

УДК 622.831.322

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА II КАЛИЙНОМ ГОРИЗОНТЕ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Андрейко Сергей Семенович<sup>1</sup>,  
ssa@mi-perm.ru

Литвиновская Наталья Александровна<sup>1</sup>,  
nlitvinovskaya@mail.ru

Папулов Артем Сергеевич<sup>1</sup>,  
asrapulov@gmail.com,

<sup>1</sup> Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук – филиал «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А.

**Актуальность** исследования продиктована необходимостью обеспечить безопасность ведения горных работ и в то же время минимизировать денежные и временные затраты на дегазацию пород почвы и кровли. Оценив возможность развития газодинамического явления в зависимости от различных условий проведения горных выработок, можно выявить те участки, где действительно требуются специальные мероприятия по предотвращению газодинамических явлений. Такое деление разрабатываемого пласта на участки по опасности развития газодинамических явлений позволяет дифференцированно подходить к обеспечению безопасности горных работ без лишних финансовых затрат.

**Цель:** провести оценку возможности развития газодинамических явлений из почвы и кровли горных выработок в различных горнотехнологических условиях при отработке запасов II калийного горизонта, дать рекомендации для ведения горных работ в местах, где возможно развития газодинамических явлений.

**Объект:** свободные газы глинистых контактов II калийного горизонта.

**Метод** исследования заключается в сравнении давления свободного газа в массиве пород с несущей способностью слоя пород между очагом газодинамического явления и кровлей/почвой горной выработки. В методике учитывается ширина выработки, расстояние от кровли/почвы до скопления свободного газа, давление свободного газа, прочностные свойства пород, геостатическая составляющая.

**Результаты.** Проведена оценка возможности развития газодинамических явлений в разных условиях как в выработке с пролетом кровли 3,2 м, так и в местах расширений, где пролет кровли достигал 6,0 м. При оценке учитывалось, подработан ли рассматриваемый участок или нет. Оценка проводилась для разных газонасыщенных слоев. В результате проведенного анализа выяснено, что для пород почвы не прогнозируются газодинамические явления вне зависимости от геотехнологической ситуации и ширины выработки. Дегазация пород почвы подготовительных выработок II калийного горизонта не требуется. Результат оценки возможности развития газодинамических явлений из пород кровли выработки шириной 3,2 м показал, что газодинамические явления из пород кровли не ожидаются и профилактические мероприятия по дегазации не требуются. Оценка возможности развития газодинамических явлений из кровли камер разворота автотранспорта показала, что в местах сопряжений, в расширениях выработок возможно запоздалое газодинамическое явление из кровли горной выработки. В этих местах необходима дегазация пород кровли. Глубина дегазационных шпуров должна составлять не менее 2,0 м.

### Ключевые слова:

газодинамические явления, газоносность, газодинамические характеристики, калийный рудник, возможность развития газодинамического явления.

### Введение

В феврале 2021 г. на II калийном горизонте в условиях шахтного поля рудника 3 РУ в транспортном штреке 23 юго-западного выемочного столба в камере разворота автотранспорта К2 произошло самопроизвольное обрушение пород кровли. На основании результатов обследования места самопроизвольного обрушения пород кровли в камере разворота автотранспорта К2, а также изучения геологического строения пород кровли и обстоятельств обрушения было предположено, что одной из причин обрушения может являться давление свободных газов в скоплениях, сформировавшихся в расслоившихся породах кровли камеры разворота автотранспорта. Данный участок подработан горными выработками III калийного горизонта. Несмотря на то, что расстояние между II и III горизонтами составляет 200 м, процессы

сдвигения от подработки могли сказаться на всей толще вышележащих пород, в том числе и на II калийном горизонте. Породы, находящиеся выше III калийного горизонта, оседают, расслаиваются, в них возрастают напряжения растяжения. Этот процесс распространяется вверх по разрезу и со временем доходит до II калийного горизонта. При проведении горных выработок уже на II калийном горизонте породы непосредственной кровли и породы почвы начинают испытывать напряжения растяжения дополнительно к тем, которые уже были в массиве. Это приводит к дополнительным расслоениям и формированию очагов возможных газодинамических явлений (ГДЯ). В этой связи на основании результатов экспериментальных исследований газоносности и газодинамических характеристик пород кровли и почвы горных выработок, пройденных в породах II калийно-

го горизонта, дана оценка возможности развития ГДЯ из пород кровли и почвы горных выработок.

#### Постановка задачи

Первые фундаментальные работы по исследованию ГДЯ в калийных рудниках были проведены ещё в 70-х гг. прошлого века [1]. Были разработаны способы предотвращения ГДЯ, например, с помощью разгрузочной дегазационной щели. Данный способ стал нормативным для угольных шахт [2]. Он хорошо себя зарекомендовал при отработке запасов лавами. Однако для камерной системы разработки данный способ предотвращения оказался неэффективен, и были разработаны другие варианты, основанные на дегазации массива шпурами и скважинами [1, 3, 4]. Вместе с тем любой из рассмотренных способов предотвращения ГДЯ подразумевает остановку горнопроходческих и добычных работ. В связи с этим был предложен оригинальный способ дегазации угольных пород с помощью гидроразрыва [5]. Однако этот способ не применим в соляных породах из-за их растворимости. Тем не менее обойтись совершенно без специальных мероприятий по дегазации пород невозможно, так как эти явления несут непосредственную опасность жизни шахтеров и также приводят к простоям оборудования. Данные, приведенные S. Wasilewski в его работе, посвященной ГДЯ угольных шахт Польши [6], убедительно показывают, что в случае внезапных выбросов метана в атмосферу шахты опасны не только непосредственно у очага ГДЯ, но и для работников, находящихся в других выработках. Похожие по своим катастрофическим последствиям явления характерны и для калийных шахт [7].

Один из способов снизить затраты на предотвращение газодинамических явлений – применять выбранные методы только в тех местах, где данные явления потенциально возможны. Это означает, что необходимо разрабатывать эффективные методы прогнозирования зон, опасных по ГДЯ. Разработка этих методов основывается на понимании природы образования очагов ГДЯ [8–13]. При этом очаги ГДЯ могут иметь как природную, так и техногенную составляющие. Техногенная составляющая формируется в процессе ведения горных работ, например, при подработке пласта [12], или в процессе перераспределения горного давления на уже отработанных участках [14]. Именно горное давление, наряду с газоносностью, является определяющим фактором для развития ГДЯ [1, 3, 4, 8–10, 12, 15–20].

Для условий подземной разработки калийных пластов развитие ГДЯ из кровли или почвы горных выработок возможно в двух случаях. Первый вариант возможен, когда в породах на контакте соляных слоев уже имеется очаговое скопление газа. При ведении горноподготовительных работ происходит подработка или надработка, если скопление газа расположено в почве горной выработки, и это приводит к развитию ГДЯ [12, 17–19]. Во втором случае очаг ГДЯ формируется уже в процессе горных работ. В этом случае при подвигании забоя происходит изменение напряженно-деформированного состояния горных пород,

под действием опорного давления и в результате того, что за фронтом горных работ формируется зона разгрузки, происходит миграция свободного газа в расслоение над или под горной выработкой [12, 17–19]. Для возникновения такого техногенного очага ГДЯ необходимо наличие достаточного количества свободного газа в окружающих породах, наличие глинистых прослоев, по которым происходит расслоение и создаются благоприятные условия для фильтрации газов и достаточный пролет выработки. Как правило, эти условия возникают в местах сопряжения горных выработок или в местах расширения, как, например, камера разворота автотранспорта К2. Во всех случаях для развития ГДЯ необходимо, чтобы давление приконтактных газов в очаге превысило силы сопротивления пород кровли или почвы выработки разрушению.

В виду того, что скопления свободного газа в калийных рудниках носят приконтактный характер, основание полости ГДЯ всегда расположено в месте контактов слоев, как правило, это галопелитовые слои или прослойки. Если в разрезе выделено несколько газоносных глинистых прослоев и слоев, то возможно многостадийное ГДЯ, развивающееся постепенно вглубь массива пород.

Все работы по обеспечению безопасности несут дополнительную финансовую нагрузку, увеличивают трудозатраты, не принося непосредственной прибыли горному предприятию. Однако они неизбежная часть рабочих процессов, и целесообразнее проводить такие работы на тех участках, где возможно развитие ГДЯ. Для этого и необходимо проводить оценку возможности ГДЯ. При этом проводится сравнение давления газа в массиве пород (определяется экспериментально) с расчетным максимальным давлением газа, которое способны выдержать горные породы. При этом учитывается то, что соляные породы плохо сопротивляются напряжениям растяжения, а именно эти напряжения возникают в породах почвы и кровли горной выработки. Они тем больше, чем больше ширина горной выработки. Дополнительные напряжения растяжения возникают при развитии ГДЯ. При этом быстрота, с которой происходит развитие процесса, исключает влияние пластических деформаций. Все это говорит о том, что задачи необходимо рассматривать в упругой постановке. Подробно этот вопрос рассмотрен в книге Н.М. Проскурякова [18. С. 125], где представлена расчетная схема оценки возможности развития ГДЯ.

Следует учитывать разницу напряженного состояния пород в рабочей зоне и вне призабойного пространства. Породы, находящиеся вне призабойной зоны, испытывают большие напряжения растяжения. Получено два выражения для оценки возможности развития ГДЯ в виде внезапного обрушения пород кровли, сопровождающегося газовыделениями в призабойной зоне (1) и вне призабойной зоны (2) [19. С. 328]:

$$P_r > (0,7925\sigma_p h_r^2 a^{-2} \pm \gamma h_r) + \Delta_{r,n}, \quad (1)$$

$$P_r > (0,5\sigma_p h_r^2 a^{-2} \pm \gamma h_r) + \Delta_{r,n}, \quad (2)$$

где  $P_r$  – давление приконтактного газа;  $\sigma_p$  – предел прочности пород при растяжении;  $h_r$  – высота слоя пород, пригруженного давлением газа;  $a$  – полупролет выработки;  $\gamma$  – плотность пород кровли;  $\Delta_{г.п.}$  – сцепление по галопелитовому прослойку.

Знак «+» соответствует расчетам, выполняемым для газового скопления в почве горной выработки, а знак «–» – для газового скопления в кровле. Такая разница обусловлена влиянием геостатической составляющей.

Если полученные неравенства выполняются, то возможно развитие ГДЯ. В противном случае, давления свободного газа не достаточно для развития ГДЯ. Правую часть неравенства составляет безопасное давление газа ( $P_6$ ).

Представленная модель учитывает все параметры, которые влияют на развитие ГДЯ в калийных шахтах. Она опробована на других калийных пластах Старобинского месторождения и других месторождений калийных солей [20].

#### Результаты экспериментальных исследований давления свободного газа в породах кровли и почвы горных выработок на II калийном горизонте

Шахтные экспериментальные исследования давления свободного газа кровли и почвы в подготовительных выработках, пройденных в породах II калийного горизонта в условиях шахтного поля рудника ЗРУ, не подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, проводились в шести исследовательских зонах подготовительных выработок. Было произведено 46 замеров давления свободного газа в породах кровли и почвы подготовительных горных выработок. Установлено, что породы кровли и почвы Второго калийного пласта газоносны.

Исследовательские зоны отличались друг от друга шириной горных выработок. Ширина одиночной выработки в месте исследования составляла 3,1 м, а ширина камер разворота автотранспорта в местах исследования достигала 8,2 м. При такой разнице пролетов выработок создаются принципиально разные условия для возможности развития ГДЯ. Результаты проведенных измерений указаны в табл. 1.

При анализе результатов стоит учитывать также и расположение газоносных слоев относительно горной выработки. Чем ближе к контуру выработки газовое скопление, тем вероятнее развитие ГДЯ даже при меньших значениях давления свободного газа. Так, в камерах разворота автотранспорта, не подработанных горными работами на Третьем калийном пласте, значение давления свободных газов возрастает в интервалах измерений на расстоянии от кровли 2,0–3,0 м и характеризует природно-техногенные показатели, достигая следующих максимальных значений в интервале 3,0–4,0 м. Количественное увеличение показателей давления свободных газов в породах кровли камер разворота автотранспорта обусловлено расслоением пород кровли в интервале 1,0–4,0 м и миграцией свободного газа из окружающего массива в образовавшиеся расслоения. В интервалах глубин 4,0–6,0 м давление свободных газов в породах кровли остается на уровне природных показателей.

**Таблица 1.** Результаты проведенных измерений давления свободного газа в массиве

**Table 1.** Results of the measuring of free gases pressure in rock massif

Ширина выработки, м Mine working width, m	Место проведения исследования Position of measuring	Давление свободного газа в массиве, МПа Pressure of free gases in rock massif, MPa		
		Мин/ Min	Макс/ Max	Среднее/ Average
Участок не подработан/Area is not underworked				
3,1	кровля/roof	0,19	0,195	0,191
3,1	почва/sole	0,19	0,199	0,191
8,2	кровля/roof	0,19	0,234	0,195
8,2	почва/sole	0,19	0,268	0,2
Участок подработан горными работами на Третьем калийном пласте Area is underworked by mine workings of the Third potash stratum				
3,1	кровля/roof	0,19	0,211	0,191
3,1	почва/sole	0,19	0,19	0,19
8,2	кровля/roof	0,19	0,212	0,192
8,2	почва/sole	0,19	0,252	0,192

Влияние подработки очистными работами на Третьем калийном пласте на породы почвы камер разворота автотранспорта, пройденных в породах II калийного горизонта, приводит к формированию дополнительных расслоений в породах почвы и, соответственно, к перераспределению свободных газов по геологическому разрезу пород почвы, и в конечном итоге к значимым изменениям давления свободных газов.

#### Оценка возможности развития газодинамических явлений из кровли и почвы горных выработок на II калийном горизонте

В ходе проведенных шахтных исследований были установлены значения давления газа в породах почвы и кровли подготовительных выработок II калийного горизонта, а также наиболее газоносные слои, их расстояние от почвы и кровли выработок. Это позволило провести оценку возможности развития ГДЯ. При этом рассматривалась возможность того, что вследствие раскрытия глинистого контакта создавались условия для миграции свободного газа из окружающих пород в расслоение и создания очага газодинамического явления в почве или кровле горной выработки.

Оценка возможности развития газодинамических явлений из кровли и почвы выработок, пройденных по Второму калийному пласту, проводилась следующим образом. По формулам (1), (2) определяем величину безопасного давления в приконтактном скоплении свободного газа, при которой газодинамическое явление в виде обрушения пород кровли (разрушения пород почвы), сопровождающееся газовыделением, не происходит в призабойной зоне и вне ее. Далее производилось сравнение величины безопасного давления газа в приконтактном скоплении ( $P_6$ ) с величиной давления газа ( $P_r$ ), экспериментально определенной в шахтных условиях для данного интервала пород кровли (почвы) выработок. При  $P_6 > P_r$  принималось, что газодинамическое явление не прогнозируются. При обратном соотношении  $P_6 < P_r$  или близких значениях  $P_6$  и  $P_r$  принималось, что ГДЯ из кровли выработки возможно.

**Таблица 2.** Результаты оценки возможности развития ГДЯ из кровли и почвы подготовительных горных выработок вне призабойных зон на II калийном горизонте

**Table 2.** Results of assessment of the possibility of gas dynamic phenomena appearing from the roof and sole of advanced mine workings away from the face zones on the II potash horizon

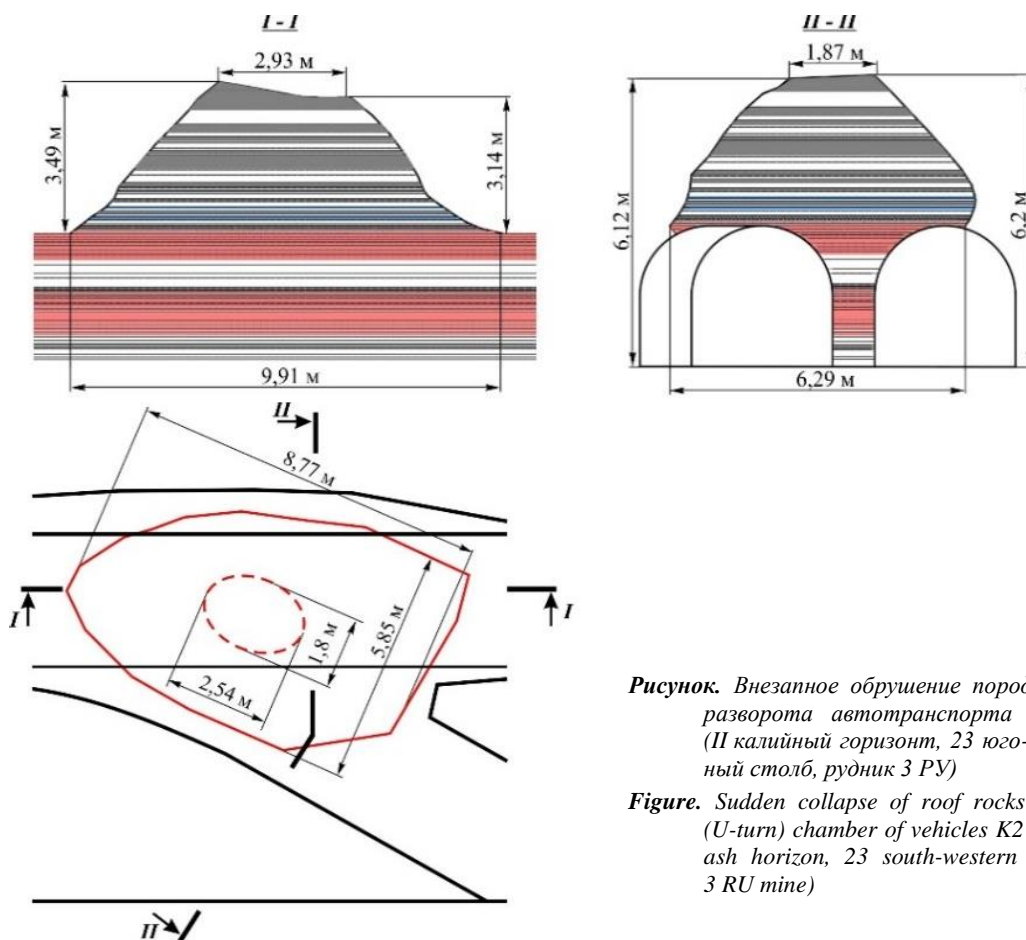
Условие Condition	$h_i$ , м/м	$P_6$ , МПа/МПа	$P_r$ , Мпа/МПа	Результат оценки Result of assessment
Не подработан, кровля Not underworked, roof	1,1	0,348	0,195	$P_6 > P_r$ , не прогно- зируются not predicted
Подработан, кровля Underworked, roof	1,1	0,348	0,211	
Не подработан, почва Not underworked, sole	2,0	1,1	0,199	
Подработан, почва Underworked, sole	1,1	0,394	0,19	

Как показывает практика ведения подготовительных горных работ в породах II калийного горизонта, за все время на всех калийных рудниках 1–4 РУ не было отмечено случаев ГДЯ как в призабойной зоне, так и вне призабойных зон в одиночных подготовительных выработках с пролетом 3,0–3,2 м. В этой связи для одиночных подготовительных выработок была выполнена оценка возможности развития газодинамических явлений в виде внезапных обрушений пород кровли (разрушений пород почвы) подготовительных выработок вне призабойных зон (запоздалые

ГДЯ). При этом в расчетах учитывались результаты шахтных экспериментальных исследований газодинамических характеристик (максимальной величины давления свободных газов в приконтактных скоплениях) пород кровли и почвы подготовительных выработок с пролетом 3,0–3,2 м, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте. Результаты оценки возможности развития обрушений пород кровли (разрушений пород почвы), сопровождающихся газовыделением на Втором калийном пласте рудника 3 РУ, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты оценки возможности развития ГДЯ из кровли и почвы в одиночных подготовительных выработках, пройденных в породах II калийного горизонта, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, свидетельствуют о том, что ГДЯ в виде внезапных обрушений пород кровли и разрушений пород почвы, сопровождающиеся газовыделением, не прогнозируются.

Для оценки возможности развития обрушений пород кровли и разрушений пород почвы камер разворота автотранспорта на II калийном горизонте, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, определим величину минимального давления свободных газов в приконтактном скоплении в породах кровли камеры разворота автотранспорта К2 после ее разделки, которое могло привести к обрушению (рисунк).



**Рисунок.** Внезапное обрушение пород кровли в камере разворота автотранспорта К2 28.02.2021 г. (II калийный горизонт, 23 юго-западный выемочный столб, рудник 3 РУ)

**Figure.** Sudden collapse of roof rocks in the turnaround (U-turn) chamber of vehicles K2 02/28/2021 (II potash horizon, 23 south-western extraction column, 3 RU mine)

Принимаем следующие исходные данные:  $h_r=3,14$  м;  $\sigma_p=1,1$  МПа;  $a=3,65$  м;  $\gamma=2100$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta_{r,п}=0,075$  МПа. Расчеты проводились на наиболее критические условия, предел прочности пород на растяжения выбран наименьшим для рассматриваемых панелей. Объемный вес и сцепление по галопелитовым прослойкам, по данным исследований, существенно не меняются. Такие условия расчетов выбраны исходя из оценки риска и обеспечения безопасности работ. Так, если проведенные исследования с минимальными значениями показывают, что газодинамическое явление не прогнозируется, то оно гарантированно не произойдет и при росте показателей  $\sigma_p$ ,  $\gamma$  и  $\Delta_{r,п}$ .

Подставляя численные значения в формулу (2) и проводя необходимые вычисления, получаем величину давления свободного газа, равную 0,42 МПа. Следовательно, при давлении газа в приконтактном скоплении на расстоянии от кровли выработки 3,14 м, превышающем 0,42 МПа, могло произойти запоздалое ГДЯ в виде внезапного обрушения пород кровли камеры К2, сопровождающееся газовыделением. Следует отметить, что при многоярусном расположении приконтактных скоплений свободного газа на контактах слоев глинисто-карбонатных пород и слоев каменной соли обрушение пород кровли могло произойти и при меньших значениях давления свободных газов.

Рассмотрим возможность развития ГДЯ в виде внезапных обрушений пород кровли и разрушений пород почвы, сопровождающихся газовыделением, в камерах разворота автотранспорта на II калийном горизонте, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, на основании результатов шахтных экспериментальных исследований давления свободных газов в породах кровли и почвы горных выработок. Результаты оценки возможности развития обрушений пород кровли (разрушений пород почвы), сопровождающихся газовыделением, на II калийном горизонте рудника 3 РУ в камерах разворота автотранспорта, представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, ГДЯ из кровли камер разворота прогнозируются в двух случаях. При этом подработка II калийного горизонта никак не сказывается на сложившейся ситуации, так как ГДЯ возможны как в условиях подработки II калийного горизонта, так и в не подработанных участках. В условиях, когда рассматриваемый участок не подработан горными работами на III калийном горизонте, ГДЯ из кровли прогнозируются при расстояниях до приконтактного скопления свободных газов до 1,1 м. Прогнозируемые ГДЯ носят запоздалый характер и происходят за счет расслоения и скопления в них свободного газа из близлежащих пород. Следует учитывать, что после разделки в камерах разворота автотранспорта осуществляется крепление пород кровли анкерной крепью длиной 1,5 м, что приводит к профилактической дегазации приконтактных скоплений, сформировавшихся в породах кровли в интервале до 1,5 м. Таким образом, при наличии анкерного крепления пород

кровли камер разворота автотранспорта, не подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, можно утверждать, что запоздалые ГДЯ в виде обрушений пород кровли, сопровождающиеся газовыделением, не прогнозируются.

**Таблица 3.** Результаты оценки возможности развития ГДЯ из кровли и почвы в камерах разворота автотранспорта на II калийном горизонте рудника 3 РУ

**Table 3.** Results of assessment of gas dynamic phenomena appearing from the roof and sole in the U-turn chambers of vehicles on the II potash horizon of the 3 RU mine

Условие Condition	$h_r$ , м/м	$P_6$ , МПа MPa	$P_r$ , МПа MPa	Результат оценки Result of assessment
Не подработан, кровля Not underworked, roof	1,1	0,17	0,213	$P_6 < P_r$ , прогнозируются predicted
	2,0	0,213	0,198	
	3,0	0,417	0,234	
Не подработан, почва Not underworked, sole	2,0	0,282	0,268	$P_6 > P_r$ , не прогнозируются not predicted
	3,0	0,510	0,228	
	4,0	0,820	0,194	
Подработан, кровля Underworked, roof	2,0	0,198	0,212	$P_6 < P_r$ , прогнозируются predicted
	3,0	0,384	0,203	
	3,5	0,507	0,201	
	4,0	0,652	0,200	
Подработан, почва Underworked, sole	2,0	0,282	0,193	$P_6 > P_r$ , не прогнозируются not predicted
	3,0	0,510	0,198	
	4,0	0,820	0,252	

В условиях подработки II калийного горизонта в целом ситуация такая же, как и на участках, не подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте. Однако здесь расстояние от кровли камеры разворота до приконтактного скопления свободного газа составляет до 2,0 м. В этом случае необходима принудительная дегазация пород кровли, так как длина анкерной крепи меньше, чем расстояние до скопления свободного газа.

Из табл. 3 также видно, что ГДЯ в виде внезапных разрушений пород почвы камер разворота автотранспорта, сопровождающиеся газовыделением, в условиях, не прогнозируются как когда II калийный горизонт не подработан, так и при подработке его очистными работами на Третьем калийном пласте.

Результаты оценки возможности развития обрушений пород кровли камер разворота автотранспорта, сопровождающихся газовыделением, позволяют рассмотреть возможность многостадийного обрушения пород кровли при многоярусном расположении приконтактных скоплений свободных газов, находящихся под давлением, величина которого установлена шахтными экспериментальными исследованиями. Для примера рассмотрим возможность многостадийного обрушения пород кровли камеры разворота автотранспорта в условиях подработки очистными работами на Третьем калийном пласте. При этом принимаем следующие ярусы расположения приконтактных скоплений свободных газов в породах кровли:

1 ярус – расстояние до приконтактного скопления 2,0 м, давление свободного газа в приконтактном скоплении 0,212 МПа; 2 ярус – расстояние до приконтактного скопления 3,0 м, давление свободного газа в приконтактном скоплении 0,203 МПа; 3 ярус – расстояние до приконтактного скопления 3,5 м, давление свободного газа в приконтактном скоплении 0,201 МПа; 4 ярус – расстояние до приконтактного скопления 4,0 м, давление свободного газа в приконтактном скоплении 0,200 МПа. Результаты расчетов по оценке возможности развития многостадийного обрушения пород кровли, сопровождающегося газовой выделением, на II калийном горизонте в камерах разворота автотранспорта представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Результаты расчетов по оценке возможности развития многостадийного обрушения пород кровли, сопровождающегося газовой выделением, на II калийном горизонте в камерах разворота автотранспорта

**Table 4.** Results of calculations to assess the possibility of appearing of multi-stage collapse of roof rocks, accompanied by gas emission, on the II potash horizon in the chambers of the U-turn of vehicles

Условие Condition	$h_r$ , м/м	$P_6$ , МПа MPa	$P_r$ , МПа MPa	Результат оценки Result of assessment
Подработан, кровля Underworked, roof	2,0/2,0	0,198	0,212	$P_6 < P_r$ , прогнозируется 1-я стадия predicted stage 1
	3,0/1,0	0,10	0,203	$P_6 < P_r$ , прогнозируется 2-я стадия predicted stage 2
	3,5/0,5	0,094	0,201	$P_6 < P_r$ , прогнозируется 3-я стадия predicted stage 3
	4,0/0,5	0,094	0,200	$P_6 < P_r$ , прогнозируется 4-я стадия predicted stage 4

Как видно из табл. 4, при многоярусном расположении приконтактных скоплений свободного газа в породах кровли камер разворота автотранспорта под действием давления свободных газов возможно многостадийное разрушение пород кровли, которое будет продолжаться до тех пор, пока давление свободных газов в приконтактных скоплениях будет превышать силы сопротивления пород кровли разрушению.

Таким образом, в геологических и горнотехнических условиях ведения подготовительных горных работ на II калийном горизонте при отсутствии профилактической дегазации пород кровли в камерах разворота автотранспорта формирование приконтактных скоплений свободных газов может провоцировать

ГДЯ в виде запоздалых внезапных обрушений пород кровли, сопровождающихся газовой выделением.

### Выводы

На основании оценки возможности развития газодинамических явлений из кровли и почвы горных выработок на II калийном горизонте в виде внезапных обрушений пород кровли (разрушений пород почвы), сопровождающихся газовой выделением, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты оценки возможности развития газодинамического явления из кровли и почвы в одиночных подготовительных выработках с пролетом не более 3,2 м, пройденных на II калийном горизонте, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, свидетельствуют о том, что газодинамические явления в виде внезапных обрушений пород кровли и разрушений пород почвы, сопровождающиеся газовой выделением, не прогнозируются. В одиночных подготовительных выработках, пройденных на II калийном горизонте, не требуется применение профилактической дегазации пород кровли и почвы выработок.
2. Результаты оценки возможности развития запоздалых обрушений пород кровли, сопровождающихся газовой выделением, в камерах разворота автотранспорта не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, свидетельствуют о том, что газодинамические явления в виде внезапных обрушений пород кровли, сопровождающихся газовой выделением, возможны в виде одностадийных (вследствие формирования одного приконтактного скопления свободного газа) и многостадийных (вследствие формирования в породах кровли нескольких приконтактных скоплений свободного газа) разрушений пород кровли. Для предотвращения в камерах разворота автотранспорта запоздалых обрушений пород кровли, сопровождающихся газовой выделением, требуется применение профилактической дегазации пород кровли выработок.
3. Результаты оценки возможности развития запоздалых разрушений пород почвы, сопровождающихся газовой выделением, в камерах разворота автотранспорта, не подработанных и подработанных очистными работами на Третьем калийном пласте, свидетельствуют о том, что газодинамические явления в виде внезапных разрушений пород почвы, сопровождающихся газовой выделением, не прогнозируются. В камерах разворота автотранспорта не требуется применение профилактической дегазации пород почвы выработок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках. – М.: Недра, 1980. – 263 с.
2. Николин В.И., Васильчук М.П. Прогнозирование и устранение выбросоопасности при разработке угольных месторождений. – Липецк: Липецкое издательство Роскомпечати, 1997. – 496 с.
3. Полянина Г.Д., Земсков А.Н., Падерин Ю.Н. Технология и безопасность разработки Верхнекамского калийного месторождения. – Пермь: Пермское кн. изд-во, 1990. – 262 с.
4. Нестеров Е.А., Иванов О.В., Андрейко С.С. Борьба с газодинамическими явлениями при разработке Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 34–37.
5. Плаксин М.С. Технологические особенности выполнения гидро-разрыва угольного пласта при проведении подготовительных выработок с целью снижения вероятности проявления газодинамических явлений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 3. – С. 16–22.

6. Wasilewski S. Gas-dynamic phenomena caused by rock mass tremors and rock bursts // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – V. 30. – № 3. – P. 413–420.
7. Hedlund F.H. The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953 // Safety science. – 2012. – № 50 (3). – P. 537–553. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.10.004.
8. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта / С.П. Береснев, В.В. Сенюк, В.И. Гончар, С.С. Андрейко, Н.А. Литвиновская // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 31–33.
9. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах / И.Е. Колесниченко, Е.А. Колесниченко, Е.И. Лобомещенко, Е.И. Колесниченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 1. – С. 108–120. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120
10. Квантово-электронные закономерности формирования метаморфических процессов и механизма внезапных выбросов метана в угольных пластах / И.Е. Колесниченко, В.Б. Артемьев, Е.А. Колесниченко, Е.И. Лобомещенко // Уголь. – 2020. – № 7 (1132). – С. 42–48 DOI: 10.18796/0041-5790-2020-7-42-48
11. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – № 29 (6). – P. 815–824. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.01.007
12. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород. – Пермь: Изд-во Перм. Нац. Исслед. Политехн. Ун-та, 2015. – 159 с.
13. Rong Z.H., Zhu Z.J. Optimization scheme in mining in hope to protect the ultra-thick suberect coal seams off the potential rock burst risks // Journal of Safety and Environment. – 2019. – № 19. – P. 1182–1191.
14. Evaluation of rockburst hazard under abandoned mine workings / D. Chlebowski, Z. Burtan, A. Zorychta // Arch. Min. Sci. – 2018. – № 63. – P. 687–699. DOI: 10.24425/123691
15. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China / X. Chen, L. Li, L. Wang, L. Qi // Safety science. – 2019. – № 115. – P. 229–236. DOI: 10.1016/J.SSCI.2019.02.010
16. Gas and dolomite outbursts in ore mines—analysis of the phenomenon and the energy balance / K. Koziel, N. Skoczylas, K. Soroko, S. Gola // Energies. – 2020. – V. 13 (11). – 2999. DOI: 10.3390/en13112999
17. Ковалев О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений. – Минск: Полымя, 1982. – 96 с.
18. Проскураев Н.М., Ковалев О.В., Мещеряков В.В. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
19. Проскураев Н.М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра, 1998. – 391 с.
20. Андрейко С.С., Лялина Т.А. Оценка возможности развития газодинамических явлений в виде внезапных разрушений пород почвы горных выработок, сопровождающихся газовой выделением, в условиях южной части Верхнекамского месторождения // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12. – № 7. – С. 107–115.

Поступила: 20.06.2022 г.

Прошла рецензирование: 30.11.2022 г.

#### Информация об авторах

**Андрейко С.С.**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией геотехнологических процессов и рудничной газодинамики Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук – филиал «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук».

**Литвиновская Н.А.**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук – филиал «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук».

**Папулов А.С.**, инженер лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук – филиал «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук».

UDC 622.831.322

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF APPEARING OF GAS-DYNAMIC PHENOMENA ON THE II POTASH HORIZON OF THE STAROBINSKY POTASH SALT DEPOSIT

Sergey S. Andreyko<sup>1</sup>,  
ssa@mi-perm.ru

Natalia A. Litvinovskaya<sup>1</sup>,  
nlitvinovskaya@mail.ru

Artem S. Papulov<sup>1</sup>,  
aspapulov@gmail.com

<sup>1</sup> Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78A, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

**The relevance** of the study is dictated by the need to ensure the safety of mining operations and at the same time to minimize the monetary and time costs of degassing sole and roof rocks. Having assessed the possibility of the appearing of a gas dynamic phenomenon depending on different conditions of mining, it is possible to identify those areas where special measures are really required to prevent gas dynamic phenomena. This kind of division of the productive formation into sections according to the danger of appearing of gas dynamic phenomena allows a differentiated approach to ensuring the safety of mining operations without unnecessary financial costs.

**Objective:** to assess the possibility of the appearing of gas dynamic phenomena from the sole and roof rocks of mine workings in various mining and technological conditions during the development of reserves of the II potash horizon; form recommendations for mining operations in places where it is possible to develop gas dynamic phenomena.

**Object:** free gases of clay contacts of the II potash horizon.

**The research method** consists in comparing the pressure of free gas in the rock mass with the bearing capacity of the rock layer between the center of the gas dynamic phenomenon and the roof/sole of the mine. The method takes into account the width of the workings, the distance from the roof/sole to the accumulation of free gas, the pressure of free gas, the strength properties of rocks, the geostatic component.

**Results.** The assessment of the possibility of appearing of gas dynamic phenomena is made in both types of mine workings, with a roof span of 3,2 m, and in places of extensions where the roof span reached 6,0 m. During the assessment, it was taken into account whether the area in question was underworked by mine workings below or not. The assessment was carried out for different gas-saturated layers. As a result of the analysis, it was found out that gas dynamic phenomena are not predicted for sole rocks, regardless of the geotechnological situation and the width of the workings. Degassing of sole rocks of advanced workings of the II potash horizon is not required. As a result of the assessment of the possibility of gas-dynamic phenomena appearing from the roof rocks of 3,2 m wide workings, it was shown that gas dynamic phenomena from the roof rocks are not expected and preventive measures for degassing are not required. The assessment of the possibility of gas dynamic phenomena appearing from the roof of the chambers of the U-turn of vehicles showed that in the places of crossing of working, in the extensions of workings, a belated gas dynamic phenomenon from the roof of the mine working is possible. In these places, degassing of roof rocks is necessary. The depth of the degassing boreholes should be at least 2,0 m.

### Key words:

gas dynamic phenomena, gas content, gas dynamic characteristics, potash mine, conditions for appearing of gas dynamic phenomena.

### REFERENCES

1. Proskuryakov N.M. *Vnezapnye vybrosy porody i gaza v kaliynykh rudnikakh* [Sudden emissions of rock and gas in potash mines]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 263 p.
2. Nikolin V.I., Vasilchuk M.P. *Prognozirovanie i ustranenie vybrosopasnosti pri razrabotke ugolnykh mestorozhdeniy* [Forecasting and elimination of outburst hazards in the development of coal deposits]. Lipetsk, Roskompechaty Publ, 1997. 496 p.
3. Polyamina G.D., Zemskov A.N., Paderin Yu.N. *Tekhnologiya i bezopasnost razrabotki Verkhnekamskogo kaliynogo mestorozhdeniya* [Technology and safety of development of the Verkhnekamskoe potash deposit]. Perm, Perm Publ. House, 1990. 262 p.
4. Nesterov E.A., Ivanov O.V., Andreiko S.S. *Borba s gazodinamicheskimi yavleniyami pri razrabotke Verkhnekamskogo i Starobinskogo mestorozhdeniy kaliynykh soley* [The control of gas dynamic phenomena in the development of Verkhnekamskoe and Starobinskoe potash salt deposits]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 34–37.
5. Plaksin M.S. Technological features of a coal seam hydraulic fracturing during de-velopment opening heading in order to reduce gas dynamic phenomena manifestation probability. *Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*, 2022, no. 3, pp. 16–22. In Rus.
6. Wasilewski S. Gas-dynamic phenomena caused by rock mass tremors and rock bursts. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, vol. 30, no. 3, pp. 413–420.
7. Hedlund F.H. The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953. *Safety science*, 2012, no. 50 (3), pp. 537–553. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.10.004
8. Beresnev S.P., Senyuk V.V., Gonchar V.I., Andreiko S.S., Litvinovskaya N.A. Research of the mechanism forming the zones that are dangerous on gas and dynamic phenomena in the first potash level rocks. *Gornyi Zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 31–33. In Rus.
9. Kolesnichenko I.E., Kolesnichenko E.A., Lyubomishchenko E.I., Kolesnichenko E.I. Mechanism of methane outbursting in coal seams. *Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020, no. 1, pp. 108–120. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-108-120.
10. Kolesnichenko I.E., Artemiev V.B., Kolesnichenko E.A., Lubomishchenko E.I. Quantum-electron laws of the formation of metamorphic processes and the mechanism of sudden methane emissions in coal seams. *Ugol*, 2020, no. 07, pp. 42–48. In Rus.
11. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, no. 29 (6), pp. 815–824. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.01.007
12. Andreyko S.S., Ivanov O.V., Litvinovskaya N.A. *Prognozirovanie i predotvrashchenie gazodinamicheskikh yavleniy iz pochvy pri*



- prokhodke podgotovitelnykh vyrabotok v podrobotanom massive solyanykh porod* [Forecasting and prevention of gas dynamic phenomena from the sole rocks during the mining of advanced workings in an underworked massif of salt rocks]. Perm, Perm. National Research Polytechnic University Publ. House, 2015. 159 p.
13. Rong Z.H., Zhu Z.J. Optimization scheme in mining in hope to protect the ultra-thick suberect coal seams off the potential rock burst risks. *Journal of Safety and Environment*, 2019, no. 19, pp. 1182–1191.
  14. Chlebowski D., Burtan Z., Zorychta A. Evaluation of rockburst hazard under abandoned mine workings. *Arch. Min. Sci.*, 2018, no. 63, pp. 687–699. DOI: 10.24425/123691
  15. Chen X., Li L., Wang L., Qi L. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China. *Safety science*, 2019, no. 115, pp. 229–236. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.010
  16. Kozieł K., Skoczylas N., Soroko K., Gola S. Gas and dolomite outbursts in ore mines – analysis of the phenomenon and the energy balance. *Energies*, 2020, no. 13 (11), 2999. DOI: 10.3390/en13112999
  17. Kovalev O.V., Livensky V.S., Bylino L.V. *Osobennosti bezopasnoy razrabotki kaliynykh mestorozhdeniy* [Features of safe development of potash deposits]. Minsk, Polymya Publ., 1982. 96 p.
  18. Proskuryakov N.M., Kovalev O.V., Meshcheryakov V.V. *Upravlenie gazodinamicheskimi protsessami v plastakh kaliynykh rud* [Control of gas-dynamic processes in potash ore formations]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 239 p.
  19. Proskuryakov N.M. *Upravlenie sostoyaniem massiva gornykh porod* [Management of the state of the rock mass]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 391 p.
  20. Andreiko S.S., Lyalina T.A. Otsenka vozmozhnosti razvitiya gazodinamicheskikh yavleniy v vide vnezapnykh razrusheniy porod pochvy gornykh vyrabotok, soprovozhdayushchikhsya gazovydeleniem, v usloviyakh yuzhnoy chasti Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [Assessment of the possibility of the appearing of gas-dynamic phenomena in the form of sudden destruction of the rocks of the sole of mine workings, accompanied by gas emissions, in the conditions of the southern part of the Verkhnekamskoye field]. *Bulletin of PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2013, vol. 12, no. 7, pp. 107–115.

Received: 20 June 2022.

Reviewed: 30 November 2022.

#### Information about the authors

**Sergey S. Andreyko**, Dr. Sc., professor, head of the Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Natalia A. Litvinovskaya**, Dr. Sc., researcher, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Artem S. Papulov**, engineer, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.