

УДК 622.363:622.831.32

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

О МЕХАНИЗМЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОЧАГОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЧВЕ СИЛЬВИНИТОВЫХ ПЛАСТОВ¹

А.Б. Барях, С.С. Андрейко¹, А.К. Федосеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

ABOUT THE MECHANISM OF LOCALIZATION OF GAS DYNAMIC PHENOMENA FOCUSES IN THE BEDROCK OF SYLVINITE FORMATIONS

Aleksandr A. Baryakh, Sergey S. Andreyko¹, Anton K. Fedoseev

Federal State Budgetary Institution of Science Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78 Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

¹Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 07.06.2017. Принята / Accepted: 18.07.2017. Опубликовано / Published: 15.09.2017

Ключевые слова:

Старобинское месторождение, калийные рудники, горные выработки, калийный пласт, газодинамические явления, внезапные выбросы соли и газа, лава, напряженно-деформированное состояние, горные породы, каменная соль, контактные элементы, математическое моделирование, критерии обрушения, пластические деформации, глинистые прослои, горные работы, метод конечных элементов, численное моделирование.

Key words:

Starobinsk field, potash mines, mine excavations, potash formation, gas dynamic phenomena, sudden salt and gas emission, long face, stress-strain state, rocks, halite, contact elements, mathematical modelling, collapse criteria, plastic deformations, clay interbedding, mine works, finite element method, numerical modelling.

Рассматриваются результаты геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния соляных пород в условиях слоевой выемки на рудниках ОАО «Беларуськалий», где из пород почвы горных выработок происходят внезапные, достаточно мощные газодинамические явления (ГДЯ) в виде выбросов соли и газа, разрушений пород почвы, сопровождающихся газовойделением. Там же выявляются участки, потенциально опасные по газодинамическим явлениям из почвы. Для условий Старобинского месторождения калийных солей газовые скопления в породах почвы горных выработок, как правило, приурочены к глинистым прослойкам и слоям в соляных породах, поэтому предполагается, что геомеханической предпосылкой проявления ГДЯ является раскрытие глинистых контактов, что приводит к образованию каналов миграции свободных газов и формированию техногенных газонасыщенных зон под воздействием горных работ.

Постановка задачи включает задание параметров обрушения пород кровли обрабатываемого Третьего калийного пласта, локализацию пластических деформаций во вмещающих породах, раскрытие глинистых контактов в соляной толще. При этом учитывается, что обрушенные породы кровли лавы заполняют выработанное пространство и с учетом разуплотнения формируют техногенную геосреду, которая также включается в расчетную схему математического моделирования. Для определения напряженно-деформированного состояния пород используется модель идеальной упругопластичной среды с внутренним трением. При этом глинистые прослои описываются контактными элементами Гудмана.

По результатам решения ряда модельных задач в двумерной постановке делается вывод о существенном влиянии глинистых прослоев в почве обрабатываемого пласта на возможность реализации газодинамических явлений. Установлено, что при наличии трех глинистых контактов и более в слое подстилающей каменной соли создаются условия для формирования многоярусного очага ГДЯ, образовавшегося при раскрытии газонасыщенных глинистых контактов. Отмечается периодический характер формирования очагов ГДЯ при движении фронта очистных работ.

Results of geomechanical modelling of a stress-strain state of salt rocks in conditions of layer mining at mines of Belaruskali JSC are reviewed. There are sudden powerful gas dynamic phenomena (GDP) occur from the bedrock of mines such as salt and gas emission, bedrock destruction followed by gas release. Moreover, there are areas that are potentially dangerous due to gas dynamic phenomena acting from the bedrocks. For the conditions of the Starobinsk deposit of potassium salts gas accumulations in bedrocks of mines are usually confined to clayish interlayers and layers in salt rocks. Therefore, it is assumed that disclosure of clay contacts is a geomechanical prerequisite for GDP. That leads to formation of channels for migration of free gases and formation of artificial gas-saturated zones under the influence of mining operations.

Task statement includes setting of parameters for collapse of the roof rocks of the Third potash formation being under the mining, localization of plastic deformations in the enclosing rocks and opening of clay contacts in a salt thickness. It is taken into account that collapsed rocks of a long face roof fill the goaf and form technogenic geo-environment with respect to their decompaction. The geo-environment is also included in the calculation scheme of mathematical modeling. In order to determine a stress-strain state of rocks, a model of an ideal elastic plastic medium with internal friction is used. In this case, clay interbedding are described by Goodman's contact elements.

Based on results of solution of a number of model problems in a two-dimensional statement, there is a conclusion made on the significant influence of clay interbedding in the bedrocks of a formation under the mining on the possibility of occurrence of gas dynamic phenomena. It is established, that in presence of three and more clay contacts in the layer of underlying halite there are conditions created for formation of a multi-stage focus of GDP, formed when gas-saturated clay contacts are exposed. Periodic character of formation of GDP focuses is noted during the movement of the front of cleaning works.

Барях Александр Абрамович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор (тел.: +007 342 216 09 48, e-mail: bar@mi-perm.ru).

Андрейко Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (тел.: +007 342 219 84 38, e-mail: ssa@mi-perm.ru). Контактное лицо для переписки.

Федосеев Антон Киимович – кандидат технических наук, научный сотрудник (тел.: +007 342 216 75 02, e-mail: rm_anton@mi-perm.ru).

Aleksandr A. Baryakh (Author ID in Scopus: 670185281) – Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director (tel.: +007 342 216 09 48, e-mail: bar@mi-perm.ru)

Sergey S. Andreyko (Author ID in Scopus: 55922205900, 6506180352) – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Development of Fields of Mineral Resources (tel.: +007 342 219 84 38, e-mail: ssa@mi-perm.ru). The contact person.

Anton K. Fedoseev (Author ID in Scopus: 23466660100) – PhD in Engineering, Research Fellow (tel.: +007 342 216 75 02, e-mail: rm_anton@mi-perm.ru).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор № 14.B25.31.0006 от 24 июня 2013 г.) и проекта «Исследование механизмов разрушения горных пород и газонасыщенных массивов» программы президиума УрО РАН.

Введение

Разработка месторождений калийных солей существенно осложняется газодинамическими явлениями (ГДЯ), которые в большинстве случаев наносят значительный материальный ущерб калийным предприятиям и представляют реальную угрозу жизни горнорабочих. За последние три десятилетия внесен существенный вклад в исследование природы, механизма, разработку методов прогноза и способов предотвращения газодинамических явлений в калийных рудниках [1–10] и угольных шахтах [11–15]. Однако при отработке калийных месторождений появляются новые, ранее не встречавшиеся в практике ведения горных работ виды ГДЯ. Например, внезапные достаточно мощные выбросы соли и газа на сопряжении лава–штрек при слоевой выемке калийных пластов в условиях Старобинского месторождения калийных солей [16–19]. В связи с этими фактами появилась настоятельная необходимость в изучении данного типа ГДЯ и разработке возможных способов управления газодинамическими процессами в почве горных выработок.

Условием реализации газодинамических явлений является наличие газовых скоплений в приконтурной части породного массива и выполнение при этом основных критериев разрушения [20–26]. Для условий Старобинского месторождения калийных солей газовые скопления в породах почвы горных выработок, как правило, приурочены к глинистым прослойкам и слоям в соляных породах [27–28]. Геомеханическими предпосылками к проявлению ГДЯ является раскрытие глинистых контактов, что приводит к образованию каналов миграции свободных газов и формированию техногенных газонасыщенных зон под воздействием горных работ.

Постановка задачи

Для оценки опасности развития ГДЯ из почвы выработанного пространства лавы выполнялось геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния пород почвы при отработке слоев 2, 2–3, 3 в условиях слоевой выемки Третьего пласта и выявлялись участки, потенциально опасные по газодинамическим явлениям из почвы.

Данная задача в общем случае требует проведения пространственного математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) соляного породного массива. Однако для понимания закономерностей геомеханических процессов (обрушение пород кровли отрабатываемого пласта, локализация пластических деформаций во вмещающих породах, раскрытие глинистых контактов в соляной толще), имеющих место при движении забоя лавы, а также определения степени влияния механических свойств пород и технологических параметров очистных работ на изменение НДС соляного массива требуется решение ряда задач, которые можно провести в двумерной постановке.

Двумерная расчетная схема оценки изменения НДС породного массива в процессе отработки лавы построена перпендикулярно движению фронта очистных работ и соответствует типовому для Старобинского месторождения геологическому разрезу (рис. 1).

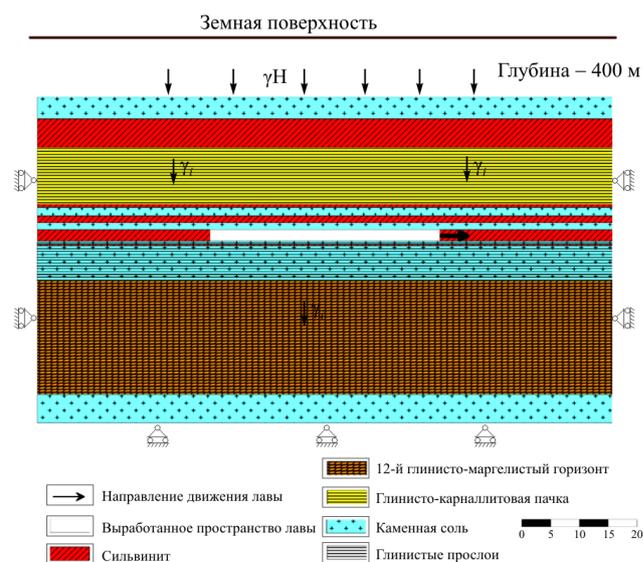


Рис. 1. Расчетная схема

Граничные условия задавались исходя из начального литостатического напряженного состояния верхней части породного массива: горизонтальные перемещения на боковых гранях и вертикальные – на нижней принимались равными нулю. На верхней границе задавалось горное давление, соответствующее весу вышележащей толщи пород. Расчетная область находилась в условиях действия массовых сил интенсивностью γ_i (удельный вес).

Для определения напряженно-деформированного состояния пород использовалась

модель идеальной упругопластичной среды с внутренним трением. В качестве условия пластичности в области сжатия использовалась параболическая огибающая кругов Мора [29]. Условием локализации пластических деформаций являлось выполнение равенства

$$\tau_{\max} = \tau^* = \sqrt{(\sigma_p + \sigma) \left[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c \right]}, \quad (1)$$

а в области растяжения –

$$\sigma_1 = \sigma_p, \quad (2)$$

где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение, $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$; σ – нормальное напряжение, $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$; σ_c – предел прочности на сжатие, σ_p – предел прочности на растяжение; σ_1, σ_3 – главные напряжения, определяемые по результатам математического моделирования.

Отметим, что зоны локализации пластических деформаций отождествлялись с процессами трещинообразования соответственно за счет развития трещин сдвига и отрыва. Численное решение задачи осуществлялось по стандартной процедуре метода конечных элементов [30]. Для учета пластического характера деформирования пород использовался метод секущей матрицы [31].

Прочностные и деформационные свойства принятых к расчету элементов геологического разреза представлены в табл. 1.

Таблица 1

Принятые к расчету механические свойства пород

Порода	Модуль деформации, ГПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение*, МПа
Сильвинит	2,3	27	3
Каменная соль	2,3	27	3
Карналлит	1,8	11	1
Глинисто-мергелистый горизонт	0,82	11	3

Примечание. * при отсутствии экспериментальных данных предел прочности на растяжение принят отличным на порядок от предела прочности на сжатие.

Прочность на растяжение горных пород значительно ниже их показателей при сжатии. В связи с этим локализация растягивающих усилий в каких-либо областях массива является предпосылкой к разрушению пород. Вместе с тем очевидно, что разрушенные под действием

растягивающих напряжений породы не будут обрушаться в выработанное пространство, если они окружены материалом, не потерявшим своей несущей способности. Исходя из этого в качестве первого условия обрушения пород принимался выход зоны действия растягивающих напряжений на обнажение. Реализация этого критерия осуществлялась путем специальной организации вычислительного итерационного процесса: на каждой итерации из рассмотрения исключались (обнулялись) конечные элементы, примыкающие к границе кровли выработанного пространства областей концентрации растягивающих напряжений [32].

Наличие глинистых прослоев в кровле лавы является дополнительным фактором, способствующим обрушению пород. В этом случае при достижении областью сдвиговой трещиноватости «раскрытого» глинистого контакта происходит обрушение пород в выработанное пространство [33]. Учет данного критерия обрушения также реализован в расчетной процедуре путем локализации и последующего исключения из расчетов областей, ограниченных «раскрытым» глинистым прослоем и зонами сдвиговой трещиноватости.

Обрушенные из кровли лавы породы заполняют выработанное пространство и с учетом их разуплотнения формируют техногенную геосреду, которая также включалась в расчетную схему математического моделирования. Ее деформационные свойства принимались на порядок ниже соответствующих показателей породного массива.

Таблица 2

Осредненные механические свойства глинистых контактов

Нормальная нагрузка σ_n , МПа	Предел прочности на сдвиг τ_p , МПа	Деформация на пределе прочности δ_p , мм	Вертикальное смещение при пределе прочности δ_n , мм	Остаточная прочность на сдвиг τ^* , МПа	Жесткость сдвига на пределе прочности k_s , ГПа/м	Жесткость разуплотнения k_m , ГПа/м
2	1,60	0,98	0,14	1,29	1,63	0,06
3,5	2,17	1,21	0,29	1,79	1,79	0,08
5	2,93	1,27	0,25	2,62	2,31	0,13
10	5,12	2,00	0,51	4,91	2,57	0,10

Примечание. Среднее значение коэффициента сцепления C по глинистому контакту составляет 0,7 МПа, угла внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$.

Деформирование глинистых контактов между слоями описывалось контактными элементами Гудмана [34, 35]. Свойства глинистых контактов принимались по данным лабораторных исследований [36] и представлены в табл. 2.

Результаты математического моделирования

Наличие глинистых контактов оказывает значимое влияние на характер разрушения пород почвы выработанного пространства. Эти эффекты проявляются наиболее выражено в условиях минимальной пригрузки почвы

обрушенными породами (рис. 2). Так, при отсутствии контактов или условий к их раскрытию зона разгрузки (рис. 2, а) охватывает значительную часть почвы выработанного пространства, что обуславливает возможность дегазации этой части пород почвы. При наличии в почве лавы трех глинистых прослоев (рис. 2, б) происходит раскрытие двух из них. При этом сплошность перекрывающих контакты пород сохраняется, что при наличии свободных газов приводит к их аккумуляции в раскрытых контактах, т.е. формированию очага ГДЯ.

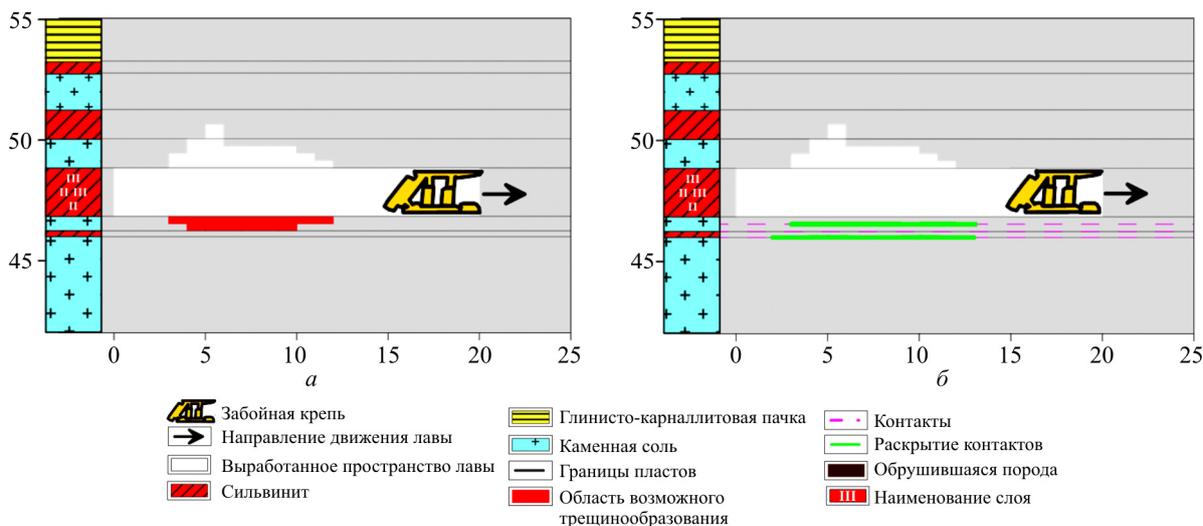


Рис. 2. Влияние глинистых контактов в почве лавы на изменение НДС в окрестности выработанного пространства при отходе от монтажного штрека

На рис. 3 представлено изменение конфигурации породного массива при отходе лавы от монтажного штрека при отработке слоев 2, 2–3, 3 в разрезе, перпендикулярном фронту очистных работ, а также показаны локализация и амплитуды раскрытия глинистых контактов. Контакты в кровле дегазированы в результате надработки, поэтому анализируется только состояние глинистых прослоев, развитых в почве лавы. Раскрытие глинистых контактов наблюдается сразу в процессе движения фронта очистных работ (рис. 3, а). При протяженности выработанного пространства за крепью 10 м и более начинается обрушение кровли и частичное закрытие контактов (рис. 3, б, в). При отходе лавы от монтажного штрека происходит разрушение междупластья и проникновение обрушенных при надработке пород в выработанное пространство (рис. 3, г). Породы начинают создавать дополнительный отпор, что

приводит к закрытию или дегазации контактов в почве лавы (см. рис. 3, з) [37]. В некоторых случаях обрушение кровли за забойной крепью происходит не сразу [38, 39], что приводит к открытию контактов в почве призабойного пространства, а значит, созданию условий для реализации ГДЯ (рис. 3, д). Эти контакты закрываются после продвижения лавы и обрушения пород в пространстве за крепью (рис. 3, е). Таким образом, в зависимости от физико-механических свойств пород, их разуплотнения, а также латеральной изменчивости этих характеристик может наблюдаться некоторая периодичность в характере разрушения породного массива в окрестности выработанного пространства. При этом в призабойном пространстве нижней лавы имеет место периодическое формирование очагов ГДЯ вследствие раскрытия контактов в почве (см. рис. 3, з, д, е).

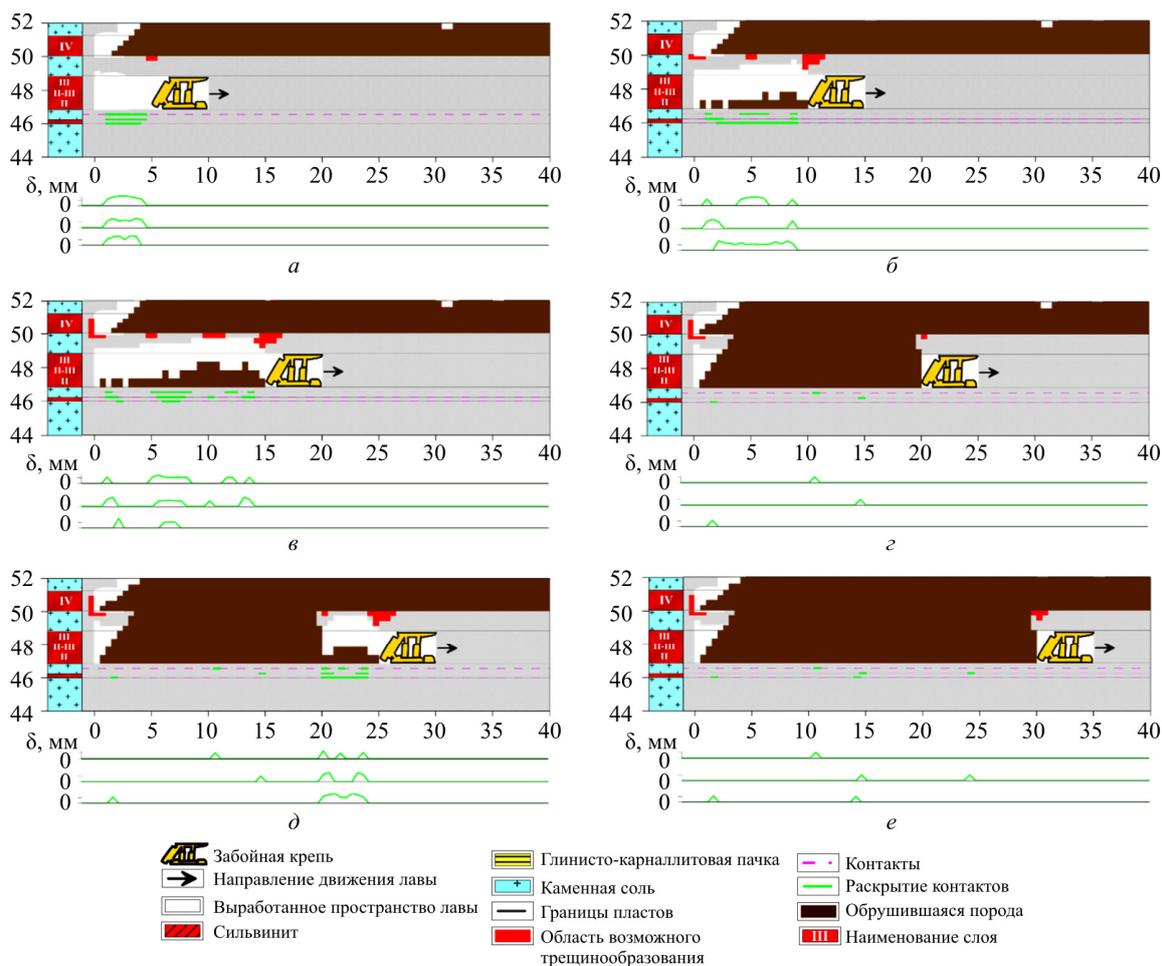


Рис. 3. Характер разрушения породного массива в процессе движения фронта очистных работ при протяженности выработанного пространства: *a* – 5 м; *б* – 10 м; *в* – 15 м; *г* – 20 м; *д* – 25 м; *е* – 30 м

Заключение

Результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния пород почвы при отработке слоев 2, 2–3, 3 в условиях слоевой выемки Третьего пласта позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при отсутствии глинистых прослоев в породах почвы при отходе лавы от монтажного штрека в породах почвы – слое подстилающей каменной соли – образуется зона разгрузки. В таких условиях приконтактных скоплениях свободного газа в породах почвы не образуется.

2. Установлено, что при наличии трех и более глинистых контактов в слое подстилающей каменной соли происходит раннее раскрытие контактов, перекрывающие породы сохраняют свою сплошность. Тем

самым создаются условия для формирования многоярусного очага ГДЯ, образовавшегося при раскрытии газонасыщенных глинистых контактов.

3. При движении фронта очистных работ в призабойном пространстве возможно периодическое формирование временных очагов ГДЯ в почве при «зависании» пород кровли.

Результаты проведенных исследований использовались для разработки параметров профилактического бурения дегазационных шпуров в почву горных выработок для предотвращения газодинамических явлений из почвы при отработке слоев 2, 2–3, 3 в условиях применения различных вариантов столбовой системы разработки Третьего калийного пласта на рудниках 1–4 РУ и Краснослободского рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий».

Библиографический список

1. Ковалев О.В. Борьба с газодинамическими явлениями на калийных рудниках // Безопасность труда в промышленности. – 1980. – № 6. – С. 51–53.

2. Duchrow G. The production of potash in East Germany // Glueckauf. – 1990. – Vol. 126, № 21/22. – P. 1016–1033.

3. Duchrow G. Der 100-jährige "Rhönmarsch" in die Kohlsäurefelder des Südhüringischen Kalibergbaus // *Zeitschrift für Kunst und Kultur im Bergbau*. – 1997. – № 49 (4). – С. 123–147.
4. Cruickshank N.M., Mahtab M.A., Wane M.T. Methods for predicting gas outburst in salt and coal mines // *Metallurgical and Petroleum Engineers*. – 1986. – Vol. 280, iss. part A. – P. 2079–2084.
5. Андрейко С.С., Блюм М.Ф., Земсков А.Н. Проблемы безопасности горных работ на рудниках ПО «Беларуськалий» в условиях газовой выделений и газодинамических явлений // *Горный журнал*. – 1998. – № 11–12. – С. 88–92.
6. Чужов В.Н., Андрейко С.С. Газодинамические явления из почвы горных выработок в калийных рудниках // *Горная механика*. – 2001. – № 1–2. – С. 26–30.
7. Прушак В.Я., Щерба В.Я., Андрейко С.С. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей // *Горная механика и машиностроение*. – 2002. – № 1. – С. 89–94.
8. Андрейко С.С., Чистяков А.Н., Береснев С.П. Состояние и перспективы решения проблемы газодинамических явлений в калийных рудниках на Верхнекамском и Старобинском месторождениях калийных солей // *Горная механика*. – 2006. – № 2. – С. 66–72.
9. Андрейко С.С., Иванов О.В., Нестеров Е.А. Борьба с газодинамическими явлениями при разработке Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей // *Научные исследования и инновации*. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2009. – Т. 3, № 4. – С. 34–37.
10. Предотвращение газодинамических явлений в почве выработанного пространства лав / В.Я. Щерба, С.С. Андрейко, С.В. Некрасов, В.Я. Прушак, В.С. Зубович // *Горный журнал*. – 2004. – № 2. – С. 45–48.
11. Li S., Zhang T. Catastrophic mechanism of coal and gas outbursts and their prevention and control // *Mining Science and Technology (China)*. – 2010. – Vol. 20, iss. 2. – P. 209–214. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60186-1
12. María B., Aguado D., González Nicieza C. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa-Olloniego coalfield, Spain // *International Journal of Coal Geology*. – 2010. – Vol. 69, iss. 4. – P. 253–266. DOI: 10.1016/j.coal.2006.05.004
13. Application of outburst risk indices in the underground coal mines by sublevel caving / J. Toraño, S. Torno, E. Alvarez, P. Riesgo // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2012. – Vol. 50. – P. 94–101. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2012.01.005
14. Hazard evaluation of coal and gas outbursts in a coal-mine roadway based on logistic regression model / Z. Li, E. Wang, J. Ou, Z. Liu // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 80. – P. 185–195. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2015.07.006
15. Трубецкой К.Н., Иофис М.А., Есина Е.Н. Особенности геомеханического обеспечения освоения месторождений, склонных к газодинамическим явлениям // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 3. – С. 64–71.
16. Андрейко С.С., Петровский Б.И., Андрейко Л.В. Методы прогноза и способы предотвращения газодинамических явлений из почвы горных выработок в рудниках ПО «Беларуськалий» // *Горная механика*. – 1998. – № 1. – С. 29–35.
17. Прушак В.Я., Щерба В.Я., Андрейко С.С. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей // *Горная механика и машиностроение*. – 2002. – № 1. – С. 89–94.
18. Механизм образования свободного газа в очагах газодинамических явлений калийных рудников / В.Я. Щерба, А.А. Тухто, С.С. Андрейко, В.С. Зубович // *Горный журнал*. – 2004. – № 3. – С. 64–67.
19. Кутырло В.Э. Газодинамические явления в промышленных горизонтах Старобинского месторождения калийных солей // *Литасфера*. – 2007. – № 1. – С. 140–148.
20. Определение критической величины газового давления, способного вызвать газодинамические явления при разработке сильвинитового пласта / С.С. Андрейко, Т.А. Лялина, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2013. – № 5. – С. 22–28.
21. Зубов В.П., Смычник А.Д. Внезапные выбросы соли и газа на калийных рудниках и их предупреждение // *Горный журнал*. – 1998. – № 11–12. – С. 85–87.
22. The characteristic of in situ stress in outburst area of China / J. Han, H.W. Zhang, S. Li, W.H. Song // *Original Research Article Safety Science*. – 2012. – Vol. 50, iss. 4. – P. 878–884. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.08.014
23. Stormont J.C., Daemen J.R. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformations // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1992. – Geomech. abstr., 29. – P. 325–342. DOI: 10.1016/0148-9062(92)90510-7
24. Popp T., Kern H., Schulze O. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, № B3. – P. 4061–4078. DOI: 10.1029/2000JB900381
25. Геомеханическое моделирование внезапных разрушений пород почвы горных выработок / И.А. Подлесный, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, С.В. Некрасов, Н.А. Литвиновская // *Горный журнал*. – 2010. – № 8. – С. 28–30.
26. Исследования газоносности пород пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения / В.А. Тараканов, И.И. Головатый, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, О.В. Иванов // *Горный журнал*. – 2010. – № 8. – С. 25–27.
27. 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.
28. Литвиновская Н.А. Газоносность и газодинамические характеристики пород почвы при слоевой выемке Третьего калийного пласта в условиях рудников ОАО «Беларуськалий» // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр.* – Пермь: Изд-во Горн. ин-та УрО РАН, 2016. – Вып. 14. – С. 255–258.
29. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1947. – 180 с.
30. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. – London: McGraw-Hill, 1971. – 521 p.
31. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
32. Baryakh A.A., Fedoseev A.K. Sinkhole formation mechanism // *Journal of Mining Science*. – 2011. – Vol. 47, iss. 6. – P. 404–412. DOI: 10.1134/S1062739147040022

33. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Барях, А.Ю. Шумихина, В.Н. Токсаров, С.Ю. Лобанов, А.В. Евсеев // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 15–19.

34. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // *Advances in rock mechanics: proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics*. – Denver, 1974. – Vol. 1, part A. – P. 127–140.

35. Groth T. Description and applicability of the BEFEM code // *Appl. Rock Mech. Mining. Proc. Conf. Lulea*. – London, 1981. – P. 204–208. DOI: 10.1016/0148-9062(82)90977-9

36. Interaction of layers in salt deposit. 1. Mechanical properties of joints / A.A. Baryakh, I.N. Dudyrev, V.A. Asanov,

I.L. Pan'kov // *Journal of Mining Science*. – 1992. – Vol. 28, iss. 2. – P. 145–149. DOI: 10.1007/BF00710733

37. Губанов В.А., Поляков А.Л., Щерба В.Я. Исследование характера восстановления нагрузки на почву лавы позади очистного забоя после выемки верхнего слоя в условиях третьего горизонта ПО «Беларуськалий» // Горный журнал. – 2002. – № 3–4. – С. 39–40.

38. JinFeng Ju, Jialin Xu. Structural characteristic of key strata and strata behavior of a fully mechanized longwall face with 7.0 m height chocks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 58. – P. 46–54. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.09.006

39. Губанов В.А. О механизме обрушения пород кровли при слоевой выемке Третьего калийного пласта // Горный журнал. – 2002. – № 3–4. – С. 50–64.

References

1. Kovalev O.V. Bor'ba s gazodinamicheskimi iavleniyami na kaliinykh rudnikakh [Combating gas-dynamic phenomena at potash mines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 1980, no.6, pp.51-53.

2. Duchrow G. The production of potash in East Germany. *Glueckauf*, 1990, vol.126, no.21/22, pp.1016-1033.

3. Duchrow G. Der 100-jährige «Rhönmarsch» in die kohlenäurefelder des südthüringischen kalibergbaus. *Zeitschrift für Kunst und Kultur im Bergba*, 1997, no.49(4), pp.123-147.

4. Cruickshank N.M., Mahtab M.A., Wane M.T. Methods for predicting gas outburst in salt and coal mines. *Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1986, vol.280, iss.pt A, pp.2079-2084.

5. Andreiko S.S., Blium M.F., Zemskov A.N. Problemy bezopasnosti gornyykh rabot na rudnikakh PO «Belarus'kaliy» v usloviyakh gazovydelenii i gazodinamicheskikh iavlenii [Problems of safety of mining operations at the mines of PA "Belaruskaliy" in conditions of gas evolution and gas dynamic phenomena]. *Gornyy zhurnal*, 1998, no.11-12, pp.88-92.

6. Chuzhov V.N., Andreiko S.S. Gazodinamicheskie iavleniya iz pochvy gornyykh vyrabotok v kaliinykh rudnikakh [Gas-dynamic phenomena from the soil of mine workings in potash mines]. *Gornaia mekhanika*, 2001, no.1-2, pp.26-30.

7. Prushak V.Ia., Shcherba V.Ia., Andreiko S.S. Analiz geologicheskikh uslovii vozniknoveniya gazodinamicheskikh iavlenii na Starobinskom mestorozhdenii kaliinykh solei [Analysis of the geological conditions of occurrence of gas-dynamic phenomena at the Starobinsky deposit of potassium salts]. *Gornaia mekhanika i mashinostroenie*, 2002, no.1, pp.89-94.

8. Andreiko S.S., Chistiakov A.N., Beresnev S.P. Sostoyanie i perspektivy resheniya problemy gazodinamicheskikh iavlenii v kaliinykh rudnikakh na Verkhnekamskom i Starobinskom mestorozhdeniyakh kaliinykh solei [State and prospects for the solution of the problem of gas dynamic phenomena in potash mines at the Verkhnekamsk and Starobinsky deposits of potash salts]. *Gornaia mekhanika*, 2006, no.2, pp.66-72.

9. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Nesterov E.A. Bor'ba s gazodinamicheskimi iavleniyami pri razrabotke Verkhnekamskogo i Starobinskogo mestorozhdenii kaliinykh solei [Combating gas-dynamic phenomena in the development of the Verkhnekamsk and Starobinsky deposits of potash salts]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2009, vol.3, no.4, pp.34-37.

10. Shcherba V.Ia., Andreiko S.S., Nekrasov S.V., Prushak V.Ia., Zubovich V.S. Predotvrashchenie gazodinamicheskikh iavlenii v pochve vyrabotannogo prostranstva lav [Prevention of gas-dynamic phenomena in the soil of the developed space of long faces]. *Gornyy zhurnal*, 2004, no.2, pp.45-48.

11. Li S., Zhang T. Catastrophic mechanism of coal and gas outbursts and their prevention and control. *Mining Science and Technology (China)*, 2010, vol.20, iss.2, pp.209-214. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60186-1

12. Maria B., Aguado D., González Nicieza C. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa-Olloniego coalfield, Spain. *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol.69, iss.4, pp.253-266. DOI: 10.1016/j.coal.2006.05.004

13. Toraño J., Torno S., Alvarez E., Riesgo P. Application of outburst risk indices in the underground coal mines by sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, vol. 50, pp.94-101. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.01.005

14. Li Z., Wang E., Ou J., Liu Z. Hazard evaluation of coal and gas outbursts in a coal-mine roadway based on logistic regression model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, vol.80, pp.185-195. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.07.006

15. Trubetskoi K.N., Iofis M.A., Esina E.N. Osobennosti geomekhanicheskogo obespecheniya osvoeniya mestorozhdenii, sklonnykh k gazodinamicheskimi iavleniyam [Features of geomechanical support for the development of deposits prone to gas dynamic phenomena]. *Fiziko-tehnichesknye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2015, no.3, pp.64-71.

16. Andreiko S.S., Petrovskii B.I., Andreiko L.V. Metody prognoza i sposoby predotvrashcheniya gazodinamicheskikh iavlenii iz pochvy gornyykh vyrabotok v rudnikakh PO «Belarus'kaliy» [Methods of forecasting and ways to prevent gas-dynamic phenomena from the soil of mine workings in the mines of PO "Belaruskaliy"]. *Gornaia mekhanika*, 1998, no.1, pp.29-35.

17. Prushak V.Ia., Shcherba V.Ia., Andreiko S.S. Analiz geologicheskikh uslovii vozniknoveniya gazodinamicheskikh iavlenii na Starobinskom mestorozhdenii kaliinykh solei [Analysis of the geological conditions of occurrence of gas-dynamic phenomena at the Starobinsky deposit of potassium salts]. *Gornaia mekhanika i mashinostroenie*, 2002, no.1, pp.89-94.

18. Shcherba V.Ia., Tukhto A.A., Andreiko S.S., Zubovich V.S. Mekhanizm obrazovaniya svobodnogo gaza

v ochagakh gazodinamicheskikh iavlenii kaliinykh rudnikov [Mechanism of formation of free gas in the foci of gas-dynamic phenomena of potash mines]. *Gornyi zhurnal*, 2004, no.3, pp.64-67.

19. Kutyrlo V.E. Gazodinamicheskie iavleniia v promyshlennykh gorizontakh Starobinskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Gas-dynamic phenomena in the industrial horizons of the Starobinsky deposit of potassium salts]. *Litosfera*, 2007, no.1, pp.140-148.

20. Andreiko S.S., Lialina T.A., Ivanov O.V., Nesterov E.A. Opredelenie kriticheskoi velichiny gazovogo davleniia, sposobnogo vyzvat' gazodinamicheskie iavleniia pri razrabotke sil'vinitovogo plasta [Determination of the critical value of the gas pressure, which can cause gas dynamic phenomena in the development of the sylvinite layer]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2013, no.5, pp.22-28.

21. Zubov V.P., Smychnik A.D. Vnezapnye vybrosy soli i gaza na kaliinykh rudnikakh i ikh preduprezhdenie [Sudden emissions of salt and gas in potash mines and their prevention]. *Gornyi zhurnal*, 1998, no.11-12, pp.85-87.

22. Han J., Zhang H.W., Li S., Song W.H. The characteristic of in situ stress in outburst area of China. *Original Research Article Safety Science*, 2012, vol.50, iss.4, pp.878-884. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.08.014

23. Stormont J.C., Daemen J.R. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1992, geomech. abstr., 29, pp.325-342. DOI: 10.1016/0148-9062(92)90510-7

24. Popp T., Kern H., Schulze O. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106, no.B3, pp.4061-4078. DOI: 10.1029/2000JB900381

25. Podlesnyi I.A., Beresnev S.P., Andreiko S.S., Nekrasov S.V., Litvinovskaia N.A. Geomekhanicheskoe modelirovanie vnezapnykh razrushenii porod pochvy gornykh vyrabotok [Geomechanical modeling of sudden destruction of soil rocks of mine workings]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no.8, pp.28-30.

26. Tarakanov V.A., Golovaty I.I., Beresnev S.P., Andreiko S.S., Ivanov O.V. Issledovaniia gazonosnosti porod plasta Tret'ego kaliinogo gorizonta Starobinskogo mestorozhdeniia [Studies of the gas content of the rocks of the third potash horizon of the Starobinsky deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no.8, pp.25-27.

27. Beresnev S.P., Seniuk V.V., Gonchar V.I., Andreiko S.S., Litvinovskaia N.A. Issledovanie mekhanizma formirovaniia opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam zon v porodakh kaliinogo gorizonta [Investigation of the mechanism of formation of zones dangerous in gas-dynamic phenomena in rocks of the potassium horizon]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no.8, pp.31-33.

28. Litvinovskaia N.A. Gazonosnost' i gazodinamicheskie kharakteristiki porod pochvy pri slovoi vyemke Tret'ego kaliinogo plasta v usloviakh rudnikov OAO «Belarus'kaliu»

[Gas-bearing and gas-dynamic characteristics of the soil rocks with layered excavation of the Third potash stratum in the conditions of JSC "Belaruskali"]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov. Sbornik nauchnykh trudov. Perm'*, Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2016, iss.14, pp.255-258.

29. Kuznetsov G.N. Mekhanicheskie svoistva gornykh porod [Mechanical properties of rocks]. Moscow, Ugletekhizdat, 1947, 180 p.

30. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill, 1971, 521 p.

31. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike [Finite element method in geomechanics]. Moscow, Nedra, 1987, 221 c.

32. Baryakh A.A., Fedoseev A.K. Sinkhole formation mechanism. *Journal of Mining Science*, 2011, vol.47, iss.6, pp.404-412. DOI: 10.1134/S1062739147040022

33. Baryakh A.A., Shumikhina A.Iu., Toksarov V.N., Lobanov S.Iu., Evseev A.V. Kriterii i osobennosti razrusheniia sloistoi krovli kamer pri razrabotke Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Criteria and features of destruction of layer roof chambers in the development of the Verkhnekamsk deposit of potassium salts]. *Gornyi zhurnal*, 2011, no.11, pp.15-19.

34. Goodman R.E. The mechanical properties of joints. *Advances in rock mechanics: proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Denver, 1974, vol.1, part A, pp.127-140.

35. Groth T. Description and applicability of the BEFEM code. *Appl. Rock Mech. Mining. Proc. Conf. Lulea*. London, 1981, pp.204-208. DOI: 10.1016/0148-9062(82)90977-9

36. Baryakh A.A., Dudyrev I.N., Asanov V.A., Pan'kov I.L. Interaction of layers in salt deposit. 1. Mechanical properties of joints. *Journal of Mining Science*, 1992, vol.28, iss.2, pp.145-149. DOI: 10.1007/BF00710733

37. Gubanov V.A., Poliakov A.L., Shcherba V.Ia. Issledovanie kharaktera vosstanovleniia nagruzki na pochvu lavy pozadi ochistnogo zaboia posle vyemki verkhnego sloia v usloviakh tret'ego gorizonta PO «Belarus'kaliu» [Investigation of the nature of restoration of the load on the long face bedrock behind the face after the mining of the upper layer under the conditions of the third horizon of PO "Belaruskali"]. *Gornyi zhurnal*, 2002, no.3-4, pp.39-40.

38. JinFeng Ju, Jialin Xu. Structural characteristic of key strata and strata behavior of a fully mechanized longwall face with 7.0 m height chocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, vol.58, pp.46-54. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2012.09.006

39. Gubanov V.A. O mekhanizme obrusheniia porod krovli pri slovoi vyemke Tret'ego kaliinogo plasta [On the mechanism of collapse of the roof rocks with the layering of the Third potash stratum]. *Gornyi zhurnal*, 2002, no.3-4, pp.50-64.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Барях А.Б., Андрейко С.С., Федосеев А.К. О механизме локализации очагов газодинамических явлений в почве сильвинитовых пластов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №3. – С.247–254. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.5

Please cite this article in English as:

Baryakh A.A., Andreyko S.S., Fedoseev A.K. About the mechanism of localization of gas dynamic phenomena focuses in the bedrock of sylvinite formations. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.3, pp.247-254. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.5