

УДК 551.24:552.42

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-1-117-132

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

Горный институт УрО РАН, 614005, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, e-mail: ilya@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г., принята к печати 14.10.2022 г.

Объект исследования. В работе рассмотрена тектоническая позиция зоны эпигенетической минерализации в соляной толще одного из рудников Верхнекамского месторождения, валовой и микроэлементный химический состав, газоносность и компонентный состав газов. **Материалы и методы.** Для оценки состава исходных и эпигенетических образований проведены структурно-геологические наблюдения в горных выработках, опробование, определение валового химического состава (РФА, спектрометр S8 Tiger фирмы “Bruker”), малых элементов (масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Aurora M90), газоносности и компонентного состава связанных газов (газовый хроматограф 450-GC компании “Varian, Inc”). **Результаты.** Установлено, что жильная минерализация выполняет трещины отслоения в ядре синклинали складки и сопровождается зонами выщелачивания галита и перекристаллизации сильвина. Ниже по разрезу зафиксированы возможные источники пересыщенных калием рассолов, которые генерируются в многочисленных мелких структурах типа рор-ур или kink bands. Обогащенность легкими углеводородными газами, а также легкорастворимыми солями и подвижными элементами (KCl, CaCl₂, MgCl₂, Br, Rb, Li, Sr, Zn, Cu, Co, Te, Se, Sn, Pb) отражает их образование из седиментационных рассолов, мобилизованных при складчатости из сильвинитовых пород. **Выводы.** Охарактеризован один из механизмов мобилизации флюидов, солей и микроэлементов в соляной толще, связанный с со складчатым возникновением мелких рассеянных очагов в нижнем сильвинитовом пласте КрIII и последующей пульсационной миграцией вверх по разрезу вдоль синклинальных перегибов более крупных складок в пласте КрII. Показано, что в процессе формирования зоны эпигенетической минерализации происходит дифференциация малых элементов и газов, связанная с различными сорбционными свойствами галита, сильвина и глинистого материала.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, эпигенез, газоносность, геохимия

Источник финансирования

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-45-596017 p_НОЦ_Пермский край

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)

Ilya I. Chaikovskiy, Oleg V. Ivanov, Marina V. Bubnova, Taras V. Fedorov

Mining Institute, UB RAS, 78a Sibirskaya st., Perm 614005, Russia, e-mail: ilya@mi-perm.ru

Received 19.07.2022, accepted 14.10.2022

Research subject. The paper considers the tectonic position of the zone of epigenetic mineralization in the salt strata of one of the mines of the Verkhnekamskoye deposit, the gross and microelement chemical composition, gas content and component composition of gases. **Materials and methods.** To assess the composition of the original and epigenetic formations, structural and geological observations were carried out in mine workings, sampling, determination of the gross chemical composition (XRF, Bruker S8 Tiger spectrometer), trace elements (Aurora M90 inductively coupled plasma mass spectrometer), gas content and component composition of associated gases (gas chromatograph 450-GC company

Для цитирования: Чайковский И.И., Иванов О.В., Бубнова М.В., Федоров Т.В. (2023) О природе, составе и газоносности эпигенетической минерализации в соляной толще Верхнекамского месторождения (на примере Усольского рудника). *Литосфера*, **23**(1), 117–132. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-1-117-132>

For citation: Chaikovskiy I.I., Ivanov O.V., Bubnova M.V., Fedorov T.V. (2023) 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). *Lithosphere (Russia)*, **23**(1), 117–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-1-117-132>

© И.И. Чайковский, О.В. Иванов, М.В. Бубнова, Т.В. Федоров, 2023

“Varian, Inc”). *Results.* It has been established that vein mineralization fills delamination cracks in the cores of the synclinal fold and is accompanied by zones of halite leaching and sylvite recrystallization. Further down the section, possible sources of K-oversaturated brines are recorded, which are generated in numerous small structures such as pop-ups or kink bands. The enrichment in light hydrocarbon gases, as well as easily soluble salts and mobile elements (KCl, CaCl₂, MgCl₂, Br, Rb, Li, Sr, Zn, Cu, Co, Te, Se, Sn, Pb), reflects their formation from sediment-brines mobilized during folding from sylvinite rocks. *Conclusions.* One of the mechanisms for the mobilization of fluids, salts, and trace elements in the salt column is characterized, which is associated with the folded appearance of small scattered chambers in the lower sylvinite bed KrIII and subsequent pulsating migration up the section along the synclinal bends of larger folds in the bed KrII. It is shown that in the process of formation of the zone of epigenetic mineralization, differentiation of small elements and gases occurs, which is associated with different sorption properties of halite, sylvin, and clay material.

Keywords: Verkhnekamskoe field, epigenesis, gas content, geochemistry

Funding information

The study was supported by the RFBR grant, project No. 20-45-596017 r_NOTs_Perm Krai Science Foundation grant 22-27-00827

ВВЕДЕНИЕ

Верхнекамское месторождение солей кунгурского возраста представляет собой стратифицированную залежь, состоящую из выдержанных по простиранию пластов солей. Закономерность их отложения проявилась в последовательной смене хлоридов натрия, калия и магния, из которых сложены следующие толщи (снизу вверх): подстилающая каменная соль (средняя мощность ≈ 330 м), сильвинитовая (18 м) и карналлитовая (54 м) зоны. Сильвинитовая зона состоит из четырех сильвинитовых пластов (снизу вверх КрIII, КрII, КрI, А), а карналлитовая – из девяти карналлитовых (от Б до К), перемежающихся с пластами каменной соли. В настоящее время разрабатываются пласты КрII, АБ и В.

В составе включений в соляных минералах присутствуют жидкая и газообразная фазы, которые были захвачены в процессе кристаллизации. Последняя сложена азотом (до 90 % и более), углеводородными газами, водородом и углекислым газом. Среднее содержание связанных газов в галитах, сильвинитах и карналлититах варьирует в пределах $0.036\text{--}0.045$ м³/м³. Предполагается, что в процессе складчатости и перекристаллизации газы высвобождаются из соляных минералов, мигрируют на границы зерен, в структурные ловушки антиклинального типа, где могут образовывать скопления, создающие большие осложнения в процессе их вскрытия горными выработками (Андрейко, 2007; Земсков и др., 2008). Газодинамические явления, сопровождаемые выбросом породы и горнопроходческого оборудования и даже чело-

веческими жертвами, известны на многих калийных месторождениях солей (Верхнекамское и Гремячинское в России, Старобинское в Беларуси, Вера в Германии), а также других, где рудные тела залегают среди эвапоритового разреза (кимберлитовые трубки Мир, Интернациональная и др.).

Галит, сильвин и карналлит характеризуются низкой изоморфной емкостью в отношении большинства малых элементов (кроме Br, Rb), которые сосредоточены в нерастворимом остатке (доломит, ангидрит, аутигенные сульфиды, терригенные и аутигенные силикаты, углефицированный растительный детрит, остатки кокколитофорид и др.), составляющем в пластах каменной соли, сильвинитов и карналлитов 3–5 мас.% и более. Минеральное и пространственное перераспределение большинства элементов связано с процессами сульфатредукции, радиолиза, миграции рассолов (Чиркова, Чайковский, 2012; Чайковский и др., 2016, 2017а, б).

Таким образом, выявление структурных, минералогических и геохимических признаков миграции флюидов представляет интерес не только для реконструкции эпигенетических процессов в эвапоритовой толще, но и для обеспечения безопасных условий разработки месторождений.

Объект и методы исследования

При проходке одного из штреков Усольского рудника Верхнекамского месторождения по сильвинитовому пласту КрII участковым геологом Е.А. Канзюба на восточной стенке выявлен участок развития крупных жил, сложенных шестова-

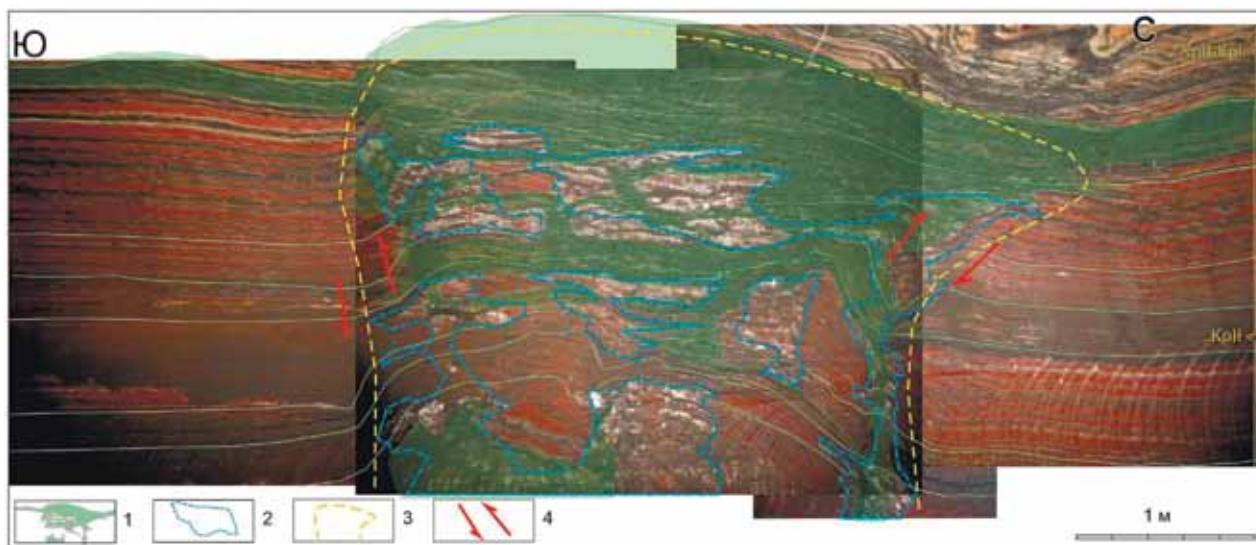


Рис. 1. Зона эпигенетической минерализации, вскрытая на западной стенке штрека.

1 – границы глинистых слоев и скоплений; 2 – границы участков перекристаллизации, сложенные пестрым сильвинитом; 3 – общий контур развития участков выщелачивания; 4 – относительное перемещение блоков. Пласт КрII сложен красным сильвинитом с белыми прослоями каменной соли и черными прослоями глинистого материала, пласт КрII–КрIII – каменной солью с глинистыми прослоями.

Fig. 1. Zone of epigenetic mineralization exposed on the western wall of the drift.

1 – boundaries of clay layers and accumulations; 2 – boundaries of recrystallization areas composed of variegated sylvite; 3 – general outline of the development of leaching sites; 4 – relative movement of blocks. Layer KrII is composed of red sylvite with white interlayers of rock salt and black interlayers of clay material, layer KrII–KrIII – of rock salt with clay interlayers.

тыми солями (Иванов и др., 2021). В рамках изучения ее строения и природы были проведены структурно-геологические наблюдения и отбор проб для исследования химического состава жильных образований и вмещающих пород, а также содержащихся в них газов.

Определение содержания петрогенных элементов (SiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , SO_3 , п.п.п.) проводилось на волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger фирмы “Bruker” (аналитик К.П. Казымов), а малых элементов – на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Aurora M90 (геологический факультет ПГНИУ, аналитики – М.А. Волкова и А.Ю. Пузик).

Компонентный состав связанных газов проанализирован на газовом хроматографе 450-GC компании “Varian, Inc” в ЦКП “Центр изучения свойств геоматериалов” ПНИПУ, аналитик О.В. Иванов.

Структурно-геологическая позиция и строение минерализованной зоны

Обследование показало, что эпигенетическая минерализация развита на обеих стенках штрека. На западной стенке, в приосевой части синклинального перегиба, вскрыта зона выщелачивания солей шириной около 3 м, сложенная остаточ-

ным глинистым материалом, экранированная прослоем глины в кровле сильвинитового пласта КрII (рис. 1). Она формирует штокверк, сопровождаемый гнездовыми участками пестрого крупнозернистого сильвинита, образовавшегося за счет перекристаллизации первичного красного среднезернистого сильвинита.

На восточной стенке штрека минерализованная зона имеет ширину около 8 м и включает в себя, наряду с участками выщелачивания и перекристаллизации сильвина (пестрый сильвинит), около десяти сближенных согласных и субсогласных жил (рис. 2), приуроченных к синклинальному перегибу. Самая протяженная из них имеет длину более 2 м и ширину более 0.5 м. Наряду с жилами зафиксированы разрывы глинистых прослоев (будинаж).

Здесь выделены две зоны выщелачивания, где глинистые прослои сливаются в единое целое. В северном участке выщелачивания отмечены реликтовые гнезда вторичного пестрого сильвинита и элементы пластических деформаций.

Наиболее крупная жила сложена преимущественно поперечно-шестоватым агрегатом, осложненным ритмичностью, сдвигами и наличием нескольких генераций хлоридных минералов, которые придают ей блоковое строение (рис. 3). Наблюдение за взаимоотношениями между блоками позволило выделить пять генераций, сменявших друг

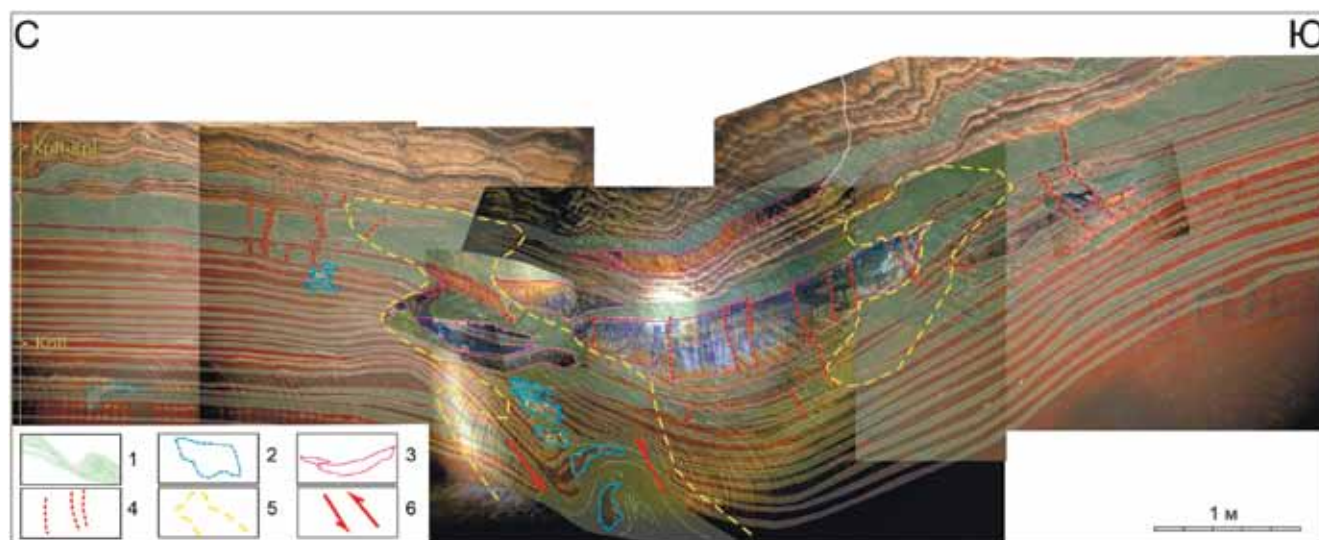


Рис. 2. Зона эпигенетической минерализации, вскрытая на восточной стенке штрека.

1 – границы глинистых слоев и скоплений газов; 2 – границы участков развития пестрого сильвина (участки перекристаллизации); 3 – границы жил, сложенных сильвином и галитом; 4 – дислокации отрыва и скалывания; 5 – общий контур участков выщелачивания; 6 – относительное перемещение блоков.

Fig. 2. Zone of epigenetic mineralization exposed on the eastern wall of the panel entry.

1 – boundaries of clay layers and gas accumulations; 2 – boundaries of areas of development of variegated sylvite (areas of recrystallization); 3 – boundaries of veins composed of sylvite and halite; 4 – detachment and shear dislocations; 5 – general outline of the development of leaching sites; 6 – relative movement of blocks.

друга во времени. Наиболее ранним был красный шестоватый агрегат галит-сильвинового состава, примыкающий к нижней стенке жилы. Ближе к центру жилы он сменяется красно-синим шестоватым сильвин-галитовым, а затем синим шестоватым галитовым, примыкающим к верхней стенке жилы. Четвертая генерация, сложенная желтоватым шестоватым галитом, обрастает “оборванные” края блоков третьей генерации и характеризуется нередко искривленными волокнами. Пятая генерация представлена пойкилитовым агрегатом прозрачного сильвина с реликтовыми вростками волокон синего галита, за счет чего выглядит голубой. Ее приуроченность к центральной части жилы позволяет предполагать, что она развивалась по красно-синему шестоватому сильвин-галитовому агрегату второй генерации.

Анализ структурного поведения пласта вдоль штрека (рис. 4) показывает, что он подвержен смятию системой пересекающихся диагональных складок, что проявлено на разрезе в виде разнонаправленного падения осевых поверхностей. Подобная система характерна не только для исследованного района, но и для Палашерского участка и Верхнекамского месторождения в целом (Чайковский и др., 2021).

Обследование лежащего ниже сильвинитового пласта КрIII позволило установить в его верхней ча-

сти, контактирующей с каменной солью КрIII–КрII и осложненной мелкой шевронной складчатостью, многочисленные локальные (1–2 м) дислокации, сопровождаемые изменением минерального состава соляных пород (рис. 5). Структурная интерпретация показывает, что они представляют собой пластичные варианты сопряженных надвига и ретронадвига (структура pop-up) или полос излома (kink bands), на которых проявилось выщелачивание сильвина. Некоторое увеличение объема галита в этой зоне может отражать не только сохранение первично-седиментационной соли, но и отложение вторичной, что было описано в так называемых “буграх пучения” на Старобинском калийном месторождении (Кислик, 1971; Чайковский и др., 2017а). Отсутствие подводящих снизу структур или изменений может указывать на мобилизацию рассолов из верхней части сильвинитового пласта КрIII. Выщелачивание сильвина с одновременным отложением галита в верхней части пласта КрIII может свидетельствовать о нагревании межзерновых рассолов в процессе складчатости, что согласуется с более высокой растворимостью KCl при температуре выше 30°C, чем NaCl. Возросшее в растворе содержание KCl вызвало высаливание (фракционирование) галита. Таким образом, в лежащий выше пласт КрII они поступили насыщенными хлоридом калия, но обедненными хлоридом натрия, что и вызвало растворение галита.

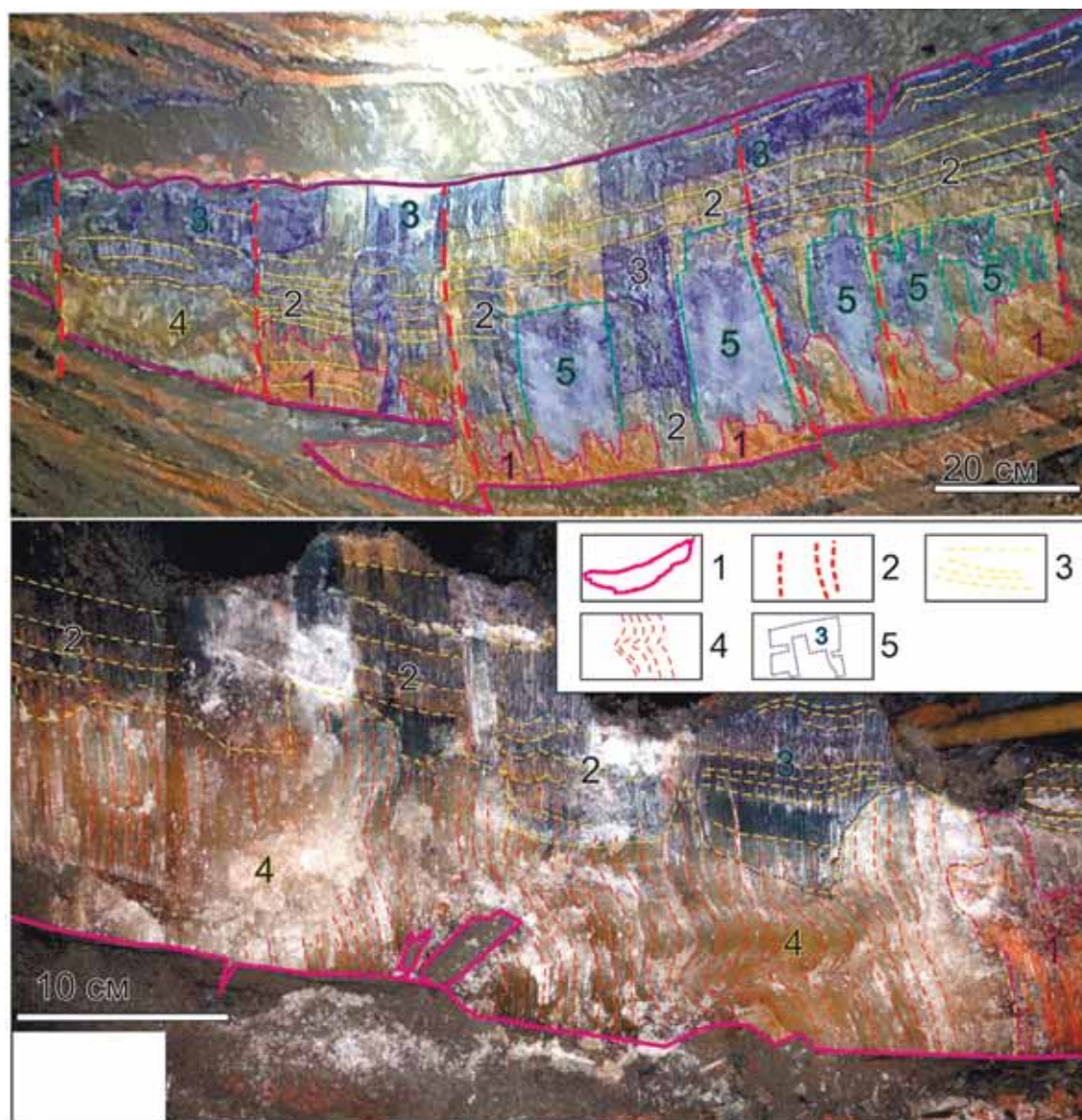


Рис. 3. Фрагменты строения двух участков наиболее крупной жилы.

1 – контур жилы; 2 – сдвиговые зоны; 3 – элементы ритмичности; 4 – ориентировка волокон минералов в шестоватом агрегате; 5 – участки в пределах жилы, различающиеся по цвету и минеральному составу. Цифрами показаны генерации галит-сильвинового (1, красные), сильвин-галитового (2, красно-синие), галитового (3, синие), галитового (4, желтоватые), галит-сильвинового (5, голубые) состава.

Fig. 3. Fragments of the structure of two sections of the largest vein.

1 – vein contour; 2 – shear zones; 3 – elements of rhythm; 4 – orientation of mineral fibers in columnar aggregate; 5 – areas within the vein, differing in color and mineral composition. The numbers show areas of halite-sylvite (1, red), sylvite-halite (2, red-blue), halite (3, blue), halite (4, yellowish), halite-sylvite (5, blue) compositions.

По представлениям Ю.А. Третьякова (1974), сходные зоны выщелачивания (“замещения”) внутри соляной толщи Верхнекамского месторождения связаны с постседиментационным перераспределением компонентов сильвиновой породы на участках неравномерного тектонического напряжения при участии остаточных маточных рас-

солов хлор-кальциевого состава, захороненных в глинистых прослоях.

Структуры pop-up или kink bands, названные не очень удачно ромбоздрами скалывания, ранее наблюдались в пласте А Новосоликамского участка Верхнекамского месторождения и связывались с динамометаморфическими процессами,

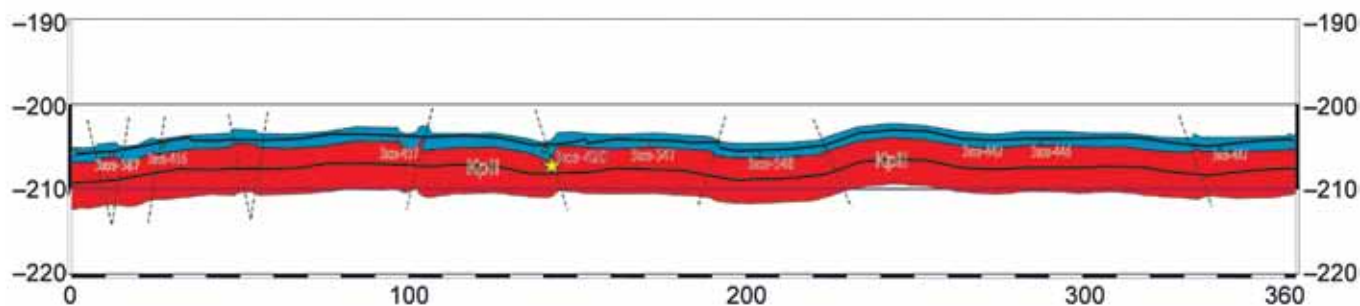


Рис. 4. Положение исследуемого участка (показано желтой звездочкой) на геологическом разрезе по восточной стенке штрека (материалы геологической службы рудника) с элементами структурной интерпретации. Пунктиром показаны осевые поверхности складок.

Fig. 4. Position of the study area (shown by a yellow star) on the geological section along the eastern wall of the panel entry (materials of the geological service of the mine) with elements of structural interpretation.

The dotted line shows the axial fold planes.

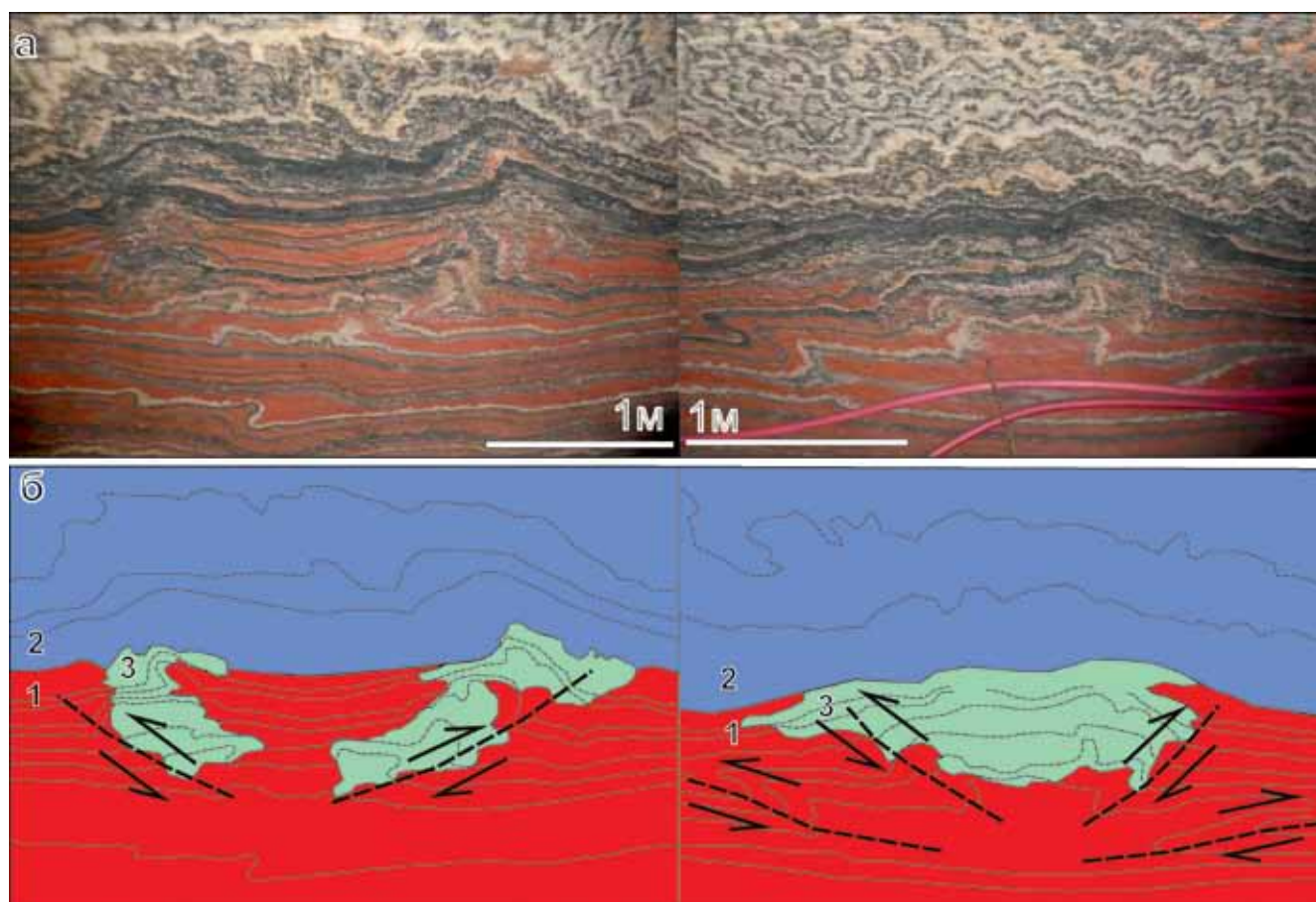


Рис. 5. Фотографии (а) и схемы (б) структурной интерпретации деформаций в верхней части пласта КрIII, сопровождаемые выщелачиванием сильвина.

1 – сильвинитовый пласт КрIII; 2 – пласт каменной соли КрIII–КрII; 3 – зона выноса хлорида калия и отложения галита. Стрелками показаны динамопары вдоль зон пластического перегиба.

Fig. 5. Photographs (a) and schemes (б) of structural interpretation of deformations in the upper part of the KrIII bed accompanied by leaching of sylvite.

1 – sylvinitic bed KrIII; 2 – layer of rock salt KrIII–KrII; 3 – zone of removal of potassium chloride and deposition of halite. The arrows show the dynamocouples along the zones of plastic inflection.

протекавшими в условиях горизонтального сжатия (Петротектонические основы..., 2000).

Таким образом, в районе проявления исследованной жильной минерализации в процессе складчатости в прикровельной части пласта КрIII, на границе с каменной солью КрIII–КрIII, формируются многочисленные локальные структуры, сложенные сопряженными надвигом и ретронадвигом, представляющие собой очаги разгрузки рассеянных внутрисоляных растворов, которые выносили хлориды калия. В лежащий выше сильвинитовый пласт КрII обогащенные калием рассолы уже поступали вдоль синклинальных перегибов, где приводили к выщелачиванию галита и перекристаллизации сильвина.

Сложное строение и состав жил свидетельствуют о длительном и пульсационном характере их раскрытия, “многокамерной” кристаллизации и эволюции химизма рассолов во времени. Шестоватое строение жильных агрегатов сильвина и галита отражает их рост в формирующихся полостях отслоения, образующихся как за счет продолжительных тектонических движений, так и выщелачивания. Искривленность волокон желтоватой соли свидетельствует о смене вертикального расслоения послойным сдвигом. Вначале происходило отложение галит-сильвинового, а затем сильвин-галитового и галитового агрегатов. Наблюдаемые взаимоотношения в жиле, отражающие отложение сильвина, а затем галита, не согласуются с последовательностью кристаллизации солей в эвапоритовых бассейнах, что подтверждает пересыщенность рассолов калием. Наряду с ростом в открывающихся полостях проявилась перекристаллизация некоторых сильвинитовых участков с образованием пойкилитовой структуры.

Особенности минерального и химического и состава

Данные химических анализов солей (табл. 1) и их пересчет на минеральную форму показали (рис. 6), что при переходе от красных сильвинитов к пестрым произошел существенный вынос хлорида натрия, привнос хлоридов калия и магния, сульфата и хлорида кальция, накопление остаточного нерастворимого материала (ангидрит, глинистые минералы и др.).

Сама жила сложена только сильвином и галитом. Содержание последнего постепенно увеличивается от красного галит-сильвинового агрегата и красно-синего сильвин-галитового к синему и желтоватому галитовому, что отражает изменение рассола во времени от существенно хлоридно-калиевого к хлоридно-натриевому.

Увеличение бром-хлорного коэффициента (рис. 7) при переходе от вмещающего красного сильвинита к пестрому отражает приток богатых

бромом рассолов. В самой жиле его содержание постепенно уменьшается от ранней генерации к поздней, что согласуется с уменьшением содержания сильвина, который характеризуется его большей изоморфной емкостью по сравнению с галитом (Валяшко, Мандрыкина, 1952). Высокие значения бром-хлорного коэффициента в голубом галит-сильвиновом агрегате подтверждает его образование за счет перекристаллизации красно-синего сильвин-галитового агрегата второй генерации. Следовательно, на участке эпигенетической минерализации проявились три процесса (тренда): выщелачивание галита с перекристаллизацией сильвина (I), последовательное отложение солей в открывающихся полостях (II), перекристаллизация красно-синего сильвин-галитового агрегата остаточными растворами (III).

Сопоставление содержания некоторых индикаторных малых элементов (табл. 2, рис. 8) показывает, что поступающие при формировании пестрого сильвинита рассолы были обогащены Rb, Li, Sr, Zn, Cu, Co, Te, Se, Sn, Pb и обеднены Mn, Cd, Ba, Mo, Sb, Tl, Bi, Zr. Для зрелых рассолов характерны Sr, Rb и Li, они могут рассматриваться как галофильные. Zn, Cu, Co, Te, Se, Sn, Pb относятся к элементам, легко экстрагируемым и переносимым в форме хлоридов и сернистых соединений.

Корреляционный анализ петрогенных и малых элементов позволил, на основе тесной положительной связи, выделить четыре геохимические группы. С галитом демонстрируют устойчивую связь Ru ($r = 0.92$), Tl (0.85), Cs (0.69), а с сильвином – Rb (0.97), Se (0.81), Sc (0.70), Ni (0.58), Co (0.55). Очень близкие значения коэффициентов корреляции многих элементов с иллитом, ангидритом, гематитом, антарктицитом и бишофитом позволяют предполагать их локализацию в так называемом галопелите, состоящим из пелитоморфного сульфатно-глинистого материала, насыщенного поровыми хлоридными рассолами магния и кальция. Связанные с ними элементы образуют следующий ряд: Nb (0.86–0.96), Mn (0.79–0.97), Y (0.85–0.95), Se (0.75–0.93), Li (0.78–0.91), Sr (0.74–0.91), Ga (0.71–0.88), V (0.69–0.85), Ag (0.52–0.84), Ta (0.64–0.74), Zr (0.58–0.86), Pd (0.53–0.76), Ba (0.52–0.63), Cd (0.44–0.74), Os (0.54–0.70), Ir (0.54–0.70), Pt (0.48–0.69), Au (0.43–0.68), Sb (0.41–0.67).

Остальные элементы (Be, Cr, Cu, Zn, Ge, As, Mo, Ru, Rh, In, Sn, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi) не демонстрируют значимой связи с петрогенными минеральными фазами. Часть из них (Cu, Zn, As, Hg, Pb) встречена на Верхнекамском месторождении в виде тонкодисперсных сульфидов в галопелитовом материале.

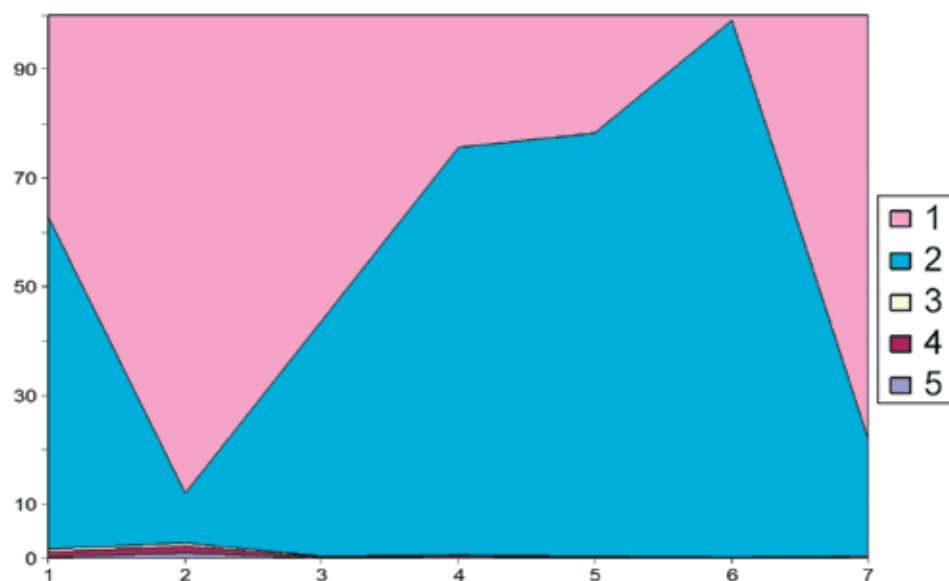
Таким образом, рассолы, вызвавшие образование пестрого сильвинита и жильных минералов, были недосыщены NaCl, но обогащены легкорастворимыми солями и подвижными элементами

Таблица 1. Химический (мас. %) и нормативный (мол. %) минеральный состав вмещающего сильвинита, продуктов его перекристаллизации и участков сложной жилы**Table 1.** Chemical and normative mineral composition of host sylvinite, products of its recrystallization and sections of a complex vein, wt %

Компонент	Неизмененный красный сильвинит (КрII, слой 1)	Пестрый сильвинит (участки перекристаллизации)	Участок жилы (генерация)				
			Галит-сильвиновый, красный (1)	Сильвин-галитовый, красносиний (2)	Галитовый, синий (3)	Галитовый, желтоватый (4)	Галит-сильвиновый, голубой (5)
K	21.25	44.18	32.33	15.31	13.44	0.65	41.94
Na	20.27	2.65	14.30	27.06	27.60	36.41	6.71
Ca	0.68	1.11	0.14	0.21	0.13	0.06	0.16
Mg	0.19	0.21	0.07	0.08	0.06	0.06	0.02
SiO ₂	0.50	1.40	0.27	0.29	0.13	0.11	0.04
Fe ₂ O ₃ общ	0.25	0.30	0.16	0.08	0.03	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.15	0.42	0.08	0.09	0	0.04	0
SO ₃	0.33	0.88	0.06	0.05	0.02	0.00	0.01
Cl	56.30	48.64	52.35	56.68	58.42	62.63	50.62
Br	0.07	0.20	0.26	0.16	0.16	0.04	0.48
Галит (NaCl)	60.80	8.94	43.09	74.74	77.73	98.59	21.67
Сильвин (KCl)	36.65	85.72	56.03	24.31	21.77	1.01	77.91
Ангидрит (CaSO ₄)	0.28	0.85	0.05	0.04	0.02	0.00	0.01
Гематит (Fe ₂ O ₃)	0.05	0.07	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00
Антарктицит CaCl ₂ ×6H ₂ O	0.88	1.30	0.20	0.29	0.19	0.09	0.28
Бишофит MgCl ₂ ×6H ₂ O	0.55	0.67	0.19	0.20	0.15	0.15	0.07
Иллит (K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ [(Si,Al) ₄ O ₁₀][(OH) ₂ ,H ₂ O]	0.78	2.45	0.41	0.41	0.14	0.16	0.06

Примечание. Сумма компонентов нормирована по безводному составу.

Note. The sum of the components is normalized to the anhydrous composition.

**Рис. 6.** Вариации содержания нормативных солей.1 – KCl, 2 – NaCl, 3 – MgCl₂, 4 – CaCl₂, 5 – CaSO₄. На горизонтальной оси 1–7: 1 – красный сильвинит; 2 – пестрый силь-

винит; 3–7 – жильные образования: 3 – галит-сильвиновое красное, 4 – сильвин-галитовое сине-красное, 5 – галитовое синее, 6 – галитовое желтоватое, 7 – галит-сильвиновое голубое.

Fig. 6. Variations in the content of standard salts.

1 – KCl, 2 – NaCl, 3 – $MgCl_2$, 4 – $CaCl_2$, 5 – $CaSO_4$. On a horizontal axis 1–7: 1 – red sylvinite; 2 – variegated sylvinite; 3–7 – vein formations: 3 – halite-sylvite red, 4 – sylvite-halite blue-red, 5 – halite blue, 6 – halite yellowish, 7 – halite-sylvite blue.

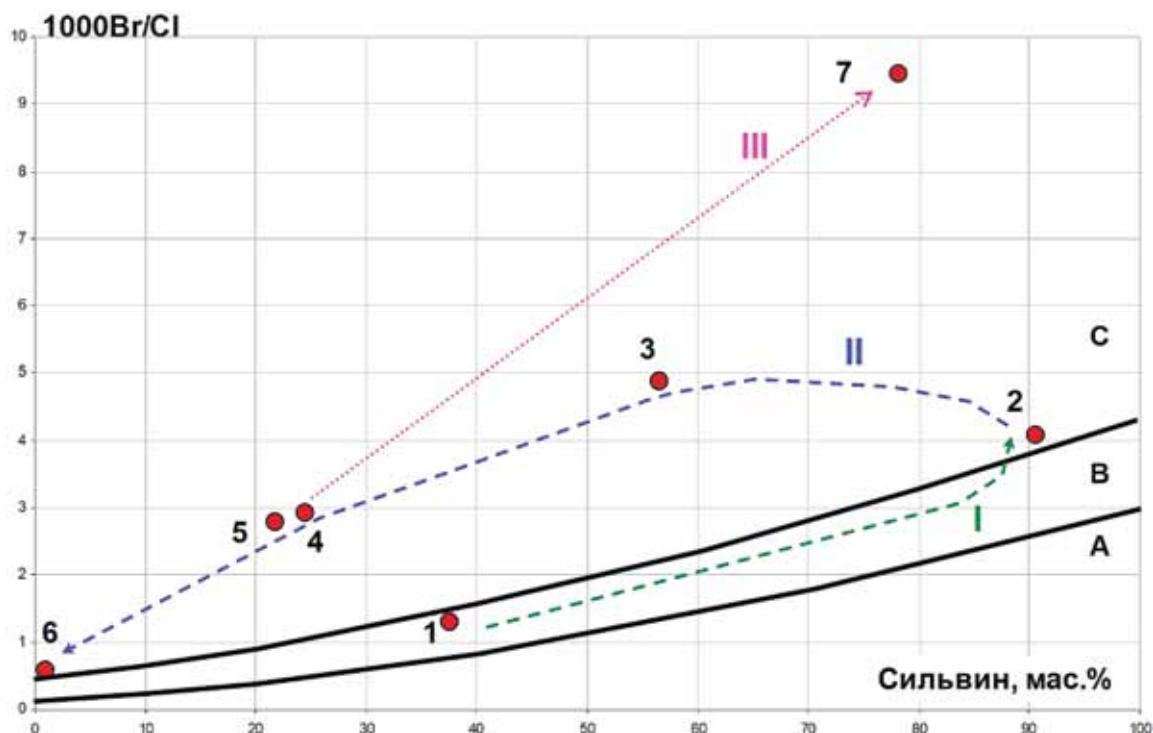


Рис. 7. Диаграмма М.Г. Валяшко, Т.В. Мандрыкиной (1952) для исследованных солей.

1 – красный сильвинит; 2 – пестрый сильвинит; 3–7 – жильные образования (3 – галит-сильвиновое красное, 4 – сильвин-галитовое сине-красное, 5 – галитовое синее, 6 – галитовое желтоватое, 7 – галит-сильвиновое голубое). Буквами обозначены поля сильвинитов, подверженных взаимодействию с опресненными водами (А), нормальных седиментационных (В), апокарналлитовых (С). Римскими цифрами показаны тренды выщелачивания галита и перекристаллизации сильвина (I), фракционирования в жиле (II), перекристаллизации остаточными растворами (III).

Fig. 7. Diagram of M.G. Valyashko, T.V. Mandrykina (1952) for the studied salts.

1 – red sylvinite; 2 – variegated sylvinite; 3–7 – vein formations (3 – halite-sylvite red, 4 – sylvite-halite blue-red, 5 – halite blue, 6 – halite yellowish, 7 – halite-sylvite blue). Letters the fields of sylvinites subject to interaction with desalinated waters (A), normal sedimentation (B), apocarnallite (C) are indicated. Roman numerals show the trends of halite leaching and sylvite (I) recrystallization, fractionation in the vein (II), recrystallization with residual solutions (III).

(KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Br, Rb, Li, Sr, Zn, Cu, Co, Te, Se, Sn, Pb), что свидетельствует о их образовании из седиментационных (меж- и внутризерновых) рассолов, мобилизованных при складчатости из сильвинитов, а не из окружения соляной толщи.

Газоносность и состав связанных газов

Анализ распределения связанных газов во вмещающем и перекристаллизованном сильвините, участках крупной жилы (табл. 3, рис. 9) и лежа-

щем выше (экранирующем) глинистом прослое позволил установить следующее. Газоносность вторичного пестрого сильвинита оказалась более высокой, чем в исходной породе, что свидетельствует об инфильтрации рассолов, обогащенных газами. Они вынесли из исходного красного сильвина азот и большинство тяжелых углеводородных газов ($i-C_5H_{12}$, $n-C_5H_{12}$, $n-C_4H_{10}$), но обогатили новообразованную породу легкими углеводородами (C_2H_6 , C_3H_8) и углекислым газом. На фоне общего падения газоносности жильных образований от

Таблица 2. Содержание малых элементов в исследованных образованиях по данным ICP анализа, г/т**Table 2.** Content of trace elements in the studied formations according to ICP analysis, ppm

Элемент	1	2	3	4	5	6	7
Li	1.318	2.858	1.660	1.547	0.785	0.663	0.529
Be	0.203	0.238	0.244	0.228	0.231	0.236	0.239
Sc	0.845	1.487	1.317	1.209	1.091	0.975	1.200
V	2.1	2.1	1.1	0.4	0	0.5	1.3
Cr	7.993	10.297	9.883	10.527	8.388	8.391	8.445
Mn	46.700	44.083	11.858	8.674	4.033	3.343	2.941
Co	2.032	8.758	9.831	2.368	2.581	2.594	2.188
Ni	5.903	7.481	7.616	7.101	6.729	6.362	6.963
Cu	7.443	17.880	111.675	15.226	5.337	3.606	4.305
Zn	16.216	55.708	110.824	24.404	21.255	13.051	10.655
Ga	0.231	0.435	0.332	0.226	0.182	0.179	0.161
Ge	0.136	0.228	0.205	0.254	0.243	0.251	0.209
As	7.889	6.155	6.825	6.521	6.115	5.685	7.973
Se	0.759	2.604	0.866	0.241	0.230	0.300	0.891
Rb	8.336	23.617	12.967	6.814	6.060	1.584	15.579
Sr	10.170	28.813	14.869	15.560	7.645	5.124	4.724
Y	0.692	0.792	0.458	0.282	0.367	0.317	0.355
Zr	15.370	9.503	6.958	3.794	2.098	1.665	1.212
Nb	0.075	0.140	0.080	0.039	0.024	0.021	0.020
Mo	0.972	0.384	3.073	0.422	0.628	0.492	0.892
Ru	0.010	0.008	0.008	0.010	0.010	0.011	0.008
Rh	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.005	0.005
Pd	0.256	0.231	0.257	0.206	0.182	0.167	0.195
Ag	0.142	0.136	0.142	0.118	0.115	0.112	0.116
Cd	0.606	0.432	0.342	0.354	0.362	0.351	0.344
In	0.086	0.084	0.074	0.087	0.090	0.090	0.090
Sn	0.089	0.101	21.740	0.140	0.038	0.039	0.148
Sb	1.231	0.625	0.144	0.778	0.112	0.194	0.303
Te	0.294	0.502	0.860	0.658	0.623	0.486	0.992
Cs	0.106	0.085	0.104	0.110	0.113	0.114	0.112
Ba	15.435	3.713	3.001	1.059	1.096	2.017	0.784
Ta	0.013	0.017	0.013	0.011	0.015	0.011	0.011
W	1.494	1.611	2.757	3.251	2.650	1.728	1.330
Re	0.089	0.089	0.089	0.090	0.085	0.089	0.090
Os	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008
Ir	0.010	0.010	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009
Pt	0.067	0.059	0.062	0.055	0.055	0.057	0.054
Au	0.028	0.026	0.025	0.026	0.025	0.025	0.026
Hg	0.162	0.173	0.243	0.233	0.224	0.152	0.157
Tl	0.032	0.003	0.031	0.042	0.045	0.046	0.033
Pb	0.235	0.355	0.868	0.113	0.127	0.111	0.114
Bi	0.029	0.018	0.035	0.017	0.016	0.016	0.017

Примечание. 1 – красный сильвинит, 2 – пестрый сильвинит, 3 – красный галит-сильвинитовый шестоватый агрегат, 4 – синне-красный сильвин-галитовый агрегат, 5 – синий галитовый агрегат, 6 – желтоватый галитовый агрегат, 7 – голубой галит-сильвинитовый.

Note. 1 – red sylvinite, 2 – variegated sylvinite, 3 – red halite- vein zone columnar aggregate, 4 – blue-red sylvite-halite aggregate, 5 – blue halite aggregate, 6 – yellowish halite aggregate, 7 – blue halite-sylvite.

ранних агрегатов к поздним происходит рост содержания азота и уменьшение метана.

Лежащий выше глинистый прослой оказался более обогащенным газами по сравнению с жилой, особенно легкими углеводородами и углекислым газом.

Использование диаграммы А. Принцхофера и Э. Пернатона (Prinzhofer, Pernaton, 1997) показало, что все фигуративные точки локализованы вдоль тренда, характеризующего одновременным ростом соотношений C_2/iC_4 и C_2/C_3 , который связывается с термогенным созреванием (рис. 10а). Сопоставление с данными предыдущих исследований газоносности (Чайковский и др., 2021) показало, что такая же тенденция характерна в целом для сильвинитового пласта КрII Усольского рудника (рис. 10б). Зафиксированное на различном удалении от крупной складки изменение степени зрелости состава газов (рис. 10в) дало основание предполагать, что вариации состава в сильвинитовом пласте напрямую связаны с расстоянием до нее. Чем дальше от крупной складки, тем более незрелый состав углеводородных газов. Низкая зрелость газов исследуемой зоны может свидетельствовать о том, что газовая фаза была мобилизована из сильвинитового пласта, подверженного незначительной складчатости.

Корреляционный анализ показал, что с галитом связан азот ($r = 0.89$), с сильвином и галопелитовым материалом – общая газоносность (0.80–0.86), этан (0.89–0.94), пропан (0.85–0.88), i-бутан (0.83–0.88), n-бутан (0.70–0.71) и CO_2 (0.90–0.95). Метан и пентан не проявили значимой связи с какими-либо минеральными фазами.

Сопоставление содержаний азота, метана и его гомологов в исследованных пробах с галитами подстилающей каменной соли, сильвинитами пласта КрII, в том числе обогащенных глинистым материалом (от 10 до 70%), Усольского рудника показали следующее (рис. 11). Каменная соль действительно характеризуется практически чистым азотным составом связанных газов. Сильвиниты обогащены метаном и его гомологами (до 11–18%), а сильвиниты, содержащие прослой галопелитового материала, обогащены гомологами метана, но обеднены метаном. Обогащенность галита и галититов азотом, а сильвина и сильвинитов – как азотом, так и углеводородными газами дает основание предполагать различную сорбционную способность этих хлоридных минералов в отношении газов, проявившуюся как в процессе седиментации, так и образовании жилы. Для объяснения низкого содержания метана в глине над жилой и сильвинитов, содержащих глинистые прослои, могут быть предложены два механизма. Глинистые прослои, будучи более проницаемыми для флюидов по сравнению

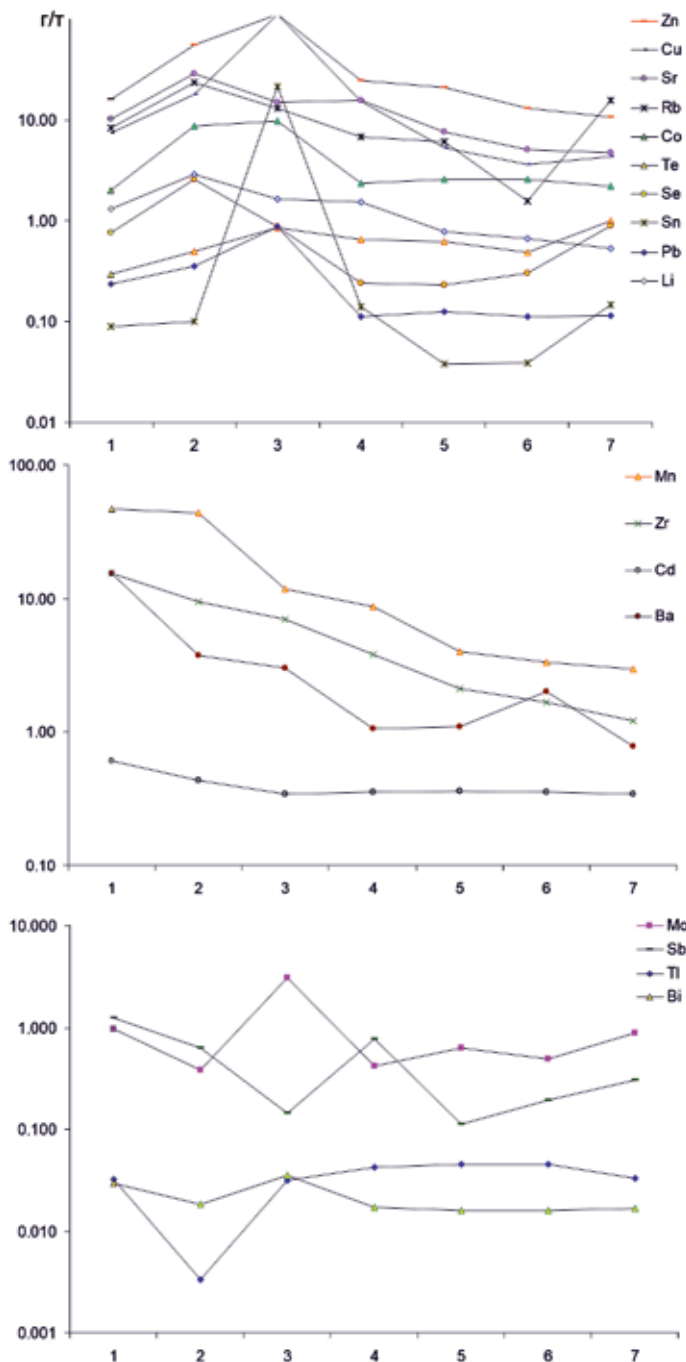


Рис. 8. Поведение индикаторных элементов во вмещающих солях и жильных образованиях.

1 – сильвинит; 2 – пестрый сильвинит; 3–7 – жильные образования: 3 – красное галит-сильвиновое, 4 – красно-синее сильвин-галитовое, 5 – синее галитовое, 6 – желтоватое галитовое, 7 – голубое галит-сильвиновое.

Fig. 8. Behavior of indicator elements in host salts and vein formations.

1 – sylvinite; 2 – variegated sylvinite; 3–7 – vein formations: 3 – red halite-sylvite, 4 – red-blue sylvite-halite, 5 – blue halite, 6 – yellowish halite, 7 – blue halite-sylvite.

Таблица 3. Общая газоносность (q , $\text{м}^3/\text{м}^3$) и компонентный состав газов (%) исследованных образований**Table 3.** Total gas content (q , $\text{м}^3/\text{м}^3$) and component composition of gases (%) of the studied formations

Газ	1	2	3	4	5	6
q	0.015	0.033	0.0256	0.014	0.006	0.024
CH_4	0.815	0.713	1.3096	0.127	0.1206	0.976
C_2H_6	1.690	2.883	0.354	0.2081	0.637	5.597
C_3H_8	0.705	0.904	0.115	0.091	0.1807	0.729
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.252	0.341	0.060	0.074	0.1257	0.248
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.535	0.467	0.111	0.060	0.1187	0.159
$i\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.598	0.345	0.123	0.078	0.0998	0.070
$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.185	0.096	0.046	0.023	0.030	0.013
CO_2	0.062	0.7256	0.216	0.047	0.056	0.355
N_2	95.155	93.5256	97.666	99.293	98.633	91.856

Примечание. 1 – красный сylvинит, 2 – пестрый сylvинит, 3 – сине-красный шестоватый галит-сylvинитовый агрегат, 4 – синий шестоватый галит, 5 – желтоватый шестоватый галит, 6 – глина, экранирующая жильную зону.

Note. 1 – red sylvinit, 2 – variegated sylvinit, 3 – blue-red columnar halite-sylvinit aggregate, 4 – blue columnar halite, 5 – yellowish columnar halite, 6 – shielding clay of the vein zone.

нию с соляными породами, дают возможность мигрировать метану, наиболее подвижному из углеводородных газов. Метан также может расходоваться как наиболее простой газ в процессе сульфатредукционных процессов.

Таким образом, общая газоносность и компонентный состав газов вмещающих сylvинитов близки таковым пласта КрII Усольского рудника. Рассолы, вызвавшие образование пестрого сylvинита, были обогащены легкими углеводородами (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8) и углекислым газом, мобилизованными из сylvинитов, претерпевших незначительную складчатость (соскладчатый катагенез).

В процессе формирования жилы проявилась дифференциация газов, обусловленная избирательной сорбцией азота, углеводородов и углекислого газа сylvинитом и глинистым материалом на ранней стадии и азота галитом – на поздней. Предполагается, что значительная доля привнесенных рассолами газов, фракционировавших в процессе выполнения жилы, дренировала в лежащий выше экранирующий глинистый слой, в котором они смешивались с аутигенными газами. В дальнейшем их состав мог трансформироваться как за счет диффузии легкоподвижного метана, так и сульфатредукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вскрытая при проходке сylvинитового пласта КрII Усольского рудника зона эпигенетической минерализации с синим галитом представляет со-

бой зону былой восходящей миграции пересыщенных калием рассолов вдоль линейной ослабленной зоны (синклинального перегиба). Она обогащена легкими углеводородными газами, легкорастворимыми солями и подвижными элементами, что отражает их мобилизацию из лежащего ниже сylvинитового пласта КрIII в процессе формирования складчатости, вероятно, из рассеянных мелких тектонических структур типа pop-up или kink bands. Блочное строение жил и наличие нескольких генераций минеральных агрегатов свидетельствуют о длительном и пульсационном характере раскрытия полостей.

Показано, что на уровне пласта КрII проявились три эпигенетических процесса, связанных с притоком высокосолеватых и высококальциевых рассолов: выщелачивание галита и перекристаллизация сylvинита, последовательное отложение сylvинита и галита в открывающихся полостях, перекристаллизация существенно сylvинитовых участков жилы остаточными рассолами. В процессе замещения и отложения проявилась дифференциация малых элементов, обусловленная геохимическим сродством к галиту (Ru, Tl, Cs), сylvину (Rb, Se, Sc, Ni, Co) и рассолонасыщенному галопелиту Nb, Mn, Y, Se, Li, Sr, Ga, V, Ag, Ta, Zr, Pd, Ba, Cd, Os, Ir, Pt, Au, Sb).

Образование вторичного сylvинита и жильной минерализации привело к дифференциации и газовой фазы, обусловленной проявившейся избирательной сорбцией азота галитом, азота, углеводородов и углекислого газа – сylvинитом и галопелитовым

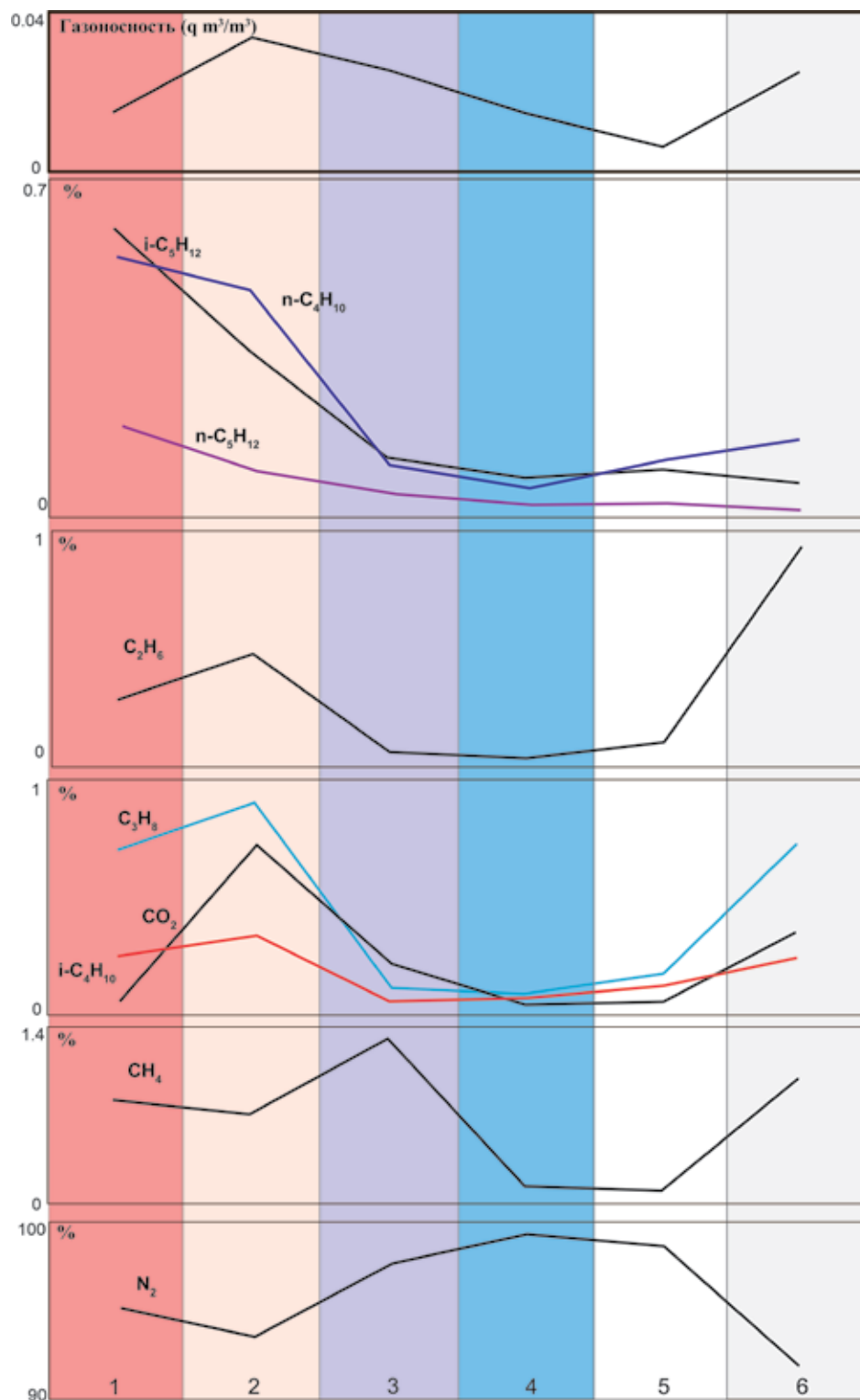


Рис. 9. Вариации газоносности и состава газов в зоне эпигенетической минерализации.

1 – красный сylvинит, 2 – пестрый сylvинит, 3 – сине-красный шестоватый галит-сильвинитовый агрегат, 4 – синий шестоватый галит, 5 – желтоватый шестоватый галит, 6 – глина, экранирующая жильную зону.

Fig. 9. Variations in gas content and composition of gases in the zone of epigenetic mineralization.

1 – red sylvinite, 2 – variegated sylvinite, 3 – blue-red columnar halite-sylvite aggregate, 4 – blue columnar halite, 5 – yellowish columnar halite, 6 – shielding clay of the vein zone.

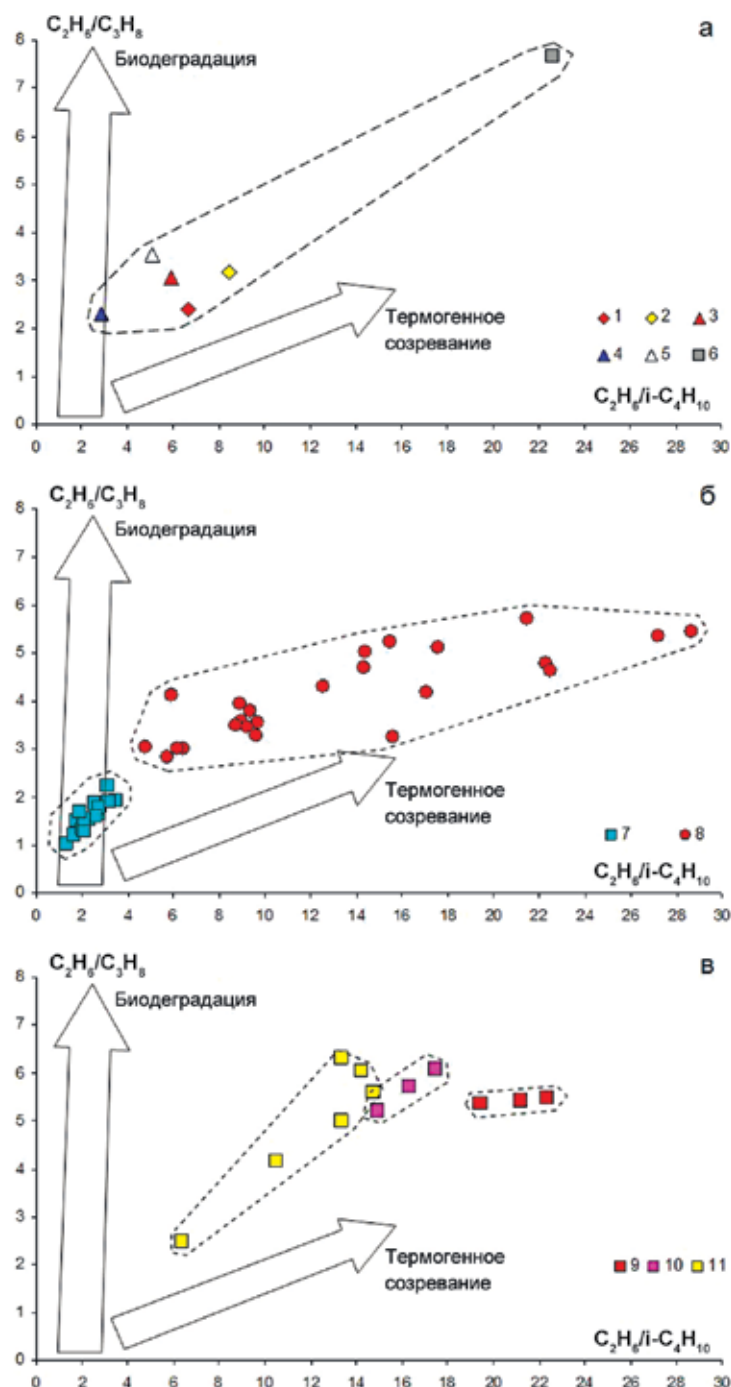


Рис. 10. Положение состава связанных газов в исследованных образованиях (а), соляных породах Усольского рудника (б) и на различном удалении от крупной складки (в) на диаграмме А. Принцхофера и Э. Пернатона (Prinzhofer, Pernaton, 1997).

1, 2 – красный и пестрый сylvинит; 3–5 – жильные агрегаты красного галит-сylvинитового, синего и желтоватого галитового; 6 – глинистого прослоя в кровле жилы; 7 – подстилающей каменной соли; 8 – сylvиниты пласта КрII; 9–11 – сylvиниты пласта КрII, отобранные у самой крупной складки (9) и на расстоянии 58 м (10) и 131–241 м (11).

Fig. 10. Position of the composition of bound gases in the studied formations (a), salt rocks of the Usolsky mine (б) and at different distances from a large fold (в) on the diagram of A. Prinzhofer and E. Pernaton (1997).

1, 2 – red and variegated sylvinit; 3–5 – vein aggregates of red halite-sylvinit, blue and yellowish halite; 6 – clay interlayer in the roof of the vein; 7 – underlying rock salt; 8 – sylvinites of bed KrII; 9–11 – sylvinites of the KrII formation taken from the largest fold (9) and at a distance of 58 m (10) and 131–241 m (11).

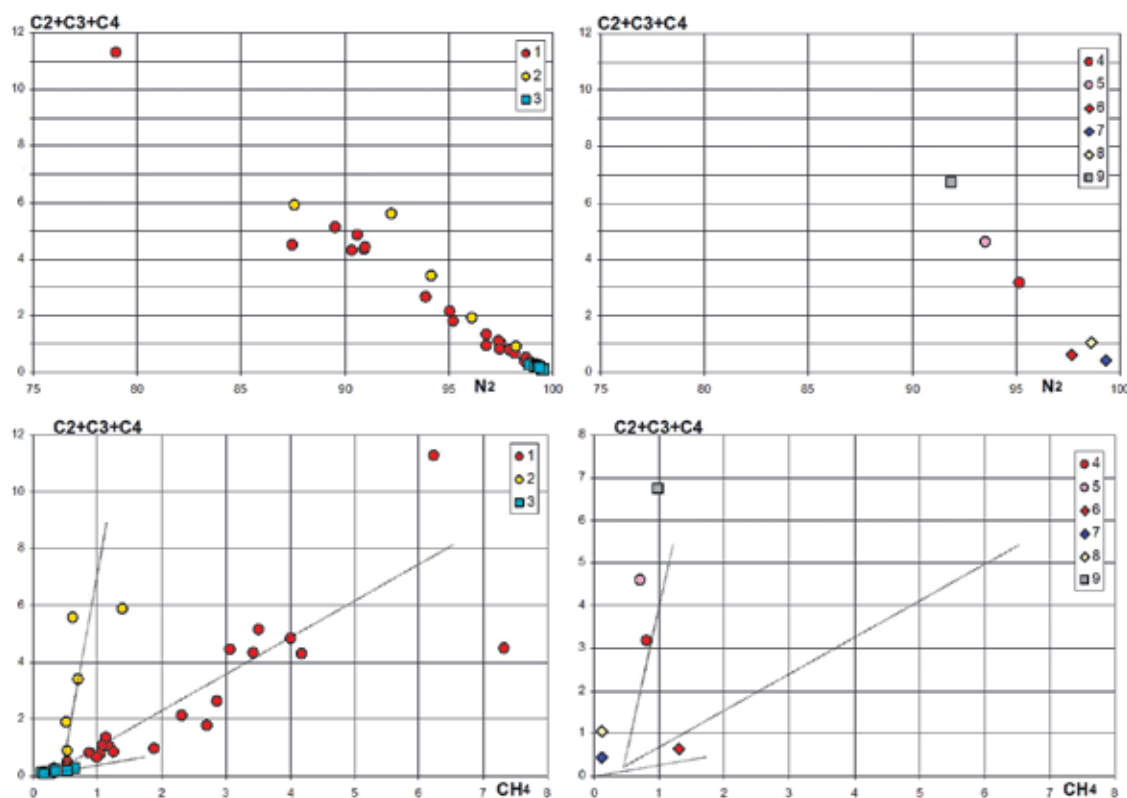


Рис. 11. Соотношение азота, метана и его гомологов в исследованных образованиях и различных породах.

1–3 – сylvinites пл. КрII (1), сylvinites глинистые (2) и halitites подстилающей каменной соли (3) Усольского рудника; 4–9 – образования минерализованной зоны: 4 – красный сylvinit, 5 – пестрый сylvinit, 6 – красный галит-сylvinit-новый агрегат, 7 – синий и 8 – желтоватый галитовый, 9 – глинистый прослой в кровле жилы.

Fig. 11. The ratio of nitrogen, methane and its homologues in the studied formations and various rocks.

1–3 – sylvinites layer KrII (1), clayey sylvinites (2) and halitites of the underlying rock salt (3) of the Usolsky mine; 4–9 – formations of the mineralized zone: 4 – red sylvinit, 5 – variegated sylvinit, 6 – red halite-sylvinit aggregate, 7 – blue and 8 – yellowish halite, 9 – clay interlayer in the top of the vein.

материалом. Показана возможность реализации и других механизмов (диффузия, сульфатредукция), ведущих к нарушению соотношения углеводородных газов в глинистых прослоях.

В связи с тем, что рассолы были мобилизованы внутри самой соляной толщи, а не поступали извне, описываемые геологические осложнения не представляют собой угрозу целостности водо-защитной толщи. Поскольку глинистые прослои в кровле пласта КрII, где накапливается свободный газ, находятся не в кровле, а на забое выработки, разгрузка газов происходит послойно (и спокойно) при комбайновой проходке. Таким образом, введения специальных мер предотвращения газодинамических явлений не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрейко С.С. (2007) Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогноза и способы пре-

дотвращения. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 219 с.

Валяшко М.Г., Мандрыкина Т.В. (1952) Бром в соляных отложениях как генетический и поисковый признак. *Тр. ВНИИ Галургии, вып. XXIII*, 54-92.

Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. (2008) Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. Пермь, 414 с.

Иванов В.В., Цыганко М.В., Протасов И.И., Кандзюба Е.А. (2021) О находке необычного параллельно-шестоватого агрегата синего галита на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (Пермский край). *В мире минералов: Минералог. альманах*, 26(2), 70-73.

Кислик В.З. (1971) Постседиментационные изменения в калийных горизонтах Старобинского месторождения. *Проблемы прогноза, поисков и разведок месторождений горно-химического сырья СССР*. М., 209-218.

Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Под ред. Н.М. Джиноридзе. (2000) СПб.; Соликамск, 400 с.

- Третьяков Ю.А. (1974) Зоны разубоживания Верхнекамского месторождения. *Литология и полезн. ископаемые*, (1), 75-85.
- Чайковский И.И., Трапезников Д.Е., Чиркова Е.П., Каблинов О.С., Иванов О.В. (2016) Новая эпигенетическая порода Верхнекамского месторождения солей: структурная позиция, состав и газоносность. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. Вып. 19*, 379-386.
- Чайковский И.И., Чиркова Е.П., Коротченкова О.В. (2017a) Эпигенетические процессы и минералы Старобинского месторождения солей. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. Вып. 20*, 91-103
- Чайковский И.И., Чиркова Е.П., Трапезников Д.Е. (2017b) Хромжелезистые метаколлоидные образования из белых карналлититов Верхнекамского месторождения. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (3), 20-25.
- Чайковский И.И., Иванов О.В., Паньков И.Л., Чиркова Е.П. (2021) О природе крупной антиклинальной складки на Верхнекамском месторождении солей, ее геомеханической и газовой-геохимической зональности. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естествозн. науки*, **163**(3), 490-499. doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499
- Чиркова Е.П., Чайковский И.И. (2012) О роли сульфатредукции в минералообразовании на Верхнекамском месторождении солей. *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: Сб. науч. статей. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь. Вып. 15*, 79-84.
- Prinzhofer A., Pernaton E. (1997) Isotopically light in natural gas: bacterial imprint or diffusive fractionation. *Chem. Geol.*, **33**(4), 193-200.
- Chaikovskii I.I., Chirkova E.P., Trapeznikov D.E. (2017b) Chrome-iron metacolloidal formations from white carnallites of the Verkhnekamskoye deposit. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (3), 20-25. (In Russ.)
- Chaikovskii I.I., Ivanov O.V., Pankov I.L., Chirkova E.P. (2021) On the nature of a large anticlinal fold at the Verkhnekamskoye salt deposit, its geomechanical and gas-geochemical zonation. *Uch. Zap. Kazan. Un-ta. Ser. Estestv. Nauki*, **163**(3), 490-499. doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499 (In Russ.)
- Chaikovskii I.I., Trapeznikov D.E., Chirkova E.P., Kablinov O.S., Ivanov O.V. (2016) New epigenetic rock of the Verkhnekamsk salt deposit: structural position, composition and gas content. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky. Perm State Nat. Res. Univ. Perm. Iss.* 19, 379-386. (In Russ.)
- Chirkova E.P., Chaikovskii I.I. (2012) On the role of sulfate reduction in mineral formation at the Verkhnekama salt deposit. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky: Coll. sci. articles. Perm State Nat. Res. Univ. Perm. Iss.* 15, 79-84. (In Russ.)
- Ivanov V.V., Tsyganko M.V., Protasov I.I., Kandzyuba E.A. (2021) On the discovery of an unusual parallel columnar aggregate of blue halite at the Verkhnekamsk deposit of potassium-magnesium salts (Perm Territory). *V Mire Mineralov: Mineralog. Al'manakh*, **26**(2), 70-73. (In Russ.)
- Kisluk V.Z. (1971) Postsedimentary changes in the potassium horizons of the Starobinskoye deposit. *Problems of forecasting, prospecting and exploration of deposits of mining and chemical raw materials in the USSR. Moscow*, 209-218. (In Russ.)
- Petrotectonic bases for the safe operation of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. (Ed. N.M. Ginoridze). (2000) St.Petersburg; Solikamsk, 400 p. (In Russ.)
- Tret'yakov Yu.A. (1974) Zones of impoverishment of the Verkhnekamskoye deposit. *Litol. Polezn. Iskop.*, (1), 75-85. (In Russ.)
- Prinzhofer A., Pernaton E. (1997) Isotopically light in natural gas: bacterial imprint or diffusive fractionation. *Chem. Geol.*, **33**(4), 193-200.
- Valyashko M.G., Mandrykina T.V. (1952) Bromine in salt deposits as a genetic and exploratory feature. *Tr. VNII Galurgii. Vyp. XXIII*, 54-92. (In Russ.)
- Zemskov A.N., Kondrashev P.I., Travnikova L.G. (2008) Natural gases of potash deposits and measures to combat them. Perm, 414 p. (In Russ.)

REFERENCES

- Andreiko S.S. (2007) Gas-dynamic phenomena in potash mines: methods of forecasting and methods of prevention. Perm, Publishing House Perm State tech. univ., 219 p. (In Russ.)
- Chaikovskii I.I., Chirkova E.P., Korotchenkova O.V. (2017a) Epigenetic processes and minerals of the Starobinsky salt deposit. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky. Perm State Nat. Res. Univ. Perm. Iss.* 20, 91-103. (In Russ.)