться (например, «очень сильные» иногда начинают с $5 \cdot 10^6$ Дж), но общий порядок величин сохраняется.

На глубинах свыше 800 м регистрируются преимущественно сильные и очень сильные удары.

Примеры из практики: Кузбасс (шахты на глубинах 600–1000 м), регистрируются горные удары с энергией $10^5\text{--}10^6$ Дж (сильные) и эпизодически $>10^6$ Дж (очень сильные). На шахте «Распадская» (глубина ~ 600 м) зафиксированы события с $E \sim 5 \cdot 10^5$ Дж [7].

2. Многофакторность и нелинейность процессов.

Прогнозирование геодинамических явлений осложняется многофакторностью и нелинейностью процессов. Эти особенности требуют учета при разработке методов прогнозирования.

Многофакторность означает, что возникновение геодинамических явлений определяется совокупным действием множества взаимосвязанных факторов. Например:

– для обрушения пород кровли конкретный момент обрушения зависит от многих причин: от расстояния до фронта очистных работ, от метода и скорости выемки угля, от податливости применяемой крепи и других факторов [8];

– при прогнозировании динамических явлений в угольном пласте учитывают интенсивность подвигания забоя, количество импульсов в единицу времени, мощность зарегистрированных явлений и другие факторы;

– при освоении месторождений полезных ископаемых на движения земной поверхности влияют как техногенные факторы (например, разработка месторождений), так и природные (тектонические процессы). Существует комбинированный класс факторов – природно-техногенных, когда техногенные процессы возбуждают природные [9].

Многофакторность приводит к тому, что прогнозы могут описываться только вероятностными функциями, а не конкретным временем:

– зависимость хода процесса от изменений начальных условий. В нелинейных системах даже малейшее изменение начальных условий быстро разводит исходно близкие траектории;

– неустойчивость прогноза из-за невозможности оценить начальные условия с бесконечно большой точностью [10].

Методы: для учета многофакторности и

нелинейности процессов используются, например:

- вероятностно-статистические модели (линейные, корреляционные, дисперсионные и другие). Они включают в прогноз не только функциональные зависимости, но и случайные величины (факторы). Но для их использования необходима количественная статистическая информация, полученная в результате долговременных стационарных наблюдений за развитием изучаемого процесса;

- нелинейные модели. Они позволяют исследовать, как небольшие изменения в условиях могут приводить к значительным последствиям в геологической среде, а также помогают понять механизмы формирования и развития геологических структур, таких как горные системы и разломы;

- детальный и комплексный мониторинг. Мониторинг процесса в реальном масштабе времени позволяет постоянно расширять горизонт предсказуемости и повышать эффективность прогноза [11].

Однако успешные прогнозы конкретных событий единичны из-за чрезвычайной зависимости нелинейных геологических систем от изменений начальных условий.

3. Проблемы интерпретации данных мониторинга.

Сложности интерпретации данных геомеханического мониторинга связаны с особенностями методов регистрации, обработки и учета факторов, влияющих на процессы в массиве горных пород. Эти сложности касаются микросейсмического мониторинга, акустической эмиссии и деформационного мониторинга. Микросейсмический мониторинг:

- искажение сигналов из-за неблагоприятных условий приема (например, высокого уровня вибрации обсадной колонны). Это приводит к погрешностям в определении азимутов эмиссионных событий и горизонтальных размеров трещинной зоны;

- маскировка данных техногенными шумами (трубными волнами, вторичными шумами источниками). Например, в скважинах, где ранее проводилось ГРП, расстояние по сейсмическим лучам может быть больше расстояния по пласту, что требует применения специальных методов для локализации источников [12];

- невысокое пространственное разрешение и чувствительность приема сейсмических сигналов, что ограничивает объем охвата породного массива наблюдениями слабых энергетических событий [16];

- проблемы с обнаружением событий из-за случайных факторов: формы и начальной фазы зарегистрированного сейсмического импульса, наличия в среде шумов и помех. Например,

алгоритм, принимающий решение о наличии сейсмического импульса, если амплитуда зарегистрированного сигнала превышает заданное пороговое значение, неустойчив к изменению формы импульса и наличию помех [13].

Акустическая эмиссия:

- ошибки в локации источников акустических событий из-за погрешностей в каждом канале регистрации (геофоне). Например, случайные комбинации погрешностей приводят к увеличению рассогласования результатов локации с ростом количества задействованных в расчете постов;

- усреднение скоростей звука в массиве горных пород, что искажает информацию о регистрируемых источниках сигнала. Некоторые алгоритмы позволяют варьировать скорость распространения звука, но только для всех датчиков одновременно, что усредняет скорости;

- ложные срабатывания из-за зашумленности данных. Например, при сильной зашумленности уровень шума превышает уровень порога обнаружения, что приводит к необходимости передачи и регистрации большого объема неинформативных данных;

- проблемы с использованием однокомпонентных датчиков – возможно получение недостоверных данных о расположении источника [14, 15].

Деформационный мониторинг:

- неоднородность деформирования в массиве горных пород, вызванная геодинамическими движениями. Это затрудняет получение объективной информации об истинных причинах возникновения деформаций. Например, методы мониторинга деформационных процессов не учитывают неоднородность деформирования, что приводит к неравномерному распределению деформаций на объектах недропользования;

- отсутствие обоснованных методик для мониторинга деформационных процессов, вызванных современными геодинамическими движениями. Например, в нормативах отсутствуют рекомендации по прогнозированию и оценке деформаций, вызванных влиянием геодинамических движений;

- ограниченное количество наблюдаемых точек в некоторых методах деформационного мониторинга, что затрудняет построение полной картины деформационных процессов. Например, съемка профильных линий недостаточна для построения полной картины, требующей наличия пунктов наблюдения по всей площади распространения деформаций [16].

Для решения этих сложностей необходимо разрабатывать методики, учитывающие особенности массива горных пород, и использовать комплексное использование

методов мониторинга, например, микросейсмического, акустической эмиссии и деформационного.

4. Недостаточная надежность прогноза выбросоопасности:

- ограниченное применение локального прогноза. Один из основных параметров, используемых для оценки выбросоопасности пласта – давление газа. Его измеряют только при вскрытии пласта, но при удалении от места вскрытия значение может существенно измениться. Локальный прогноз может не отражать фактического состояния массива;

- невысокая достоверность метода, основанного на начальной скорости газоотдачи. Этот параметр показывает только предрасположенность взятой пробы отдавать газ. Он не отражает фактического давления газа в пласте и количества газа, которое способно принять участие в выбросе;

- нерациональность нормативного метода текущего прогноза. Он требует значительных затрат времени и имеет большую ошибку второго рода: часть невыбросоопасных зон относят к выбросоопасным [17].

Согласно Приказу Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2020 г. N 515 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений», для предупреждения внезапных выбросов угля и газа разработан комплекс мероприятий, который включает несколько видов прогноза:

- региональный. Оценка опасности выброса по данным геологической разведки;

- локальный. Определение опасности по данным обследования механических, фильтрационных, сорбционных, петрографических свойств, структуры угля и пласта в целом;

- текущий. Улавливание предупредительных признаков или предвестников внезапного выброса, в том числе сейсмоакустическими методами.

5. Интеграция цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Применение машинного обучения и глубоких нейросетей для прогноза горных ударов на основе микросейсмических данных – перспективное направление интеграции цифровых технологий и искусственного интеллекта в горнодобывающей отрасли. Это позволяет автоматизировать прогнозирование опасных проявлений горного давления в шахтах, что важно для безопасности горных работ [18].

В 2023 году А. П. Господариков и другие его соавторы разработали модель на основе

рекуррентных нейронных сетей (RNN), адаптированную для анализа последовательности микросейсмических событий.

Методика

Модель позволяет моделировать временные зависимости в данных, таких как динамика сейсмических событий и напряжений в породах. Это помогает выявлять критические моменты, когда вероятность динамического проявления возрастает.

Для обучения модели использовались данные сейсмоакустических наблюдений, собранные за полтора года на одном из дальневосточных месторождений. За это время было зафиксировано 2,5 миллиона сигналов, из которых для обучения нейросетей было отобрано 320 тысяч полезных, связанных с геомеханическими процессами в массиве породы [19].

Результаты

Разработанная модель на основе рекуррентных нейронных сетей продемонстрировала высокую эффективность в ретроспективном анализе и прогнозе динамических событий. В ходе исследования было установлено, что нейросетевая модель позволяет с достаточной точностью идентифицировать предвестники горных ударов, анализируя изменения частотных характеристик и энергетических параметров микросейсмического потока.

Апробация модели на исторических данных показала, что алгоритм способен корректно классифицировать состояние массива и выделять аномальные периоды, предшествующие выбросам энергии. Точность прогноза (при бинарной классификации «опасно/неопасно») на тестовой выборке достигла значений, сопоставимых с экспертными оценками геомехаников, что подтверждает возможность использования ИИ в качестве ассистирующего инструмента для служб прогноза. Исследователи подчеркивают, что качество обучения напрямую зависело от объема и представительности входных данных: использование массива из 320 тысяч событий позволило сети выявить скрытые нелинейные закономерности развития геомеханических процессов, недоступные для традиционного статистического анализа [19].

Проблемы

Некоторые проблемы, с которыми сталкиваются при применении моделей машинного обучения и глубоких нейросетей для прогноза горных ударов:

- недостаток размеченных данных. Для надежного обучения нейросетей требуется 10^4 – 10^5 размеченных событий (с метками «горный удар»/«фоновое событие»). Данные должны включать разнообразные сценарии;

– «черный ящик» нейросетей. Нейросети не предоставляют интерпретируемых объяснений своих прогнозов. Это создает сложности: горный мастер не может проверить, на каком основании выдано предупреждение, затруднено доверие к системе и принятие управленческих решений;

– локальность моделей. Модели, обученные на данных одного месторождения, плохо переносятся на другие из-за различий в геологии, специфики технологии отработки и особенностей мониторинга [20].

Перспективы

Некоторые направления развития метода прогноза горных ударов на основе микросейсмических данных с применением машинного обучения и глубоких нейросетей:

– обнаружение аномалий в сигналах при проведении мониторинга, свидетельствующих о предстоящем событии. Если будет обнаружена устойчивая связь между аномалиями в микросейсмических сигналах и горным ударом, это позволит с высокой точностью определить время возникновения удара;

– комбинирование нескольких моделей глубокого обучения с использованием ансамблей методов, что может улучшить точность и надежность прогнозов;

– учет разнообразных сценариев при обучении моделей, например, разных глубин, типов пород, технологий отработки [19].

Перспективные направления решения

Перспективные направления развития систем прогнозирования и предупреждения геодинамических явлений на угольных шахтах базируются на сочетании теоретического, инструментального и цифрового подходов. Во-первых, важным является дальнейшее развитие геомеханических моделей НДС массива с учетом глубины, тектоники, анизотропии, долговременной прочности и накопления повреждений, что позволит более корректно оценивать энергетический потенциал динамических проявлений на больших глубинах [21].

Во-вторых, приоритетным направлением является создание комплексных систем мониторинга, объединяющих микросейсмику, акустическую эмиссию, деформационный контроль, газодинамические измерения и технологические параметры (скорость подвигания лавы, нагрузка на крепь и др.) в едином информационном пространстве шахты. Такая интеграция данных позволит выявлять устойчивые комбинации предвестников, переходить от эпизодического к непрерывному контролю и строить более надежные критерии перехода массива от фоновое состояние к предаварийному [19].

Перспективным является внедрение цифровых двойников горного массива – трехмерных постоянно актуализируемых моделей НДС и газодинамического состояния, сопряженных с данными мониторинга и результатами расчетов. Цифровой двойник позволяет в режиме, близком к реальному времени, оценивать влияние изменения схемы отработки, параметров крепи или дегазации на геодинамическую обстановку и проводить «виртуальные эксперименты» по выбору оптимальных режимов ведения работ.

Отдельное направление связано с использованием методов машинного обучения и глубоких нейронных сетей для интеллектуальной обработки массивов микросейсмических и других данных. Такие модели уже демонстрируют возможность прогноза вероятности горного удара за несколько часов до события, однако требуют расширения и стандартизации обучающих выборок, повышения устойчивости к переносу между месторождениями и разработки методов интерпретируемости прогнозов для практического использования горными специалистами [22].

Наконец, перспективным является развитие риск-ориентированного подхода к управлению геодинамической безопасностью, предполагающего не только жесткое следование нормативам, но и количественную оценку вероятности и последствий динамических явлений. Это создает основу для ранжирования участков по уровню опасности, оптимизации профилактических мероприятий (разгрузочные скважины, гидроразрыв, предварительная дегазация) и более рационального распределения ресурсов службы прогноза [23].

Результаты и обсуждение

Проведенный анализ литературных источников, нормативных документов и современных исследований показал, что углубление горных работ приводит к существенному росту литостатических и тектонических напряжений в углепородном массиве, а также к увеличению энергетического потенциала динамических явлений. На глубинах порядка 800–1000 м вертикальные напряжения достигают десятков мегапаскалей, а энергия сильных и очень сильных горных ударов – величин порядка 10^5 – 10^6 Дж и более, что подтверждается данными наблюдений в Кузбассе и на других крупных угольных месторождениях.

Установлено, что возникновение геодинамических явлений носит ярко выраженный многофакторный и нелинейный характер: на риск их проявления одновременно влияют геологические, геофизические, газодинамические и технологические параметры.

Это объясняет ограниченную эффективность однофакторных методов прогноза, которые не учитывают сложные взаимодействия процессов и зачастую либо дают избыточное количество ложных предупреждений, либо пропускают действительно опасные ситуации.

Рассмотренный опыт применения микросейсмического, акустико-эмиссионного и деформационного мониторинга свидетельствует о высоком потенциале этих методов для выявления предвестников динамических событий, но также демонстрирует серьезные проблемы интерпретации данных: зашумленность сигналов, влияние техногенных помех, неопределенность скоростей распространения волн и погрешности локации источников. Для повышения информативности мониторинга необходимы как совершенствование аппаратуры и алгоритмов обработки, так и переход к комплексированию различных физико-технических методов наблюдений.

Анализ подходов к оценке выбросоопасности показал, что традиционные методы, основанные на локальных измерениях давления газа и начальной скорости газоотдачи, обладают существенными ограничениями и не всегда отражают реальное состояние массива на расстоянии от точки отбора проб. В этой связи набирают актуальность многоуровневые схемы прогноза (региональный, локальный, текущий), а также разработка многофункциональных подсистем, объединяющих геолого-геофизические и газодинамические параметры.

Отдельно рассмотрены работы по интеграции методов машинного обучения и глубинных нейросетей в системы прогноза горных ударов, которые показывают возможность существенного повышения точности прогноза при наличии больших массивов размеченных данных. Вместе с тем подчеркивается проблема «черного ящика» и слабой переносимости моделей между различными месторождениями, что требует разработки гибридных решений, сочетающих ИИ-подходы с физически обоснованными геомеханическими моделями и экспертными системами.

Выводы

1. Геодинамическая безопасность угольных шахт в условиях углубления горных работ и разработки сложных, метанообильных пластов остается одной из наиболее актуальных задач горной промышленности, так как сопровождается ростом напряженности массива и энергичности динамических явлений.

2. Современные проблемы прогнозирования геодинамических явлений обусловлены многофакторностью и нелинейностью процессов, а также ограниченной

информативностью и интерпретируемостью традиционных методов мониторинга и оценки выбросоопасности.

3. Имеющиеся нормативные и методические подходы обеспечивают базовый уровень контроля за состоянием массива, но не позволяют в полной мере реализовать потенциал оперативного, высоконадежного прогноза, особенно на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях.

4. Перспективное развитие систем геодинамической безопасности связано с комплексным мониторингом, созданием цифровых двойников массива, внедрением методов машинного обучения и нейросетевых моделей, а также переходом к риск-ориентированным, адаптивным системам предупреждения.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию геомеханических, геофизических и газодинамических моделей в единую многофакторную платформу прогноза, а также на разработку практико-ориентированных рекомендаций по внедрению цифровых и ИИ-технологий на конкретных угольных предприятиях с учетом их геолого-технологической специфики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумов Е. Е. Совершенствование метода прогнозирования удароопасности по результатам сейсмического мониторинга при интенсивной отработке угольных пластов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.8.6. Разумов Егор Евгеньевич. Кемерово, 2025. 22 с.
URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01013527146>.
2. Колесниченко Е. А., Колесниченко И. Е., Колесниченко Е. И., Люмомищенко Е. И. Горные удары и выбросы метана: технологическая теория и способы предотвращения // Горная промышленность. 2025. № 1. С. 88–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-88-96.
3. На шахте «Осинниковская» ввели в эксплуатацию самую глубокую лаву в Кузбассе // Руда и Металлы: информационно-аналитический портал. 2025. 1 декабря.
4. Клишин В. И., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н., Цветков А. Б. Влияние пространственной ориентировки инициирующих щелей направленного гидроразрыва на деформирование пород кровли в окрестности очистного забоя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2025. № 1. С. 3–16. DOI: 10.15372/FTPRPI20250101.
5. Wang X., Li Z., Zhang Y. Energy evolution analysis of rockburst in deep roadways based on critical energy criterion // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 11. Art. 1283079. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1283079.
6. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. Москва : Недра, 1983. 280 с.
7. Егоров О. П. Безопасность горных работ в

тектонически нарушенных зонах угольных пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа и горным ударам : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01. Егоров Олег Петрович. Кемерово, 2002. 178 с.

8. Ботвенко Д. В. Исследование процессов, обуславливающих устойчивость и периодичность обрушения пород кровли в очистных забоях на пластах пологого падения при современной технологии угледобычи // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 3. С. 45–56.

9. Wu S.-K., Zhang J.-W., Song Z.-X., Fan W.-B., Zhang Y. [et al.] Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China // Journal of Central South University. 2023. Vol. 30. Iss. 11. Pp. 3763–3789. DOI : 10.1007/s11771-023-5489-5.

10. Itasca Consulting Group. Modeling Chaotic Systems // Itasca Software 9.60 Documentation. Minneapolis : Itasca, 2025. Section: Methodology.

11. Singh M., Banakar L., Dikshit S. AI-Powered Environmental Surveillance: Enhancing Air and Water Quality Monitoring through Real-Time Predictive Analytics // Journal of Carcinogenesis. 2025. Vol. 24. № 3S. Pp. 639–647. DOI: 10.64149/J.Carcinog.24.3s.639-647.

12. Яскевич С. В., Муртазин Р. Р., Дучков А. А., Жилко Е. Ю. О факторах, влияющих на достоверность результатов скважинных микросейсмических наблюдений, и важности контроля качества обработки данных // Нефтяное хозяйство. 2025. № 3. С. 73–78. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-3-73-78.

13. Zhou Z., Wang Y., Chen X. DASEventNet: AI-Based Microseismic Detection on Distributed Acoustic Sensing Data From the Utah FORGE Well 16A (78)-32 Hydraulic Stimulation // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2024. Vol. 129. № 9. Art. e2024JB029102. DOI: 10.1029/2024JB029102.

14. Щербина А. О., Солодчук А. А. Локация источников акустической эмиссии по данным распределенной системы комбинированных приемников // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 44. № 3. С. 144–156. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156.

15. Marapulets Y., Shcherbina A., Solodchuk A., Mishchenko M. Localization of Rock Acoustic Emission Sources Based on a Spaced Sensors System Consisting of

Two Combined Receivers and a Hydrophone // Sensors. 2025. Vol. 25. № 3. Art. 849. DOI: 10.3390/s25030849.

16. Cao Y., Li X., Wang Y. [et al.] A review of monitoring, forecasting, and early warning methods for landslides triggered by mining activities // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. № 10. Art. 1737. DOI: 10.3390/rs16101737.

17. Xue K., Qi Y., Duan H., Cao A., Wang A. Prediction of coal and gas outburst hazard using kernel principal component analysis and an enhanced extreme learning machine approach // Geohazard Mechanics. 2024. Vol. 2. № 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1016/j.ghm.2024.09.002.

18. Xu Z., Chen L., Zhang W. [et al.] Research on Intelligent Early Warning System and Cloud Platform for Rockburst Monitoring // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. № 20. Art. 11650. DOI: 10.3390/app152011650.

19. Господариков А. П., Зацепин М. А., Трофимов А. В. Прогнозирование горных ударов на основе анализа временных рядов микросейсмических событий с использованием рекуррентных нейронных сетей // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 345–356. DOI: 10.31897/PMI.2023.15.

20. Interpretability Analysis of Data Augmented Convolutional Neural Network in Mineral Prospectivity Mapping Using Black-Box Visualization Tools // Natural Resources Research. 2025. Vol. 34. № 2. Pp. 1–25. DOI: 10.1007/s11053-024-10456-7.

21. Zhang X., Li G., Chen Y., Wang H., Zhang H., Li H., Du W., Li X., Xu X., He Y. A prototype-based rockburst types and risk prediction algorithm considering intra-class variance and inter-class distance of microseismic data // Frontiers in Earth Science. 2025. Vol. 13. Art. 1601090. DOI: 10.3389/feart.2025.1601090.

22. Корнилов С. В., Рыбников П. А., Рыбникова Л. С. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2025. Т. 67. № 1. С. 76–85. DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.

23. Narimani Dehnavi R. Development of a quantitative risk assessment method to address the rock mechanics issues of applying TBMs in deep mines : Doctoral Thesis. R. Narimani Dehnavi. Leoben : Montanuniversitaet Leoben, 2024. DOI: 10.34901/mul.pub.2024.055.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Бессарабова Алина Андреевна, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: a.bessarabova@ro.ru

Фомин Анатолий Иосифович, доцент тех. наук, профессор АОТП, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: fominai@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Бессарабова Алина Андреевна – постановка задач исследования, обзор соответствующей литературы, сбор данных, расчеты, написание текста.

Фомин Анатолий Иосифович – постановка задач исследования, научный менеджмент, написание и

редактирование материала, формулировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

REVIEW OF CONTEMPORARY ISSUES OF FORECASTING AND PREVENTING GEODYNAMIC PHENOMENA IN COAL MINES

Alina A. Bessarabova, Anatoly I. Fomin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: a.bessarabova@ro.ru



Article info

Received:

20 February 2026

Accepted for publication:

15 June 2026

Accepted:

01 July 2026

Keywords: geodynamic phenomena, coal mines, rock bursts, sudden outbursts, geomechanical monitoring

Abstract.

The paper examines current issues in predicting and preventing geodynamic phenomena in coal mines under conditions of mining deepening and increasing stress in the coal-rock mass of Kuzbass. The relevance of the study stems from the high accident rate associated with manifestations of rock bursts, sudden coal and gas outbursts, coal seam extrusion, dynamic failure of floor rocks, and the need to improve industrial safety in deep, methane-bearing coal seams. The aim of the work is to summarize existing concepts of the mechanism of geodynamic phenomena and to analyze the current state of methods for their prediction and monitoring, considering the multifactorial and nonlinear nature of processes in the rock mass. The methods employed include an analytical review of regulatory documents and scientific publications, analysis of theoretical geomechanical models of the stress-strain state, examination of practical experience in applying microseismic, acoustic emission, and deformation monitoring, as well as approaches based on machine learning. It is shown that the multifactorial and nonlinear nature of the processes, spatial heterogeneity of the rock mass, and noise in recorded signals significantly limit the reliability of single-factor and local methods, increasing the rate of false alarms and missed detections of hazardous zones. The necessity of transitioning to integrated, adaptive forecasting systems is substantiated, including the integration of various monitoring channels, the construction of digital twins of the rock mass, the use of intelligent data processing algorithms, and a risk-oriented approach to safety management. The results obtained can be used to improve the regulatory and methodological framework, design geodynamic testing sites, modernize monitoring systems, and develop software and hardware complexes for assessing and managing the geodynamic situation in coal mines.

For citation: Bessarabova A.A., Fomin A.I. Review of contemporary issues of forecasting and preventing geodynamic phenomena in coal mines. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):110-120. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-110-120, EDN: UYRHZP

REFERENCES

1. Razumov E.E. Improvement of the method for predicting rockburst hazard based on the results of seismic monitoring during intensive mining of coal seams: Author's abstract. dis. ... cand. tech. sciences: 2.8.6. Razumov Egor Evgenievich. Kemerovo, 2025. 22 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01013527146>
2. Kolesnichenko E.A., Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.I., Lyubomishchenko E.I. Rock bursts and methane outbursts: technological theory and methods of prevention. *Russian Mining Industry*. 2025; 1:88-96. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-88-96.
3. The deepest longwall in Kuzbass was put into operation at the Osinnikovskaya mine. *Ore and Metals : information and analytical portal*. 2025. December 1.
4. Klishin V.I., Pavlova L.D., V.N. Fryanov V.N., A.B., Tsvetkov A.B. Influence of the spatial orientation of initiating slots of directional hydraulic fracturing on the deformation of roof rocks in the vicinity of the longwall face. *Journal of Mining Science*. 2025; 1:3-16. DOI: 10.15372/FTPRPI20250101.
5. Wang X., Li Z., Zhang Y. Energy evolution analysis of rockburst in deep roadways based on critical energy criterion. *Frontiers in Energy Research*. 2023; 11:1283079. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1283079.

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД,
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

6. Petukhov I.M., Linkov A. M. Mechanics of rock bursts and outbursts. Moscow: Nedra; 1983. 280 p.
 7. Egorov, O. P. Safety of mining operations in tectonically disturbed zones of coal seams prone to sudden outbursts of coal and gas and rock bursts: dis. ... cand. tech. sciences: 05.26.01. Egorov Oleg Petrovich. Kemerovo, 2002. 178 p.
 8. Botvenko D.V. Investigation of processes determining the stability and periodicity of roof rock caving in longwall faces on gently sloping seams with modern coal mining technology. *Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety*. 2022; 3:45-56.
 9. Wu S.-K., Zhang J.-W., Song Z.-X., Fan W.-B., Zhang Y. [et al.] Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China. *Journal of Central South University*. 2023; 30(11):3763-3789. DOI: 10.1007/s11771-023-5489-5.
 10. Itasca Consulting Group. Modeling Chaotic Systems. Itasca Software 9.60 Documentation. Minneapolis: Itasca; 2025. Section: Methodology.
 11. Singh M., Banakar L., Dikshit S. AI-Powered Environmental Surveillance: Enhancing Air and Water Quality Monitoring through Real-Time Predictive Analytics. *Journal of Carcinogenesis*. 2025; 24(3S):639-647. DOI: 10.64149/J.Carcinog.24.3s.639-647.
 12. Yaskevich S.V., Murtazin R.R., Duchkov A.A., Zhilko E.Yu. On factors affecting the reliability of results of borehole microseismic observations and the importance of data processing quality control. *Oil Industry*. 2025; 3:73-78. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-3-73-78.
 13. Zhou Z., Wang Y., Chen X. DASEventNet: AI-Based Microseismic Detection on Distributed Acoustic Sensing Data From the Utah FORGE Well 16A (78)-32 Hydraulic Stimulation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024; 129(9):e2024JB029102. DOI: 10.1029/2024JB029102.
 14. Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. Location of acoustic emission sources based on data from a distributed system of combined receivers. *Bulletin of KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2023; 44(3):144-156. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156.
 15. Marapulets Y., Shcherbina A., Solodchuk A., Mishchenko M. Localization of Rock Acoustic Emission
- © 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alina A. Bessarabova, Postgraduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia Kemerovo, Vesennyaya St., 28), e-mail: a.bessarabova@ro.ru
Anatoly I. Fomin, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the AOTP Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia Kemerovo, Vesennyaya St., 28), e-mail: fominai@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Alina A. Bessarabova – formulation of research objectives, literature review, data collection, calculations, writing the original draft.

Anatoly I. Fomin – formulation of research objectives, scientific management, writing and editing the material, formulation of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Sources Based on a Spaced Sensors System Consisting of Two Combined Receivers and a Hydrophone. *Sensors*. 2025; 25(3):849. DOI: 10.3390/s25030849.

16. Cao Y., Li X., Wang Y. [et al.] A review of monitoring, forecasting, and early warning methods for landslides triggered by mining activities. *Remote Sensing*. 2024; 16(10):1737. DOI: 10.3390/rs16101737.

17. Xue K., Prediction of coal and gas outburst hazard using kernel principal component analysis and an enhanced extreme learning machine approach. Qi Y., Duan H., Cao A., Wang A. *Geohazard Mechanics*. 2024; 2(4):279-288. DOI: 10.1016/j.ghm.2024.09.002.

18. Xu Z., Chen L., Zhang W. [et al.] Research on Intelligent Early Warning System and Cloud Platform for Rockburst Monitoring. *Applied Sciences*. 2025; 15(20):11650. DOI: 10.3390/app152011650.

19. Gospodarikov A.P., Zatselin M.A., Kovalevsky D.V., Trofimov A.V. Prediction of rock bursts based on the analysis of time series of microseismic events using recurrent neural networks. *Journal of Mining Institute*. 2023; 261:345-356. DOI: 10.31897/PMI.2023.15.

20. Interpretability Analysis of Data Augmented Convolutional Neural Network in Mineral Prospectivity Mapping Using Black-Box Visualization Tools. *Natural Resources Research*. 2025; 34(2):1-25. DOI: 10.1007/s11053-024-10456-7.

21. Zhang X. A prototype-based rockburst types and risk prediction algorithm considering intra-class variance and inter-class distance of microseismic data / X. Zhang, Li G., Chen Y., Wang H., Zhang H., Li H., Du W., Li X., Xu X., He Y. *Frontiers in Earth Science*. 2025; 13:1601090. DOI: 10.3389/feart.2025.1601090.

22. Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. On the main directions of complementarity of digitalization methods and geoinformation support for mining production. *News of higher educational institutions. Geology and Exploration*. 2025; 67(1):76-85. DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.

23. Narimani Dehnavi R. Development of a quantitative risk assessment method to address the rock mechanics issues of applying TBMs in deep mines : Doctoral Thesis. Leoben: Montanuniversitaet Leoben4 2024. DOI: 10.34901/mul.pub.2024.055.

