

УДК 622.831.322  
Статья / Article  
© ПНИПУ / PNRPU, 2022



## Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината

С.С. Андрейко, С.Ю. Нестерова

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

## The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant

Sergei S. Andreiko, Svetlana Yu. Nesterova

Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 22.04.2022. Принята / Accepted: 18.11.2022. Опубликовано / Published: 22.12.2022

### Ключевые слова:

Гремячинское месторождение калийных солей, рудник, пласт калийно-магниевого солей, карналлит-галитовый слой, подготовительные выработки, внезапное разрушение, приконтурный массив, газовыделения, газодинамические явления, выбросы соли и газа.

В настоящее время в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината при проходке выработок по промышленному сиввинитовому пласту возникают горнотехнические ситуации, связанные с необходимостью вскрытия и пересечения забоями подготовительных выработок карналлит-галитового слоя пласта калийно-магниевого солей. Как правило, такие горно-технические ситуации приурочены к антиклинальным складкам пласта калийно-магниевого солей. Проходка подготовительных выработок комбайном «Урал-20Р» по породам карналлит-галитового слоя сопровождается внезапными разрушениями приконтурной части массива и газовыделениями горючих газов. С начала ведения горно-подготовительных работ в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината зафиксировано несколько случаев внезапных разрушений приконтурной части массива, которые сопровождались газовыделениями, угрожали жизни шахтеров и нарушали ритмичность работы рудника.

В статье представлены результаты анализа геологических и горно-технических условий возникновения внезапных разрушений приконтурной части массива в условиях рудника Гремячинского горно-обогатительного комбината. На основании результатов анализа геологических и горно-технических условий возникновения, протекания и результатов закончившегося процесса разрушения приконтурной части массива, а также показаний очевидцев и визуального осмотра мест разрушений непосредственно в горных выработках выявлены общие признаки, характерные для газодинамических явлений в виде внезапных выбросов соли и газа. Выполнена классификационная оценка вида газодинамических явлений с помощью решающих правил по отнесению газодинамических явлений к определенному виду. Предложены способы предотвращения газодинамических явлений в виде внезапных выбросов соли и газа при проходке подготовительных выработок по породам карналлит-галитового слоя пласта калийно-магниевого солей проходочно-очистными комбайнами в условиях рудника Гремячинского горно-обогатительного комбината.

### Keywords:

Gremyachinskoye potash deposit, mine, potassium-magnesium salt layer, carnallite-halite layer, development workings, sudden destruction, near-contour massif, gas emissions, gas-dynamic phenomena, salt and gas emissions.

Currently, in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant, when driving workings along the industrial sylvinite layer, mining technical situations arise associated with the need to open and cross the development workings of the carnallite-halite layer of the potassium-magnesium salt layer. As a rule, such mining and technical situations are confined to the anticlinal folds of the potassium-magnesium salt formation. Driving development workings with the Ural-20R combine along the rocks of the carnallite-halite layer is accompanied by sudden destruction of the contour part of the massif and combustible gases outgassing. Since the beginning of mining and preparation work in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant, several cases of sudden destruction of the near-contour part of the massif have been recorded, which were accompanied by gas emissions, threatened the lives of miners and disrupted the rhythm of the mine.

The article presents the results of the analysis of the geological and mining-technical conditions for the occurrence of sudden destruction of the near-contour part of the massif in the conditions of the mine in the Gremyachinsky mining and processing plant. Based on the results of the geological and mining-technical conditions analysis for the occurrence, course and results of the completed process of massif near-contour part destruction, as well as the testimony of eyewitnesses and visual inspection of the destruction places directly in mine workings, common signs were identified that were characteristic of gas-dynamic phenomena in the form of sudden salt and gas outbursts. A classification assessment of the gas-dynamic phenomena type was performed using decision rules for attributing gas-dynamic phenomena to a certain type. Methods were proposed to prevent gas-dynamic phenomena in the form of sudden outbursts of salt and gas during the driving of development workings through the rocks of the carnallite-halite layer of the potassium-magnesium salt formation by tunneling and cleaning machines in the conditions of the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant.

© Андрейко Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: ssa@mi-perm.ru).

© Нестерова Светлана Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (тел.: +007 (342) 216 58 42, e-mail: sveta\_ber@inbox.ru).

© Sergei S. Andreiko (Author ID in Scopus: 6506180352) – Doctor of Engineering, Professor, Head of Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: ssa@mi-perm.ru).

© Svetlana Yu. Nesterova (Author ID in Scopus: 57200331766) – PhD in Engineering, Associate Professor, Researcher of Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (tel.: +007 (342) 216 58 42, e-mail: sveta\_ber@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Андрейко С.С., Нестерова С.Ю. Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината // Недропользование. – 2022. – Т.22, №3. – С.144-150. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.6

Please cite this article in English as:

Andreiko S.S., Nesterova S.Yu. The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.3, pp.144-150. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.6

**Введение**

Разработка подземным способом месторождений калийных солей в мире существенно осложняется газодинамическими явлениями в виде внезапных выбросов соли и газа, обрушений пород кровли (разрушений пород почвы), сопровождающихся газовыделением, явлений комбинированного типа и внезапных отжимов призабойной части пород. Газодинамические явления при разработке сильвинитовых пластов представляют собой быстротекущие процессы разрушения приконтурной части массива и выноса раздробленной породы потоком расширяющегося газа в горную выработку. В силу таких факторов газодинамических явлений, как внезапность, высокая скорость разлета кусков породы, значительные объемы разрушаемых горных пород, выделение горючих газов, ударная воздушная волна, – все виды газодинамических явлений представляют серьезную угрозу жизни шахтеров, разрушают дорогостоящее проходческое и добычное оборудование, нарушают ритмичность работы калийных рудников.

Проходка подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината проходческо-очистными комбайнами «Урал-20Р» по породам карналлит-галитового слоя сопровождается внезапными разрушениями приконтурной части массива и газовыделениями горючих газов. С начала ведения горно-подготовительных работ в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината зафиксировано несколько случаев внезапных разрушений приконтурной части массива, которые сопровождались газовыделениями, угрожали жизни шахтеров и нарушали ритмичность работы рудника. Для разработки научно обоснованных способов прогнозирования и предотвращения подобных внезапных разрушений приконтурной части массива необходимо выполнить анализ условий возникновения, протекания и результатов закончившегося процесса разрушения.

**Горно-геологические условия проходки подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината**

Гремячинское месторождение калийных солей (ГМКС) расположено на территории Котельниковского района Волгоградской области. Освоение запасов месторождения ведется рудником Гремячинского горно-обогатительного комбината (ГОК) компании ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий».

В наиболее полных разрезах Гремячинского месторождения калийных солей галогенная толща месторождения подразделяется на пять ритмопачек, каждая из которых сложена в нижней части ангидритами и доломитами, а в верхней части – преимущественно каменной солью [1–7]. Снизу вверх выделены погожская (VI), антиповская (VII), пигаревская (VIII), долинная (IX) и ерусланская (X) ритмопачки (рис. 1).

Погожская ритмопачка (VI) является наиболее выдержанной частью галогенной толщи и прослеживается на всей площади месторождения без существенного изменения состава и строения. Ритмопачка подразделяется на четыре пласта (снизу вверх): базальный ангидритовый, галитовый, калийно-магниевых солей, перекрывающей каменной соли. Базальный ангидритовый пласт (VI-1), выделяемый в составе ритмопачки условно, сложен ангидритовой породой серой и темно-серой, тонко-мелкокристаллической, массивной или неяснослоистой. Мощность пласта изменяется от 1,8 до 18,0 м. Пласт галититов (VI-2) представлен каменной солью светло-серой и розовой, реже темно-серой, средне-крупнокристаллической, массивной. Темно-серый цвет обусловлен тонкорассеянной примесью глинистого материала. По всему пласту отмечаются прожилки и мелкие гнезда карналлита. Содержание NaCl по пласту составляет от 83 до 95 %. Мощность пласта составляет в большинстве случаев 40–55 м. В отдельных скважинах она уменьшается до 10–12 м или увеличивается до 53–67 м.

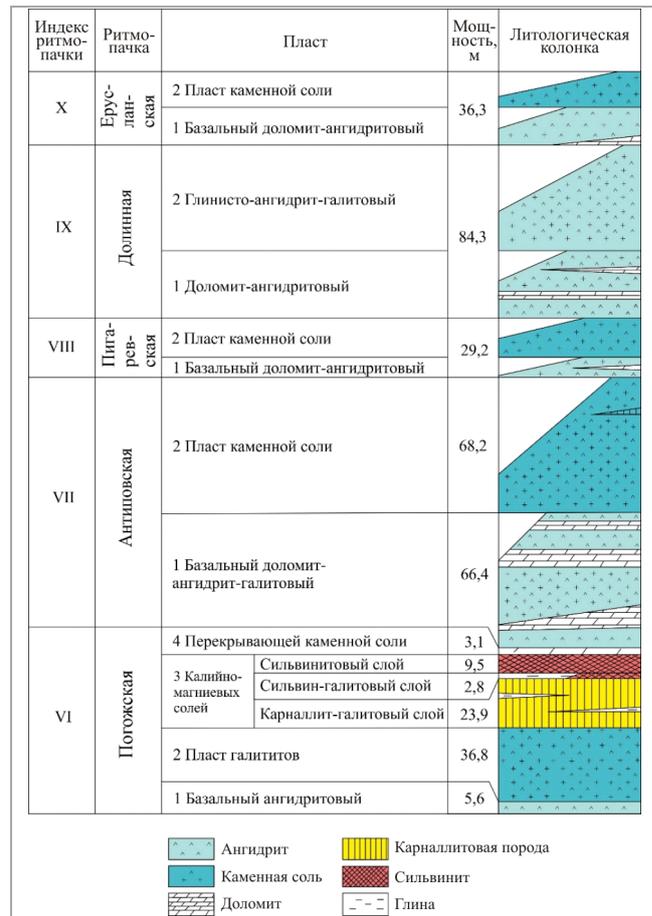


Рис. 1. Стратиграфический разрез калийной залежи Гремячинского месторождения калийных солей

Пласт калийно-магниевых солей (VI-3) выделяется по наличию в верхней части разреза карналлитовых и сильвинитовых пород. По литологическим и минералогическим признакам этот пласт подразделяется на три слоя (снизу вверх): карналлит-галитовый, сильвин-галитовый и сильвинитовый (продуктивный). Карналлит-галитовый слой прослеживается практически повсеместно. Представлен чередованием карналлит-галитовых, галит-карналлитовых и галитовых с примесью карналлита прослоев мощностями от 1–2 до 3 м. Карналлит-галитовые и галит-карналлитовые различия имеют конгломератовидную текстуру – разновеликие (от 1–2 до 6–17 см) включения галита как бы сцементированы карналлитом. Включения галита от светло-серого до серого цвета, разнокристаллические, иногда с тонко рассеянной примесью ангидритового материала. Карналлит средне-крупнокристаллический, розоватый, мясо-красный. Содержание карналлита в карналлит-галитовых породах составляет до 20–30 %, в галит-карналлитовых – до 40–50 %. Мощность слоя изменяется от 4–7 м до 10–20 м. Иногда мощность слоя увеличивается до 40–64 м.

Сильвин-галитовый слой прослежен примерно в половине разрезов геолого-разведочных скважин. В отсутствие сильвин-галитового слоя сильвинитовая залежь подстилается непосредственно карналлит-галитовым слоем. Слой представлен переслаиванием каменной соли светло-серой мелко-среднезернистой, массивной и сильвинита розовато-светло-серого, иногда белого мелко-среднезернистого, редко крупнозернистого массивного или ритмично-слоистого, неясно-ритмично-слоистого, иногда загрязненного ангидритовым материалом. Мощность сильвин-галитового слоя в разрезах скважин, вскрывших слой, составляет первые метры, иногда мощность сильвин-галитового слоя увеличивается до 9–15 м.

Сильвинитовый слой в горно-промышленном отношении рассматривается как промышленный сильвинитовый пласт. Слой представлен сильвинитом светло-серым, серым, розовато-

серым, мелко-среднекристаллическим, редко (прослоями) крупнокристаллическим. Мощность сильвинитового слоя изменяется от 2,3 до 20,8 м, составляя в среднем 9,46 м.

Пласт перекрывающей каменной соли (VI-4) развит практически повсеместно и располагается между сильвинитовым слоем (продуктивной залежью) погожской ритмопачки и базальным ангидрит-доломитовым пластом вышележащей антиповской ритмопачки. Пласт представлен каменной солью светло-серой, серой, темно-серой, иногда с розоватым оттенком; в основном мелко- и среднезернистой, отдельными прослоями крупнозернистой; массивной, слоистой и неяснослоистой. Залегание прослоев преимущественно горизонтальное, иногда отмечаются углы до 5–10°, 20° и даже 50°. Практически повсеместно отмечается ангидритовый и глинистый материал в виде тонкорассеянной примеси или отдельных прослоев до 0,05–0,15 м мощностью. Мощность пласта изменяется от 0,6–0,9 м до 3–5 м. Общая мощность отложений погожской ритмопачки изменяется от 54,3 – 136,8 м, составляя в среднем 81,6 м.

В составе антиповской ритмопачки (VII) выделяются два пласта: базальный доломит-ангидрит-галитовый и каменной соли. Базальный доломит-ангидрит-галитовый пласт (VII-1) подразделяется на четыре слоя: ангидритовый, магнезит-доломит-ангидритовый, ангидрит-галитовый и доломит-ангидритовый. Мощность ангидритового слоя изменяется от 1,5 до 8 м, составляя преимущественно 2,5–3,5 м. Магнезит-доломит-ангидритовый слой развит не повсеместно. Мощность магнезит-доломит-ангидритового слоя изменяется от 2 до 20 м. Ангидрит-галитовый слой в значительном количестве скважин отсутствует и вышележащий доломит-ангидритовый слой располагается либо на ангидритовом слое, либо на магнезит-доломит-ангидритовом. Доломит-ангидритовый слой развит практически повсеместно. Представлен переслаиванием доломита темно-серого участками с коричневатым оттенком пелитоморфно-микрозернистого и ангидрита светло-серого, пелитоморфно-микрозернистого. Мощность слоя изменяется от 12,5 до 37,4 м. Мощность базального доломит-ангидрит-галитового пласта изменяется от 37,5 до 107,6 м и в среднем составляет 66,4 м.

Результаты исследований газоносности пласта калийно-магниевого солей в условиях рудника Гремячинского ГОК показали, что природные газы в соляных породах содержатся в свободном и связанном (микровключенном) виде. В состав газов входят азот, метан, тяжелые углеводороды (этан, пропан, бутан, пентан), водород, углекислый газ, другие горючие и инертные газы в незначительном количестве [1–11].

Газоносность по свободным газам карналлит-галитовых пород изменяется от 0,02 до 0,32 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при среднем значении 0,17 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Газоносность по свободным газам карналлитовых пород изменяется от 0,15 до 1,16 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при среднем значении 0,30 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Компонентный состав свободных газов карналлитовых пород следующий: CH<sub>4</sub> – 32,31 %; H<sub>2</sub> – 4,69 %; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 0,44 %; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – 0,02 %; iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0,001 %; nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0,005 %; N<sub>2</sub> – 62,51 %; CO<sub>2</sub> и другие газы – 0,02 %. Суммарное содержание горючих газов (метан + водород) составляет 37,01 %. Суммарное содержание тяжелых углеводородов метанового ряда – 0,46 %.

Газоносность пород карналлит-галитового слоя пласта калийно-магниевого солей по связанным газам изменяется от 0,011 до 0,072 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при среднем значении 0,039 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. По компонентному составу связанные газы – метаново-азотные. В составе связанных газов карналлит-галитового слоя также обнаружен водород. При этом суммарное содержание углеводородов метанового ряда достигает 0,21 %, содержание азота – 74,98 %.

**Внезапные разрушения приконтурного массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината**

Мировая практика ведения горных работ при подземной разработке месторождений калийных солей показывает, что практически на всех месторождениях

подземная разработка существенно осложняется – вплоть до закрытия калийных рудников газодинамическими явлениями (ГДЯ) [12–29].

За последние три десятилетия внесен существенный вклад в исследование природы, механизма, разработку методов прогноза и способов предотвращения, газодинамических явлений в калийных рудниках [26, 30–34]. Внедрение в практику результатов исследований позволило существенно снизить частоту и интенсивность газодинамических явлений в рудниках, однако проблема ГДЯ еще далека от своего окончательного решения, газодинамические явления продолжают происходить при ведении подготовительных и очистных горных работ. Так, в условиях Гремячинского месторождения калийных солей в руднике Гремячинского ГОК при ведении подготовительных горных работ по породам карналлит-галитового слоя зафиксировано несколько случаев внезапных разрушений приконтурной части массива.

Подготовка всех панелей на шахтном поле рудника Гремячинского ГОК предусматривается пластовая, с расположением выработок в кровле сильвинитового пласта. Проходка панельных подготовительных выработок предусматривается комбайновым способом с применением комбайнов в комплексе с самоходным вагоном и бункером-перегрузателем. Выработки проходятся шириной по почве 5,1 м, высотой 3,7 м и площадью поперечного сечения 20,2 м<sup>2</sup>. На стадии ведения подготовительных горных работ осуществляется опережающая разведка сильвинитового пласта скважинами подземного бурения с целью уточнения характера и сложности возможных тектонических нарушений. В связи с этим первое интенсивное газовыделение было зафиксировано при бурении подземной геолого-разведочной скважины в разведочном штреке № 1. При бурении геолого-разведочной скважины в интервале глубин 3,4–3,5 м в карналлит-галитовом слое пласта калийно-магниевого солей произошло газовыделение из скважины с выбросом бурового штыба и пыли, сопровождающееся ударной воздушной волной. При этом буровой снаряд с колонковой трубой были отброшены, а буровой станок в выработке был смещен примерно на 1,0 м. При проходке транспортного штрека № 2 в призабойной части произошло внезапное разрушение приконтурной части массива, сопровождающееся газовыделением (рис. 2, а).

Проходка транспортного штрека № 2 производилась в карналлит-галитовом слое пласта калийно-магниевого солей. В результате внезапного разрушения приконтурной части массива разрушенной породой массой 0,4 т был засыпан правый редуктор бермовых фрез до магнитной станции комбайна. Полость внезапного разрушения имела овальную форму, размер основания полости 1,0 × 0,5 м, высота полости 1,0 м.

Следующее внезапное разрушение приконтурной части пород массой 0,3 т произошло в призабойной зоне – в правом борту транспортного штрека № 1, проходка которого производилась в карналлит-галитовом слое пласта калийно-магниевого солей. Внезапное разрушение сопровождалось газовыделением, содержание горючих газов в призабойной зоне превысило предельно допустимую концентрацию, что привело к срабатыванию стационарной аппаратуры непрерывного автоматического контроля содержания горючих газов, установленной на комбайне «Урал-20Р».

Внезапное разрушение приконтурной части карналлит-галитовых пород объемом 32,2 м<sup>3</sup> произошло из кровли выработки при проходке разведочного штрека № 2 (рис. 2, б).

В результате разрешения был частично засыпан разрушенной породой режущий орган и двигатель редуктора бермовых фрез комбайнового комплекса «Урал 20-Р». При проектной ширине выработки 5,10 м фактическая ее ширина в месте разрушения составила 5,81 м. Высота выработки при проектном значении 3,70 м составила 6,60 м. Концентрация горючих газов в забое выработки после разрушения значительно превышала предельно допустимую концентрацию и составила 4 %.

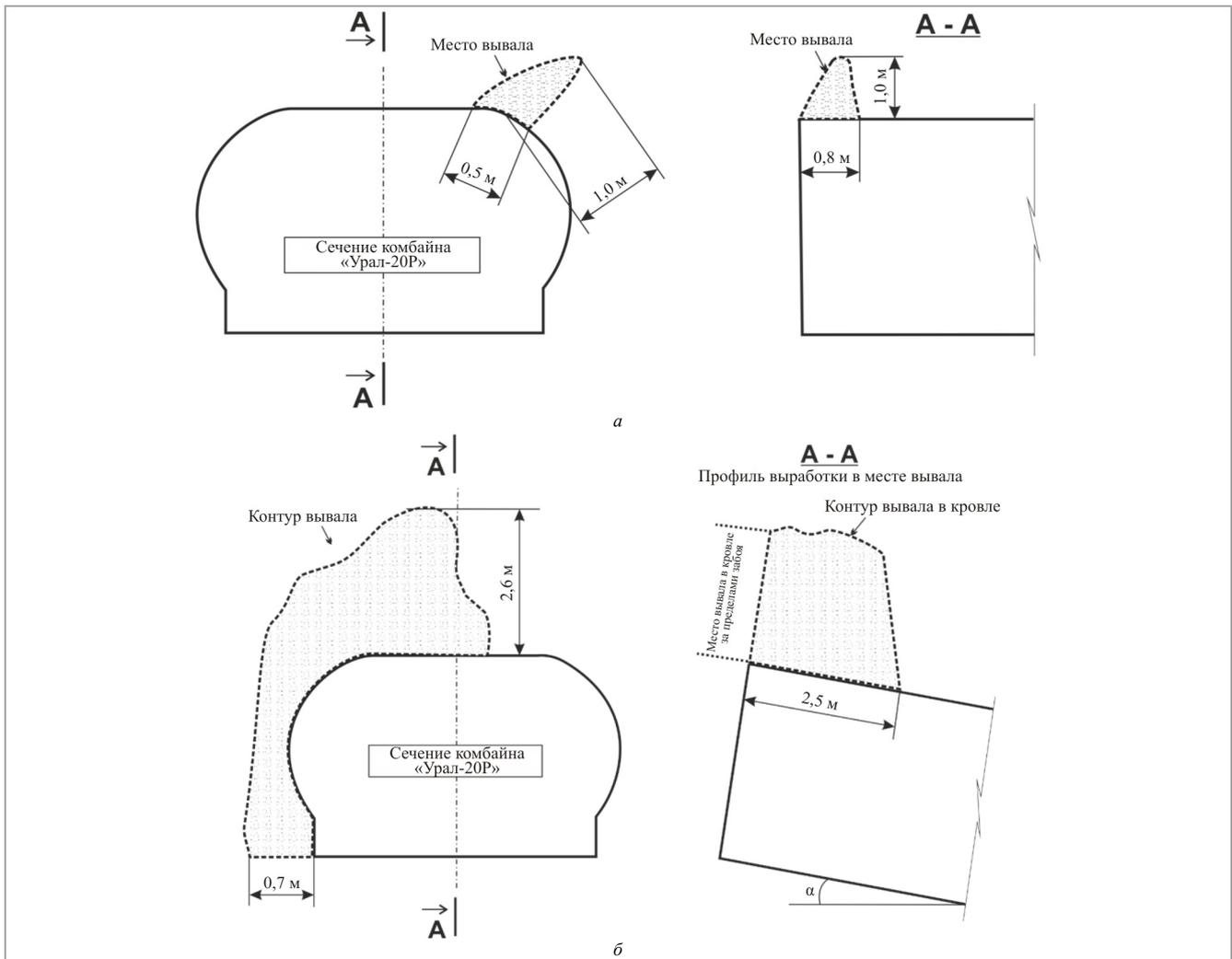


Рис. 2. Внезапное разрушение приконтурной части пород: *а* – транспортном штреке № 2 (рудник Гремячинского ГОКа); *б* – в разведочном штреке № 2 (рудник Гремячинского ГОК)



Рис. 3. Форма полости внезапного разрушения приконтурного массива: *а* – в стенке разведочного штрека № 2; *б* – в забое транспортного штрека № 1

**Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке выработок по породам карналлит-галитового слоя**

Для того чтобы определить природу и классифицировать виды происшедших в руднике Гремячинского ГОК внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок по породам карналлит-галитового слоя, был произведен анализ условий возникновения, протекания и результатов закончившегося процесса разрушения на основании показаний очевидцев и фактов, а также визуального осмотра мест разрушений непосредственно в горных выработках.

В результате анализа происшедших случаев разрушений приконтурной части выработок в процессе их

проходки комбайном «Урал-20Р» выявлены следующие общие признаки, характерные для газодинамических явлений (ГДЯ) в виде внезапных выбросов соли и газа [12–15, 26, 30, 31]:

- локальность проявления внезапных разрушений приконтурной части пород, которые приурочены к газоносному карналлит-галитовому слою;
- во всех случаях после внезапного разрушения приконтурной части пород фиксировалось наличие в забое выработки горючих газов, концентрация которых достигала 4 % при работающем вентиляторе местного проветривания;
- внезапность и высокая скорость разрушений приконтурной части пород (ни в одном из случаев не было отмечено предвестников разрушений – прогибов

кровли, отслоений боков, образования трещин в кровле и боках выработок);

– формы полостей внезапных разрушений имеют произвольную форму с округлыми стенками (рис. 3);

– стенки полостей разбиты концентрическими трещинами (см. рис. 3);

– разрушенная карналлит-галитовая порода представлена мелкими фракциями и тонкими пластинками, а также выпукло-вогнутыми пластинами, оконтуривающими полости, что свидетельствует о разрушении приконтурной части пород по механизму послойного отрыва, характерного только для выбросов соли и газа.

Таким образом, на основании анализа случаев внезапных разрушений приконтурного массива при проходке выработок комбайном «Урал-20Р» по карналлит-галитовому слою на руднике Гремячинского ГОК, следует классифицировать как внезапные выбросы соли и газа.

Наиболее общей предпосылкой развития внезапного выброса соли и газа можно считать удовлетворение известному условию вида [12]:

$$\frac{\sigma_p}{m_r \cdot (P_m - P_b)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_p$  – прочность пород карналлит-галитового слоя при растяжении;  $m_r$  – поверхность приложения давления газа;  $P_m, P_b$  – давление газа соответственно в массиве и горной выработке.

На данной стадии исследований можно предполагать, что природа выбросов соли и газа при проходке горных выработок по породам карналлит-галитового слоя обусловлена наличием локальных газонасыщенных зон, формирование которых происходило, по-видимому, при эпигенетических (вторичных) процессах, обусловленных складкообразованием и миграцией газонасыщенных водных растворов, которая сопровождалась аккумуляцией газов на локальных участках пород с пониженной прочностью [30, 31].

Для формализации процедуры определения вида происшедшего газодинамического явления в руднике Гремячинского ГОК разработаны решающие критерии, позволяющие правильно определять вид происшедшего ГДЯ. В процессе разработки критериев для классификации видов ГДЯ, происшедших при ведении горных работ на карналлит-галитовых пластах месторождений калийных солей, измерялись размеры полостей ГДЯ, определялось их местоположение в пласте и камере, фиксировалось наличие концентрических трещин на стенках полостей и наличие геологических нарушений в месте ГДЯ. Анализ случаев ГДЯ при отработке карналлит-галитовых пластов позволил установить, что их необходимо подразделять на четыре типа: внезапные выбросы соли и газа из кровли и стенок выработок, внезапные обрушения из кровли и стенок выработок. При статистическом анализе параметров, характеризующих вид газодинамического явления, использовалось 10 следующих:  $X_1$  – расстояние от полости ГДЯ до забоя;  $X_2$  – ширина выработки;  $X_3$  – высота полости явления;  $X_4$  – большая ось нижнего основания полости явления;  $X_5$  – малая ось нижнего основания полости явления;  $X_6$  – наличие концентрических трещин на стенках полости;  $X_7$  – число пластов, вскрытых полостью явления;  $X_8$  – форма поло сти;  $X_9$  – порода, в которой заканчивается полость явления;  $X_{10}$  – наличие разрывных нарушений сплошности в разрабатываемом пласте и вмещающих породах. В связи с тем, что часть параметров носила качественный характер, применялось эвристическое продвижение, которое заключается в том, что качественные параметры отмечали «метками», применяя дихотомию (0;1), а затем эти «метки» использовали как результат измерения наравне с другими количественными параметрами. В связи с тем, что не все используемые параметры, по которым предполагалось разделить ГДЯ на группы, в равной степени полезны, проводился отбор наиболее информативных из них. Для решения этой задачи

использовался пошаговый дискриминантный анализ (ПДА), в котором для отбора наиболее информативных показателей применяют  $F$ -статистику, основанную на критерии однофакторного дисперсионного анализа [35, 36]. Для разделения ГДЯ на группы в результате реализации процедуры ПДА были получены решающие правила в виде дискриминантных функций. Дискриминантные функции позволяют определить тип происшедшего ГДЯ. Оно относится к тому типу, которому соответствует наибольшее числовое значение дискриминантной функции, получаемое подстановкой измеренных показателей в дискриминантные уравнения, которые имеют следующий вид. Для внезапных выбросов  $f_{\text{выбр}}$  и обрушений  $f_{\text{обр}}$ , из кровли выработок:

$$f_{\text{выбр}} = 12X_8 + 7,6X_3 + 4,1X_6 + 3,4X_{10} - 18,7, \quad (2)$$

$$f_{\text{обр}} = 3,0X_8 + 2,1X_3 + 1,7X_6 + 1,4X_{10} - 1,3. \quad (3)$$

Для внезапных выбросов и обрушений из боков выработок:

$$f_{\text{выбр}} = 9,9X_8 + 4,7X_9 + 0,5X_3 + 11,6X_4 - 19,1, \quad (4)$$

$$f_{\text{обр}} = 2,5X_8 + 1,0X_9 + 2,5X_3 - 2,5X_4 - 6,7. \quad (5)$$

где  $X_9 = 1,0$ , если полость ГДЯ расположена в карналлит-галитовом слое;  $X_9 = 0$ , если она находится в любом другом его слое.

После подстановки численных значений в уравнения (2) и (3) или (4) и (5) определяют некоторые дискриминантные индексы  $f_{\text{выбр}}$  и  $f_{\text{обр}}$ . Если  $f_{\text{выбр}} > f_{\text{обр}}$  то происшедшее явление относится к внезапным выбросам, если  $f_{\text{выбр}} < f_{\text{обр}}$ , то к обрушениям. При подстановке численных значений, характеризующих внезапные разрушения приконтурного массива в руднике Гремячинского ГОК, установлено, что они относятся к внезапным выбросам соли и газа. В соответствии с полученными критериями классификации газодинамических явлений в руднике Гремячинского ГОК в дальнейшем целесообразно при анализе подобных разрушений приконтурной части пород не употреблять термин «вывал», так как он не отражает реального механизма разрушения с участием газа и может характеризовать только местное выпадение в горную выработку отделившейся от массива части пород и полезного ископаемого под действием сил гравитации – собственного веса пород. Следует отметить, что кроме газодинамических явлений в руднике Гремячинского ГОК могут происходить технологические обрушения пород кровли. Причинами технологических обрушений является отслоение породы и падение ее под действием собственного веса. Технологическим обрушениям пород иногда предшествуют прогиб слоя, образование трещин, потрескивание пород при их разрушении. Обрушения сопровождаются местными звуковыми эффектами без последующего газовыделения. Полости технологических обрушений имеют неправильную форму, большие размеры в нижнем основании и значительно меньшую, по сравнению с основанием, высоту, стенки полости неровные, часто ступенчатые. Обрушенная порода разрушается на остроугольные куски и плиты произвольных размеров, часто представлена отдельными блоками и глыбами. В связи с тем, что технологические обрушения к ГДЯ не относятся, регистрация их геологической службой рудника не ведется.

### Заключение

На основании анализа условий возникновения, протекания и результатов закончившегося процесса разрушения, свидетельств очевидцев и фактов, а также визуального осмотра мест разрушения непосредственно в горных выработках рудника Гремячинского ГОК можно сделать следующие выводы:

1. Внезапные разрушения приконтурной части выработок в процессе их проходки имеют признаки, характерные для газодинамических явлений в виде внезапных выбросов соли и газа. Такими признаками являются: локальность проявления внезапных разрушений приконтурной части пород, которые приурочены к газоносному карналлит-галитовому слою; наличие во всех случаях после внезапного разрушения приконтурной части пород в забое выработки горючих газов, концентрация которых достигала 4 % при работающем вентиляторе местного проветривания; внезапность и высокая скорость разрушений приконтурной части пород (ни в одном из случаев не было отмечено предвестников разрушений – прогибов кровли, отслоений боков, образования трещин в кровле и боках выработок); формы полостей внезапных разрушений имеют произвольную форму с округлыми стенками; стенки полостей разбиты концентрическими трещинами; разрушенная карналлит-галитовая порода представлена мелкими фракциями и тонкими пластинками, а также выпукло-вогнутыми пластинами, оконтуривающими

полости, что свидетельствует о разрушении приконтурной части пород по механизму послойного отрыва, характерного только для выбросов соли и газа.

2. Природа выбросов соли и газа при проходке горных выработок по породам карналлит-галитового слоя обусловлена наличием локальных газонасыщенных зон, формирование которых происходило, по-видимому, при эпигенетических (вторичных) процессах, обусловленных складкообразованием и миграцией газонасыщенных водных растворов, которая сопровождалась аккумуляцией газов на локальных участках пород с пониженной прочностью.

3. Для формализации процедуры определения вида происшедшего газодинамического явления в руднике Гремячинского ГОК разработаны критерии, отражающие причинность явлений и позволяющие по условиям возникновения, протекания и результатам закончившегося процесса разрушения приконтурной части выработки определять его вид и оценивать основные причины возникновения.

### Библиографический список

1. Кутырло В.О. Особенности строения калийной залежи Гремячинского месторождения // Литосфера. – 2009. – № 1 (30). – С. 86–94.
2. Московский Г.А., Гончаренко О.П., Свидзинский С.А. Условия формирования доломит-магнетит-ангидритовых пород из кровли продуктивного горизонта Гремячинского месторождения калийных солей (юг Приволжской моноклинали) // Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – № 2 (41). – С. 75–80.
3. Ярцева Т.А. Вариации минералого-геохимических параметров в разрезе соленосной толщи Гремячинского месторождения калийных солей (Волгоградская область) // Металлогения древних и современных океанов. – 2013. – № 19. – С. 92–95.
4. Карналлит-галитовые породы и галититы галогенных образований Гремячинского месторождения и их роль в формировании продуктивного сylvинитового горизонта / Г.А. Московский, С.А. Свидзинский, О.П. Гончаренко, М.А. Барановская // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 84–87.
5. Moskovskii G.A., Goncharenko O.P., Ilin K.K. Desalting of sodium and potassium chlorides at the final stages of halogenesis: Evidence from the Gremyachinsk potash deposit in the Caspian basin // Lithology and Mineral Resources. – 2016. – Vol. 51, № 1. – С. 86–91. DOI: 10.1134/S0024490216010041
6. Moskovskii G.A., Goncharenko O.P., Solomon M.V. Rhythmic Structure of the Productive Sylvinitic Lode in the Gremyachinsk Deposit (Southern Volga Monocline) // Lithology and Mineral Resources. – 2018. – Vol. 53, № 2. – P. 170–177. DOI: 10.1134/S0024490218010078
7. Гавриленко В.В. Особенности вертикальной изменчивости вещественного состава полезной толщи Гремячинского месторождения калийных солей (Волгоградская область) // Металлогения древних и современных океанов. – 2019. – № 1. – С. 245–249.
8. Шарафутдинов Р.Р., Иванов О.В. Определение компонентного состава связанных газов в породах Гремячинского месторождения калийных солей // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магневых солей: сборник материалов I Международной научно-практической конференции / под ред. Г.З. Файнбурга; Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2018. – С. 236–244.
9. Кочнев И.И. Определение количественной составляющей газоносности горных пород по связанным газам Гремячинского месторождения калийных солей // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2018. – № 1. – С. 337–339.
10. Иванов О.В. Результаты исследований газоносности и газодинамических характеристик пород в выработках околоствольного двора рудника Гремячинского ГОКа // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – Вып. 16. – С. 313–316. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.82
11. Шарафутдинов Р.Р. Экспериментальные исследования газоносности и газодинамических характеристик пород по свободным газам Гремячинского месторождения калийных солей // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2018. – № 1. – С. 376–379.
12. Проскуряков Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках. – М.: Недра, 1980. – 263 с.
13. Ковалев О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений. – Минск: Полымя, 1982. – 96 с.
14. Проскуряков Н.М., Ковалев О.В., Мещеряков В.В. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
15. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
16. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта / С.П. Береснев [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 31–33.
17. 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.
18. Оценка газодинамических характеристик горных пород Краснослободского разлома / Д.В. Барбиков, С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Д.А. Бобров // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 38–42.
19. 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.
20. Андрейко С.С. Предотвращение газодинамических явлений при проведении уклонов, вскрывающих IV калийный горизонт, в условиях Старобинского месторождения калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2014. – Вып. 12. – С. 227–229.
21. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distribution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 354–363. DOI: 10.1023/B:JOML.0000023186.58971.f8
22. Hedlund F.H. The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953 // Safety Science. – 2012. – Vol. 50, iss. 3. – P. 537–553.
23. Molinda G.M. Investigation of Methane Occurrence and Outbursts in the Cote Blanche Domal Salt Mine, Louisiana [Электронный ресурс] // U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. RI 9186, No. PB90-270083. – 1988. – P. 1–21. – URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9590> (дата обращения: 01.02.2022).
24. Assessment of Methane Hazards in an Anomalous Zone of a Gulf Coast Salt Dome [Электронный ресурс] / A.T. Iannacchione, R.H. Grau, A. Sainato, T.M. Kohler, S.J. Schatzle // U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 8861. – 1984. – P. 1–26. – URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/ri8861.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
25. Полянина Г.Д. Газы соляных пород и газопроявления в рудниках Верхнекамского месторождения // Горный журнал. – 1995. – № 6. – С. 145–150.
26. Полянина Г.Д., Земсков А.Н., Падерин Ю.Н. Технология и безопасность разработки Верхнекамского калийного месторождения – Пермь: Кн. изд-во, 1990. – 262 с.
27. Baryakh A.A., Fedoseev A.K. Geomechanical forecast for distribution of fissuring areas in the saliferous measures of the Upper Kama potash salt deposit // Journal of Mining Science. – 2007. – Vol. 43, № 5. – P. 462–471. DOI: 10.1007/s10913-007-0048-9
28. Aptukov V.N., Skachkov A.P., Konstantinova S.A. Micromechanical characteristics of karnallite, sylvinitic and rock salt at Upper Kama deposit // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46, № 4. – P. 352–358. DOI: 10.1007/s10913-010-0044-3
29. Tool control method of strain-stress state of marginal salt rocks / V.A. Asanov, V.V. Anikin, N.K. Beltyukov, A.V. Evseev, V.N. Toksarov // Eurasian Mining. – 2013. – № 4. – P. 20–24.
30. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление. – Минск: Вышэйшая школа, 2000. – 335 с.
31. Андрейко С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве. – Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 196 с.
32. Нестеров Е.А. Совершенствование технологии дегазационных работ при отработке сylvинитовых пластов в условиях шахтных полей рудников ОАО «Сильвинит» // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12, № 6. – С. 120–127.
33. Литвиновская Н.А. Прогноз и предотвращение газодинамических явлений из почвы подготовительных горных выработок в условиях подработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ. – 2010. – № 4. – С. 180–186.
34. Андрейко С.С. Проблема газодинамических явлений при совершенствовании технологии слоевой выемки Третьего калийного пласта в условиях Старобинского месторождения калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Пермь: ГИ УрО РАН. – Вып. 16. – 2018. – С. 300–307.
35. Андрейко С.С., Шаманский Г.П., Лаптев Б.В. Многомерные статистические критерии классификации газодинамических явлений на рудниках Верхнекамского калийного месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1985. – № 1. – С. 85–91.
36. Андрейко С.С., Бей М.М., Лаптев Б.В. Критерии типизации газодинамических явлений на карналлитовых пластах Верхнекамского калийного месторождения // Вентиляция шахт и рудников. Аэропылегазодинамика горных выработок: сб. научн. тр. – Л.: Изд-во ЛГИ. – 1987. – С. 49–54.

## References

1. Kutyro V.O. Osobennosti stroeniia kaliinoi zalezhi Gremiachinskogo mestorozhdeniia [Some structural peculiarities of the Gremyachin potash lode deposit]. *Litasfera*, 2009, no. 1 (30), pp. 86-94.
2. Moskovskii G.A., Goncharenko O.P., Svidzinskii S.A. Uslovia formirovaniia dolomit-magnezit-angidritovykh porod iz krovli produktivnogo gorizonta Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi (iug Privolzhskoi monoklinali) [Conditions for the formation of dolomite-magnesite-anhydrite rocks from the roof of the productive horizon of the Gremyachinsky potash deposit (south of the Volga monocline)]. *Geologiya, geografiia i globalnaia energii*, 2011, no. 2 (41), pp. 75-80.
3. Iartseva T.A. Variatsii mineralogo-geokhimicheskikh parametrov v razreze solenosnoi tolshchi Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi (Volgogradskaiia oblast') [Variations in mineralogical and geochemical parameters in the section of the salt-bearing strata of the Gremyachinsky potassium salt deposit (Volgograd region)]. *Metallogeniia drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2013, no. 19, pp. 92-95.
4. Moskovskii G.A., Svidzinskii S.A., Goncharenko O.P., Baranovskaiia M.A. Karnallit-galitovyie porody i galitity galogennykh obrazovanii Gremiachinskogo mestorozhdeniia i ikh rol' v formirovanii produktivnogo sil'vinitovogo gorizonta [Carnallite-halite Rocks and Halite of Gremyachinsky Field' Halogenous Formations and Their Role in Productive of Sylvinite Horizon Foundation]. *Izvestiia Saratovskogo universiteta. Novaia seriia. Nauki o Zemle*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 84-87. DOI: 10.18500/1819-7663-2013-13-1-84-87
5. Moskovskii G.A., Goncharenko O.P., Ilin K.K. Desalting of sodium and potassium chlorides at the final stages of halogenesis: Evidence from the Gremyachinsk potash deposit in the Caspianbasin. *Lithology and Mineral Resources*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 86-91. DOI: 10.1134/S0024490216010041
6. Moskovskii G.A., Goncharenko O.P., Solomon M.V. Rhythmic Structure of the Productive Sylvinite Lode in the Gremyachinsk Deposit (Southern Volga Monocline). *Lithology and Mineral Resources*, 2018, vol. 53, no. 2, pp. 170-177. DOI: 10.1134/S0024490218010078
7. Gavrilenko V.V. Osobennosti vertikalnoi izmenchivosti veshchestvennogo sostava poleznoi tolshchi Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi (Volgogradskaiia oblast') [Features of the vertical variability of the material composition of the useful strata of the Gremyachinsky potash deposit (Volgograd region)]. *Metallogeniia drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2019, no. 1, pp. 245-249.
8. Sharafutdinov R.R., Ivanov O.V. Opredelenie komponentnogo sostava svyazannykh gazov v porodakh Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi [Determination of component composition of related gases in the rocks of Gremyachinsk deposit of potassium salts]. *Aktualnye problemy okhrany truda i bezopasnosti proizvodstva, dobychi i ispolzovaniia kaliino-magnievykh soi. Sbornik materialov I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ed. G.Z. Fainburg. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, pp. 236-244.
9. Kochnev I.I. Opredelenie kolichestvennoi sostavliushchei gazonosnosti gornykh porod po svyazannym gazam Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi [Determination of quantitative part of gas content in rocks on associated gases of the Gremyachinsk deposit of potassium salts]. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2018, no. 1, pp. 337-339.
10. Ivanov O.V. Rezultaty issledovaniia gazonosnosti i gazodinamicheskikh kharakteristik porod v vyrabotkakh okolostvol'nogo dvora rudnika Gremiachinskogo GOKa [The results of studies of gas content and gas-dynamic characteristics of rocks in the workings of the near-shaft yard of the Gremyachinsky mining and processing plant]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia RAN, 2018, iss. 16, pp. 313-316. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.82
11. Sharafutdinov R.R. Eksperimentalnye issledovaniia gazonosnosti i gazodinamicheskikh kharakteristik porod po svobodnym gazam Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi [Experimental studies of gas content and gas-dynamic characteristics of rocks based on free gases of the Gremyachinsky potassium salt deposit]. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2018, no. 1, pp. 376-379.
12. Proskuriakov N.M. Vnezapnye vybrosy porod i gaza v kaliinykh rudnikakh [Sudden outbursts of rock and gas in potash mines]. Moscow: Nedra, 1980, 263 p.
13. Kovalev O.V., Livenskii V.S., Bylyno L.V. Osobennosti bezopasnoi razrabotki kaliinykh mestorozhdenii [Features of safe development of potash deposits]. Minsk: Polymia, 1982, 96 p.
14. Proskuriakov N.M., Kovalev O.V., Meshcheriakov V.V. Upravlenie gazodinamicheskimi protsessami v plastakh kaliinykh rud [Control of gas-dynamic processes in potash ore beds]. Moscow: Nedra, 1988, 239 p.
15. Proskuriakov N.M. Upravlenie sostoianiem massiva gornykh porod [Managing the state of the rock mass]. Moscow: Nedra, 1991, 368 p.
16. Beresnev S.P. et al. Issledovanie mekhanizma formirovaniia opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam zon v porodakh kaliinogo gorizonta [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.
17. Podlesnyi I.A., Beresnev S.P., Andreiko S.S., Nekrasov S.V., Litvinovskaiia N.A. Geomekhanicheskoe modelirovanie vnezapnykh razrushenii porod pochvy gornykh vyrabotok [Geomechanical modeling of sudden destruction of soil rocks in mine workings]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 28-30.
18. Barbikov D.V., Andreiko S.S., Ivanov O.V., Bobrov D.A. Otsenka gazodinamicheskikh kharakteristik gornykh porod Krasnoslobodskogo razloma [Estimation of gas-dynamic characteristics of rocks of the Krasnoslobodskogo fault]. *Gornyi zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 38-42. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.04
19. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Litvinovskaiia N.A. Prognozirovanie i predotvrashchenie gazodinamicheskikh iavlenii iz pochvy pri prokhodke podgotovitel'nykh vyrabotok v podrobotannom massivy solianyykh porod [Forecasting and prevention of gas-dynamic phenomena from the soil during the excavation of development workings in undermined salt rock massifs]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, 159 p.
20. Andreiko S.S. Predotvrashchenie gazodinamicheskikh iavlenii pri provedenii uklonov, vskryvaushchikh IV kaliinyi gorizont, v usloviakh Starobinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi [Prevention of gas-dynamic phenomena during slopes that open up the IV potash horizon in the conditions of the Starobinskoye potash salt deposit]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia RAN, 2014, iss. 12, pp. 227-229.
21. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distribution in potash deposits. *Journal of Mining Science*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 354-363. DOI: 10.1023/B:JOMI.0000023186.58971.f8
22. Hedlund F.H. The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953. *Safety Science*, 2012, vol. 50, iss. 3, pp. 537-553. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.10.004
23. Molinda G.M. Investigation of Methane Occurrence and Outbursts in the Cote Blanche Domal Salt Mine, Louisiana. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. RI 9186, no. PB90-270083, 1988, pp. 1-21, available at: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9590> (accessed 01 February 2022).
24. Iannacchione A.T., Grau R.H., Sainato A., Kohler T.M., Schatze S.J. Assessment of Methane Hazards in an Anomalous Zone of a Gulf Coast Salt Dome. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 8861, 1984, pp. 1-26, available at: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/pdfs/ri8861.pdf> (accessed 01 February 2022).
25. Pollianina G.D. Gazy solianyykh porod i gazoproavleniia v rudnikakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Gases of salt rocks and gas manifestations in the mines of the Verkhnekamskoye field]. *Gornyi zhurnal*, 1995, no. 6, pp. 145-150.
26. Pollianina G.D., Zemskov A.N., Paderin Iu.N. Tekhnologiya i bezopasnost' razrabotki Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Technology and safety of development of the Verkhnekamskoye potash deposit]. Perm: Knizhnoe izdatel'stvo, 1990, 262 p.
27. Baryakh A.A., Fedoseev A.K. Geomechanical forecast for distribution of fissuring areas in the saliferous measures of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*, 2007, vol. 43, no. 5, pp. 462-471. DOI: 10.1007/s10913-007-0048-9
28. Aptukov V.N., Skachkov A.P., Konstantinova S.A. Micromechanical characteristics of karnallite, sylvinite and rock salt at Upper Kama deposit. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 352-358. DOI: 10.1007/s10913-010-0044-3
29. Asanov V.A., Anikin V.V., Beltyukov N.K., Evseev A.V., Toksarov V.N. Tool control method of strain-stress state of marginal salt rocks. *Eurasian Mining*, 2013, no. 4, pp. 20-24.
30. Andreiko S.S., Kalugin P.A., Shcherba V.Ia. Gazodinamicheskie iavleniia v kaliinykh rudnikakh: genesis, prognoz i upravlenie [Gas-dynamic phenomena in potash mines: genesis, forecast and management]. Minsk: Vysheishaia shkola, 2000, 335 p.
31. Andreiko S.S. Mekhanizm obrazovaniia ochagov gazodinamicheskikh iavlenii v solianom porodnom massive [The mechanism of formation of foci of gas-dynamic phenomena in a salt rock massif]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 196 p.
32. Nesterov E.A. Sovershenstvovanie tekhnologii degazatsionnykh rabot pri otrabotke sil'vinitovykh plastov v usloviakh shakhtnykh polei rudnikov OAO "Sil'vinit" [Improvement of decontamination works technology during sylvinite layers mining in the mine fields of "Silvinit"]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 120-127.
33. Litvinovskaiia N.A. Prognoz i predotvrashchenie gazodinamicheskikh iavlenii iz pochvy podgotovitel'nykh gornykh vyrabotok v usloviakh podrobotki [Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena from the soil of preparatory mine workings under undermining conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi samaritarnyi universitet, 2010, no. 4, pp. 180-186.
34. Andreiko S.S. Problema gazodinamicheskikh iavlenii pri sovershenstvovanii tekhnologii sloevoi vyemki Tret'ego kaliinogo plasta v usloviakh Starobinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soi [The problem of gas-dynamic phenomena when improving the technology of layered mining of the Third potash seam in the conditions of the Starobinskoye potash salt deposit]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia RAN, 2018, iss. 16, pp. 300-307. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.80
35. Andreiko S.S., Shamanskii G.P., Laptev B.V. Mnogomernye statisticheskie kriterii klassifikatsii gazodinamicheskikh iavlenii na rudnikakh Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Multidimensional statistical criteria for the classification of gas-dynamic phenomena in the mines of the Verkhnekamskoye potassium deposit]. *Fiziko-tekhnicheskoe problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1985, no. 1, pp. 85-91.
36. Andreiko S.S., Bei M.M., Laptev B.V. Kriterii tipizatsii gazodinamicheskikh iavlenii na karnallitovykh plastakh Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Criteria for typification of gas-dynamic phenomena in carnallite beds of the Verkhnekamskoye potash deposit]. *Ventiliatsiia shakht i rudnikov. Aeropylegazodinamika gornykh vyrabotok. Sbornik nauchnykh trudov*. Leningrad: Leningradskii gornyi institut, 1987, pp. 49-54.

Финансирование. Исследования проводились при поддержке гранта РФФИ № 20-45-596017.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.