

Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения

С.С. Андрейко¹, О.В. Иванов², Т.А. Лялина¹✉, Е.А. Нестеров²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

² Горный Институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

✉ lyalina@mi-perm.ru

Резюме: Представлены результаты исследований в шахтных и лабораторных условиях газоносности по свободным газам соляных пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон стратиграфического разреза Верхнекамского месторождения калийных солей. В процессе проведения экспериментальных исследований в калийных рудниках получены количественные характеристики газоносности по свободным газам промышленных сильвинитовых и карналлитовых пластов, а также вмещающих пластов каменной соли. В процессе проведения лабораторных исследований методом газовой хроматографии проб природных газов дана оценка компонентного состава свободных газов соляных пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей. На основании анализа геологического строения калийных пластов и обобщения результатов исследования газоносности соляных пород дана оценка состава, масштаба, места и характера выделения природных газов в калийных рудниках. На основании обобщения результатов экспериментальных исследований газоносности соляных пород по свободным газам, а также анализа мест, масштаба и характера газовыделений в калийных рудниках при ведении горных работ установлены вероятные места скопления свободных газов в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения калийных солей, основными из которых являются области перегиба антиклинальных складок, локальные зоны разрывов и дробления пластов, трещины разрыва пластов, зоны тектонических нарушений, зоны перехода сильвинитов в карналлитовую породу и зоны изменения состава солей.

Ключевые слова: соляная толща, сильвинитовая зона, сильвинито-карналлитовая зона, газоносность, свободные газы, компонентный состав, характер газовыделений, места скоплений, антиклинальные складки, локальные зоны, тектонические нарушения

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

Для цитирования: Андрейко С.С., Иванов О.В., Лялина Т.А., Нестеров Е.А. Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения. *Горная промышленность*. 2021;(4):125–133. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.

Free gas content of the rocks of the silvinitite and silvinitite-carnallite zones at the Upper Kama Districts

S.S. Andreyko¹, O.V. Ivanov², T.A. Lyalina¹✉, E.A. Nesterov²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

✉ lyalina@mi-perm.ru

Abstract: The results of the mine and the laboratory studies of the free gas content of the sylvinite and sylvinite-carnallite zones of the Upper Kama districts are presented. In the process of the experimental studies, the quantitative characteristics of the free gas content were obtained for sylvinite, carnallite and rock salt layers. In the process of the laboratory studies by the gas chromatography of the natural gas samples, the component composition of the free gases was assessed. Based on the geological structure analysis and the gas content study, the assessment of the composition, the volume, the location and the intensity of the natural gases release is given. Based on the experimental studies results of the free gas content, and an analysis of the locations, the volume and the intensity of the gas emissions, the probable places of the free gases accumulation are installed. The main which are the anticlinal folds inflection the rupture and the crushing, the fractures, the tectonic disturbances, the transition of the sylvinites into the carnallite and the composition changes of the layers.

Keywords: a salt layer, a sylvinite zone, a sylvinite-carnallite zone, a gas content, a free gases, a component composition, a gas emissions intensity, a accumulation sites, a anticlinal folds, a local zones, a tectonic faults

Acknowledgments: Research was carried out with the support of the RFBR grant No. 20-45-596017.

For citation: Andreyko S.S., Ivanov O.V., Lyalina T.A., Nesterov E.A. Free gas content of the rocks of the silvinitite and silvinitite-carnallite zones at the Upper Kama Districts. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(4):125–133. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.

Введение

В настоящее время подземная разработка калийных пластов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей сопровождается газовыделениями и газодинамическими явлениями. Увеличение объемов добычи калийных солей в последние десятилетия и рост числа калийных рудников, разрабатывающих Верхнекамское месторождение калийных солей, сопровождаются изменением геологических условий разработки и расширением областей распространения природных опасностей в виде суфлярных газовыделений и газодинамических явлений различного вида. Суфлярные газовыделения и газодинамические явления существенно осложняют разработку калийных пластов и представляют серьезную угрозу жизни шахтеров. В этой связи исследования газоносности соляных пород, как одного из факторов, определяющих газовую и газодинамическую опасность, являются актуальной задачей. Количественные характеристики и закономерности распределения газоносности соляных пород по геологическому разрезу Верхнекамского месторождения калийных солей необходимы для прогнозирования зон, опасных по скоплениям горючих газов и газодинамическим явлениям, а также для разработки научно обоснованных параметров профилактического дегазационного бурения для предотвращения газодинамических явлений различного вида при ведении подготовительных и очистных горных работ в калийных рудниках.

Методология исследований

Методика шахтных экспериментальных исследований газоносности включала определение газоносности пород по свободным газам и определение компонентного состава свободных газов [1]. Методика исследований реализовывалась путем шахтных инструментальных наблюдений за газовыделениями из шпуров диаметром 42 мм, пробуренных в горных выработках с одновременным отбором проб свободного газа. Шпуры бурятся поинтервально и сразу герметизируются на расстоянии 0,5 м от забоя скважины с помощью герметизатора. Газ, выделяющийся со стенок и забоя загерметизированной части шпура поступает в газотводящий штуцер, к которому подключается прецизионный портативный цифровой манометр DPI-740. Диапазоны измерений цифрового манометра DPI-740: атмосферного давления – от 0,75 до 1,15 бар; абсолютного давления – от 0,035 до 1,3; 2,6; 3,5 бар; точность – ±0,02% ВПИ; предельно допустимое давление – 4 бар. С помощью прибора DPI-740 определяется начальная скорость газовыделения в шпуре по давлению, создаваемому газом, проходящим через откалиброванное отверстие капилляра, а также определяется приращение давления газов в шпуре в течение 30 с после его герметизации, т.е. начальное газовое давление. По этой величине с помощью заранее построенных графиков зависимости $X = f(P_г)$, где X – газоносность пород, м³/м³; $P_г$ – величина начального газового давления, определяются показатели газоносности. Прибором DPI-740 замеряется скорость истечения газов из шпуров, секундомером фиксируется время изменения скорости. Полученный объем выделившихся из шпура газов соотносится к объему зоны дренирования вокруг шпура.

Для определения компонентного состава свободного газа параллельно производится отбор проб для последующего хроматографического анализа. Для проведения анализа компонентного состава газов используются современные газовые хроматографы 450-GC компании «Varian, Inc». Хроматографы газовые Varian 450-GC представляют

собой универсальные стационарные лабораторные приборы. Хроматограф состоит из основного блока, включающего термостат с детекторами и колонками, блок ввода проб, блок контроля газовых потоков и систему управления и обработки данных. В термостате располагаются три группы колонок, каждой из которых соответствует определенный инжектор и детектор. Температура колонок регулируется по заданной программе в режиме линейного изменения (со скоростью до 40 °С/мин) и изотермическом (с шагом 1 °С). Программное обеспечение Galaxie версия 1.8 и выше, которым комплектуется хроматограф, обеспечивает обработку данных, программирование температуры, управление давлением газа-носителя и других рабочих газов, переключение газовых кранов и управление работы внешних устройств.

Результаты исследований

Калийная залежь Верхнекамского месторождения представлена серией продуктивных пластов, разделенных пластами каменной соли (рис. 1). По составу продуктивных пластов залежь делится на сильвинитовую и сильвинито-карналлитовую зоны [2]. Сильвинитовая зона сложена чередующимися пластами красных сильвинитов (КрIII КрII и КрI), полосчатого сильвинита (А) и разделяющих их пластов каменной соли (КрIII – КрII, КрII – КрI и КрI – А). Сильвинито-карналлитовая зона сложена чередующимися пластами калийно-магниевых солей (девять пластов, которые индексируются снизу вверх буквами от Б до К) и каменной соли (восемь пластов – от Б–В до И–К). В основании сильвинито-карналлитовой зоны, непосредственно на пласте полосчатого сильвинита А, залегает пласт Б. На рис. 1 представлена часть сильвинито-карналлитовой зоны, в пределах которой проводились исследования газоносности соляных пород по свободным газам.

Газопроявления различного вида и интенсивности на площади Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) происходили при бурении геологоразведочных скважин с поверхности и на разных стадиях ведения горных работ на площадях шахтных полей всех калийных рудников, эксплуатирующих месторождение [3; 4]. Сведения о газопроявлениях и результаты экспериментальных исследований газоносности соленосной толщи непосредственно в калийных рудниках характеризуются различной детальностью исследований газоносности пород и качеством имеющегося материала. Исследования газоносности пород соляной толщи ВКМКС представляют значительный интерес с позиций выявления закономерностей распределения газов по геологическому разрезу месторождения с последующим определением состава, масштаба и характера возможных газовыделений в процессе ведения подготовительных и очистных горных работ в калийных рудниках.

В условиях Верхнекамского месторождения калийных солей исследования газоносности пород соляной толщи проводились начиная с 1930-х годов [5–7]. В настоящее время следует констатировать тот факт, что несмотря на многолетние исследования газоносности соляных пород ВКМКС большим числом ученых, до сих пор нет общепризнанной теории происхождения газовой составляющей соляной толщи. Основные гипотезы происхождения газов соляной толщи ВКМКС сводятся к следующим: «нефтяное» происхождение углеводородных газов, обусловленное восходящей миграцией из нижележащих нефтяных месторождений; биохимическое происхождение газов за счет разложения растительных и животных остатков в соле-

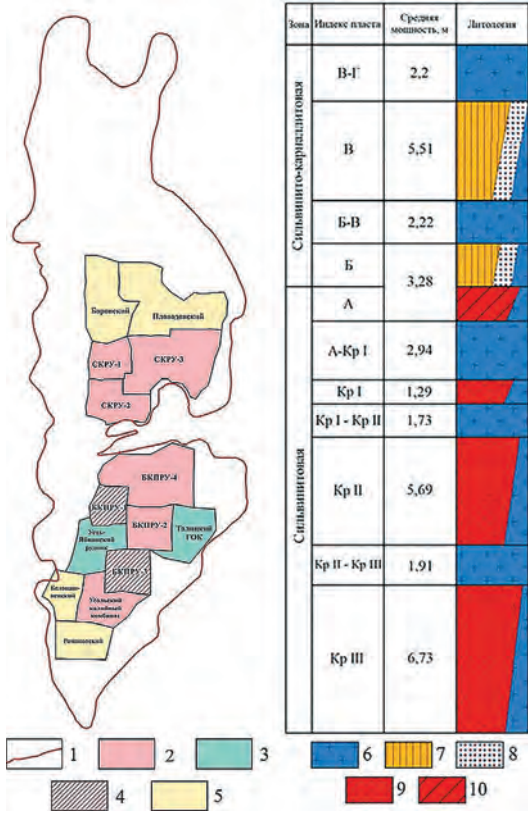


Рис. 1
 План и стратиграфический разрез сильвинитовой и части сильвинито-карналлитовой зон калийной залежи Верхнекамского месторождения калийных солей [2]:
 1 – граница месторождения;
 2 – действующие рудники;
 3 – строящиеся рудники;
 4 – затопленные рудники;
 5 – участки, планируемые к разработке;
 6 – каменная соль;
 7 – карналлитовая порода;
 8 – пестрый сильвинит;
 9 – красный сильвинит;
 10 – полосчатый сильвинит

Fig. 1
 Plan and stratigraphic section of the sylvinite and part of the sylvinito-carnallite zones of the potash deposit at the Upper Kama districts [2]:
 1 – the boundary of the deposit;
 2 – operating mines;
 3 – mines under construction;
 4 – flooded mines;
 5 – areas planned for development;
 6 – rock salt;
 7 – carnallite rock;
 8 – variegated sylvinite;
 9 – red sylvinite;
 10 – banded sylvinite

родных лагунах; радиационно-химическое превращение органического материала; химическое взаимодействие неустойчивых соединений солей аммония в процессе термодинамометаморфизма и т.д. [8–24].

Была проведена оценка закономерностей распределения газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин с поверхности на Верхнекамском месторождении калийных солей [3]. Методы математической статистики и теории вероятностей детально описаны в работах как отечественных, так и зарубежных авторов [24–32].

В настоящее время большой объем шахтных экспериментальных исследований газоносности по свободным газам и компонентного состава свободных газов выполнен «ГИ УрО РАН» на южном (шахтные поля рудников БКПРУ-1, БКПРУ-2, БКПРУ-4) и центральном (шахтные поля рудников СКРУ-1, СКРУ-2, СКРУ-3) участках ВКМКС. Для данных участков ВКМКС имеется наиболее представительный фактический материал. Остальные участки ВКМКС описываются на основании детального обзора литературных источников и результатов исследования газоносности солей на стадии ведения геологоразведочных работ с поверхности.

Результаты шахтных экспериментальных исследований

газоносности по свободным газам в условиях рудника БКПРУ-1 показали, что газоносность пород промышленных пластов АБ и КрII по свободным газам – газам, находящимся в открытых макропорах и трещинах, составляет соответственно 0,17 и 0,22 м³/м³, при этом максимальная газоносность пластов по условному метану составляет соответственно 1,2×10⁻³ и 0,023 м³/м³. Газоносность пород пласта АБ по сероводороду составляет 1,9×10⁻⁷ м³/м³. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 88,3 до 94,8%; метан (CH₄) от 4,63 до 10,51%; водород (H₂) – от 0,007 до 0,096%; этан (C₂H₆) – от 0,30 до 0,44%; пропан (C₃H₈) – от 0,11 до 0,29%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,026 до 0,069%.

На шахтном поле рудника БКПРУ-2 газоносность пород сильвинито-карналлитовой зоны – пласта В и пласта каменной соли Б-В составляет соответственно 1,03 и 0,72 м³/м³ (рис. 2). Газоносность пород сильвинитовой зоны по свободным газам следующая. Газоносность промышленного пласта АБ по свободным газам составляет 0,51 м³/м³, при этом газоносность пласта АБ по условному метану может достигать величины 0,41 м³/м³. Газоносность пород пласта АБ по сероводороду изменяется от 1,23×10⁻⁷ до 3,70×10⁻⁵ м³/м³ при среднем значении 3,58×10⁻⁶ м³/м³. Газоносность пород пласта каменной соли А-КрI, сильвинитового пласта КрI и пласта каменной соли КрI-КрII составляет соответственно 0,20, 0,16 и 0,63 м³/м³. Газоносность пород промышленного пласта КрII по свободным газам составляет 0,34 м³/м³, при этом газоносность пласта КрII по условному метану может достигать величины 0,14 м³/м³. Газоносность пород пласта КрIII по свободным газам составляет 0,15 м³/м³, при этом газоносность пласта КрIII по условному метану составляет 0,05 м³/м³. Компонентный состав свободных газов пласта АБ (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 40,62 до 85,64%; метан (CH₄) от 8,84 до 49,17%; водород (H₂) – от 0,09 до 5,07%; этан (C₂H₆) – от 0,04 до 7,53%; пропан (C₃H₈) – от 0,06 до 1,12%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,01 до 0,19%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,001 до 0,014%. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – 54,18 до 63,52%; метан (CH₄) от 12,38 до 28,22%; водород (H₂) – от 0,06 до 0,79%; этан (C₂H₆) – от 0,08 до 4,89%; пропан (C₃H₈) – от 0,02 до 0,70%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,001 до 0,008%. Компонентный состав свободных газов пласта КрIII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – 58,24 до 73,35%; метан (CH₄) от 18,23 до 29,42%; водород (H₂) – от 0,03 до 0,64%; этан (C₂H₆) – от 0,04 до 2,56%; пропан (C₃H₈) – от 0,06 до 2,74%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,04 до 0,57%.

Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинито-карналлитовой и сильвинитовой зон на шахтном поле рудника БКПРУ-4 представлено на рис. 3. Как видно из рис. 3, газоносность пород сильвинито-карналлитовой зоны – пласта каменной соли В-Г, пласта В и пласта каменной соли Б-В составляет соответственно 0,91, 0,73 и 0,64 м³/м³. Газоносность промышленного пласта АБ по свободным газам составляет 0,62 м³/м³, при этом газоносность пласта АБ по условному метану может достигать величины 0,54 м³/м³. Газоносность по свободным газам пород пласта каменной соли А-КрI, сильвинитового пласта КрI и пласта каменной соли КрI-КрII составляет соответственно 0,39, 0,20 и 0,51 м³/м³. Газоносность пород промышленного пласта КрII по свободным газам составляет 0,33 м³/м³, при этом газоносность пласта КрII по условному метану может достигать 0,24 м³/м³. Газоносность пласта каменной соли КрII-КрIII составляет 0,10 м³/м³. Газоносность пород пласта КрIII по свободным газам составляет 0,15 м³/м³, при

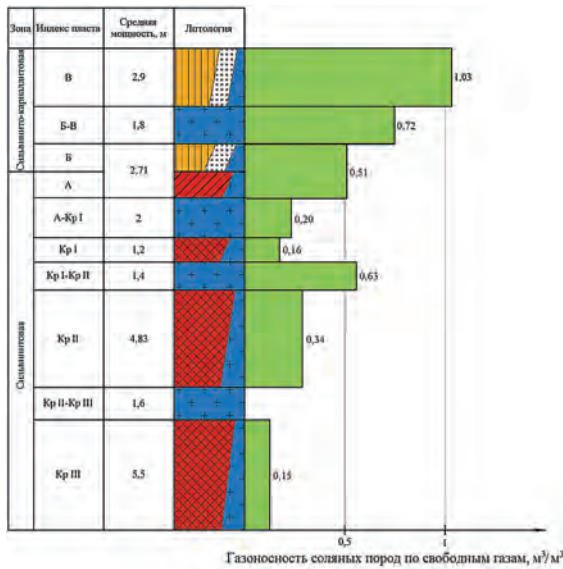


Рис. 2
Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника БКПРУ-2

Fig. 2
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinite and sylvinite-carnallite zones in the mine field of the BKPRU-2 mine

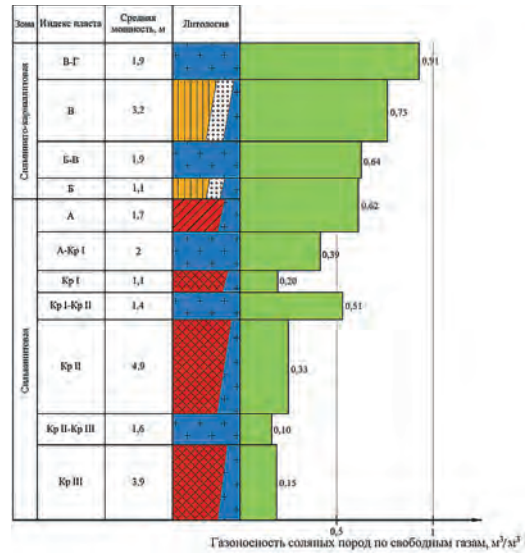


Рис. 3
Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника БКПРУ-4

Fig. 3
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinite and sylvinite-carnallite zones in the mine field of the BKPRU-4 mine

этом газоносность пласта КрIII по условному метану может достигать 0,06 м³/м³. Компонентный состав свободных газов пласта АВ (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 34,70 до 69,90%; метан (CH₄) от 7,24 до 49,56%; водород (H₂) – от 0,08 до 8,96%; этан (C₂H₆) – от 0,096 до 4,72%; пропан (C₃H₈) – от 0,11 до 2,31%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,08 до 0,92%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,004 до 0,037%. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 12,67 до 76,42%; метан (CH₄) от 15,70 до 48,39%; водород (H₂) – от 0,42 до 1,56%; этан (C₂H₆) – от 1,41 до 3,70%; пропан (C₃H₈) – от 1,55 до 2,31%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,30 до 1,35%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,001 до 1,16%. Компонентный состав свободных газов пласта КрIII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 48,43 до 61,62%; метан (CH₄) – от 12,35 до 28,60%; водород (H₂) – от 0,12 до 0,86%; этан (C₂H₆) – от 0,11 до 2,69%; пропан (C₃H₈) – от 0,09 до 1,28%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,02 до 0,64%.

В условиях шахтного поля рудника СКРУ-1 в сильвинито-карналлитовой зоне средняя газоносность пород пласта В по свободным газам составляет 1,05 м³/м³, при этом газоносность пласта Вк карналлитового состава по условному метану может достигать 1,54 м³/м³ (рис. 4).

Газоносность пород сильвинитового пласта Вс по свободным газам составляет 0,82 м³/м³, при этом газоносность пласта Вс по условному метану может достигать 0,53 м³/м³. Газоносность пород пласта каменной соли Б-В составляет 0,91 м³/м³. В сильвинитовой зоне газоносность пород пласта АВ составляет 0,62 м³/м³, при этом газоносность пласта АВ по условному метану может достигать 0,54 м³/м³. Газоносность пласта каменной соли КрI-КрII может достигать 0,24 м³/м³. Газоносность пород пласта КрIII по свободным газам составляет 0,15 м³/м³, при этом газоносность пласта КрIII по условному метану может достигать 0,06 м³/м³. Компонентный состав свободных газов карналлитового пласта Вк (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 14,29 до 85,13%; метан (CH₄) – от 11,21 до 45,56%; водород (H₂) – от 3,31 до 35,16%; этан (C₂H₆) – от 0,19 до 1,20%; пропан (C₃H₈) – от 0,05 до 0,34%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,004 до 0,02%; CO₂ и другие газы – от 0,10 до 3,43%. Компонентный

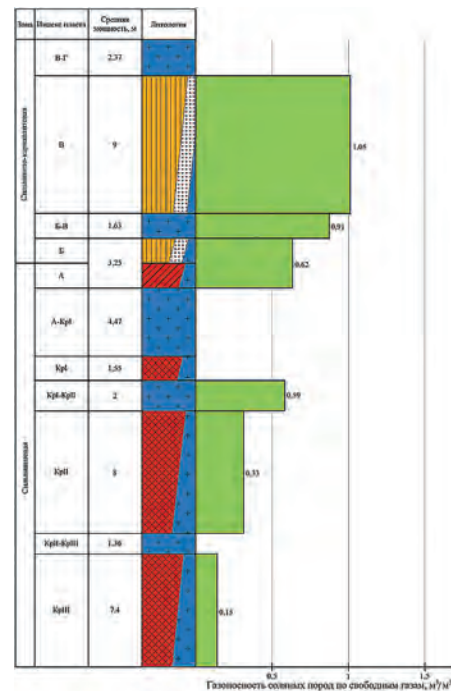


Рис. 4
Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника СКРУ-1

Fig. 4
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinite and sylvinite-carnallite zones in the mine field of the SKRU-1 mine

состав свободных газов сильвинитового пласта Вс (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 50,55 до 55,51%; метан (CH₄) – от 37,19 до 38,73%; водород (H₂) – от 3,27 до 9,95%; этан (C₂H₆) – от 1,15 до 2,11%; пропан (C₃H₈) – от 0,007 до 0,23%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,002 до 0,021%. Компонентный состав свободных газов пласта АВ (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 34,70 до 69,90%; метан (CH₄) – от 7,24 до 49,56%; водород (H₂) – от 0,08 до 8,96%; этан (C₂H₆) – от 0,096 до 4,72%; пропан (C₃H₈) – от 0,11 до 2,31%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,08 до 0,92%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,004 до 0,037%. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объем-

ных процентах) следующий: азот (N₂) – от 12,67 до 76,42%; метан (CH₄) – от 15,70 до 48,39%; водород (H₂) – от 0,42 до 1,56%; этан (C₂H₆) – от 1,41 до 3,70%; пропан (C₃H₈) – от 1,55 до 2,31%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,30 до 1,35%; пентан (C₅H₁₂) – до 1,16%. Компонентный состав свободных газов пласта КрIII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 48,43 до 61,62%; метан (CH₄) – от 12,35 до 28,60%; водород (H₂) – от 0,12 до 0,86%; этан (C₂H₆) – от 0,11 до 2,69%; пропан (C₃H₈) – от 0,09 до 1,28%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,02 до 0,64%.

На шахтном поле рудника СКРУ-2 газоносность пород сальвинито–карналлитовой зоны – промышленного пласта Вс сальвинитового состава и пласта каменной соли Б–В по свободным газам составляет соответственно 0,51 и 0,37 м³/м³, при этом газоносность пласта Вс по условному метану может достигать 0,40 м³/м³ (рис. 5). Газоносность пород промышленного пласта АБ по свободным газам составляет 0,34 м³/м³, при этом газоносность пласта АБ по условному метану может достигать 0,21 м³/м³. Газоносность пластов Вс и АБ по сероводороду составляет соответственно 76×10⁻⁶ и 41×10⁻⁶ м³/м³. Газоносность пород пласта каменной соли КрI–КрII и промышленного пласта КрII по свободным газам составляет соответственно 0,33 и 0,24 м³/м³, при этом газоносность пласта КрII по условному метану может достигать 0,13 м³/м³. Газоносность пород пласта КрIII по свободным газам составляет 0,14 м³/м³, при этом газоносность пласта КрIII по условному метану может достигать 0,08 м³/м³. Компонентный состав свободных газов сальвинитового пласта Вс (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 45,12 до 48,25%; метан (CH₄) – от 38,94 до 46,67%; водород (H₂) – от 0,62 до 3,67%; этан (C₂H₆) – от 4,87 до 5,21%; пропан (C₃H₈) – от 1,18 до 2,262%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,19 до 2,37%. Компонентный состав свободных газов пласта АБ (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 51,01 до 57,85%; метан (CH₄) – от 34,70 до 41,54%; водород (H₂) – от 0,51 до 0,62%; этан (C₂H₆) – от 0,08 до 4,62%; пропан (C₃H₈) – от 1,19 до 1,29%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,31 до 1,19%. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 32,45 до 60,30%; метан (CH₄) – от 12,34 до 23,80%; водород (H₂) – от 0,22 до 3,67%; этан (C₂H₆) – от 0,46 до 0,61%; пропан (C₃H₈) – от 0,75 до 3,93%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,06 до 3,85%. Компонентный состав свободных газов пласта КрIII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 34,42 до 78,65%; метан (CH₄) – от 20,34 до 36,32%; водород (H₂) – от 0,02 до 0,48%; этан (C₂H₆) – от 0,18 до 3,69%; пропан (C₃H₈) – от 0,19 до 3,12%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,06 до 1,46%.

В условиях шахтного поля рудника СКРУ-3 газоносность пород сальвинито–карналлитовой зоны – пласта каменной соли В–Г, промышленного сальвинитового пласта В_с и пласта каменной соли Б–В по свободным газам составляет соответственно 0,72, 0,60 и 0,61 м³/м³ (рис. 6). При этом газоносность пласта В_с по условному метану может достигать 0,53 м³/м³. Газоносность пород сальвинитовой зоны – промышленного пласта АБ, пласта каменной соли КрI–КрII, промышленного пласта КрII и сальвинитового пласта КрIII по свободным газам составляет соответственно 0,47, 0,40, 0,32 и 0,12 м³/м³. При этом газоносность пласта АБ по условному метану может достигать 0,40 м³/м³, пласта КрII – 0,26 м³/м³, пласта КрIII – 0,07 м³/м³. Компонентный состав свободных газов сальвинитового пласта В_с (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 35,78 до 55,88%; метан (CH₄) – от 28,62 до 51,70%; водород (H₂) – от 1,96 до 5,24%; этан (C₂H₆) – от 4,31 до 4,51%; пропан (C₃H₈) – от 0,73 до 2,45%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,13 до 0,68%. Компонентный состав свобод-

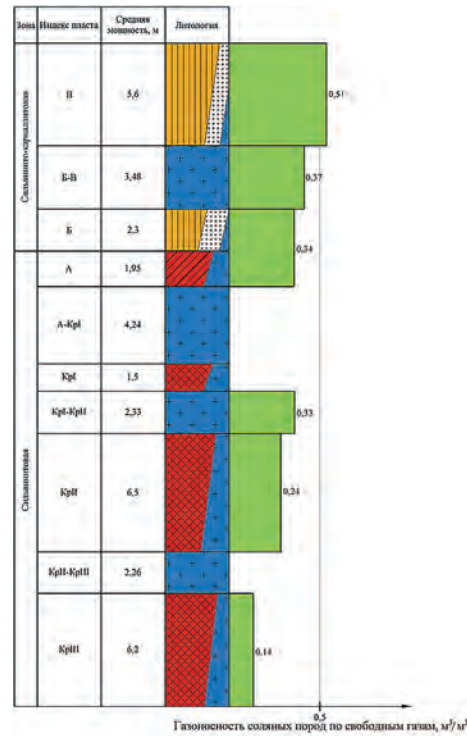


Рис. 5
Распределение газоносности по свободным газам в породах сальвинитовой и сальвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника СКРУ-2

Fig. 5
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinitic and sylvinitic-carnallite zones in the mine field of the SKRU-2 mine

ных газов пласта АБ (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 35,78 до 77,69%; метан (CH₄) – от 17,44 до 55,72%; водород (H₂) – от 0,58 до 3,28%; этан (C₂H₆) – от 0,04 до 6,65%; пропан (C₃H₈) – от 0,12 до 1,64%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,03 до 0,72%. Компонентный состав свободных газов пласта КрII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – 52,53 до 82,13%; метан (CH₄) – от 17,29 до 20,91%; водород (H₂) – от 0,08 до 5,44%; этан (C₂H₆) – от 0,35 до 14,84%; пропан (C₃H₈) – от 0,02 до 4,20%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,04 до 0,79%. Компонентный состав свободных газов пласта КрIII (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – 44,28 до 76,32%; метан (CH₄) – от 18,38 до 46,67%; водород (H₂) – от 0,02 до 0,06%; этан (C₂H₆) – от 0,48 до 2,93%; пропан (C₃H₈) – от 0,26 до 2,25%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,06 до 0,49%.

На шахтном поле строящегося Усть-Яйвинского рудника промышленные пласты АБ и КрII характеризуются газоносностью по свободным газам от 0,07 до 0,25 м³/м³, при этом газоносность пластов АБ и КрII по условному метану может достигать соответственно 0,11 и 0,018 м³/м³. Скопления свободных газов наблюдаются в двух формах: приконтактные (прикоржевые) и гнездовые (очаговые). В составе свободных газов по данным геологоразведочных работ установлено следующее содержание горючих газов: карналлитовая порода (пласты В_к и Б_к) – метан (CH₄) – до 2,26%; тяжелые углеводороды (этан C₂H₆ + пропан C₃H₈ + бутан C₄H₁₀ + пентан C₅H₁₂ + гексан C₆H₁₄) – до 0,32%; водород (H₂) – до 7,34%; сальвинит пестрый (пласт В_с и Б_с) – метан (CH₄) – до 1,05%; тяжелые углеводороды (этан C₂H₆ + пропан C₃H₈ + бутан C₄H₁₀ + пентан C₅H₁₂ + гексан C₆H₁₄) – до 0,01%; водород (H₂) – до 4,17%; сальвинит пестрый и полосчатый (пласт АБ) – метан (CH₄) – до 3,82%; тяжелые углеводороды (этан C₂H₆ + пропан C₃H₈ + бутан C₄H₁₀ + пентан C₅H₁₂ + гексан C₆H₁₄) – до 0,42%; водород (H₂) – до 16,21%; сальвинит красный (пласты КрI, КрII и КрIII) – метан (CH₄)

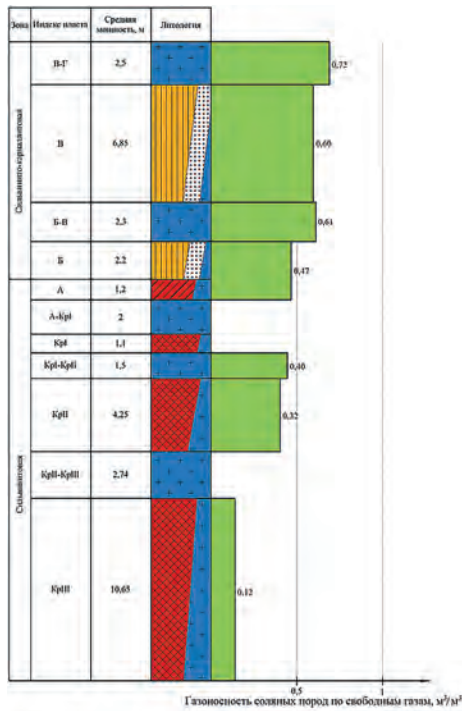


Рис. 6
Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника СКРУ-3

Fig. 6
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinitic and sylvinitic-carnallite zones in the mine field of the SKRU-3 mine

– до 3,46%; тяжелые углеводороды (этан C_2H_6 + пропан C_3H_8 + бутан C_4H_{10} + пентан C_5H_{12} + гексан C_6H_{14}) – до 0,68%; водород (H_2) – до 6,63%; межпластовая каменная соль – метан (CH_4) – до 4,74%; тяжелые углеводороды (этан C_2H_6 + пропан C_3H_8 + бутан C_4H_{10} + пентан C_5H_{12} + гексан C_6H_{14}) – до 0,34%; водород (H_2) – до 10,63%; подстилающая каменная соль – метан (CH_4) – до 4,68%; тяжелые углеводороды (этан C_2H_6 + пропан C_3H_8 + бутан C_4H_{10} + пентан C_5H_{12} + гексан C_6H_{14}) – до 0,11%; водород (H_2) – до 10,00%.

Анализ геологических условий

Анализ геологических условий разработки промышленных карналлитовых и сильвинитовых пластов В, АВ и КрII на шахтных полях калийных рудников в условиях ВКМКС позволил выявить наличие антиклинальных складок промышленных пластов третьего порядка, зон распространения смешанных солей в пластах АВ и В, а также наличие надвигов (зоны разрывных и флексурно-складчатых деформаций), локальных зон сильвинитизации карналлитовых пород и галитизации сильвинитов, зон локальных сдвигов и надвигов, зон открытых трещин растяжения, участков флексуобразных складок, локальных замещений пласта АВ глинистым материалом, зон разрывов и дробления пластов. На основании анализа геологического строения шахтных полей калийных рудников и практического опыта отработки карналлитовых и сильвинитовых пластов В, АВ и КрII на шахтных полях рудников в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей, а также мирового опыта разработки других месторождений калийных солей подземным способом можно считать наиболее вероятными местами скопления свободных газов в промышленных пластах и вмещающих породах следующие геологические структуры и зоны: локальные зоны замещения сильвинитовых слоев линзами неправильной

формы, выполненными каменной солью и глиной, с линейными размерами от первых метров до 10–12 м; локальные зоны интенсивного смятия сильвинитовых пластов в осевых частях крупных складок или флексуобразных перегибов; зоны развития антиклинальных складок высотой от первых метров до 10–12 м, шириной от 5–20 до 100 м, длиной – до 300 м, в пределах которых породы перемяты, характеризуются повышенной пористостью в результате развития межзерновой трещиноватости и высокой газонасыщенностью; зоны развития эпигенетических изменений в межпластовой каменной соли КрI – А, разделяющей пласты КрI и АВ, представленных прослоями и отдельными блоками шпатовой каменной соли; трещины разрыва (залеченные и открытые); зоны тектонических нарушений (сдвигов, надвигов, сбросов) и области их динамического влияния, представленные «оперяющими» трещинами, сколами и разрывами вблизи зоны сдвига или взброса; зоны разрывов и дробления пласта АВ и пласта каменной соли В-В; зоны перехода сильвинитов в карналлитовую породу по пластам В и В; участки калийных пластов с весьма изменчивым распределением карналлитовой породы и сильвинитов, когда одни и те же слои пород представлены смешанными солями (карналлит + сильвинит).

На основе анализа геологических условий разработки калийных пластов В, АВ и КрII на шахтных полях калийных рудников наблюдается крайне неравномерное – «пятнистое» распределение газоносности соляных пород по площади, когда преобладающие по площади шахтного поля участки с фоновой газоносностью по свободным (не более $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$) будут чередоваться с локальными газонасыщенными зонами, приуроченными к вышеуказанным геологическим структурам и зонам. В связи с этим характер выделения природных свободных газов в калийных рудниках в зависимости от газоносности может быть следующим: обычное газовыделение; суфлярное газовыделение; внезапное газовыделение в виде газодинамического явления.

При ведении горных работ по породам с обычной (фоновой) газоносностью вне вышеуказанных геологических структур в атмосферу горных выработок будут происходить обычные газовыделения, которые связаны с выделением содержащихся в разрабатываемом пласте свободных газов, при этом связанные (микровключенные) газы практически не выделяются в атмосферу горных выработок. Обычные газовыделения происходят при проходке подготовительных выработок и ведении очистных работ с обнаженных поверхностей массива (забоя, стенок, почвы и кровли), из шпуров и скважин, в момент взрывания из разрушенной массы породы и из отбитой породы, находящейся в забое выработки какое-либо время до ее погрузки. Количество выделяющегося при этом свободного газа будет невелико и в предельном случае не превысит газоносности пород по свободным газам. Обычные газовыделения являются небольшими по объему и при надлежащем проветривании горной выработки не создают заметных концентраций газа и не приводят к загазовыванию выработок, т.е. концентрация газов не превышает предельно допустимого значения, указанного в правилах безопасности – 0,5% (10% от нижней концентрации предела взрываемости). При ведении горных работ в зонах, опасных по скоплениям свободных газов, возможны суфлярные газовыделения и газодинамические явления в виде: внезапных выбросов соли и газа; обрушений пород кровли и разрушений пород почвы, сопровождающихся газовыделениями; явлений комбинированного типа (рис. 7).

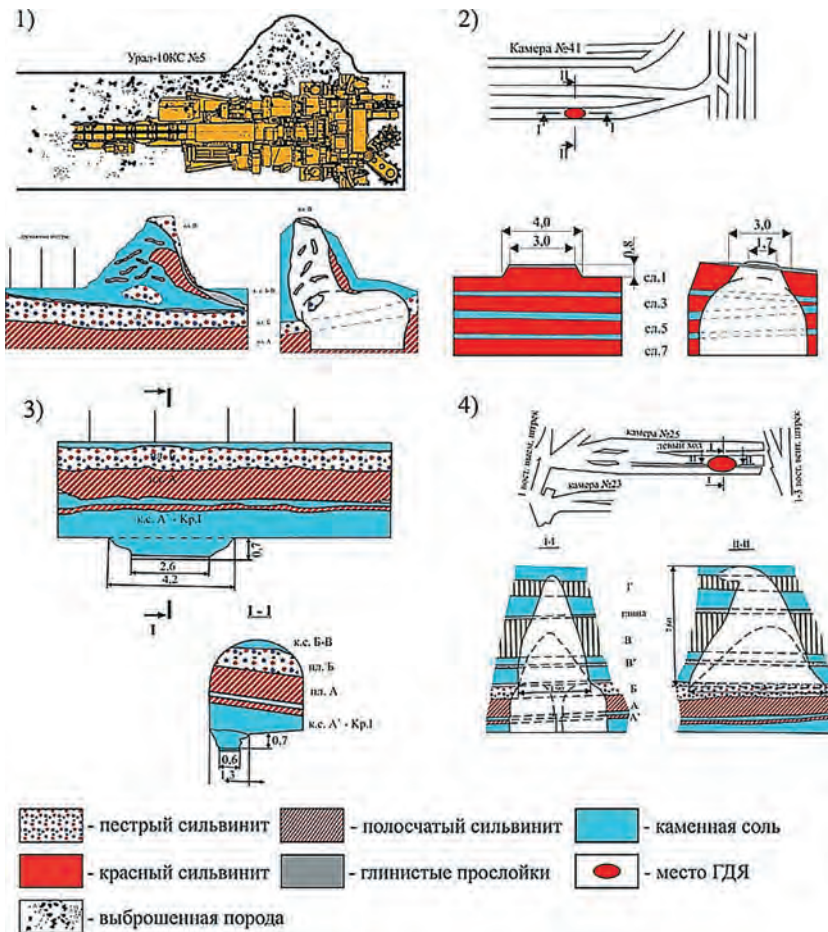


Рис. 7
Распределение газоносности по свободным газам в породах сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон на шахтном поле рудника СКРУ-3

Fig. 7
Distribution of gas content by free gases in the rocks of the sylvinitic and sylvinitic-carnallite zones in the mine field of the SKRU-3 mine

Газодинамические явления представляют собой внезапные по месту и времени быстротекающие (от единиц до нескольких десятков секунд) разрушения части приконтурного массива с выносом разрушенной породы в выработку, сопровождающиеся газовыделением и образованием в массиве полостей. При этом количество газа, которое выделяется при газодинамических явлениях в атмосферу горных выработок, может быть различным и изменяться от нескольких кубометров до тысяч кубометров.

Суфлярные газовыделения – выделения газа из трещин, шпуров или скважин, вскрывающих газопроводящие трещины и скопления свободных газов в пласте или вмещающих породах, с дебитом газа 1 м³/мин и более на участках выработок менее 20 м. Суфлярные газовыделения могут проявляться бурно, но кратковременно. В случае связи суфлярных газовыделений с крупными коллекторами газа они могут быть весьма длительными (несколько лет) и значительными по дебиту газа (тысячи и десятки тысяч кубометров газ).

Заключение

Результаты обобщения и анализа данных о газоносности по свободным газам соляных пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей позволяют сделать следующие выводы:

1. Газоносность пород по свободным газам сильвинито-

вой зоны – сильвинитовых пластов КрIII, КрII, КрI и АБ, а также пластов каменной соли КрIII–КрII, КрII–КрI, КрI–А изменяется от 0,10 м³/м³ до 0,62 м³/м³. Средние значения газоносности пород сильвинитовой зоны по свободным газам следующие: сильвинитовый пласт КрIII – 0,14 м³/м³, пласт каменной соли КрIII–КрII – 0,10 м³/м³, сильвинитовый пласт КрII – 0,31 м³/м³, пласт каменной соли КрII–КрI – 0,49 м³/м³, сильвинитовый пласт КрI – 0,18 м³/м³, пласт каменной соли КрI–А – 0,29 м³/м³, сильвинитовый пласт АБ – 0,51 м³/м³.

2. Компонентный состав свободных газов сильвинитовой зоны (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 12,67 до 94,80%; метан (CH₄) – от 4,63 до 55,72%; водород (H₂) – от 0,02 до 8,96%; этан (C₂H₆) – от 0,04 до 14,84%; пропан (C₃H₈) – от 0,02 до 4,20%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,001 до 3,85%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,001 до 1,16%.

3. Газоносность пород по свободным газам исследованной части пластов сильвинито-карналлитовой зоны – пласта каменной соли Б–В, пласта В сильвинитового (В_с) и карналлитового состава (В_к), а также пласта каменной соли В–Г изменяется от 0,37 до 1,05 м³/м³. Средние значения газоносности пород исследованных пластов сильвинито-карналлитовой зоны по свободным газам следующие: пласт каменной соли Б–В – 0,78 м³/м³, пласт В – 0,73 м³/м³, пласт каменной соли В–Г – 0,81 м³/м³.

4. Компонентный состав свободных газов исследованной части пластов сильвинито-карналлитовой зоны (в объемных процентах) следующий: азот (N₂) – от 34,70 до 96,10%; метан (CH₄) – от 0,59 до 48,80%; водород (H₂) – от 0,002 до 1,17%; этан (C₂H₆) – от 0,04 до 9,72%; пропан (C₃H₈) – от 0,01 до 4,66%; бутан (C₄H₁₀) – от 0,15 до 0,46%; пентан (C₅H₁₂) – от 0,09 до 0,17%.

5. Наиболее вероятными местами скопления свободных газов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей являются следующие геологические зоны и структуры: локальные зоны замещения сильвинитовых слоев линзами неправильной формы, выполненными каменной солью и глиной, с линейными размерами от первых метров до 10–12 м; локальные зоны интенсивного смятия сильвинитовых пластов в осевых частях крупных складок или флексуобразных перегибов; зоны развития антиклинальных складок высотой от первых метров до 10–12 м, шириной от 5–20 до 100 м, длиной – до 300 м; зоны развития эпигенетических изменений в межпластовой каменной соли КрI – А, разделяющей пласты КрI и АБ, представленные прослоями и отдельными блоками шпатовой каменной соли; трещины разрыва (залеченные и открытые); зоны тектонических нарушений (сдвигов, надвигов, сбросов) и области их динамического влияния; зоны разрывов и дробления пласта АБ и пласта каменной соли Б–В; зоны перехода сильвинитов в карналлитовую породу по пластам Б и В; участки калийных пластов с весьма изменчивым распределением карналлитовой породы и сильвинитов, когда одни и те же слои пород представлены смешанными солями (карналлит + сильвинит).

Список литературы

1. Земсков А.Н., Кондрашов П.И., Травникова Л.Г. *Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними*. Пермь: Типография купца Тарасова; 2008. 414 с.
2. Кудряшов А.И. *Верхнекамское месторождение солей*. Пермь: ГИ УрО РАН; 2013. 429 с.
3. Андрейко С.С., Лялина Т.А. Результаты оценки закономерностей распределения газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин с поверхности на Верхнекамском месторождении калийных солей. *Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 2011;(1):105–120.
4. Андрейко С.С., Калугин П.А., Щерба В.Я. *Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление*. Минск: Высшая школа; 2000. 335 с.
5. Иванов А.А., Рейнеке В.И. О газах Верхнекамского соляного района. В: Голубятникова В.Д., Рейнеке В.И. (ред.) *Природные газы СССР*. М.: Гелиогазразведка; 1935. С. 72–76.
6. Морачевский Ю.В., Черепенников А.А., Самарцева А.Г. Газоносность толщи калийных солей Верхнекамского месторождения. *Калий*. 1937;(7):12–21.
7. Морачевский Ю.В., Черепенников А.А., Самарцева А.Г. Газоносность соляной толщи Верхнекамских отложений. *Труды ВИГ*. 1939;(17):32–33.
8. Несмелова З.Н. О газах в калийных солях Березниковского рудника. *Труды ВНИИГ*. 1959;(35):206–213.
9. Пермяков Р.С., Проскуряков Н.М. *Внезапные выбросы соли и газа*. Л.: Недра; 1972. 180 с.
10. Фивег М.П. О работах ВИГ по изучению газов карналлитовых пород Соликамского рудника. В: Раевский В. И. (ред.) *Геология месторождений калийных солей и их разведка*. Л.; 1973.
11. Несмелова З.Н., Травникова Л.Г. Радиогенные газы древних соляных отложений. *Геохимия*. 1973;(5):716–722.
12. Медведев И.И., Полянина Г.Д. *Газовыделения в калийных рудниках*. М.: Недра; 1974. 207 с.
13. Аполлонов В.Н. Аммоний в сильвине Верхнекамского месторождения. *Доклады АН СССР*. 1976;231(3):709–710.
14. Чудинов Н.К. Методы количественной оценки пиковых и фоновых процессов эволюции в практике и решение проблемы генезиса природных газов и нефти. *Проблемы соленакопления*. 1977;2:292–301.
15. Воронов Н.А., Махмудов А.Х., Несмелова З.Н. и др. *Природные газы осадочной толщи*. Л.: Недра; 1976. 344 с.
16. Несмелова З.Н. Газы древних соляных отложений. В: Алексеев Ф.А. (ред.) *Метан*. М.: Недра; 1978. С. 218–222.
17. Несмелова З.Н. и др. *Геолого-геохимические факторы формирования компонентного и изотопного состава газа*. Л.: ВНИГРИ; 1978. 191 с.
18. Проскуряков Н.М. *Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках*. М.: Недра; 1980. 264 с.
19. Андрейко С.С., Галкин В.И., Шаманский Г.П. Некоторые особенности распределения углеводородных газов по разрезу Верхнекамского месторождения калийных солей. В: Красноштейн А. Е. (ред.) *Разработка соляных месторождений*. Пермь: Перм. политехн. ин-т; 1980. С. 82–87.
20. Галкин В.И. Некоторые особенности распределения и формирования газов Верхнекамского месторождения калийных солей. В: Жарков М.А., Яншин А.Л. (ред.) *Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления*. Новосибирск: Наука; 1982. С. 172–174.
21. Аполлонов В.Н. Происхождение азота в месторождениях калийных солей. В: Жарков М.А., Яншин А.Л. (ред.) *Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления*. Новосибирск: Наука; 1982. С. 153–157.
22. Несмелова З.Н., Гемп С.Д. Вероятная модель формирования газовой составляющей соляных пород калийных месторождений. В: Жарков М.А., Яншин А.Л. (ред.) *Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления*. Новосибирск: Наука; 1982. С. 162–172.
23. Травникова Л.Г., Прасолов Э.М. Химический состав газов соленосных отложений. *Геохимия*. 1985;(12):1766–1778.
24. Гемп С.Д. Анализ существующих материалов и представлений о прохождении газового состава (свободного и микровключенного) в соляных породах ВКМКС. В: Джиноридзе Н.М. (ред.) *Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей*. СПб.; Соликамск: Соликамская типография; 2000. С. 321–329. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-petrotektonicheskie-osnovy-bezopasnoy-ekspluatatsii-verhnekamskogo-mestorozhdeniya.pdf>
25. Roberts N.M., Tikoff B., Davis J.R. Stetson-Lee T. The utility of statistical analysis in structural geology. *Journal of Structural Geology*. 2019;125:64–73. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.05.030>
26. Tekin S., Altun E., Çan T. A new statistical model for extreme rainfall: POT-KumGP. *Earth Science Informatics*. 2021;14(6):765–775. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00581-x>
27. Robert C.P. Essentials of probability theory for statisticians. *Chance*. 2020;33(3):61. <https://doi.org/10.1080/09332480.2020.1820255>
28. Rocchi P., Burgin P. An essay on the prerequisites for the probability theory. *Advances in Pure Mathematics*. 2020;10(12):685–698. <https://doi.org/10.4236/apm.2020.1012042>
29. Закревский К.Е., Попов В.Л. История развития трехмерного геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(5):89–100. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3188>
30. Саакян М.И., Закревский К.Е., Газизов Р.К., Лепилин А.Е., Рьжиков Е.А. К вопросу о перспективах создания корпоративного программного обеспечения геологического моделирования. *Нефтяное хозяйство*. 2019;(11):50–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-11-50-54>
31. Тараскин Е.Н., Гутман И.С., Руднев С.А., Захарян А.З., Урсегов С.О. Новый адаптивный подход к геолого-гидродинамическому моделированию длительно разрабатываемых месторождений и залежей. *Нефтяное хозяйство*. 2017;(12):78–83. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-78-83>
32. Зундэ Д.А., Горланов А.А., Шаламов И.П., Давлетшин А.И., Белянский В.Ю., Лознюк О.А., Закревский К.Е., Абрашов В.Н. Итерационный подход при геологическом и гидродинамическом моделировании. *Нефтяное хозяйство*. 2019;(5):58–61. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-5-58-61>

References

1. Zemskov A.N., Kondrashov P.I., Travnikova L.G. *Natural gases of potash deposits and measures to combat them*. Perm: Tipografiya kuptsa Tarasova; 2008. 414 p. (In Russ.)
2. K Andreyko S.S., Lyalina T.A. Evaluation of gas-dynamics phenomena distribution laws in exploration drilling wells from the surface in Verkhnekamskoye deposit of potassium salts. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2011;(1):105–120. (In Russ.)
4. Andreyko S.S., Kalugin P.A., Shcherba V.Ya. *Gas-dynamic phenomena in potash mines: genesis, forecast and management*. Minsk: Higher school; 2000. 335 p. (In Russ.)
5. Ivanov A.A., Reinecke V.I. On the gases of the Verkhnekamsky salt region. In: Golubyatnikova V.D., Reinecke V.I. (eds) *Natural gases of the USSR*. Moscow: Geliogazrazvedka; 1935, pp. 72–76. (In Russ.)
6. Morachevsky Yu.V., Cherepennikov A.A., Samartseva A.G. Gas content of the stratum of potassium salts of the Verkhnekamskoye field. *Kalii = Potassium*. 1937;(7):12–21. (In Russ.)
7. Morachevsky Yu.V., Cherepennikov A.A., Samartseva A.G. Gas content of the salt strata of the Verkhnekamsk deposits. *Trudy VIG*. 1939;(17):32–33. (In Russ.)

8. Nesmelova Z.N. On gases in the potassium salts of the Bereznikovskiy mine. *Trudy VNIIG*. 1959;(35):206–213. (In Russ.)
9. Permyakov R.S., Proskuryakov N.M. *Sudden outbursts of salt and gas*. Leningrad: Nedra; 1972. 180 p. (In Russ.)
10. Vieweg M.P. On the work of the VIG on the study of gases of carnallite rocks of the Solikamsk mine. In: Raevsky V. I. (ed.) *Geology of potassium salt deposits and their prospecting*. Leningrad; 1973. (In Russ.)
11. Nesmelova Z.N., Travnikova L.G. Radiogenic gases of ancient salt deposits. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1973;(5):716–722. (In Russ.)
12. Medvedev I.I., Polyagina G.D. *Gas emission in potash mines*. Moscow: Nedra; 1974. 207 p. (In Russ.)
13. Apollonov V.N. Ammonium in sylvite of the Verkhnekamskoe deposit. *Doklady Academy of Sciences of the USSR*. 1976;231(3):709–710. (In Russ.)
14. Chudinov N.K. Methods for quantitative assessment of peak and background processes of evolution in practice and solving the problem of the genesis of natural gases and oil. *Problems of salt accumulation*. 1977;2:292–301. (In Russ.)
15. Voronov N.A., Makhmudov A.Kh., Nesmelova Z.N. et al. *Natural gases of sedimentary strata*. Leningrad: Nedra; 1976. 344 p. (In Russ.)
16. Nesmelova Z.N. Gases of ancient salt deposits. In: Alekseev F.A. (ed.) *Methane*. Moscow: Nedra; 1978, pp. 218–222. (In Russ.)
17. Nesmelova Z.N. et al. *Geological and geochemical factors of the formation of the component and isotopic composition of gas*. Leningrad: VNIGRI; 1978. 191 p. (In Russ.)
18. Proskuryakov N.M. *Sudden outbursts of rock and gas in potash mines*. Moscow: Nedra; 1980. 264 p. (In Russ.)
19. Andreyko S.S., Galkin V.I., Shamansky G.P. Some features of the distribution of hydrocarbon gases along the section of the Verkhnekamskoye potash deposit. In: Krasnoshtein A. E. (ed.) *Development of salt deposits: Interuniversity*. Perm: Perm Polytechnic Institute; 1980, pp. 82–87. (In Russ.)
20. Galkin V.I. Some features of the distribution and formation of gases from the Verkhnekamskoye potassium salt deposit. In: Zharkov M.A., Yanshin A.L. (eds) *Oil and gas potential of ancient salt accumulation regions*. Novosibirsk: Nauka; 1982, pp. 172–174. (In Russ.)
21. Apollonov V.N. The origin of nitrogen in deposits of potassium salts. In: Zharkov M.A., Yanshin A.L. (eds) *Oil and gas potential of ancient salt accumulation regions*. Novosibirsk: Nauka; 1982, pp. 153–157. (In Russ.)
22. Nesmelova Z.N., Gemp S.D. Possible model of the formation of the gas component of salt rocks of potash deposits. In: Zharkov M.A., Yanshin A.L. (eds) *Oil and gas potential of ancient salt accumulation regions*. Novosibirsk: Nauka; 1982, pp. 162–172. (In Russ.)
23. Travnikova L.G., Prasolov E.M. Chemical composition of saline sediment gases. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1985;(12):1766–1778. (In Russ.)
24. Gemp S.D. Analysis of existing materials and notions about the origin of gas composition (free and microincluded) in saline rocks of the UKDPMs. In: Ginoridze N.M. (ed.) *Petrotectonic fundamentals for safe mining operation in the Upper-KAMA deposit of potash-magnesium salts*. St. Petersburg; Solikamsk: Solikamskaya tipografiya; 2000, pp. 321–329. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-petrotektonicheskie-osnovy-bezopasnoy-ekspluatacii-verhnekamskogo-mestorozhde.pdf>
25. Roberts N.M., Tikoff B., Davis J.R., Stetson-Lee T. The utility of statistical analysis in structural geology. *Journal of Structural Geology*. 2019;125:64–73. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.05.030>
26. Tekin S., Altun E., Çan T. A new statistical model for extreme rainfall: POT-KumGP. *Earth Science Informatics*. 2021;14(6):765–775. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00581-x>
27. Robert C.P. Essentials of probability theory for statisticians. *Chance*. 2020;33(3):61. <https://doi.org/10.1080/09332480.2020.1820255>
28. Rocchi P., Burgin M. An essay on the prerequisites for the probability theory. *Advances in Pure Mathematics*. 2020;10(12):685–698. <https://doi.org/10.4236/apm.2020.1012042>
29. Zakrevskiy K.E., Popov V.L. The history of development of 3D geology modeling as a method for studying oil and gas reservoirs. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(5):89–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3188>
30. Saakyan M.I., Zakrevskiy K.E., Gazizov R.K., Lepilin A.E., Ryzhikov E.A. The prospects of corporate geological modeling software creation. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2019;(11):50–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-11-50-54>
31. Taraskin E.N., Gutman I.S., Rudnev S.A., Zakharian A.Z., Ursegov S.O. New adaptive approach to geological and hydrodynamic modeling of fields and reservoirs with long production history. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2017;(12):78–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-78-83>
32. Zunde D.A., Gorlanov A.A., Shalamov I.P., Davletshin A.I., Belyansky V.Yu., Loznyuk O.A., Zakrevskiy K.E., Abrashov V.N. Iterative approach to geological and hydrodynamic modeling. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2019;(5):58–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-5-58-61>

Информация об авторах

Андрейко Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

Иванов Олег Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики, Горный Институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

Лялина Тамара Александровна – ассистент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: lyalina@mi-perm.ru

Нестеров Егор Анагольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики, Горный Институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.06.2021

Поступила после рецензирования: 12.07.2021

Принята к публикации: 13.07.2021

Information about the authors

Sergey S. Andreyko – Doctor in Engineering, Professor, Head of Department of Underground Ore Mining, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Oleg V. Ivanov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

Tamara A. Lyalina – Assistant of Department of Underground Ore Mining, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: lyalina@mi-perm.ru

Egor A. Nesterov – Candidate of Technical Sciences, Researcher of Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

Article info

Received: 18.06.2021

Revised: 12.07.2021

Accepted: 13.07.2021