ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11-1):77–95
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831.32 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_77

ФАКТОРЫ, ПОВЫШАЮЩИЕ ОПАСНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

А. В. Бондарев[1], А. Н. Шабаров[1], М. В. Шванкин[1], Т. А. Василенко[1]

[1]Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Разнообразие горно-геологической составляющей угольных месторождений, их индивидуальность, сложные геодинамические условия отработки угольных пластов с учётом скоростного ведения проходческих и добычных работ являются факторами рисков, требующих постоянного изучения. Нередко возникают ситуации, на которые нельзя дать однозначного ответа, а для их разрешения требуются нелинейные подходы. Технические и технологические решения должны быть направлены на локализацию рисков геодинамической природы. Высокая вероятность дестабилизации состояния массива горных пород, прогрессирующей вследствие техногенного воздействия, требуют своевременных действий для предотвращения катастрофических последствий. Актуальной в подобных случаях становится идентификация форм рисков, использование проверенных и адекватных приёмов для исследования реакции среды и фиксации (контроля) развития сложноорганизованных природных процессов и «нетипичных» (особых) форм их проявления. С 2014 года угольные предприятия с подземной добычей работают в режиме использования многофункциональной системы безопасности – МФСБ, что обеспечивает применение дополнительных средств контроля с проведением адаптационных испытаний новых технологий, методов прогноза и предотвращения газодинамических явлений на угольных месторождениях. Основополагающую роль в реализации на практике геодинамического мониторинга при широкомасштабных исследованиях играет сформированный набор средств и методов контроля, предельно точно и эффективно пополняющий структуру МФСБ действующего угледобывающего предприятия.

Ключевые слова: угольное месторождение, геодинамический мониторинг, массив горных пород, удароопасность, формы техногенных рисков, газодинамические явления, пористость.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2023-0002 Фундаментальные междисциплинарные исследования недр Земли и процессов комплексного освоения георесурсов).

Для цитирования: *Бондарев А. В., Шабаров А. Н., Шванкин М. В., Василенко Т. А.* Факторы, повышающие опасность проявления газодинамических явлений в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 77–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_77.

Factors that increase the danger of gas dynamic phenomena in coal mines

A. V. Bondarev[1], A. N. Shabarov[1], M. V. Shvankin[1], T. A. Vasilenko[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: The diversity of the mining and geological component of coal deposits, their individuality, complex geodynamic conditions of coal seams mining taking into account the high-speed tunneling and mining operations are risk factors that require constant study. Often there are situations that cannot be answered unambiguously, and their resolution requires non-linear approaches. Technical and technological solutions should be aimed at localizing geodynamic risks. The high probability of destabilization of the rock mass due to anthropogenic impact requires timely actions to prevent catastrophic consequences. In such cases, it becomes relevant to identify the forms of risks, use proven and adequate methods to study the reaction of the environment and fix (control) the development of complex natural processes and "atypical" (special) forms of their manifestation. Since 2014, coal enterprises with underground mining have been working in the mode of using a multifunctional safety system – MFSB, which ensures the use of additional means of control, with adaptation tests of new technologies and methods of prediction and prevention of gas dynamic phenomena at coal deposits. The fundamental role in the implementation in practice of geodynamic monitoring in large-scale research plays a formed set of means and methods of control, extremely accurately and effectively replenishing the structure of MFSB of the operating coal mining enterprise.

Key words: coal deposit, geodynamic monitoring, rock mass, impact hazard, forms of man-made risks, gas dynamic phenomena, poristicity.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2023-0002).

For citation: Bondarev A. V., Shabarov A. N., Shvankin M. V., Vasilenko T. A. Factors that increase the danger of gas dynamic phenomena in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11-1):77–95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_77.

Введение

Природные и горнотехнические факторы оказывают значительное влияние на уровень безопасности отработки угольных месторождений при ведении подземных горных работ на шахтах России. По состоянию на 01.01.2025 44 шахты (77% от общего числа шахт России) отрабатывали пласты, опасные по горным ударам, 36 шахт (63%) горные работы вели в зонах геологических нарушений, а на 34 шахтах (60%) работы проводились в зонах повышенного горного давления (ЗПГД)[1]. При подземной разработке современные шахты типизируются как «шахта–лава» [1].

Освоение угольного месторождения начинается с его геологоразведки. На предпроектном этапе научными организациями соответствующего профиля проводится анализ строения горно-геологической среды с возможными геомеханическими и геодинамическими процессами [2]. Горный массив рассматривается как сложная блочная мегаструктура. Исследование и идентификация рисков на этом этапе ведется с применением геодинамического районирования. Постановка выявленных рисков под режимные наблюдения (контроль) в рамках геодинамического мониторинга дает результат при дроблении средств наблюдения по пространственным уровням (принцип «от общего к частному»), например, региональный, локальный, согласно «Инструкции по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Геодинамический мониторинг подразумевает использование многофакторного ана-

[1] Из доклада на рабочей группе НТС Минэнерго России «Добыча угля и повышение безопасности ведения горных работ» (Информационно-презентационный материал «Основные результаты анализа опасностей и оценки рисков аварий на угольных шахтах в 2024 году»).

лиза данных регистрации и изменений ключевых индикаторов, характеризующих трансформацию геомеханических и геофизических полей, с оперативной выдачей рекомендаций по недопущению развития кризисных сценариев газодинамической природы [3–5].

Наряду с природными свойствами горных пород первостепенные факторы, провоцирующие проявления газодинамических явлений (ГДЯ) следующие: большие глубины разработки, сложные горно-геологические условия при значительной тектонической нарушенности отрабатываемых шахтных полей, высокая газоносность пластов (свит пластов), крупные площади отработки пластов в границах горных отводов, а в последние годы — резко возросшая интенсивность и концентрация горных работ, как во времени, так и в пространстве, в основном в условиях Кузнецкого бассейна и Воркутского месторождения, с перспективой расширения на угольные месторождения в Тыве и Восточной Якутии.

Основной раздел

В рамках статьи представлены наиболее актуальные факторы рисков, повышающие опасность проявления газодинамических явлений в угольных шахтах.

Свой обзор начнем с факторов рисков, связанных с ***ведением горных работ в зонах влияния геологических нарушений.***

Опасные явления, от обрушения кровли выработки до горно-тектонических ударов, фиксируются в зонах влияния тектонических нарушений и во многом определяются напряженным состоянием и свойствами пород в этих зонах. Оценки доли аварий, связанных с тектоническими нарушениями, в среднем составляют приблизительно от 2/3 до 3/4 общего числа аварий. Таким образом, правильное установление особых зон — зон влияния тектонических нарушений и безопасных приемов работы в них — является ключевым направлением обеспечения безопасности горных работ (требования «Инструкции по геологическим работам на угольных месторождениях Российской Федерации» (1993 г.)).

Проявление активности геологических нарушений определяется наблюдениями и измерениями (в пространстве и времени) изменений параметров геологической среды [6]. Косвенно активность разрыва оценивают по геологическим, геоморфологическим, геофизическим [7, 8], геодезическим, маркшейдерским, геохимическим и другим признакам [9].

С определенной условностью для участков нарушений и зон их влияния можно выделить две большие группы:

– тектонические напряженные зоны (ТНЗ), отличающиеся более высоким уровнем горного давления, чем окружающие зоны, большей плотностью и меньшей пористостью угля, преобладанием закрытой пористости, наличием связанного (в различной степени) метана, меньшими водопритоками, более высокой опасностью горных ударов и т.д. (пример ТНЗ представлен на рис. 1);

– тектонически разгруженные зоны (ТРЗ) или тектонически ослабленные зоны, отличающиеся сниженным горным давлением, более высокой трещиноватостью и меньшей крепостью угля, преобладанием открытой пористости и свободного метана, неустойчивостью кровли и стенок выработок, повышенными водопритоками и т.д.

Тектонически напряженные зоны являются наиболее сложным объектом для дегазации. С одной стороны, высокие напряжения и закрытие пор и трещин приводит к тому, что практически весь газ находится в сорбированном состоянии или в закрытых порах. Повы-

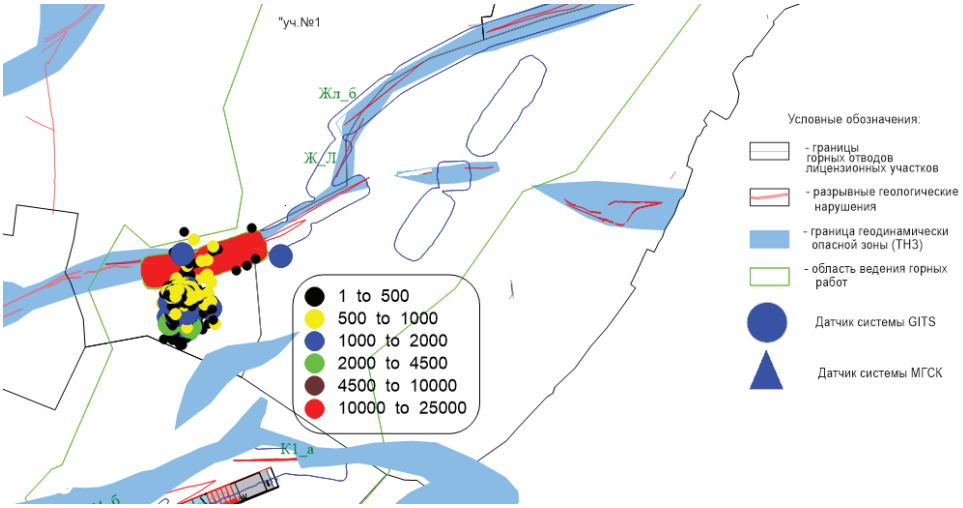

Рис. 1. Фрагмент карты тектонически напряженных зон Воркутского месторождения, совмещенный с гипоцентрами сейсмических событий, приуроченных к ТНЗ [составлен авторами]
Fig. 1. Fragment of the map of tectonically stressed zones of the Vorkuta field combined with the hypocenters of seismic events associated with TNZ [compiled by the authors]

шение горного давления несколько снижает сорбционную способность, однако это снижение измеряется первыми процентами и существенно меньше, чем влияние обводненности и особенно температуры. Высокие давления могут способствовать закрытию пор, превращению части открытой пористости в закрытую и резкому снижению проницаемости, особенно сильному в углях с низкими модулями деформации. Движущиеся техногенные зоны высокого давления (зоны опорного давления впереди лавы) могут служить агентами перераспределения метана в угольном массиве и кровле пласта.

Тектонически разгруженные зоны, напротив, обладают высокой пористостью и являются зонами скопления свободного метана, если они расположены ниже зоны выветривания азотно-углекислых газов. При этом высокая проницаемость существенно облегчает и ускоряет процессы дегазации. В то же время тектонически разгруженные зоны в процессе перераспределения горного и газового давления из-за ведения горных работ могут легко заново заполняться метаном, поступающим из нижних пластов свиты. Поэтому этим зонам свойственны перепады содержания метана, что вызывает необходимость тщательного контроля.

Проведенные экспериментальные исследования открытой пористости углей Кузнецкого угольного бассейна показали существенные различия в значениях этого параметра для ТРЗ и ТНЗ (таблица).

Из приведенных данных видно, что открытая пористость меняется практически в два раза в зоне нарушения: увеличивается в тектонически разгруженных зонах и уменьшается в тектонически напряженных зонах. При этом общая пористость может как меняться, так и оставаться неизменной.

Выделение нагруженных и разгруженных зон — эффективный метод районирования площади для определения геодинамически опасных зон [10]. Напряженно-деформированное состо-

Экспериментальные значения открытой пористости углей Кузнецкого угольного бассейна [составлена авторами]
Experimental values of open porosity of coals of the Kuznetsk coal basin [compiled by the authors]

№ п\п	Характеристика места отбора пробы	Выход летучих, V_{daf}, %	Открытая пористость $П_о$, %	Общая пористость (метод малоуглового нейтронного рассеяния), %
Пласт 1				
1.	вне нарушения	41,7	2,50	27
2.	нарушение, ТРЗ	39,5	5,34	23
3.	вне нарушения	42,7	6,11	17,4
4.	геодинамически активная зона, ТНЗ	41,2	2,92	12,3
Пласт 2				
1.	вне нарушения	40,3	8,70	10,7
2.	нарушение, ТРЗ	38,6	14,50	14,6
3.	вне нарушения	39,4	7,25	16,5
4.	нарушении ТРЗ	37,9	14,29	10,9

яние массива в плоскости угольных пластов является важным фактором выявления структур, склонных к проявлению опасной активности.

Зоны влияния нарушений этих типов с каждой стороны от них состоят из трех участков: основного участка, напряженного в ТНЗ или разгруженного в ТРЗ, примыкающих к нему соседних участков с особенностями напряженности противоположного знака, но менее выраженными на них, а также расположенных далее за ними участков неопределенных размеров с несколько повышенной трещиноватостью и вариациями напряжений в обе стороны. Причем фиксируемая при ведении горных работ зона влияния нарушения начинается, как правило, на третьих участках, но близко ко вторым, предыдущим участкам зон влияния.

К примеру, опыт разработки газоносных, удaро- и выбросоопасных пластов Воркутского угольного месторождения выявил особую опасность ведения горных работ вблизи расщепления пластов. По геологическим условиям природа расщепления пластов связана с дифференциальным характером волновых тектонических движений. Все характерные виды расщепления пластов угля на отдельные самостоятельные пласты меньшей мощности систематизированы по форме и генезису [11]. В геологическом аспекте участки расщепления пластов не определяются аномальными характеристиками, однако природное геомеханическое и геодинамическое состояние пластов и вмещающих пород, повышенная метаноносность пластов на этих участках приурочивает их к опасным по концентрации горного и газового давления. В представленных условиях тектонической нарушенности массива горных пород весьма ***вероятна активизация газодинамики метана, поступающего в действующие выработки при отработке свиты пластов***.

Современные угледобывающие предприятия в основном работают в условиях отработки одиночных пластов. Но в Кузнецком угольном бассейне и Воркутском месторождении отработка нескольких пластов в свите весьма распространена. Подработка

и надработка угольных пластов и вмещающих их газоносных пород приводит к активному выделению метана, и активнее метановыделение происходит на сближенных пластах газоносных месторождений.

Инфильтрация в пределах подработанной толщи метана, выделяющегося при подработке и надработке газоносных пластов, проходит на значительные расстояния от зон этих процессов. Отработка очередной лавы увеличивает общий пролет выработанного пространства, и сдвижение горных пород соответственно интенсифицируется с вовлечением по высоте нового массива, что приводит к сохранению свободных раскрытых трещин, а процесс уплотнения пород происходит длительно, вплоть до отработки всего выемочного шахтного поля.

При отработке свиты угольных пластов весьма актуальными являются исследования и изучение причин формирования в структурно-тектонических нарушениях скопления свободного метана (области повышенного газовыделения), которые, как правило, возникают в зонах растяжения (ТРЗ). Положение мест скоплений метана в пространстве определено типом нарушения (сброс, взброс, сдвиг или промежуточные типы). Важным фактом является выклинивание мест скопления метана в приближении к сместителю разрыва. Крупные структурно-тектонические места скопления метана приурочены к областям развития максимальных амплитуд смещения в разных крыльях разрыва (рис. 2).

В последние годы на шахтах отмечаются заметные изменения в механизмах газопроявления при аварийных ситуациях, связанных с этим фактором. Чаще всего аварийные ситуации возникают при сочетании двух и более форм риска.

Рассмотрим пример такой комбинированной специфики. При отработке в свите пластов опасного по горным ударам пласта, подработанного нижележащим пластом, при выходе из зоны ПГД от краевой части подрабатывающего пласта проводились мероприятия по обеспечению разгрузки

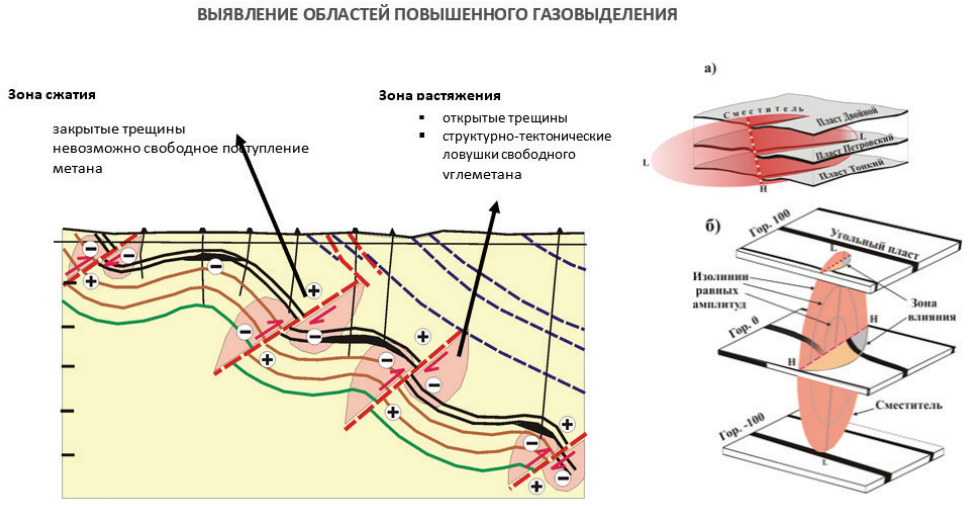

Рис. 2. Выявление областей повышенного газовыделения [12]
Fig. 2. Identification of areas with increased gas emission [12]

данной зоны. На предприятии произошел инцидент в виде динамического явления с попутным газовыделением из угля и междупластья. Динамическое явление явилось горным ударом с разрушением пород почвы отрабатываемого пласта (ДРПГВ) и было вызвано разломом кровли подрабатывающего пласта. Явление сопровождалось отжимом угля из борта выработки, предварительно разгруженного при проведении профилактических мероприятий.

Предпосылок ДРПГВ описываемого случая не было, профилактические мероприятия проводились по стандартной схеме, на базе нормативных документов в области отработки пластов, склонных к горным ударам, но не принесли ожидаемого эффекта.

Для предупреждения подобных инцидентов в приоритете должен рассматриваться контроль изменений параметров регистрации более крупного масштабного уровня (отличного от локального), реализованного на базе комплексных подходов, с большим набором средств контроля [13–15] и по методологии осуществления геодинамического мониторинга, с обязательной аналитической составляющей.

Еще одним фактором, требующим всестороннего изучения, является ***глубина ведения работ и совместное влияние горного и газового давления***.

Длительная и интенсивная эксплуатация месторождений приводит к значительному увеличению глубины извлечения полезного ископаемого на отрабатываемых шахтных полях и вовлечение в отработку запасов более глубоких «старых» и «новых» месторождений. По состоянию на 2024 год на 2 шахтах горные работы велись на глубине более 1000 м, на 19 шахтах — на глубине более 500 метров (на 2023 год в эксплуатации насчитывалось 55 шахт).

Отмечено проявление новых форм горного давления [16]:

– разломы пород в почве выработок, сопровождающиеся повышенным, в т.ч. суфлярным газовыделением;

– внезапные выдавливания угля с повышенным газовыделением;

– динамические разрушения угля в почве выработок с последующим его интенсивным выдавливанием (пучением) в выработки и газовыделением.

Новые формы горного давления (применительно к Кузнецкому угольному бассейну) проявляются на пластах угля, склонных как к горным ударам, так и к внезапным выбросам угля и газа. Внезапные выдавливания и динамические разрушения угля проявляются в основном на мощных угольных пластах [17], на глубинах 500 и более метров.

Исследованиями в Воркутском угольном месторождении установлено, что с ростом глубины фиксируется изменение свойств массива горных пород [18]. Как правило, растут и показатели, которые являются значимыми маркерами факторов риска (горное давление, метаноносность и пр.). На больших глубинах все чаще встречается породы и угли, склонные к ударо- и выбросоопасности [19]. Ведение горных работ на больших глубинах приводит не только к росту интенсивности проявлений горного давления [20] в динамической форме, но и к их частоте. Крупные горно-тектонические (геодинамические) удары [21] проявляются с энергетическими эффектами[1] значительной силы.

В условиях Воркутского угольного месторождения зоны ПГД, зоны влияния геологических нарушений,

[1] Сейсмический сигнал с максимумами в диапазоне 1 ÷ 3 Гц и энергией более 104 Дж по классификации И. М. Петухова [22].

межгоризонтные и межблоковые целики (рис. 3), а также участки выемочных столбов и прилегающих к ним конвейерных штреков, расположенные между очистными забоями и передовыми выработками, являются потенциальными источниками опасности проявлений горного давления в критической (динамической) форме.

При этом размеры обозначенных зон зачастую превышают 100 м или находятся на таком же расстоянии от действующих выработок, что переводит проявление горно-тектонических ударов в разряд региональных форм проявления, что, в свою очередь, требует корректировок состава средств наблюдений и, как следствие, использования соответствующего масштабного уровня режимных наблюдений.

Свое значимое место, и по масштабам «присутствия» в условиях угольных шахт, и по масштабам последствий, занимают ***неконтролируемые обрушения и зависания «тяжелых» кровель***.

Тяжелые кровли при крупных массовых обрушениях в выработанном пространстве выемочных участков, включая динамические формы, соизмеримы с последствиями газодинамических явлений [24].

Эта проблема, возникающая при зависании тяжелой кровли и задержке первичных и последующих посадок кровли, относится к важнейшей в ранге технологических признаков, ослож-

Рис. 3. Тектоническая нарушенность с зонами ТНЗ Воркутского месторождения [23]
Fig. 3. Tectonic dislocation with TNZ zones of the Vorkuta field [23]

няющих состояний горного массива, и нарастает в зависимости от опасности кризисных и аварийных ситуаций геомеханической природы.

Так, например, на Баренцбургском угольном месторождении наличие слоев монолитных пород с пределом прочности, превышающим 70 МПа при мощности более 8 м, которые залегают непосредственно или на небольшом расстоянии от кровли и почвы пластов, является основной опасностью для проявления горных ударов. Такие условия в процессе хрупкого разрушения угля аккумулируют значительную часть энергии и способствуют интенсивному отражению волновой потенциальной энергии, высвобождающейся в виде горного удара [25]. При невозможности использования активных методов разгрузки многолетнемерзлых монолитных пород основной кровли в качестве путей решения была выбрана площадная разгрузка массива путем оставления целиков по границе с выработанным пространством. Целик в этом случае играет роль промежуточной опоры и препятствует передаче опорных нагрузок на лавы со стороны выше отработанных выемочных полей. Примеры используемых технологических схем представлены на рис. 4.

Предлагаются и используются другие технологические решения и параметры отработки пластов с «тяжелыми» кровлями [26]. Для воздействия на силу проявления горного давления от тяжёлых кровель при их первичных осадках и снижения последствий от этого процесса на шахтах Воркутского месторождения применяются как нормативные, согласно «Инструкции по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках» (ВНИМИ, 1990 г.), активные способы управления труднообрушаемой кровлей, так и экспериментальные [27, 28]. При производстве таких работ, проводимых с целью разупрочнения тяжёлых кровель, была подтверждена их эффективность, проявляющаяся в снижении интенсивности осадок этой кровли при её разупрочнении с уменьшением величины зависания краевой консоли у горных выработок, уменьшении деформации целиков и краевых частей угля. Практика подтвердила снижение рисков возникновения ГДЯ безаварийное состояние подготовительных выработок на весь период их эксплуатации, потому что применение разгрузки способствует предотвращению опасных геодинамических явлений в целиках и краевых частях массива, снижает интенсивность смещений пород кровли и почвы, и обеспечивает устойчивость горных выработок [29].

Отметим, что поэтапное (принудительное) разупрочнение и обрушение пород основной кровли исключает одномоментное выдавливание из выработанного пространства очистных выработок большого количества метана (при площадной посадке кровли), это предотвращает загазирование и другие опасные факторы, связанные с превышением концентрации метана в действующих горных выработках, тем самым купируются риски аварий [30, 31].

Горные породы способны снижать накопленную энергию за счет реологических процессов. При ***интенсификации темпов развития горных работ*** закономерно растет интенсивность энергообмена в массиве и провоцируются эффекты, имеющие потенциально опасные последствия [32, 33].

В высокопроизводительных очистных забоях в различных горно-геологических условиях при отработке угольных пластов с возрастанием скорости подвигания происходит увеличение шага осадки основной кровли и скоро-

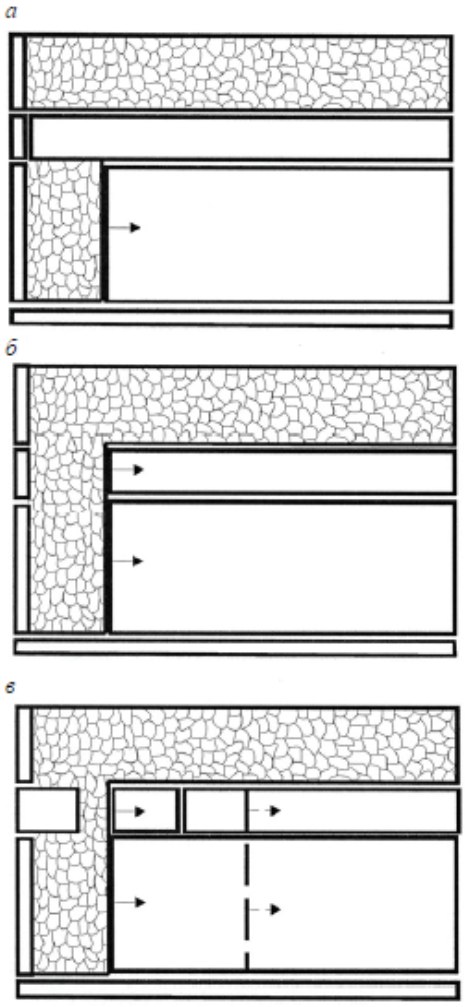

Рис. 4. Рекомендуемые технологические схемы ведения горных работ на пласте «Верхний» Баренцбургского угольного месторождения [составлен авторами]: а — оконтуривание дополнительной выработкой протяженного на всю длину столба целика с отнесением его в потери; б — временное оконтуривание целика дополнительной выработкой с последующим извлечением его действующим очистным забоем; в — оконтуривание дополнительной выработкой прерывистых участков протяженного целика и извлечением промежутков столба между ними

Fig. 4. Recommended technological schemes for mining operations on the Upper seam of the Barentsburg coal deposit [compiled by the authors]: a — contouring of an additional working that extends along the entire length of the pillar with its inclusion in the losses; b — temporary contouring of the pillar with an additional working, followed by its extraction by the current mining face; c — contouring of intermittent sections of an extended pillar with an additional working, followed by the extraction of the gaps between them

сти опускания контура очистной выработки в призабойном пространстве. Однако имеется эффект концентрации напряжений в области максимума зоны опорного давления, который перемещается ближе к обнажению угля в забое. Тем самым в призабойной зоне пласта возрастают проявления толчкообразных (по классификации И. М. Петухова [22]) деформаций пласта, что требует изучения уровня деформаций и НДС [34]. Период стабилизации нагрузок возрастает, проходят изменения в системе почва–пласт–кровля. Это в свою очередь приводит к существенным изменениям и трансформациям геофизических полей, в том числе в виде сейсмических проявлений [32].

Высокая скорость перераспределения нагрузок в зоне опорного давления в условиях такой отработки уравновешивается высокой пассивностью изменения процессов сдвижения налегающей над выработанным пространством толщи пород, и, как следствие, существенно замедляются процессы оседания налегающей толщи пород над её выработанным пространством и восстановления нагрузок на почву пласта. В то же время эти процессы сопровождаются длительным сохранением нагрузок в зоне опорного давления и в ЗПГД, со всеми последствиями.

Также классические представления о размерах зоны опорного давления, закрепленные в нормативных документах, требуют дополнительных исследований, с применением широ-

кого спектра методов и методик, в том числе на моделях из эквивалентных материалов [35], или метода конечных элементов (МКЭ) [36]. В итоге после адаптации результатов возможно их использование для условий высокоскоростных темпов ведения очистных и подготовительных работ.

В настоящей публикации рассмотрена лишь малая часть факторов рисков (справочно: в условиях действующего предприятия самоконтроль осуществляется по 137 факторам рисков аварий, где только 30 относятся к субъективному (человеческому) фактору).

***Мониторинг факторов рисков, провоцирующих опасность проявления газодинамических явлений в угольных шахтах* для предупреждения условий возникновения опасностей геодинамического характера, в рамках МФСБ**

Процессы в геологической среде под воздействием техногенного вмешательства приводят к соответствующим реакциям в виде газодинамических явлений или горно-тектонических ударов. Исследовательская задача в этом случае состоит в установлении закономерностей переходных процессов с определением свойств, например, геомеханической природы, отличных от состояния естественного равновесия. В результате формируются режимные наблюдения (контроль) в рамках геодинамического мониторинга. Например, авторами в условиях Баренцбургского угольного месторождения был опробован широкий спектр методов (средств внутри метода) с акцентом на минимально полезный набор инструментов. Предложена реализация исследований по следующим направлениям: аналитические (статистические и расчетные), геомеханические (прежде всего деформационные) и геофизические (дискретные и непрерывные). Особенность проведения исследований была в выборе типичных средств контроля (с известной условностью), которые должны быть обеспечены перспективой использования уже в качестве режимных средств наблюдений (при положительных, значимых результатах исследовательских работ). Исследования осуществлялись в разные годы. Всего задействовано более десяти методов, при единовременном исследовательском комплексе, состоящем минимум из трех способов. Результатом широкомасштабных исследований, внедрения технологических схем отработки, способов прогноза, профилактики газодинамических явлений и геодинамического мониторинга стало улучшение геодинамической обстановки. В период с 2000 по 2006 г. было зафиксировано 50 случаев ГДЯ (горный удар, ДГПГВ), тогда как в период с 2006 по настоящее время — только один (в 2013 г.).

Блок-схема предложенного и реализованного на практике геодинамического мониторинга представлена на рис. 5.

Выводы

В целях повышения качества прогноза рисков геодинамической природы до начала ведения горных работ (стадия предпроекта) силами специализированных научных организаций должен быть выполнен комплекс исследований по выявлению признаков и факторов дестабилизации геодинамической составляющей. Далее, с учетом преобладающих форм рисков и прогнозируемых последствий от влияния техногенного воздействия на массив горных пород формируется блок с первоочередными параметрами, выводимыми под контроль (геодинамический мониторинг). Это позволит упростить анализ динамики изменения физических параметров техногенной

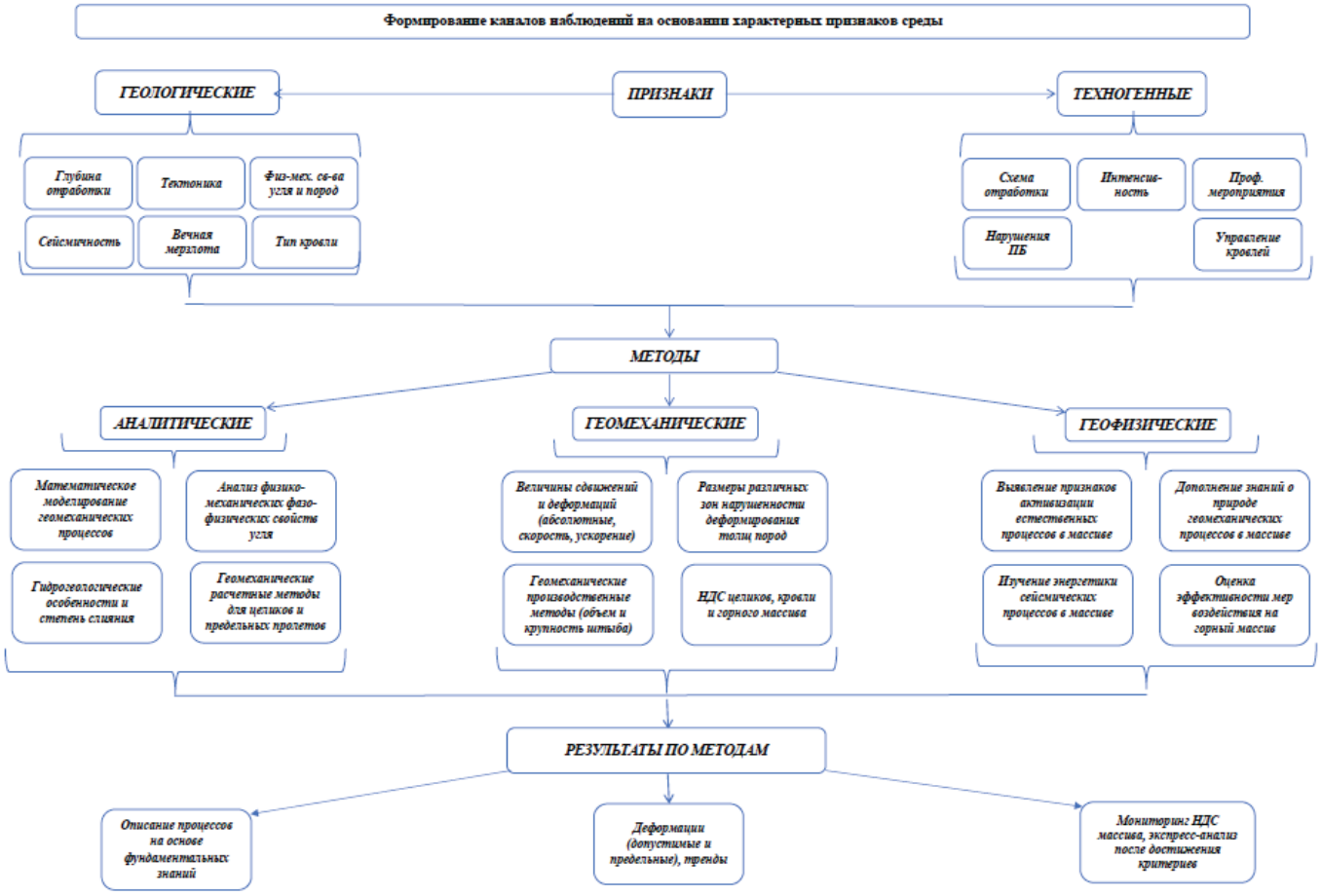

Рис. 5. Блок-схема формирования каналов наблюдений, реализованная в условиях Баренцбургского угольного месторождения [составлен авторами]

Fig. 5. Flowchart of observation channel formation implemented at the Barentsburg Coal Deposit [compiled by the authors]

геологической среды, своевременно распознать формы рисков, отличные от типичных, т.е. новые, и подтвердить переход в докритическую стадию уже имеющихся контролируемых форм рисков.

Наблюдения за факторами рисков устанавливаются на основе целевых исследований, с использованием блоков:

• аналитического;

• гидрогеологического и геохимического контроля;

• геомеханического контроля (деформационного, геодезического);

• геофизического контроля (сейсмические, электромагнитные и сейсмоакустические наблюдения);

• прочих видов средств мониторинга, оптимального в текущих условиях масштабного ранга.

Необходимо объединить результаты всех форм осуществляемого мониторинга горной среды в единую базу данных. Это позволит учитывать всю совокупность корреляционных связей между контролируемыми параметрами, вести учет всех форм их аномальных отклонений, прогнозировать природу их возникновения, контролировать динамику изменения во времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сидоренко А. А.*, *Дмитриев П. Н.*, *Ярошенко В. В.* Комплексное обоснование технологической структуры угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 8. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_5.

2. *Черданцев Н. В.* Параметры опорного давления около очистной выработки с двумя вариантами учёта свойств обрушенных пород // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2024. — № 1. — С. 23–31. DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.11.82.003

3. *Данильев С. М.*, *Секерина Д. Д.*, *Данильева Н. А.* Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 260–271.

4. *Мулев С. Н.*, *Рукавишников Г. Д.*, *Мороз Д. И.*, *Пашкова В. И.*, *Мороз Н. Е.* Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» // Уголь. — 2022. — № 12(1161). — С. 88–93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88–93.

5. *Сашурин А. Д.*, *Мельник В. В.* Природно-техногенные катастрофы на горных предприятиях: истоки и пути предупреждения // Проблемы недропользования. — 2020. — № 4(27). — С. 5–13. DOI: 10.25635/2313–1586.2020.04.005.

6. *Выговский Д. Д.*, *Выговская Д. Д.* Влияние горного давления на величины смещения боковых пород в горных выработках при различных способах подготовки выемочных полей // Проблемы горного давления. — 2022. — № 1–2 (42–43). — С. 48–55.

7. *Локтюкова О. Ю.*, *Кравчук А. В.* Методика прогнозирования тектонических нарушений на основе переинтерпретации данных геологоразведочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2025. — № 2. — С. 114–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_114.

8. *Nosov V. V.*, *Borovkov A. I.*, *Artyushchenko A. P.* Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission // Resources. 2022, vol. 11(10). DOI: 10.3390/resources11100087.

9. *Киряева Т. А.*, *Рукавишников Г. Д.* О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 2. — С. 385–395.

10. *Батугин А. С.*, *Мороз Н. Е.* История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования // Горная промышленность. — 2024. — № S3. — С. 14–19. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-14–19.

11. *Фуникова В. В.*, *Дудлер И. В.* Проблема нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и пути ее решения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2022. — № 1. — С. 3–12. DOI: 10.31857/S0869780922010052.

12. *Корнилов М. Ф.*, *Мишин Н. И.*, *Панфилов А. Л.* Структурно-геологические модели месторождений как основа оценки ресурсов и запасов полезных ископаемых // Недропользование XXI век. — 2007. — № 3. — С. 60–62.

13. *Сидоров М. С.*, *Лебедев И. М.*, *Мулев С. Н.*, *Тюхрин В. Г.* Обеспечение геодинамической безопасности на угольных шахтах // Горная промышленность. — 2024. — № S3. — С. 37–43. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-37–43.

14. *Кабанов Е. И.* Анализ риска аварий на угольных шахтах с учетом человеческого фактора // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 48–54. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

15. *Иванов Л. А.*, *Туманов В. В.*, *Савченко А. В.* Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНИМИ. — 2022. — № 16–17(31–32). — С. 46–57.

16. *Зыков В. С.*, *Лазаревич Т. И.* Классификация динамических явлений в угольных шахтах // Уголь. — 2016. — № 11(1088). — С. 47–53. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-11–47–53.

17. *Feng F.*, *Yang D.*, *Jiang Q.* A data-driven method for the deformation analysis of layered rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2025, vol. 186, p. 106030. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2025.106030.

18. *Вербило П. Э.*, *Карасев М. А.*, *Шишкина В. С.* Прогноз геомеханического состояния структурно нарушенных породных целиков с учетом запредельного их деформирования // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 41–47. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.

19. *Радченко А. Г.* Анализ современных взглядов на формирование и проявление внезапных выбросов угля и газа на шахтах Донбасса // Проблемы горного давления. — 2024. — № 1–2 (46–47). — С. 56–70.

20. *Багаутдинов И. И.*, *Шабаров А. Н.*, *Локтюкова О. Ю.* Горные удары и их связь с геолого-структурными особенностями массива // Горный журнал. — 2025. — № 03. — С. 53–60. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.08.

21. *Батугин А. С.* Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры // Горная промышленность. — 2023. — № S1. — С. 14–21. DOI: 10.30686/1609–9192–2023-S1–14–21.

22. *Петухов И. М.* Горные удары на угольных шахтах. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: ВНИМИ, 2004. — 238 с.

23. *Кротов Н. В.*, *Дупак Ю. Н.*, *Вернигор В. М.*, *Веселов А. П.* Геодинамическая оценка отработки мульдовой части Воркутского месторождения // Проблемы геодинамической безопасности. II Международное рабочее совещание, 24–27 июня 1997 г. — СПб.: ВНИМИ, 1997. — С.120–122.

24. *Шванкин М. В.*, *Бондарев А. В.* Особенности отработки удароопасных пластов в условиях труднообрушаемых кровель // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2019. — № 2. — С. 81–88. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010.

25. *Казанин О. И.*, *Ильинец А. А.* Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 41–48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

26. *Зубов В. П.*, *Фук Л. К.* Разработка ресурсосберегающей технологии выемки пологих угольных пластов с труднообрушающимися породами кровли (на примере

шахт Куангниньского угольного бассейна) // Записки Горного института. — 2022. — Т. 257. — С. 795–806. DOI: 10.31897/PMI.2022.72.

27. *Klishin V. I.*, *Opruk G.* Yu. The methods of hydraulic fracturing of a rock massif to provide coal mining safety // Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass: XII International Russian-Kazakh Symposium, Kemerovo, July 03–06, 2023, p. 48.

28. *Дудин А. А.*, *Лысенко М. В.*, *Аушев Е. В.*, *Карасев В. А.*, *Ногаев С. Н.*, *Валешный Р. Ю.*, *Мороз Д. И.*, *Шильников Д. В.* Опыт внедрения направленного гидроразрыва для управления труднообрушаемой кровлей на каменноугольных месторождениях АО «Воркутауголь» // Уголь. — 2023. — № 8 (1170). — С. 87–95. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-87–95.

29. *Клишин В. И.*, *Тайлаков О. В.*, *Уткаев Е. А.* [и др.] Мониторинг геомеханического состояния угольных пластов // Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего: международная научно-практическая конференция: в 4 т., Москва, 17–23 ноября 2023 года. — М.: Российская академия наук, 2024. — С. 161–166.

30. *Баловцев С. В.* Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 310–319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08–18.

31. *Говорухин Ю. М.*, *Кубрин С. С.* О проницаемости обрушенных и дезинтегрированных пород в выработанном пространстве выемочных участков при высокоинтенсивной отработке пластов угля // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2025. — № 1. — С. 5–20. DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001.

32. Xu Li, Guangyao Si, Wenzhuo Cao, Wu Cai, Joung Oh, Ismet Canbulat. A sequence of seismic event triggering in longwall coal mines based on the aftershock cascade theory // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2024, vol. 182, p. 105883. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105883.

33. *Noskov V. A.*, *Tsirel S. V.*, *Korchak P. A.* Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises // Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development Proceedings of the 14th International congress on rock mechanics and rock engineering, Foz Do Igvassu, Brazil, 13–18 sept. 2019 — Foz Do Igvassu, Brazil: Taylor & Francis Group pic Typeset by Integra Software Serv ices Pvt. Ltd., Pondicherry, 2020, pp. 330–335.

34. *Морозов К. В.*, *Демехин Д. Н.*, *Бахтин Е. В.* Методика использования многокомпонентных датчиков деформаций для первичной оценки и мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 11–1. — С. 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_25.

35. *Зуев Б. Ю.* Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 542–552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.

36. *Sidorenko A. A.*, *Sidorenko S. A.*, *Ivanov V. V.* Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021, vol. 16(5), pp. 568–574. ГИАБ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бондарев Алексей Владимирович[1] — ведущий инженер лаборатории геодинамической безопасности Научного центра геомеханики и проблем горного производства, alex_bondarev78@mail.ru, SPIN-код: 2904–4066, AuthorID: 689415, https://orcid.org/0009-0006-9363-701X;

Шабаров Аркадий Николаевич[1] — докт. техн. наук, директор Научного центра геомеханики и проблем горного производства, Shabarov_AN@pers.spmi.ru, AuthorID: 108771, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7925-3163;
Шванкин Михаил Васильевич[1] — канд. техн. наук, заведующий сектором лаборатории геодинамической безопасности Научного центра геомеханики и проблем горного производства, vnimi-sgu@yandex.ru, AuthorID: 479112;
Василенко Татьяна Анатольевна[1] — докт. техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамической безопасности Научного центра геомеханики и проблем горного производства, tvasilenko@mail.ru; AuthorID 57212244174, https://orcid.org/0000-0003-4290-1520;
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: *Бондарев Алексей Владимирович*, e-mail: alex_bondarev78@mail.ru.

REFERENCES

1. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Yaroshenko V. V. Comprehensive Justification of the Technological Structure of a Coal Mine. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021, no. 8, pp. 5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_5.

2. Cherdantsev N. V. Parameters of the Bearing Pressure Near a Stope with Two Options for Taking into Account the Properties of Caving Rocks. *Bulletin of the Scientific Center of the Eastern Research Institute for Industrial and Environmental Safety*. 2024, no. 1, pp. 23–31. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.11.82.003.

3. Danilyev S. M., Sekerina D. D., Danileva N. A. Localization of areas of development of geomechanical processes in underground workings based on the results of transformation-classification analysis of seismic exploration data. *Notes of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 260–271. [In Russ].

4. Mulev S. N., Rukavishnikov G. D., Moroz D. I., Pashkova V. I., Moroz N. E. Monitoring of the stress state by seismic and calculation methods in the mines of JSC Vorkutaugol. *Ugol*. 2022, no. 12(1161), pp. 88–93. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12–88–93.

5. Sashurin A. D., Melnik V. V. Natural and man-made disasters at mining enterprises: origins and ways of prevention. *Problems of subsoil use*. 2020, no. 4 (27), pp. 5–13. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313–1586.2020.04.005.

6. Vygovsky D. D., Vygovskaya D. D. Influence of rock pressure on the magnitude of wall rock displacement in mine workings with different methods of preparing extraction fields. *Problems of rock pressure*. 2022, no. 1–2 (42–43), pp. 48–55. [In Russ].

7. Loktyukova O. Yu., Kravchuk A. V. Methodology for predicting tectonic faults based on reinterpretation of geological exploration data. *Mining informational and analytical bulletin*. 2025, no. 2, pp. 114–129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_114.

8. Nosov V. V., Borovkov A. I., Artyushchenko A. P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission. *Resources*. 2022, vol. 11(10). DOI: 10.3390/resources11100087.

9. Kiryaeva T. A., Rukavishnikov G. D. On the influence of earthquakes and powerful technological explosions on the gas-dynamic activity of coal mines. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2021, no. 2, pp. 385–395. [In Russ].

10. Batugin A. S., Moroz N. E. History of development and prospects for further application of the geodynamic zoning method. *Mining industry*. 2024, no. S3, pp. 14–19. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-14–19.

11. Funikova V. V., Dudler I. V. The Problem of the Growing Danger of Man-Made Changes in the Geological Environment and Ways to Address It. *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2022, no. 1, pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0869780922010052.

12. Kornilov M. F., Mishin N. I., Panfilov A. L. Structural and Geological Models of Deposits as a Basis for Assessing Resources and Reserves of Minerals. *Subsoil Use in the 21st Century*. 2007, no. 3, pp. 60–62. [In Russ].

13. Sidorov M. S., Lebedev I. M., Mulev S. N., Tyukhrin V. G. Ensuring geodynamic safety in coal mines. *Mining industry*. 2024, no. S3, pp. 37–43. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-37–43.

14. Kabanov E. I. Analysis of the risk of accidents in coal mines taking into account the human factor. *Mining magazine*. 2023, no. 9, pp. 48–54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

15. Ivanov L. A., Tumanov V. V., Savchenko A. V. Structural and geodynamic prerequisites for using microseisms to search for anomalous methane accumulations. *Proceedings of RANIMI*. 2022, no. 16–17 (31–32), pp. 46–57. [In Russ].

16. Zykov V. S., Lazarevich T. I. Classification of dynamic phenomena in coal mines. *Coal*. 2016, no. 11 (1088), pp. 47–53. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-11–47–53.

17. Feng F., Yang D., Jiang Q. A data-driven method for the deformation analysis of layered rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025, vol. 186, p. 106030. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2025.106030.

18. Verbilo P. E., Karasev M. A., Shishkina V. S. Forecast of the geomechanical state of structurally disturbed rock pillars taking into account their extreme deformation. *Mining Journal*. 2025, no. 3, pp. 41–47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.

19. Radchenko A. G. Analysis of modern views on the formation and manifestation of sudden coal and gas outbursts in Donbass mines. *Problems of Rock Pressure*. 2024, no. 1–2 (46–47), pp. 56–70. [In Russ].

20. Bagautdinov I. I., Shabarov A. N., Loktyukova O. Yu. Rock bursts and their relationship with the geological and structural features of the massif. *Mining magazine*. 2025, no. 03, pp. 53–60. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.08.

21. Batugin A. S. Geodynamic effects of the ultimate stress state of the earth's crust. *Mining industry*. 2023, no. S1, pp. 14–21. DOI: 10.30686/1609–9192–2023-S1–14–21.

22. Petukhov I. M. Rock bursts in coal mines. 2nd ed., revised and enlarged. St. Petersburg, VNIMI, 2004, 238 p. [In Russ].

23. Krotov N. V., Dupak Yu. N., Vernigor V. M., Veselov A. P. Geodynamic assessment of mining of the trough part of the Vorkuta deposit. *Problems of geodynamic safety. II International working meeting*. June 24–27, 1997, St. Petersburg: VNIMI, pp. 120–122. [In Russ].

24. Shvankin M. V., Bondarev A. V. Features of mining rockburst-hazardous seams in conditions of difficult-to-collapse roofs. *Bulletin of the Scientific Center of the Eastern Research Institute for Industrial and Environmental Safety*. 2019, no. 2, pp. 81–88. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.10.2.010.

25. Kazanin O. I., Ilyinets A. A. Ensuring the stability of mining workings during the preparation of mining sections of flat coal seams by three workings. *Notes of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 41–48. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

26. Zubov V. P., Phuc L. K. Development of a resource-saving technology for extracting flat coal seams with difficult-to-collapse roof rocks (using the Quang Ninh Coal Basin mines as an example). *Notes of Mining Institute*. 2022, vol. 257, pp. 795–806. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.72.

27. Klishin V. I., Opruk G. Yu. The methods of hydraulic fracturing of a rock massif to provide coal mining safety. *Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass: XII International Russian-Kazakh Symposium*, Kemerovo, 03–06 July 2023. 2023, p. 48.

28. Dudin A. A., Lysenko M. V., Aushev E. V., et al. Experience of Implementing Directional Hydraulic Fracturing to Manage Difficult-to-Collapse Roofs at the Coal Deposits of JSC Vorkutaugol. *Coal*. 2023, no. 8 (1170), pp. 87–95. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-87–95.

29. Klishin V. I., Tailakov O. V., Utkaev E. A., et al. Monitoring the Geomechanical State of Coal Seams. *Development of Productive Forces of Kuzbass: History, Modern Experience, Strategy of the Future. International Scientific and Practical Conference*: in 4 volumes, Moscow, November 17–23, 2023. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2024, pp. 161–166. [In Russ].

30. Balovtsev S. V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology* (Russia). 2022, vol. 7, no. 4, pp. 310–319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18. [In Russ].

31. Govorukhin Yu. M., Kubrin S. S. On the permeability of collapsed and disintegrated rocks in the mined-out space of extraction areas during high-intensity mining of coal seams. *Bulletin of the Scientific Center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025, no. 1, pp. 5–20. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001.

32. Xu Li, Guangyao Si, Wenzhuo Cao, Wu Cai, Joung Oh, Ismet Canbulat. A sequence of seismic event triggering in longwall coal mines based on the aftershock cascade theory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024, vol. 182, p. 105883. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105883.

33. Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A. Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development Proceedings of the 14th International congress on rock mechanics and rock engineering*, Foz Do Igvassu, Brazil, 13–18 sept. 2019 Foz Do Igvassu, Brazil: Taylor & Francis Group pic Typeset by Integra Software Serv ices Pvt. Ltd., Pondicherry, 2020. P. 330–335.

34. Morozov K. V., Demehin D. N., Bakhtin E. V. Methodology for using multicomponent strain gauges for primary assessment and monitoring of stress-strain state of rock mass. *Mining informational and analytical bulletin*. 2024, no. 11–1, pp. 25–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_25.

35. Zuev B. Yu. Methodology for modeling nonlinear geomechanical processes in block and layered rock masses using models of equivalent materials. *Notes of the Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 542–552. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.

36. Sidorenko A. A., Sidorenko S. A., Ivanov V. V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021, vol. 16(5), pp. 568–574.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bondarev A. V., Leading Engineer of the Geodynamic Safety Laboratory of Scientific Center for Geomechanics and Issues of Mining Industry, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: alex_bondarev78@mail.ru;

Shabarov A. N., Dr. Sci. (Eng.), Director of Scientific Center for Geomechanics and Issues of Mining Industry, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: shabarov_an@pers.spmi.ru;

Shvankin M. V., Cand. Sci. (Eng.), Head of the Geodynamic Safety Laboratory Sector Scientific Center for Geomechanics and Issues of Mining Industry, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: vnimi-sgu@yandex.ru;

Vasilenko T. A., Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chief Researcher, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: tvasilenko@mail.ru.

ВКЛАД АВТОРОВ

Шабаров А. Н., д.т.н. — обоснование концепции исследований (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), формулирование выводов.
Васильенко Т. А., д.т.н. — разработка методологии исследований, анализ и систематизация экспериментальных данных, формулирование выводов.
Шванкин М. В., к.т.н. — обоснование концепции исследований (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследований, редактирование текста рукописи, формулирование выводов.
Бондарев А. В. — обоснование концепции исследований, разработка методологии исследований, интерпретация результатов исследований, обобщение результатов исследования, редактирование текста рукописи.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Shabarov A. N., Dr. Sci. (Eng.) — substantiation of the research concept (formulation of the idea, research goals and objectives), formulation of conclusions.
Vasilenko T. A., Dr. Sci. (Eng.) — development of research methodology, analysis and systematization of experimental data, formulation of conclusions.
Shvankin M. V., Cand. Sci. (Eng.) — substantiation of the research concept (formulation of the idea, research goals and objectives), development of research methodology, editing of the manuscript text, formulation of conclusions.
Bondarev A. V. — substantiation of research concepts, development of research methodology, interpretation of research results, generalization of research results, and editing of manuscript text.
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Получена редакцией 14.08.2025; получена после рецензии 06.10.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 14.08.2025; received after the review 06.10.2025; accepted for printing 10.10.2025.