

УДК 622.363.2

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2024

**Геологическая модель механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сylvинито-карналлитовой зоны на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей****С.С. Андрейко<sup>1</sup>, Т.А. Лялина<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Российская Федерация, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а)<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)**Geological Model of the Mechanism of Formation of Gas-Dynamic Hazard Centers in the Rocks of the Sylvinite-Carnallite Zone at the Verkhnekamskoye Potassium-Magnesium Salt Deposit****Sergei S. Andreiko<sup>1</sup>, Tamara A. Lialina<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 15.03.2024. Принята / Accepted: 30.09.2024. Опубликовано / Published: 31.10.2024

**Ключевые слова:**

геолого-разведочные скважины, нефтяные месторождения, нефтеперспективные структуры, газовыделения, газодинамические явления, зоны замещения, сylvинитизация карналлитов, природная подработка, расслоения, газонаполненные трещины, мулды движения, краевая часть.

В процессе проведения исследований разработана геологическая модель механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сylvинито-карналлитовой зоны на Верхнекамском месторождении калийных солей. При образовании в породах сylvинито-карналлитовой зоны очагов газодинамической опасности источниками газонасыщенных флюидов являлись газонасыщенные водные растворы, в том числе и флюиды из нефтеносных месторождений, расположенных в толще пород, подстилающих соляную залежь. Пути восходящей миграции газонасыщенных флюидов могли быть: разрывные тектонические нарушения, надвиги, сквозные зоны повышенной трещиноватости и зоны проницаемости над склонами рифогенных структур. Миграция газонасыщенных флюидов в соляную толщу из подстилающих пород происходила в субвертикальном направлении (снизу вверх). В породах сylvинито-карналлитовой зоны латеральное направление миграции газонасыщенных водных растворов преобладало над вертикальным вследствие ярко выраженной анизотропии фильтрационных свойств. Флюиды в латеральном направлении двигались по многочисленным глинистым слоям прослойкам и межзерновому пространству. В процессе миграции газонасыщенных флюидов в породах сylvинито-карналлитовой зоны происходили эпигенетические преобразования соляных пород: замещение сylvинитов каменной солью, сylvинитизация карналлитов, образование пород смешанного состава (сylvинит + карналлит). При сylvинитизации карналлитов миграция агрессивных газонасыщенных флюидов происходила в направлении от зон замещения сylvинитов каменной солью и пестрых сylvинитов в направлении развития карналлитовых пород. Пестрый сylvинит как продукт эпигенетических процессов в породах сylvинито-карналлитовой зоны вблизи контакта с карналлитовой породой обладает повышенной пористостью и пониженной прочностью. Закономерности распределения свободных газов в пластах сylvинито-карналлитовой зоны обусловлены работой трехзонной функциональной системы галогенного метасоматоза. Разложение карналлита сопровождалось образованием дефицита твердой фазы, величина которого могла изменяться в широком диапазоне значений и достигать почти 70 %. На участках полного разложения карналлита в породах сylvинито-карналлитовой зоны из-за дефицита твердой фазы формировались пустоты. Эти пустоты по аналогии можно считать процессом природной «подработки» вышележащих пластов и «надработки» нижележащих. Эффект природной «подработки» сопровождался формированием в подработанной части сylvинито-карналлитовой зоны за счет разгрузки от горного давления и сдвига пород систем трещин, через которые происходила миграция свободных газов в подработанные пласты. В результате в породах сylvинито-карналлитовой зоны под воздействием природной «подработки» в зоне разгрузки от вертикальных напряжений за счет разрушений и расслоений по контактам слоев и пластов, а также по глинистым прослойкам создаются благоприятные условия для фильтрации в нее свободных газов.

**Keywords:**

exploration wells, oil fields, oil-promising structures, gas emissions, gas-dynamic phenomena, replacement zones, carnallites sylvinitization, natural undermining, stratification, gas-filled cracks, displacement troughs, marginal part.

In the course of the research, a geological model of the mechanism of formation of gas-dynamic hazard centers in the rocks of the sylvinite-carnallite zone at the Verkhnekamskoye potassium salt deposit was developed. During the formation of gas-dynamic hazard centers in the rocks of the sylvinite-carnallite zone, the sources of gas-saturated fluids were gas-bearing aqueous solutions, including fluids from oil-bearing deposits located in the thickness of rocks underlying the salt deposit. The paths of ascending migration of gas-saturated fluids could be: rupture tectonic faults, thrusts, through zones of increased fracturing and permeability zones above the slopes of reef structures. Migration of gas-saturated fluids into the salt thickness from the underlying rocks occurred in a subvertical direction (from the bottom up). In the rocks of the sylvinite-carnallite zone, the lateral direction of migration of gas-saturated aqueous solutions prevailed over the vertical one due to the pronounced anisotropy of filtration properties. Fluids moved laterally along numerous clay layers, interlayers and intergranular space. During the migration of gas-saturated fluids in the rocks of the sylvinite-carnallite zone, epigenetic transformations of salt rocks occurred: replacement of sylvinites with rock salt, sylvinitization of carnallites, formation of rocks of mixed composition (sylvinite + carnallite). During sylvinitization of carnallites, the migration of aggressive gas-saturated fluids occurred in the direction from the zones of replacement of sylvinites with rock salt and variegated sylvinites in the direction of development of carnallite rocks. Variegated sylvinite as a product of epigenetic processes in rocks of the sylvinite-carnallite zone near the contact with carnallite rock has increased porosity and decreased strength. The patterns of free gas distribution in the layers of the sylvinite-carnallite zone are determined by the work of the three-zone functional system of halogen metasomatism. The decomposition of carnallite was accompanied by the formation of a deficit of the solid phase, the value of which could vary in a wide range of values and reach almost 70%. In areas of complete decomposition of carnallite in rocks of the sylvinite-carnallite zone, voids were formed due to the deficit of the solid phase. These voids, by analogy, can be considered a process of natural "undermining" of the overlying layers and "overmining" of the underlying ones. The effect of natural "undermining" was accompanied by the formation of crack systems in the undermining part of the sylvinite-carnallite zone due to unloading from rock pressure and rock displacement, through which free gases migrated into the undermining layers. As a result, in the rocks of the sylvinite-carnallite zone, under the influence of natural "undermining", in the zone of unloading from vertical stresses due to destruction and stratification at the contacts of layers and layers, as well as along clay interlayers, favorable conditions are created for the filtration of free gases into it.

© Андрейко Сергей Семенович – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Геотехнологические процессы и рудничная газодинамика» (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: ssa@mi-perm.ru). Контактное лицо для переписки.

© Лялина Тамара Александровна – старший преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» (тел.: +007 (909) 731 56 64, e-mail: talyalina@pstu.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). The contact person for correspondence.

© Tamara A. Lialina (Author ID in Scopus: 57197872777) – Senior Lecturer at the Department of Mineral Deposits Development (tel.: +007 (909) 731 56 64, e-mail: talyalina@pstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Андрейко, С.С. Геологическая модель механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сylvинито-карналлитовой зоны на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей / С.С. Андрейко, Т.А. Лялина // Недропользование. – 2024. – Т.24, №4. – С.260–269. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.10

Please cite this article in English as:

Andreiko S.S., Lialina T.A. Geological model of the mechanism of formation of gas-dynamic hazard centers in the rocks of the sylvinite-carnallite zone at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2024, vol.24, no.4, pp.260-269. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.4.10

**Введение**

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС), расположенное на территории Пермского края, занимает второе место по запасам калийных солей после крупнейшего в мире Саскачеванского месторождения калийных солей. Толща соляных пород имеет форму линзы площадью до 8,2 тыс. км<sup>2</sup>. Площадь основной многопластовой залежи калийно-магниевого солей составляет 3,7 тыс. км<sup>2</sup> [1]. Вопросы генезиса и строения Верхнекамского месторождения изучались многими известными учеными и нашли отражение в ряде работ [1–4]. Геологическая ценность месторождения возрастает за счет наличия в подсолевых породах нефтеносных структур.

Калийная залежь Верхнекамского месторождения представлена серией продуктивных пластов, разделенных пластами каменной соли (рис. 1). По составу продуктивных пластов залежь делится на сальвинитовую и сальвинито-карналлитовую зоны. Сальвинитовая зона средней мощностью 20 м сложена чередующимися пластами красных сальвинитов (КрIII, КрII и КрI), полосчатого сальвинита (А) и разделяющих их пластов каменной соли (КрIII – КрII, КрII – КрI и КрI – А). Сальвинито-карналлитовая зона средней мощностью 60 м сложена чередующимися пластами калийно-магниевого 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 сальвинито-карналлитовой зоны,

непосредственно на пласте полосчатого сальвинита А, залегают пласт Б.

Наряду с запасами калийных солей в пределах территории Верхнекамского месторождения в подсолевых отложениях на глубинах 1600–2300 м открыто 14 месторождений нефти и 17 нефтеперспективных структур (нижнего и среднего карбона и верхнего девона) (см. рис. 1) [5].

Известно, что газовый фактор играет основную роль в иницировании и процессе протекания газовой выделений и газодинамических явлений при геолого-разведочных работах. Свободные газы в соляных породах находятся под большим давлением, достигающим иногда величины до 8,0 МПа [6]. Первые сведения о газовой выделении на Верхнекамском месторождении калийных солей при бурении скважин относятся к 1925 г. При вскрытии солей скважинами газовой выделении проявляются по-разному. Иногда наблюдается лишь вспенивание промывочной жидкости и слышен слабый шум в скважине. В других случаях газовой выделение происходит бурно, сопровождаясь выбросами раствора и шлама из скважин на высоту до нескольких десятков метров, приводя в отдельных случаях к вспышкам горючих газов и пожарам в буровом помещении. Особо бурные выбросы газов имеют место при проходке пластов сальвинито-карналлитовой зоны от Е до В и чаще всего наблюдаются в скважинах, расположенных в присводовых частях и на крыльях антиклинальных структур. Продолжительность газовой выбросов (с учетом пауз) может колебаться от долей часа до нескольких суток и даже недель.

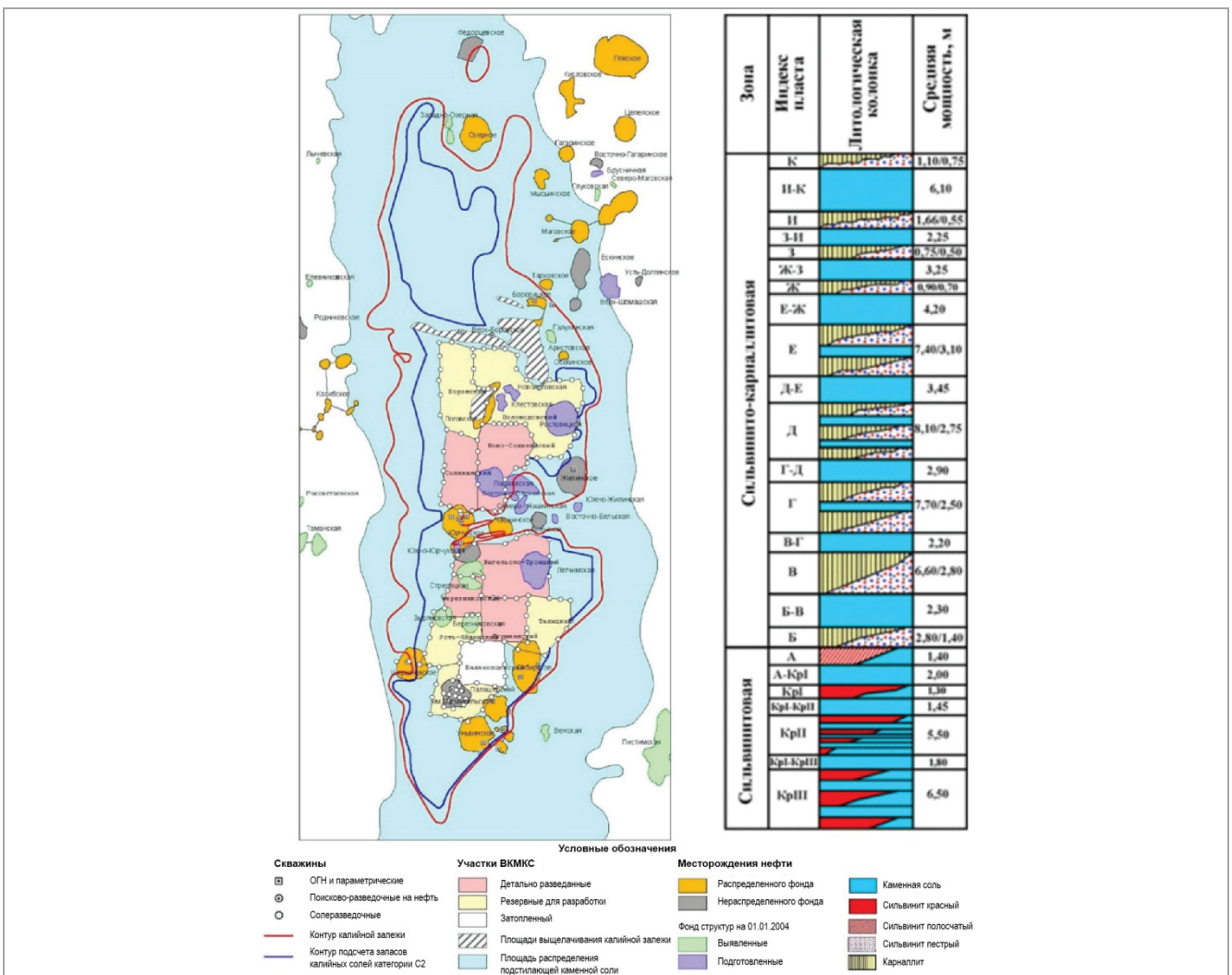


Рис. 1. Совмещенный план Верхнекамского месторождения калийных солей, нефтяных месторождений и перспективных структур

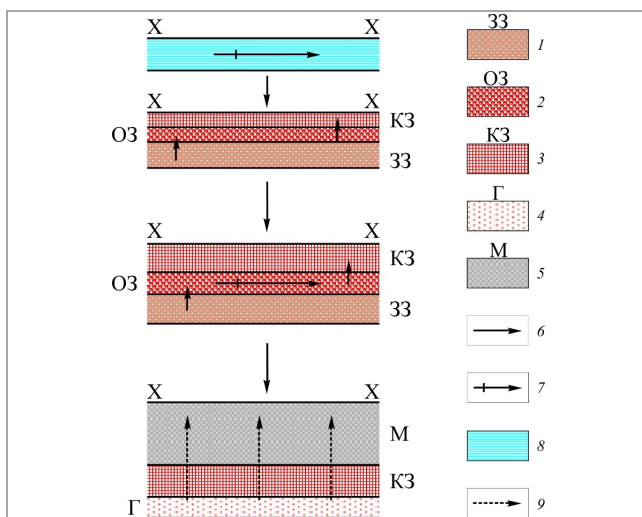


Рис. 2. Модельная элементарная схема трехзонных функциональных систем метасоматоза при образовании очагов ГДЯ: П – проводник; Г – трещина; 1 – забойная зона; 2 – обменная зона; 3 – конденсационная зона; 4 – свободный газ; 5 – метасоматит и интерсоматит; 6 – массообмен между забойной и конденсационной зонами через обменную; 7 – продольный массообмен вдоль обменной зоны; 8 – каменная соль с «коржом» и галопелитовыми слоями и прослойками; 9 – направление миграции свободных газов в процессе метасоматоза; ТЗ – транзитная зона

Сведения о газовыделениях, зафиксированных при бурении скважин на территории Верхнекамского месторождения калийных солей, приведенные в архивных данных и отчетах о поисково-оценочных работах, были сведены в таблицу и проанализированы. Всего было собрано 410 событий более чем в 180 скважинах. Наибольшее количество газопроявлений зафиксировано на Половодовском, Усть-Яйвинском, Боровском и Палашерском участках ВКМКС [7].

Следует отметить, что для повышения достоверности прогноза газодинамической опасности и эффективности профилактических мероприятий по ее предотвращению необходимо учитывать геологические условия формирования скоплений свободных газов и очагов газодинамических явлений, в том числе и возможную генетическую связь с эпигенетическими процессами в калийной залежи и нефтегазоносными нижележащими отложениями, которая проявляется в горных выработках калийных рудников в виде следов нефтепроявлений и наличия на отдельных участках месторождения в соляных породах свободных газов с аномально высоким суммарным содержанием тяжелых углеводородных газов, достигающим 20 % и более.

В настоящее время нет модели геологического механизма возникновения очагов газовых скоплений и газодинамических явлений в породах сильвинито-карналлитовой зоны выше пласта В в процессе эпигенетических преобразований пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей и возможной миграции газонасыщенных флюидов в соляную толщу из нефтегазоносных нижележащих отложений.

Методы моделирования и прогноза газодинамической опасности детально описаны в работах как отечественных, так и зарубежных авторов [8–34]. Первые очаги ГДЯ рассмотрены в работе М.П. Фивега [35]. Их рассмотрение базируется на точке зрения, основанной на представлениях галокинеза и отвергающих существование разрывных дислокаций. Очаги ГДЯ в пласте В д.т.н., чл.-корр. РАН

Н.М. Проскуряков относил к зонам дробления [36, 37]. Контуры геологической модели образования очагов газодинамических явлений в соляных породах были сформулированы д.г.-м.н. А.И. Кудряшовым и в дальнейшем развиты д.т.н. С.С. Андрейко [1]. Но при этом в построениях геологической модели авторами рассматривались только промышленные пласты КрП или АБ. Геологические механизмы формирования очагов скопления свободных газов и очагов газодинамических явлений в породах сильвинито-карналлитовой зоны (за исключением пласта В) Верхнекамского месторождения калийных солей до настоящего времени вообще не рассматривались.

В связи с этим разработка геологической модели механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сильвинито-карналлитовой зоны Верхнекамского месторождения калийных солей является актуальной задачей. На основе этой модели в дальнейшем планируется разработать методы прогнозирования зон газодинамической опасности в породах сильвинито-карналлитовой зоны Верхнекамского месторождения калийных солей, что позволит повысить безопасность ведения геолого-разведочных работ с поверхности и из горных выработок в калийных рудниках.

#### Методы исследования

Для разработки научно обоснованной геологической модели механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сильвинито-карналлитовой зоны необходимо установить источники газонасыщенных флюидов, пути миграции флюидов в соляную толщу и механизм образования газонасыщенных зон.

Для условий Верхнекамского месторождения калийных солей наиболее полно механизму образования газонасыщенных зон в процессе эпигенетических преобразований соляных пород, в частности сильвинитизации карналлитов, отвечает модельная схема трехзонной системы метасоматоза, представленная на рис. 2. Свободный газ в таком случае будет аккумулироваться в микрополостях и пустотах между метасоматитом и внешней стенкой проводника водных растворов. На основе работы модельной схемы трехзонной системы метасоматоза проводились построения геологической модели механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сильвинито-карналлитовой зоны.

#### Геологическая модель механизма образования газонасыщенных зон

В условиях Верхнекамского месторождения калийных солей механизм образования газонасыщенных зон в породах сильвинито-карналлитовой зоны соляной толщи, целесообразно рассматривать как единый процесс тектогенеза, миграции газонасыщенных флюидов, эпигенетических преобразований пород сильвинито-карналлитовой зоны, трещинообразования и расслоений в процессе природной «подработки» и аккумуляции газов (формирование газонасыщенных зон – зон газодинамической опасности при ведении геолого-разведочных и горных работ) на участках природной «подработки». В предлагаемой геологической модели механизма образования газонасыщенных зон, как уже указывалось ранее, источниками газонасыщенных флюидов могли быть пакки глинисто-ангидритовых



пород (источники газонасыщенных водных растворов), а также нефтеносные месторождения и перспективные нефтеносные структуры в подстилающей толще пород [38]. Формирование газонасыщенных зон в породах сальвинито-карналлитовой зоны месторождения сопровождалось весьма сложным процессом галогенного метасоматоза, сопровождавшегося эпигенетическими преобразованиями пород и выделением растворенных газов в свободную фазу. Химическое воздействие подземных вод является наиболее мощным фактором эпигенеза соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей. Среди подземных вод в условиях месторождения различают надсолевые, внутрисолевые и подсолевые воды [1]. Надсолевые воды являются инфильтрационными, и в механизме образования газонасыщенных зон их участие маловероятно. Даже наоборот, проникая внутрь соляной толщи, инфильтрационные воды играли деструктивную роль, разрушая газонасыщенные зоны в пределах крупных положительных структур Верхнекамского месторождения.

Количество внутрисолевых вод в современной залежи невелико, а сами воды находятся в физико-химическом равновесии с составом вмещающих пород. В то же время наблюдается связь между интенсивностью деформации солей и их вторичными преобразованиями (осветление, перекристаллизация, частичное замещение), что логичнее всего объясняется взаимодействием солей с внутрисолевыми водными растворами. Наиболее вероятным источником водных растворов внутри соляной толщи являются пакки глинисто-ангидритовых пород. Известно, что подсолевой гидрогеологический этаж содержит в себе шесть водоносных комплексов: нижнепермско-верхнекамменноугольный карбонатный; московский; башкирско-верхневизейский; средне-нижневизейский терригенный, турнейско-верхнедевонский карбонатный и верхне-среднедевонский терригенный [1, с. 79]. Подсолевые воды в пределах Соликамской впадины, по данным ряда исследователей, являются газонасыщенными и при наличии путей восходящей миграции также могли войти в контакт с солями.

Пути восходящей миграции могли быть: разрывные тектонические нарушения, которые образовались в результате дифференцированных движений подсолевого ложа; надвиги, образованные в результате односторонне направленного с востока на запад тектонического давления, направленные снизу вверх и с востока на запад; сквозные зоны повышенной трещиноватости, образовавшиеся в ходе тектонического развития Соликамской впадины над стыками блоков кристаллического фундамента в осадочном чехле, которые могли пронизывать и соляную залежь [1, 39, 40]. Не вступая в дискуссии о путях восходящей миграции агрессивных газонасыщенных водных растворов с авторами указанных научных работ, принимаем, что путями восходящей миграции газонасыщенных флюидов в соляную толщу могли быть все вышеперечисленные проницаемые зоны.

Следует отметить, что путями восходящей миграции газонасыщенных флюидов из нефтяных месторождений и нефтеперспективных структур могли служить проницаемые зоны над рифогенными структурами. Известно, что зоны замещения на калийных пластах в плане тяготеют к склонам рифогенных структур [41]. В настоящее время выдвинута гипотеза развития иницирующих трещин над склоном рифа и проведено геомеханическое моделирование методом граничных элементов в варианте «разрывных смещений» [43, 44]. В результате исследований была определена область

распространения трещин над рифогенными структурами, которая составляет около 2000 м и достигает пород соляной толщи. Таким образом доказано, что над рифогенными структурами формируются проницаемые зоны, которые могут служить путями миграции нефтяных флюидов в соляную толщу.

Миграция газонасыщенных флюидов в соляную толщу происходила в субвертикальном направлении (снизу вверх) в породах подстилающей толщи. Непосредственно в породах соляной толщи вследствие ярко выраженной анизотропии фильтрационных свойств соленосной толщи латеральное направление миграции газонасыщенных флюидов преобладало над вертикальным, движение флюидов происходило по напластованию. В этом случае флюиды двигались по глинистым прослойкам, в том числе по пласту маркирующей глины и межзерновому пространству.

Следует особо отметить важную роль зон замещения (галитизации) сальвинитовых и карналлитовых пластов в геологическом механизме образования газонасыщенных зон в породах сальвинито-карналлитовой зоны. Замещение сальвинитов и карналлитов каменной солью, образование пестрых сальвинитов, смешанных солей (сальвинит + карналлит) и образование газонасыщенных зон в породах сальвинито-карналлитовой зоны следует рассматривать как единый процесс, происходящий в результате миграции через толщу и в толще калийно-магниевого флюидов, представленных газонасыщенными водными растворами или флюидами нефтяных месторождений (нефтеперспективных структур). В соответствии с принятой типизацией зоны замещения (галитизации) сальвинитовых пластов подразделяются на экранированные, открытые и сквозные [39, с.156–160]. Экранированные зоны замещения характеризуются тем, что непосредственно над зоной замещения промышленных пластов залегают один или несколько пластов сальвинито-карналлитовой зоны, сложенных пестрыми сальвинитами. К данному типу относятся мелкие, средние и крупные зоны замещения. Открытый тип зон замещения характеризуется расположением над зоной замещения промышленных пластов всех пластов сальвинито-карналлитовой зоны, представленных пестрыми сальвинитами. Сквозной тип зон замещения характеризуется замещением каменной солью всех пластов сальвинитовой и сальвинито-карналлитовой зон при полноте их разреза, в котором присутствует пласт маркирующей глины и покровная каменная соль. Основным отличием внутреннего строения зоны замещения сквозного типа предыдущих двух типов является замещение каменной солью всех пластов сальвинито-карналлитовой зоны. Как видно из характеристик рассмотренных зон замещения, внешняя и внутренняя структура всех зон замещения принципиально не отличаются друг от друга, что свидетельствует о едином эпигенетическом процессе образования таких зон. Основное отличие будет заключаться в масштабах эпигенетических процессов по вертикали и латерали в породах сальвинито-карналлитовой зоны при формировании газонасыщенных зон.

Рассмотрим геологический механизм образования газонасыщенных зон в породах сальвинито-карналлитовой зоны при миграции газонасыщенных водных растворов в направлении от зоны замещения в сторону развития карналлитовых пород. При этом будем исходить из частного случая, когда зона замещения представлена экранированным типом как наиболее распространенным на месторождении. В качестве примера эпигенетических изменений карналлитовых пород сальвинито-карналлитовой зоны

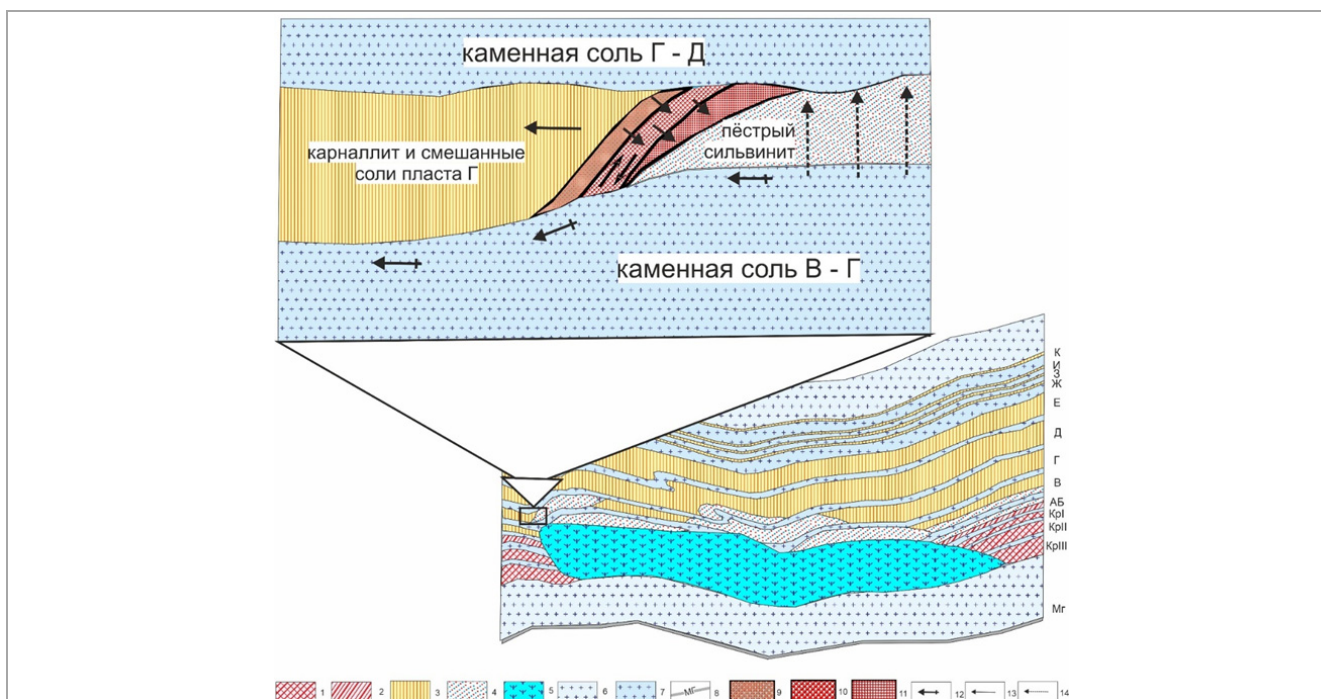


Рис. 3. Модельная схема трехзонной функциональной системы метасоматоза при латеральной миграции газонасыщенных флюидов от экранированной зоны замещения в условиях пласта Г при образовании газонасыщенных зон: 1 – сильвинит красный; 2 – полосчатый сильвинит; 3 – карналлит; 4 – пестрый сильвинит; 5 – каменная соль замещения; 6 – покровная и подстилающая каменная соль; 7 – каменная соль междупластий; 8 – маркирующий горизонт; 9 – конденсационная зона; 10 – обменная зона; 11 – забойная зона; 12 – массообмен между забойной и конденсационной зонами через обменную, обменной зоны с транзитной; 13 – продольный массообмен; 14 – направление миграции свободных газов в процессе метасоматоза

по механизму галогенного метасоматоза рассмотрим карналлитовый пласт Г. Следует отметить, что при воздействии газонасыщенных водных растворов на другие карналлитовые пласты (Д, Е, Ж и т.д.) при их латеральной миграции от зон замещения в направлении карналлитовых пород механизм эпигенетического изменения пород будет аналогичен рассмотренному для пласта Г. Модельная схема трехзонной функциональной системы галогенного метасоматоза в условиях карналлитового пласта Г представлена на рис. 3. Вследствие высокой проницаемости глинисто-ангидритовых прослоев, агрессивные растворы проникали, в первую очередь, по соленосным глинам и, следовательно, сильвинитизация карналлитовых пород пласта Г начиналась преимущественно сверху. При наличии слоев и прослоек соленосных глин в почве пласта Г сильвинитизация могла происходить и снизу, как показано на рис. 3. Забойная зона трехзонной функциональной системы метасоматоза двигалась как вниз от проводника, так и вперед по направлению движения водного раствора. Разложение карналлита сопровождалось дефицитом твердой фазы, так как агрессивность водного раствора относительно карналлита равняется примерно единице [1, с. 304–308; 41]. В результате этого, вновь образованная порода – пестрый сильвинит – вблизи контакта с карналлитовой породой обладает повышенной пористостью. На участках полного разложения карналлита пласта Г структурные связи между зернами минералов под воздействием литостатического давления и продолжающейся миграции растворов восстанавливались, и порода становилась монолитной, практически лишенной крупных пор. Таким образом, создавался своего рода «газовый барьер», препятствующий миграции газов в направлении, противоположном движению фронта сильвинитизации карналлита пласта Г. По мере продвижения фронта сильвинитизации (забойной, обменной и конденсационной зон системы галогенного

метасоматоза), участки с различной пористостью перемещались в том же направлении, что и мигрирующие растворы, – в направлении карналлитовых пород пласта Г. Как показывает практика ведения горных работ на промышленном пласте АБ, наибольшее количество газовыделений и газодинамических явлений происходило на участках развития более пористых пород при «затухании» процесса сильвинитизации, т.е. вблизи контакта пестрого сильвинита с карналлитовой породой [1, с. 318–321; 45, с. 110–118]. Этим и объясняется смещение максимума частоты газодинамических явлений в сторону карналлитовых пород.

Следует отметить еще один очень важный нюанс в механизме образования газонасыщенных зон в породах сильвинито-карналлитовой зоны. Как уже указывалось выше, при наличии слоев и прослоек соленосных глин в почве пласта Г сильвинитизация могла происходить и снизу. При этом процесс галогенного метасоматоза мог распространяться не на всю мощность карналлитового пласта, а только на нижнюю часть пласта. Вследствие этого по вертикали в разрезе пласта на границе с карналлитовой породой формировались газонасыщенные зоны. Аналогичным образом могли формироваться газонасыщенные зоны и в других мощных карналлитовых пластах сильвинито-карналлитовой зоны. Иллюстрацией высказанного положения является представленный на рис. 4 случай газодинамического явления интенсивностью 180 т, происшедшего на руднике БКПРУ-2 15 марта 1973 г.

Как видно из рис. 4, мощное газодинамическое явление произошло из кровли выработки шириной 3,0 м. При этом пласт В, из которого произошло газодинамическое явление, представлен смешанным составом: нижняя часть пласта представлена пестрыми сильвинитами, верхняя – карналлитовой породой. Подобные случаи газодинамических явлений неоднократно происходили в калийных рудниках на Верхнекамском месторождении.

Весьма важным является и геомеханический аспект формирования газонасыщенных зон в породах сильвинито-карналлитовой зоны в процессе галогенного метасоматоза при сильвинитизации карналлитовых пластов. Забойная зона трехзонной функциональной системы метасоматоза двигалась как вверх от проводника, так и вперед по направлению движения водного раствора. Разложение карналлита сопровождалось дефицитом твердой фазы, так как агрессивность водных флюидов относительно карналлита равняется примерно единице. Рассмотрим геомеханические процессы, сопровождавшие сильвинитизацию карналлитовых пластов, на примере карналлитового пласта Г. На участках полного разложения карналлита пласта Г из-за дефицита твердой фазы формировались пустоты, т.е. мощность пласта Г при сильвинитизации значительно уменьшалась, примерно в 3 раза при средних значениях мощностей с 7,70 до 2,50 м. Формирование таких природных пустот создавало известный в горном деле эффект подработки свиты пластов выше пласта Г, подвергшегося сильвинитизации. В связи с тем что в процессе сильвинитизации карналлитовых пластов участвуют только природные процессы, в данном случае под природной подработкой будем понимать изменение мощности карналлитовых пластов в процессе сильвинитизации.

В исследованиях о влиянии подработки на калийные пласты можно выделить два основных направления. Первое направление связано с исследованием сдвижения горных пород и характера перераспределения горного давления вокруг очистных выработок подрабатываемого пласта. Второе направление связано собственно с исследованием процессов, связанных с изменением газодинамических характеристик подрабатываемых калийных пластов. До настоящего времени в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей исследования закономерностей изменения газодинамических свойств калийных пластов при их природной подработке не проводились. Следовательно, и участие геомеханических процессов в механизме формирования газонасыщенных зон в породах сильвинито-карналлитовой зоны до настоящего времени не исследовалось.

Известно, по аналогии с техногенной подработкой, что процесс сильвинитизации карналлитовых пластов будет сопровождаться перераспределением горного давления, в результате чего карналлитовые пласты сильвинито-карналлитовой зоны подвергались воздействию различных силовых полей. Рассмотрим эти процессы на примере сильвинитизации карналлитового пласта Г. В области влияния движущегося фронта сильвинитизации пласта Г в зависимости от характера деформирования и перераспределения горного давления формировались следующие характерные зоны: не подверженная влиянию горных работ (зона I); повышенного горного давления (зона II); разгрузки (зона III); восстановленного геостатического давления (зона IV) (рис. 5).

Каждый участок карналлитовых пластов, расположенных по геологическому разрезу над пластом Г, при движении фронта сильвинитизации по пласту Г последовательно оказывался в каждой зоне, что сопровождалось многократным изменением вида их напряженного состояния: состояние гидростатического сжатия в зоне, не подверженной воздействию природной подработки; переход в состояние неравнокомпонентного сжатия, связанный с ростом нормальных к напластованию напряжений в зоне опорного давления; уменьшение бокового распора на границе зоны опорного

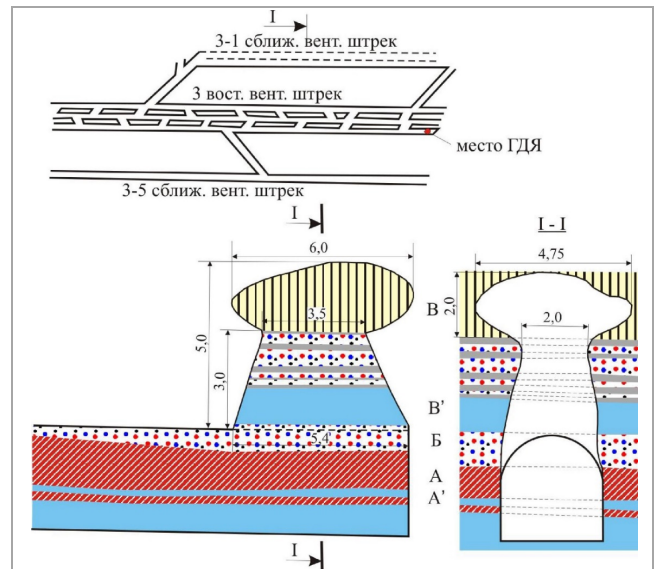


Рис. 4. Газодинамическое явление на пласте АБ (рудник БКПРУ-2, 3-я восточная панель, 3-1 восточный выемочный штрек)

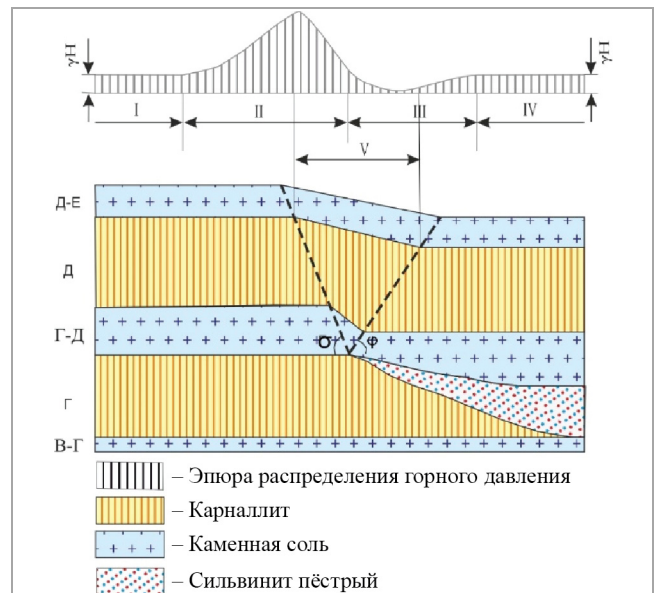


Рис. 5. Зоны, сформировавшиеся в результате сильвинитизации (природной подработки) карналлитового пласта Г: I – неподверженная влиянию горных работ; II – повышенного горного давления; III – разгрузки; IV – восстановленного геостатического давления; V – изгиба;  $\sigma$ ,  $\varphi$  – соответственно внешний и внутренний граничные углы полных сдвижений при сильвинитизации карналлитового пласта Г

явления и разгрузки; изгиб и связанное с ним появление растягивающих напряжений; разгрузка от горного давления; восстановление горного давления и переход в состояние гидростатического сжатия.

Деформирование карналлитовых пластов, расположенных над пластом Г, в зоне опорного давления может быть рассмотрено с позиций теории Гриффитса, которая в своей качественной части сводится к тому, что всякое тело содержит внутри себя множество хаотически расположенных дефектов. При этом многочисленные контакты между литологическими разностями пород, слои и прослойки глин в карналлитовых пластах можно рассматривать как включения. В условиях неравнокомпонентного сжатия на контуре этих дефектов возникают растягивающие напряжения, которые и



обуславливают разрушение тела. В условиях трехосного неравнокомпонентного сжатия наблюдаются большие пластические деформации тела, обусловленные развитием внутренней трещиноватости и расслоений, которые сопровождаются увеличением объема и газопроницаемости. При этом интенсивность процесса будет тем выше, чем больше разница между нормальными составляющими тензора напряжений, т.е. уменьшение величины бокового распора на границе зоны опорного давления и зоны разгрузки будет способствовать нарушению исходной структуры карналлитовых пластов в результате развития микродефектов.

Особый интерес с точки зрения нарушения структуры пород представляет деформирование карналлитовых пластов при нахождении в зоне изгиба, включающей в себя часть зон повышенного горного давления и разгрузки (рис. 5, зона IV). В пределах этой зоны протекают активные стадии процессов сдвижения, деформирования массива и перераспределения горного давления. При этом могут образовываться самые различные сочетания главных напряжений, вплоть до появления растягивающих усилий. Кроме того, эта зона характеризуется и ростом касательных напряжений. В зоне изгиба создаются условия для увеличения трещиноватости и образования расслоений, подрабатываемых при сальвинитизации пласта Г карналлитовых пластов в результате сдвига и растяжения по плоскостям природных неоднородностей и вновь образовавшейся трещиноватости.

Изменению структуры карналлитовых пластов при их природной подработке будет также способствовать и их газонасыщенность, которая приводит к увеличению деформаций как в упругой, так и в пластической областях, а также к понижению пределов прочности, текучести и работы разрушения.

В соответствии с изложенными положениями природная подработка карналлитовых пластов, расположенных над пластом Г, при его сальвинитизации может быть представлена как последовательная смена видов напряженного состояния, каждому из которых соответствует определенная форма деформирования:

- трещинообразование при переходе пород от состояния гидростатического сжатия в состояние неравнокомпонентного объемного сжатия в результате нагружения в зоне опорного давления;
- сдвиг по природным плоскостям ослабления и вновь образовавшейся трещиноватости под действием касательных напряжений при переходе от зоны опорного давления к зоне разгрузки;
- трещинообразование, раскрытие трещин и расслоение по контактам слоев, глинистым слоям и прослойкам под воздействием растягивающих напряжений при изгибе.

Особенностью деформирования карналлитовых пластов при природной подработке в процессе сальвинитизации в зонах повышенного горного давления на границе фронта сальвинитизации является то, что оно протекает при длительном действии нагрузки. При этом весь период деформирования можно разделить на два этапа:

- при непосредственном движении фронта сальвинитизации по карналлитовому пласту;
- в результате длительного пребывания при природной подработке карналлитовых пластов в зоне повышенного горного давления.

Характер формирующейся при этом структуры карналлитовых пластов после природной подработки определяется совокупностью деформаций, имевших место на этих этапах. На первом этапе при нахождении карналлитовых пластов в зоне влияния движущейся

волны опорного давления пластические деформации пород обусловлены ростом нормальных к напластованию напряжений. Основной формой пластических деформаций при этом будет образование новых систем микро- и макротрещин вследствие развития внутренних дефектов. На втором этапе в результате длительного действия повышенных напряжений развиваются деформации пластичности и ползучести, происходит релаксация напряжений. В зонах разгрузки формируются области расслоений карналлитовых пластов по контактам литологических разностей пород, глинистым прослойкам и слоям.

Таким образом, в процессе природной подработки карналлитовых пластов при сальвинитизации создаются предпосылки для изменения первоначальной структуры пород, заключающиеся в появлении новых систем микро- и макротрещин, а также расслоений по контактам слоев, глинистым прослойкам и слоям. При сальвинитизации нескольких карналлитовых пластов, например, Б, В и Г, эти эффекты усиливаются. Этот процесс можно определить, как геомеханическую деструкцию карналлитовых пластов сальвинито-карналлитовой зоны под влиянием природной подработки при сальвинитизации карналлитовых пластов. В результате природной подработки в пределах области влияния фронтов сальвинитизации в карналлитовых пластах формируются участки с различной структурой и, следовательно, с различными газодинамическими характеристиками пород.

Так как деформирование карналлитовых пластов под воздействием природной подработки длится длительное геологическое время, всякая остановка границы фронта сальвинитизации оказывается источником возникновения краевой части мулды сдвижения. В краевых частях мульд сдвижения карналлитовые пласты будут подвергаться максимальным деформациям с развитием трещиноватости и расслоениями по контактам слоев, глинистым слоям и прослойкам, следовательно, фильтрационные и коллекторские свойства карналлитовых пластов в этих зонах будут играть весьма важную роль с точки зрения возможности формирования газонасыщенных зон. На этих участках в карналлитовых пластах наиболее вероятно появление газодинамических аномалий, т.е. участков, отличающихся степенью нарушенности пород, их газонасыщенностью и газодинамическими характеристиками.

В карналлитовых пластах, подработанных при сальвинитизации, в зоне разгрузки от вертикальных напряжений за счет разрушений и расслоений по контактам слоев, глинистым слоям и прослойкам создаются благоприятные условия для фильтрации в нее свободных газов. Таким образом, при природной подработке в области пониженных напряжений в результате расслоений пород по контактам слоев, глинистым слоям и прослойкам образуются квазиизолированные газонаполненные области. В результате в зоне пониженных напряжений свободный газ скапливается в количествах, превышающих его содержание в нетронутом массиве. При этом дополнительные сжимающие напряжения, действующие по другую сторону от границы, играют роль своеобразного барьера, препятствующего дальнейшей фильтрации газа и более равномерного его распространения по подработанному массиву. В силу неустойчивого равновесия системы газонаполненных трещин повышение давления газа в них может происходить импульсно, достигая при этом весьма значительных величин. По аналогичному механизму могло происходить формирование газонасыщенных зон в пластах сальвинито-карналлитовой зоны в процессе

сильвинитизации других карналлитовых пластов, одного или нескольких одновременно.

### Заключение

Геологическая модель механизма образования очагов газодинамической опасности в породах сильвинито-карналлитовой зоны на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей может быть представлена следующим образом:

1. Источниками газонасыщенных флюидов являлись газоносные водные растворы из подстилающих соляную толщу пород, в том числе из нефтяных месторождений и нефтеперспективных структур. Пути восходящей миграции газонасыщенных флюидов в соляную толщу могли быть разрывные тектонические нарушения, надвиги, сквозные зоны повышенной трещиноватости и зоны проницаемости над склонами рифов.

2. Миграция газонасыщенных флюидов в соляную толщу через подстилающую толщу пород происходила преимущественно в субвертикальном направлении (снизу вверх). Непосредственно в породах сильвинито-карналлитовой зоны латеральное направление миграции газонасыщенных флюидов преобладало над вертикальным. В породах сильвинито-карналлитовой зоны газонасыщенные флюиды двигались по глинистым слоям и прослойкам, а также по межзерновому пространству.

3. Замещение сильвинитов и карналлитов каменной солью, образование пестрых сильвинитов, смешанных солей (сильвинит + карналлит) и образование газонасыщенных зон в породах сильвинито-карналлитовой зоны следует рассматривать как единый процесс, происходящий в результате миграции через толщу и в толще калийно-магниевых солей газонасыщенных флюидов, представленных газонасыщенными водными растворами или флюидами нефтяных месторождений (нефтеперспективных структур).

4. Газонасыщенные флюиды по путям восходящей миграции проникали в сильвинито-карналлитовую зону и двигались в латеральном направлении от зон замещения в направлении карналлитовых пород. Латеральная миграция газонасыщенных флюидов по глинистым слоям и прослойкам, а также межзерновому пространству карналлитовых пород сопровождалась эпигенетическими изменениями – сильвинитизацией карналлитовых пластов по механизму галогенного метасоматоза, представляющего собой работу трехзонной функциональной системы, состоящей из забойной, обменной и конденсационной зон.

5. Порода, образованная при сильвинитизации карналлитов, – пестрый сильвинит вблизи контакта с карналлитовой породой как по латерали, так и по вертикали – обладала повышенной пористостью. В таких породах происходила аккумуляция свободных газов, выделившихся из газонасыщенных флюидов при изменении термобарических условий и эффекта «высаливания» газов при росте минерализации водных растворов. Кроме этого, здесь же могли аккумулироваться и связанные газы, перешедшие в свободную фазу при разложении карналлитов.

### Библиографический список

1. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов. – Пермь: Ги УрО РАН, 2013. – 429с.
2. Месторождения калийных солей СССР. Методы их поисков и разведки / В.И. Раевский [и др.] – Л.: Недра, 1973. – 344 с.
3. Иванов, А.А. Верхнекамское месторождение калийных солей / А.А. Иванов, М.Л. Воронова. – Л.: Недра, 1975. – 219 с.
4. Белоликов, А.И. Верхнекамское калийное месторождение / А.И. Белоликов, Б.И. Сапегин // Проблемы прогноза, поисков и разведки горно-химического сырья СССР. – М.: Недра, 1971. – С. 193–209.
5. Анализ геологического строения и оценка возможности разработки нефтяных месторождений, расположенных под толщей калийно-магниевых солей Верхнекамского месторождения Пермской области / В.И. Галкин [и др.] – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 41–52.
6. Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Т.А. Лялина, Е.А. Нестеров // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 125–133. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133

6. В дальнейшем структурные связи между зернами минералов под воздействием литостатического давления и продолжающейся миграции растворов восстанавливались, и порода становилась монолитной, практически лишенной крупных пор. На некотором расстоянии от контакта «карналлит – пестрый сильвинит» создавался своего рода «газовый барьер», препятствующий миграции газов в направлении, противоположном движению фронта сильвинитизации карналлитовых пластов. По мере продвижения фронта сильвинитизации (забойной, обменной и конденсационной зон системы галогенного метасоматоза), участки с различной пористостью перемещались в том же направлении, что и мигрирующие растворы – в направлении карналлитовых пород. Процесс сильвинитизации карналлитов затухал по мере насыщения агрессивных растворов по хлористому магнию.

7. На участках полного разложения карналлитов в процессе сильвинитизации из-за дефицита твердой фазы формировались пустоты, т.е. мощности пластов при сильвинитизации значительно уменьшались, примерно в 2–3 раза. Формирование таких природных пустот создавало известный в горном деле эффект подработки свиты пластов выше пласта, подвергшегося сильвинитизации. В процессе природной подработки карналлитовых пластов при сильвинитизации создаются предпосылки для изменения первоначальной структуры пород, заключающиеся в появлении новых систем микро- и макротрещин, а также расслоений по контактам слоев, глинистым прослойкам и слоям. В результате природной подработки в пределах области влияния фронтов сильвинитизации в карналлитовых пластах формируются участки с различной структурой и, следовательно, с различными газодинамическими характеристиками пород.

8. Деформирование карналлитовых пластов под воздействием природной подработки длится длительное геологическое время, всякая остановка границы фронта сильвинитизации оказывается источником возникновения краевой части мульды сдвига. В краевых частях мульды сдвига карналлитовые пласты будут подвергаться максимальным деформациям с развитием трещиноватости и расслоениям по контактам слоев, глинистым слоям и прослойкам. Фильтрационные и коллекторские свойства карналлитовых пластов в этих зонах будут играть весьма важную роль с точки зрения возможности формирования газонасыщенных зон. На этих участках в карналлитовых пластах наиболее вероятно появление газодинамических аномалий, т.е. участков, отличающихся степенью нарушенности пород, их газоносностью и газодинамическими характеристиками, представляющими собой зоны газодинамической опасности при ведении горных работ. Границы таких зон газодинамической опасности в пределах конкретных карналлитовых пластов сильвинито-карналлитовой зоны будут определяться угловыми характеристиками краевых частей мульды сдвига, сформировавшихся на границе фронта сильвинитизации карналлитов.



7. Андрейко, С.С. Исследование газовойделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей / С.С. Андрейко, Т.А. Лялина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 33–38.
8. Andreyko, S.S. Rockburst From Floors / S.S. Andreyko, T. Lyalina // Soils and Rocks, São Paulo. – 2019. – Vol. 42(1). – P. 77–82. DOI: 10.28927/SR.421077
9. The Static Analysis of the Gas Content and the Gas-Dynamic Characteristics at the Second Potash Bed in the Starobinsk Potassium Salts Deposit [Электронный ресурс] / S.S. Andreyko, N. Litvinovskaya, A. Papulov, T. Lyalina // Fluids. – 2022. – Vol. 7, iss. 8. – Art. 278. – 14 p. – URL: www.mdpi.com/2311-5521/7/8/278 (дата обращения: 26.10.2022). DOI: 10.3390/fluids7080278
10. Исследование содержания галопелитов в пласте каменной соли Б-В Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей / В.И. Галкин, С.С. Андрейко, Н.А. Литвиновская, С.В. Галкин, Т.А. Лялина // Горная промышленность. – 2022. – № 4. – С. 103–108. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-4-103-108
11. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations / M. He [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2022. – Vol. 15(E1). – P. 1312–1353. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014
12. He, M. Rockburst mechanism research and its control / M. He, F. Ren, D. Liu // Int J Min Sci Technol. – 2018. – Vol. 28, № 5. – P. 829–837. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.09.002
13. Numerical simulation method for the process of rockburst / Y. Fanjie [et al.] // Eng Geol. – 2022. – Vol. 306. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106760
14. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods / M. Askaripour [et al.] // Underground Space (China). – 2022. – Vol. 7, № 4. – P. 577–607. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.11.008
15. Novel Ensemble Tree Solution for Rockburst Prediction Using Deep Forest / D. Li [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, № 5. – P. 787. DOI: 10.3390/math10050787
16. Machine learning methods for rockburst prediction-state-of-the-art review / Y. Pu [et al.] // Int J Min Sci Technol. – 2019. – Vol. 29, № 4. – P. 565–570. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.009
17. Farhadian, H. A new empirical chart for rockburst analysis in tunnelling: Tunnel rockburst classification (TRC) / H. Farhadian // Int J Min Sci Technol. – 2021. – Vol. 31, № 4. – P. 603–610. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.03.010
18. Microseismic monitoring, analysis and early warning of rockburst / T. hui Ma [et al.] // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2021. – Vol. 12, № 1. DOI: 10.1080/19475705.2021.1968961
19. The Use of Data Mining Techniques in Rockburst Risk Assessment / L. Ribeiro e Sousa [et al.] // Engineering. – 2017. – Vol. 3, № 4. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.002
20. Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines / X.T. Feng [et al.] // Engineering. – 2017. – Vol. 3, № 4. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.013
21. Intelligent rockburst prediction model with sample category balance using feedforward neural network and Bayesian optimization / D. Li [et al.] // Underground Space (China). – 2022. – Vol. 7, № 5.
22. Li, C.C. Principles and methods of rock support for rockburst control / C.C. Li // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Chinese Academy of Sciences. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 46–59. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.11.001
23. Małkowski, P. A comprehensive geomechanical method for the assessment of rockburst hazards in underground mining / P. Małkowski, Z. Niedbalski // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 4. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.009
24. Zhou, J. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review / J. Zhou, X. Li, H.S. Mitri // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – Vol. 8. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.029
25. Numerical simulation method for the process of rockburst / Y. Fanjie, Z. Hui, C. Fudong [et al.] // Engineering Geology. – 2022. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106760
26. Стрелкова, С.В. Результаты исследований газоносности пород по свободным газам на 1–5 северо-западных панелях шахтного поля рудника БКПРУ–4 ПАО «Уралкалий» / С.В. Стрелкова, О.В. Иванов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2023. – Вып. 1. – С. 490–495.
27. Обоснование параметров профилактического дегазационного бурения для условий юго-восточной части шахтного поля рудника УКК / Е.А. Нестеров, Д.А. Бобров, А.С. Папулов, В.О. Лядов // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 94–96. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.16
28. Оценка газодинамической опасности пород кровли подготовительных горных выработок при проходке в выработанном пространстве камерной системы разработки на Третьем калийном пласте в условиях Старобинского месторождения калийных солей / Н.А. Литвиновская, А.С. Папулов, А.Б. Петровский, И.А. Подлесный // Горный журнал. – 2023. – № 8. – С. 24–28.
29. Чайковский, И.И. Состав и природа связанных и свободных газов Верхнекамского месторождения солей / И.И. Чайковский, О.В. Иванов, А.С. Папулов // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 108–112. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.03
30. Региональное прогнозирование опасных по газодинамическим явлениям зон в условиях шахтного поля рудника Талицкого гока / О.В. Иванов, С.Ю. Нестерова, В.О. Лядов, Е.В. Лукьянец // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 84–88.
31. О природе, составе и газоносности эпигенетической минерализации в соляной толще Верхнекамского месторождения (на примере Усольского рудника) / И.И. Чайковский, О.В. Иванов, М.В. Бубнова, Т.В. Федоров // ЛИТОСФЕРА. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 117–132. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-1-117-132
32. Иванов О.В. Прогнозирование газодинамических явлений при разведке и разработке сиввинитовых пластов (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. ... канд. тех. наук / Иванов О.В. – Пермь, 2005. – 18 с.
33. Газоносность и газодинамические характеристики пород сиввинитового пласта IV-п Петриковского месторождения калийных солей / Е.А. Нестеров, Д.А. Бобров, Д.В. Барбиков, Ю.Б. Петровский // Горный журнал. – № 8. – 2023. – С. 29–33. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.04
34. Лядов, В.О. Результаты исследований полной газоносности пород продуктивного пласта Гремячинского месторождения калийных солей / В.О. Лядов, А.С. Папулов // Проблемы недропользования. – 2023. – № 2 (37). – С. 99–111. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.099
35. Фивег, М.П. Стратиграфия и внутренняя тектоника продуктивной толщи Верхнекамского месторождения калийных и магниевого солей / М.П. Фивег // Труды ВНИИГ. – Л., 1948. – Вып. XIX.
36. Проскураков, Н.М. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд / Н.М. Проскураков, О.В. Ковалев, В.В. Мещеряков. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
37. Проскураков, Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках / Н.М. Проскураков. – М.: Недра, 1980. – 264 с.
38. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей / Н.М. Джиноридзе, М.Г. Аристаров, А.И. Поликарпов [и др.]. – СПб.; Соликамск, 2000. – 400 с.
39. Вишняков, А.К. Вторичные (эпигенетические) изменения галогенной толщи Соликамской впадины / А.К. Вишняков // Строение и условия образования соленосных формаций. – Новосибирск: Наука, 1981.
40. Чайковский, И.И. Тектоническое строение Верхнекамского месторождения: становление новой парадигмы / И.И. Чайковский, О.И. Галинова, В.Ю. Морозов // Горное Эхо: Вестник ГИ УрО РАН. – 2006. – № 1. – С. 21–24.
41. Фон-дер-Флаас, Г.С. Особенности метасоматического процесса соляных пород / Г.С. Фон-дер-Флаас, А.И. Кудряшов // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: сборник докладов. – Пермь: ГИ УрО РАН. – 2002. – С. 6–9.
42. Никифорова, А.И. Прогноз строения и свойств калийной залежи на основе сейсмостратиграфического анализа разреза Верхнекамского месторождения: дис. ... канд. техн. наук / Никифорова А.И. – 2013
43. Барях, А.А. Геомеханический прогноз распределения зон трещиноватости в соляной толще Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Барях, А.К. Федосеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 5. – С. 11–21.
44. Крауч, С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
45. Андрейко, С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве / С.С. Андрейко. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – Пермь, 2008.

## References

1. Kudriashov A.I. Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei [Verkhnekamskoye salt deposit]. Perm': Gorniy institut Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2013, 429 p.
2. Raevskii V.I. et al. Mestorozhdeniia kaliinykh solei SSSR. Metody ikh poiskov i razvedki [Potassium salt deposits of the USSR. Methods of their search and exploration]. Leningrad: Nedra, 1973, 344 p.
3. Ivanov A.A., Voronova M.L. Verkhnekamskoe mestorozhdenie kaliinykh solei [Verkhnekamskoye deposit of potassium salts]. Leningrad: Nedra, 1975, 219 p.
4. Belolikov A.L., Sapegin B.I. Verkhnekamskoe kaliinoe mestorozhdenie [Verkhnekamskoye potash deposit]. *Problemy prognoza, poiskov i razvedki gorno-khimicheskogo syr'ia SSSR*. Moscow: Nedra, 1971, pp. 193-209.
5. Galkin V.I. et al. Analiz geologicheskogo stroeniia i otsenka vozmozhnosti razrabotki neftiannykh mestorozhdenii, raspolozhennykh pod toplshchei kaliino-magnievykh solei Verkhnekamskogo mestorozhdeniia Permskoi oblasti [Analysis of the geological structure and assessment of the possibility of developing oil fields located under the layer of potassium-magnesium salts of the Verkhnekamskoye deposit in the Perm region]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2005, pp. 41-52.
6. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Lialina T.A., Nesterov E.A. Gazonosnost' po svobodnym gazam porod sil'vinitovoi i sil'vinito-karnallitovoi zon Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Free gas content of the rocks of the silvinit and silvinit-carnallite zones at the Upper Kama districts]. *Gornaiia promyshlennost'*, 2021, no. 4, pp. 125-133. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133
7. Andreiko S.S., Lialina T.A. Issledovanie gazovydeleniia iz geologorazvedochnykh skvazhin na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliinykh solei [The analysis of gas emission out of geologic prospecting wells at Verkhnekamskoye deposit of potassium salts]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2017, no. 2, pp. 33-38.
8. Andreyko S.S., Lyalina T. Rockburst From Floors. *Soils and Rocks, São Paulo*, 2019, vol. 42 (1), pp. 77-82. DOI: 10.28927/SR.421077
9. Andreyko S.S., Litvinovskaya N., Papulov A., Lyalina T. The Static Analysis of the Gas Content and the Gas-Dynamic Characteristics at the Second Potash Bed in the Starobinsk Potassium Salts Deposit. *Fluids*, 2022, vol. 7, iss. 8, Art. 278, 14 p., available at: www.mdpi.com/2311-5521/7/8/278 (accessed 26 October 2022). DOI: 10.3390/fluids7080278

10. Galkin V.I., Andreiko S.S., Litvinovskaia N.A., Galkin S.V., Lialina T.A. Issledovanie sodержaniia galopelitov v plaste kamennoi soli B-V Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievnykh soli [Studies of halopelite content in the B-V rock salt layer of the Verkhnekamsk potassium-magnesium salt deposit]. *Gornaiia promyshlennost'*, 2022, no. 4, pp. 103-108. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-4-103-108
11. He M. et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, vol. 15(E1), pp. 1312-1353. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014
12. He M., Ren F., Liu D. Rockburst mechanism research and its control. *Int J Min Sci Technol.*, 2018, vol. 28, no. 5, pp. 829-837. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.09.002
13. Fanjie Y. et al. Numerical simulation method for the process of rockburst. *Eng Geol.*, 2022, vol. 306. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106760
14. Askaripour M. et al. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space (China)*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 577-607. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.11.008
15. Li D. et al. Novel Ensemble Tree Solution for Rockburst Prediction Using Deep Forest. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 5, p. 787. DOI: 10.3390/math10050787
16. Pu Y. et al. Machine learning methods for rockburst prediction-state-of-the-art review. *Int J Min Sci Technol.*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 565-570. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.06.009
17. Farhadian H. A new empirical chart for rockburst analysis in tunnelling: Tunnel rockburst classification (TRC). *Int J Min Sci Technol.*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 603-610. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.03.010
18. hui Ma T. et al. Microseismic monitoring, analysis and early warning of rockburst. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1080/19475705.2021.1968961
19. Ribeiro e Sousa L. et al. The Use of Data Mining Techniques in Rockburst Risk Assessment. *Engineering*, 2017, vol. 3, no. 4, pp. 552-558. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.002
20. Feng X.T. et al. Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines. *Engineering*, 2017, vol. 3, no. 4, pp. 538-545. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.013
21. Li D. et al. Intelligent rockburst prediction model with sample category balance using feedforward neural network and Bayesian optimization. *Underground Space (China)*, 2022, vol. 7, no. 5, pp. 833-846. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.12.009
22. Li C.C. Principles and methods of rock support for rockburst control. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Chinese Academy of Sciences*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 46-59. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.11.001
23. Małkowski P., Niedbalski Z. A comprehensive geomechanical method for the assessment of rockburst hazards in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, vol. 4. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.009
24. Zhou J., Li X., Mitri H.S. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 8. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.029
25. Fanjie Y., Hui Z., Fudong C. et al. Numerical simulation method for the process of rockburst. *Engineering Geology*, 2022. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106760
26. Strelkova S.V., Ivanov O.V. Rezul'taty issledovaniia gazonosnosti porod po svobodnym gazam na 1-5 severo-zapadnykh paneliakh shakhtnogo polia rudnika BKPRU-4 PAO "Uralkalii" [Results of studies of the gas content of rocks on free gases on 1-5 North-Western panels of the mine field of the BKRU-4 mine of PJSC Uralkali]. *Izvestiia Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2023, iss. 1, pp. 490-495.
27. Nesterov E.A., Bobrov D.A., Papulov A.S., Liadov V.O. Obosnovanie parametrov profilakticheskogo degazatsionnogo bureniia dlia uslovii iugo-vostochnoi chasti shakhtnogo polia rudnika UK [Substantiation of preventive degassing drilling parameters in the South East of the mine field of Eurochem Usolsky potash plant]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 94-96. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.16
28. Litvinovskaia N.A., Papulov A.S., Petrovskii A.B., Podlesnyi I.A. Otsenka gazodinamicheskoi opasnosti porod krovli podgotovitel'nykh gornykh vyrabotok pri prokhodke v vyrabotannom prostranstve kamernoi sistemy razrabotki na Tret'em kaliinom plaste v usloviakh Starobinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soli [Risk of gas dynamic phenomena in roof rocks in entry heading in potassium stratum III]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 8, pp. 24-28. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.03
29. Chaikovskii I.I., Ivanov O.V., Papulov A.S. Sostav i priroda sviazannykh i svobodnykh gazov Verkhnekamskogo mestorozhdeniia soli [Composition and nature of bound and free gases at the Upper Kama salt deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 108-112. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.19
30. Ivanov O.V., Nesterova S.Iu., Liadov V.O., Luk'ianets E.V. Regional'noe prognozirovanie opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam zon v usloviakh shakhtnogo polia rudnika Talitskogo goka [Regional prediction of hazardous zones of gas-dynamic phenomena in mine field of Talitsa GOK]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 84-88. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.14
31. Chaikovskii I.I., Ivanov O.V., Bubnova M.V., Fedorov T.V. O prirode, sostave i gazonosnosti epigeneticheskoi mineralizatsii v soliano-i tolshche Verkhnekamskogo mestorozhdeniia (na primere Usolskogo rudnika) [On the nature, composition and gas content of epigenetic mineralization in the salt column of the Verkhnekamskoe deposit (on the example of the Usolsky mine)]. *LITOSFERA*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 117-132. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-1-117-132
32. Ivanov O.V. Prognozirovanie gazodinamicheskikh iavlenii pri razvedke i razrabotke sil'vinitovykh plastov (na primere Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh soli) [Forecasting gas-dynamic phenomena during exploration and development of sylvinitic formations (using the example of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit)]. Abstract of Ph. D. thesis. Perm', 2005, 18 p.
33. Nesterov E.A., Bobrov D.A., Barbikov D.V., Petrovskii Iu.B. Gazonosnost' i gazodinamicheskie kharakteristiki porod sil'vinitovogo plasta IV-p Petrikovskogo mestorozhdeniia kaliinykh soli [Gas content and gas-dynamic characteristics of sylvinitic stratum IV-p at Petrikov potash deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 8, pp. 29-33. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.04
34. Liadov V.O., Papulov A.S. [Rezultaty issledovaniia polnoi gazonosnosti porod produktivnogo plasta Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh soli [Results of studies on the full gas content in rocks of the productive formation of the Gremiachinskoye potash salt deposit]. *Problemy nedropol'zovaniia*, 2023, no. 2 (37), pp. 99-111. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.099
35. Fivg M.P. Stratigrafia i vnutrenniia tektonika produktivnoi tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh i magnievnykh soli [Stratigraphy and internal tectonics of the productive strata of the Verkhnekamskoye deposit of potassium and magnesium salts]. *Trudy VNIIG. Leningrad*, 1948, iss. XIX.
36. Proskuriakov N.M., Kovalev O.V., Meshcheriakov V.V. Upravlenie gazodinamicheskimi protsessami v plastakh kaliinykh rud [Control of gas-dynamic processes in potash ore formations]. Moscow: Nedra, 1988, 239 p.
37. Proskuriakov N.M. Vnezapnye vybrosy porody i gaza v kaliinykh rudnikakh [Rock and gas outbursts in potash mines]. Moscow: Nedra, 1980, 264 p.
38. Dzhinoridze N.M., Aristarov M.G., Polikarpov A.I. et al. Petrotektonicheskie osnovy bezopasnoi ekspluatatsii Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievnykh soli [Petrotectonic foundations of safe exploitation of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts]. Sankt-Peterburg: Solikamsk, 2000, 400 p.
39. Vishniakov A.K. Vtorichnye (epigeneticheskie) izmeneniia galogennoi tolshchi Solikamskoi vpadiny [Secondary (epigenetic) changes in the halogen layer of the Solikamsk depression]. *Stroenie i uslovia obrazovaniia solenosnykh formatsii*. Novosibirsk: Nauka, 1981.
40. Chaikovskii I.I., Galinova O.I., Morozov V.Iu. Tektonicheskoe stroenie Verkhnekamskogo mestorozhdeniia: stanovlenie novoi paradigmy [Tectonic structure of the Verkhnekamskoye deposit: the formation of a new paradigm]. *Gornoe Ekho: Vestnik gornogo instituta Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk*, 2006, no. 1, pp. 21-24.
41. Fon-der-Flaas, Kudriashov A.I. Osobennosti metasomaticheskogo protsessa solianyykh porod [Features of the metasomatic process of salt rocks]. *Problemy kompleksnogo monitoringa na mestorozhdeniakh poleznykh iskopaemykh. Sbornik dokladov*. Perm': Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2002, pp. 6-9.
42. Nikiforova A.I. Prognoz stroeniia i svoystv kaliinoi zalezhi na osnove seismostratigraficheskogo analiza razreza Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Forecast of the structure and properties of the potash deposit based on seismic stratigraphic analysis of the Verkhnekamskoye deposit section]. Ph D. thesis, Perm', 2013.
43. Bariakh A.A., Fedoseev A.K. Geomekhanicheskii prognoz raspredeleniia zon treshchinovatosti v soliano-i tolshche Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh soli [Geomechanical forecast of distribution of fracture zones in the salt layer of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2007, no. 5, pp. 11-21.
44. Krauch S., Starfild A. Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela [Boundary element methods in solid mechanics]. Moscow: Mir, 1987, 328 p.
45. 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.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.