

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.424:553.632

doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499

## О ПРИРОДЕ КРУПНОЙ АНТИКЛИНАЛЬНОЙ СКЛАДКИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ, ЕЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ГАЗОВО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

*И.И. Чайковский, О.В. Иванов, И.Л. Паньков, Е.П. Чиркова*  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь, 614007, Россия*

### Аннотация

Установлено, что на месте пересечения двух систем складчатости на Верхнекамском месторождении солей в соляной толще сформировалась отдельная флексуроподобная складка амплитудой более 30 м. В процессе формирования данной дислокации сильвинитовый пласт подвергся соскладчатому катагенезу, приведшему к будинажу и появлению директивной текстуры, интенсивность которых убывает на удалении от складки.

В геомеханическом отношении сформировались две зоны: ближняя, незначительно ослабленных пород с подзонами более жестких (около 0 м) и более пластичных (около 58 м), и дальняя, сильно ослабленных пород с подзонами более вязких и менее упругих (около 131 м) и менее вязких и более упругих (около 241 м). Их образование, наряду с уплощением зерен, связывается с отжимом и пространственным перераспределением газовой-жидких включений.

В процессе диффузии газовой фазы сформировалась зональность распределения газов (метан и его гомологи → азот → углекислый газ), которая согласуется с их миграционной способностью. Высокое значение индекса  $C_2H_6/i-C_4H_{10}$  дает основание считать, что часть углеводородных газов могла генерироваться на месте из собственного органического вещества солей в процессе соскладчатого катагенеза.

**Ключевые слова:** Верхнекамское месторождение солей, складчатость, газоносность, физико-механические свойства

### Введение

Верхнекамское месторождение солей кунгурского возраста сложено хорошо стратифицированной толщей переслаивающихся галитовых, сильвинитовых и карналлитовых пород, которые осложнены внутрисоляной складчатостью различных порядков.

В процессе осадконакопления и диагенетического разложения сингенетического органического вещества соляные породы захватывали газовую фазу, которая локализовалась внутри зерен соляных минералов (в виде газовой-жидких включений) и в межзерновом пространстве. Их содержание в среднем для различных пластов варьируется от 0.03 до 0.3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Вскрытие сильвинитовых и карналлитовых пластов горными выработками с относительно равномерным первичным распределением газовой фазы не представляет угрозы. Однако образование складчатости в соляных толщах сопровождается в силу их высокой пла-

стичности высвобождением газовой-жидких включений, которые вместе с межзерновыми газами становятся «свободными» и могут мигрировать по вертикали и латерали, формируя локальные газовые скопления. При подработке последних имеется риск возникновения газодинамических явлений, нередко с разрушением горнопроходческого оборудования и человеческими жертвами. Общие представления о распределении газов в солях Верхнекамского месторождения и Усольского рудника приведены в работах [1–3].

Обычно вертикальная амплитуда складок редко превышает первые метры и не осложняет подземную разработку сильвинитовых или карналлитовых пластов. Тем не менее в процессе проходки подготовительных выработок по сильвинитовому пласту КрII на одном из участков Усольского рудника была вскрыта складка высотой более 30 м, на которой было решено провести структурно-геологические, физико-механические и газово-геохимические исследования для определения природы складки и прочностных свойств прилегающих пород, а также выявления закономерностей пространственного распределения связанных газов.

### Методика работ

Для определения природы внутрисоляной складчатости была построена структурная карта исследуемого сильвинитового пласта КрII, а для изучения свойств соляных пород геологической службой рудника из стен выработки были выбурены четыре представительные (около 10 кг каждая) пробы керна диаметром 128 мм из одного и того же сильвинитового слоя (пласт КрII, слой 1). Керны были отобраны непосредственно у складки, а также на расстоянии 58, 131 и 241 м от нее.

Структурно-геологические исследования включали обследование подготовительных горных выработок, интерпретацию структурных планов и структурно-литологическое изучение образцов на стереомикроскопе Leica MZ16 (Leica Microsystems GmbH, Германия).

Физико-механические испытания заключались в подготовке из каждой пробы 4–5 монолитов размером 70×35×35 мм и определении их свойств на сервогидравлическом испытательном комплексе MTS 815 (MTS, США) и электромеханическом прессе Zwick/Z 250 (Zwick Roell AG, Германия). Испытания и обработка результатов проводились согласно методике, приведенной в [4].

Компонентный состав связанных газов определяли с помощью газового хроматографа 450-GC (Varian, Inc., Нидерланды). Для каждой пробы определение газонности выполняли в трех повторностях.

Все лабораторные работы проводились на оборудовании ЦКП «Исследование материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» ПНИПУ.

### Результаты и их обсуждение

В качестве поверхности для структурного анализа использована кровля пласта КрII, которая является контрастной границей между красными сильвинитами и перекрывающей их серо-черной каменной солью пласта (междупластья) КрII–КрI. В связи с технологической необходимостью эта граница всегда вскрывается проходческим комбайном в отличие от других частей пласта, и, соответственно,

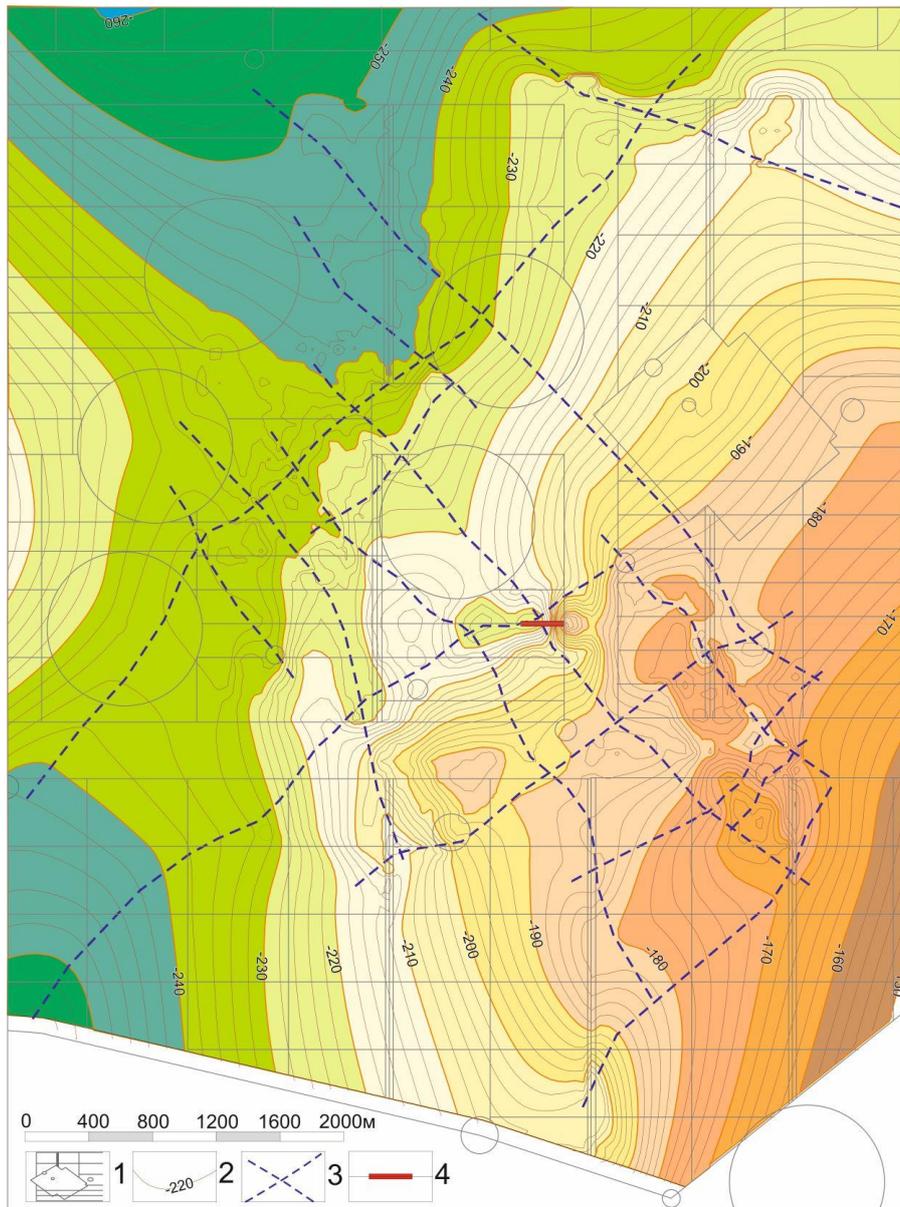


Рис. 1. Структурная карта поверхности пласта КрII Усольского рудника: 1 – границы панелей и блоков; 2 – изолинии кровли пласта КрII; 3 – оси синеклинальных складок; 4 – исследуемый участок горной выработки. Окружностями показаны целики вокруг солеразведочных и структурных скважин

абсолютных отметок по ней имеется существенно больше. На основе интерпретации структурной карты кровли пласта КрII можно сказать, что его структура осложнена двумя системами складчатости северо-восточного и северо-западного простирания (рис. 1, 2), а сама складка представляет собой структурный нос.

Результаты стереомикроскопии образцов свидетельствуют о том, что все пробы характеризуются одинаковым минеральным составом пород. Они состоят

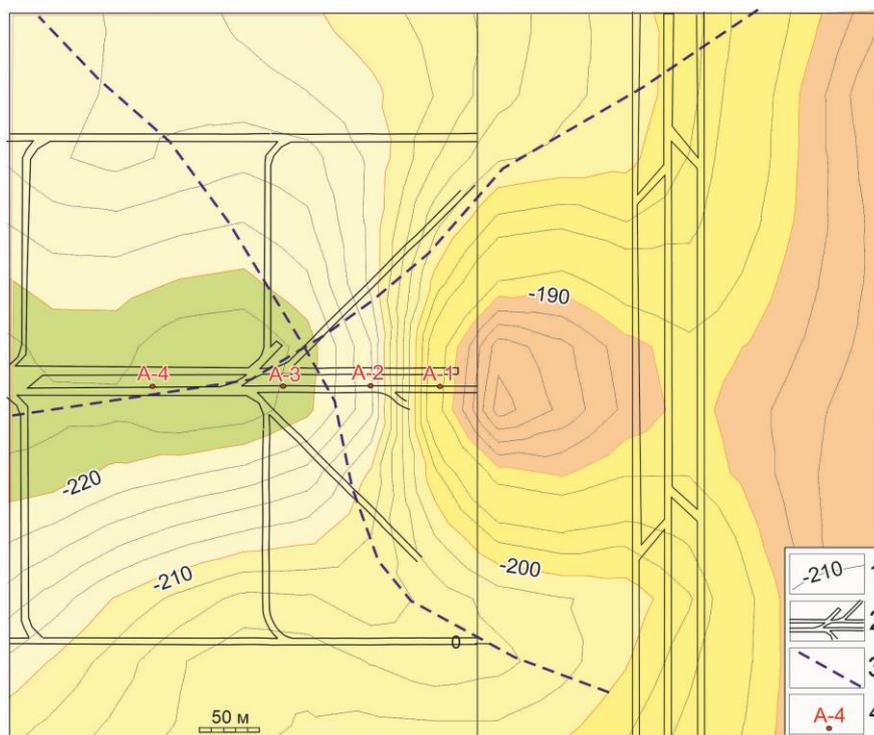


Рис. 2. Структурная карта поверхности пласта КрII в районе антиклинальной складки: 1 – изолинии кровли пласта КрII; 2 – горные выработки; 3 – оси синклинальных складок; 4 – места отбора и номера проб

Табл. 1

Структурно-геологическая характеристика пород

Проба	Будинаж	Лежачие складки	Удлинение зерен
A-1 (0 м)	глинистых и галитовых прослоев	+	1:2.8 – 1:13.5
A-2 (58 м)		+	1:2.2 – 1:12.2
A-3 (131 м)		+	1:1.8 – 1:5.5
A-4 (241 м)	глинистых прослоев	–	1:2.2 – 1:9.3

из сильвинита с подчиненными прослоями светло-серой каменной соли и черного, обогащенного органическим веществом, глинистого материала. Различия наблюдаются в степени брекчирования (будинажа), наличии лежачих «сплюснутых» микроскладок и удлинении зерен сильвина (табл. 1, рис. 3), которые характеризуют проявившееся послойное течение солей. На удалении от складки проявлен будинаж только глинистых прослоев, лежачие складки отсутствуют, а удлинение зерен уменьшается.

Физико-механические испытания показали (табл. 2, рис. 4, а), что значения определяемых параметров варьируются на различном расстоянии от складки.

Пониженные относительно среднего для Усольского рудника значения прочности пород на одноосное сжатие свидетельствуют о том, что зона влияния складки оказалась больше, чем интервал исследования (241 м). Из анализа кривых изменения физико-механических свойств можно заключить, что в исследуемой зоне произошло формирование зональности проявления геомеханических свойств.

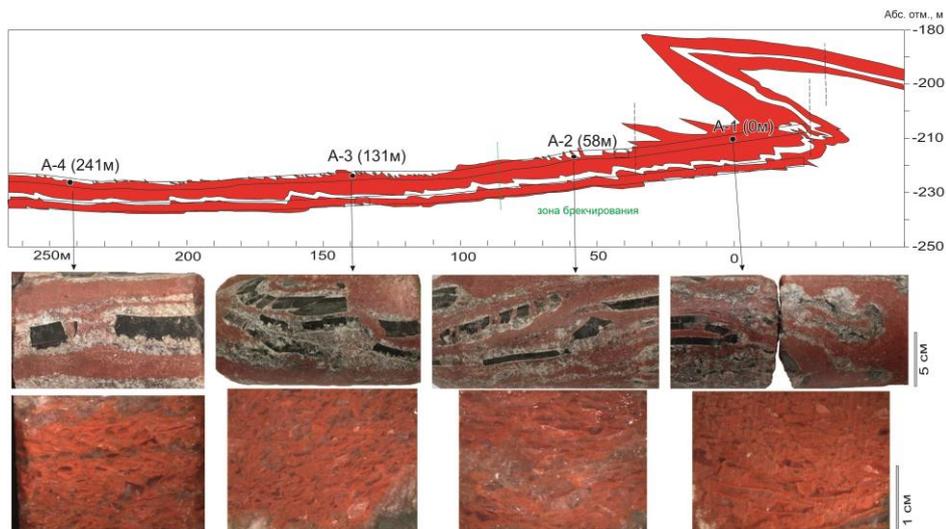


Рис. 3. Общий вид и детали строения пород на различном расстоянии от складки. Красное – сильвинит, серое – прослойки каменной соли, черное – фрагменты глинистых прослоев

Табл. 2

Средние значения физико-механических параметров для испытанных пород\*

Проба	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\varepsilon_{пр}$ , %	$D_y$ , ГПа	$E$ , ГПа	$M_c$ , ГПа
А-1	16 11	1 93	1 83	9 16	0 77
А-2	16 28	3 09	0 88	7 71	0 72
А-3	11 068	2 29	0 99	8 47	0 517
А-4	11 848	1 82	0 97	6 34	0 67

\*  $\sigma_{сж}$  – прочность породы на одноосное сжатие;  $\varepsilon_{пр}$  – разрушающая деформация;  $D_y$  – начальный модуль деформации;  $E$  – модуль упругости;  $M_c$  – модуль спада.

В первой зоне незначительно ослабленных пород могут быть выделены подзоны более жестких (около 0 м) и более пластичных (около 58 м) пород. Во второй зоне сильно ослабленных пород выделены подзоны более вязких и менее упругих (около 131 м) и менее вязких и более упругих (около 241 м) пород.

Определение газоносности пород показало (см. табл. 3, рис. 4, б), что в непосредственной близости от складки количество газов минимально ( $0.014 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ). На удалении от нее количество газов возрастает, но тоже не выходит на средние значения, характерные для пласта. Зафиксирована значительная дифференциация состава газов в зависимости от расстояния до складки, которая проявлялась в «смене» метана его более тяжелыми гомологами, а затем азотом и углекислым газом от складки к периферической части зоны ее влияния.

Повышенное содержание углеводородных газов в районе складки относительно как сильвинитового пласта (рис. 5, а), так и нижележащей подстилающей каменной соли (ПдКС) не дает оснований предполагать их поступление из под-солевых раннепермских и каменноугольных нефтеносных рифовых структур. Диаграмма  $\text{C}_2\text{H}_6/i\text{-C}_4\text{H}_{10} - \text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ , разработанная А. Принцхофером и Э. Пернатом [5] для генетической разбраковки газовых скоплений (рис. 5, б), позволила связать образовавшиеся газы с прогрессивным (термальным) разложением органического вещества соляной залежи.

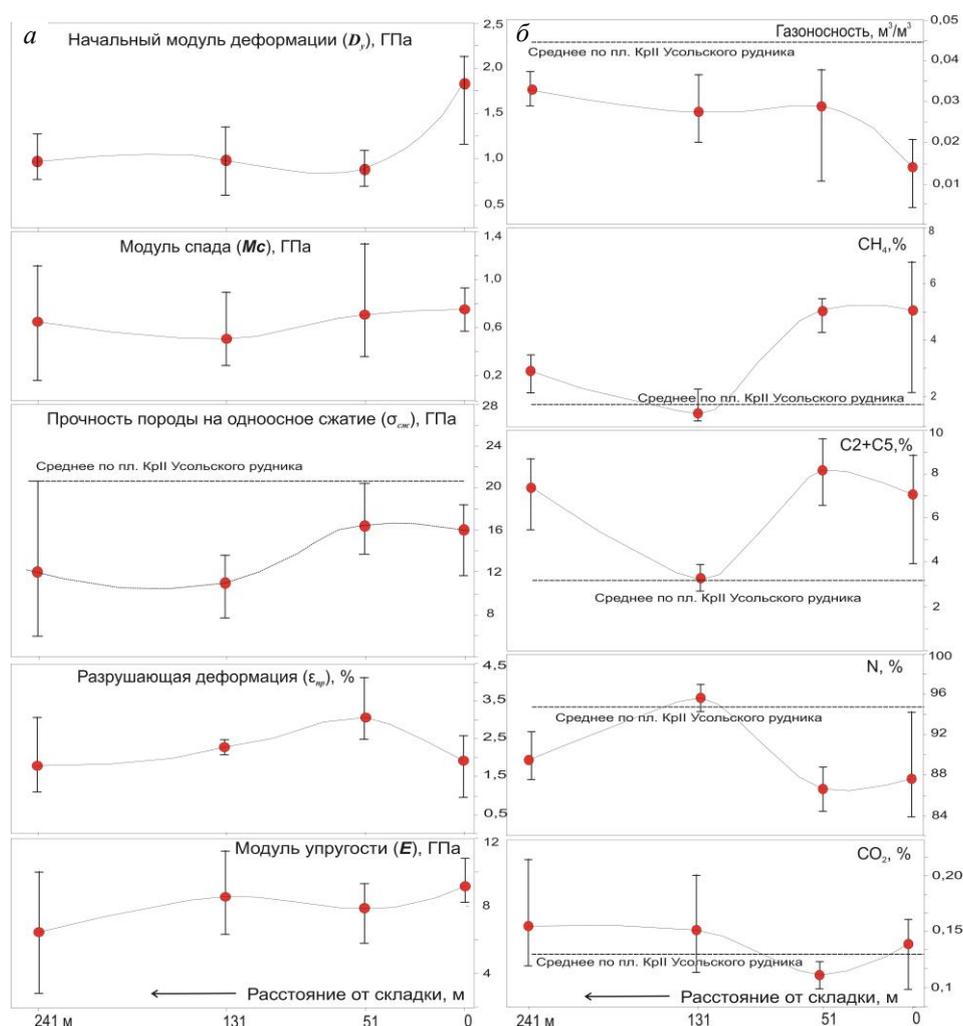


Рис. 4. Изменение физико-механических свойств пород (а), их газоносности и состава связанных газов (б) на различном расстоянии от складки

Табл. 3

Средние значения газоносности и состава связанных газов

Проба	Q, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Содержание, %								
		N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>
A-1	0.014	87.67	5.06	4.84	0.90	0.24	0.5241	0.33	0.32	0.14
A-2	0.029	86.53	5.02	5.62	1.01	0.35	0.66	0.39	0.32	0.11
A-3	0.028	95.82	1.33	1.44	0.35	0.14	0.30	0.26	0.21	0.15
A-4	0.033	89.58	2.83	5.07	0.89	0.3740	0.48	0.3661	0.27	0.16

Образовавшаяся высокоамплитудная складка располагается на месте пересечения складчатых структур различной ориентировки, что является убедительным доказательством ее локальной природы, связанной с наложением (интерференцией) волн. Ранее [6] образование складок северо-восточной и северо-западной ориентировки связывалось с гравитационным оползанием соляных масс с разных склонов Соликамской впадины.

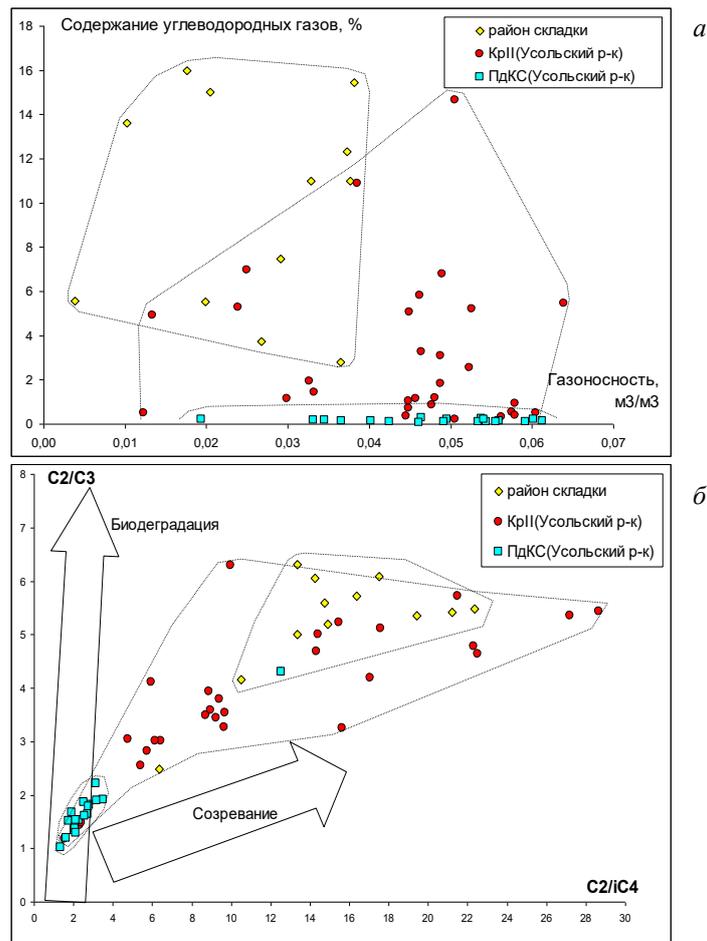


Рис. 5. Сопоставление пород из района складки с породами пласта КрII и подстилающей каменной соли Усольского рудника: а – соотношение газоносности и содержания углеводородных газов; б – соотношение геохимических индикаторов на диаграмме А. Принццофера и Э. Пернатона [5]

Послойное течение солей проявилось в брекчировании (будинаже) более компетентных по отношению к сильвину прослоев глины и каменной соли, образовании микроскладок, дроблении и переориентировке изначально изометричных зерен сильвина, особенно вблизи контактов прослоев. Произошедшая структурная перестройка породы в зоне влияния складки выразилась в образовании геомеханической и газовой-геохимической зональности. Несколько повышенные значения прочности породы на одноосное сжатие и пониженная газоносность пород у складки указывают на то, что здесь произошло не только некоторое уплотнение минерального скелета, но и отжатие газовой-жидких включений в периферические части зоны влияния складки. Ослабление прочности пород и колебания вязкоупругих свойств могут отражать проявившуюся неравномерную инфильтрацию флюидов на удалении от складки.

Наблюдаемая зональность в ряду метан (и его гомологи) → азот → углекислый газ в целом согласуется с эффективным диаметром молекул газов (3.8,

3.4, 3.3 Å соответственно), что говорит в пользу диффузионной природы проявившейся дифференциации. Углекислый газ является еще и наиболее водорастворимым. Однако высокое значение предложенного А. Принцхофером и Э. Пернатом [5] индекса  $C_2H_6/i-C_4H_{10}$ , отражающего степень термального созревания органического вещества, в районе складки по сравнению с остальным шахтным полем (рис. 4, б) дает основание считать, что часть углеводородных газов могла генерироваться на месте из аутигенной органики в процессе соскладчатого катагенеза.

Характерные для пласта средние значения, полученные в результате интерполяции кривых предела прочности на сжатие и газоносности, служат показателем того, что зона влияния данной складки оказалась больше исследуемого интервала и составляет 380–500 м. Таким образом, исследуемая высокоамплитудная складка имеет локальную природу, примыкающая к ней зона характеризуется пониженной прочностью и газоносностью, однако на ее периферии могут наблюдаться газовые скопления.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-45-596017 р\_НОЦ\_Пермский край).

#### Литература

1. Андрейко С.С., Галкин В.И., Шаманский Г.П. Некоторые особенности распределения углеводородных газов по разрезу Верхнекамского месторождения калийных солей // Разработка соляных месторождений: Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1980. – С. 82–87.
2. Трапезников Д.Е., Чиркова Е.П. Взаимосвязь литологии и газоносности соляных пород на примере Верхнекамского месторождения солей // Горное эхо. – 2020. – № 3. – С. 26–32. – doi: 10.7242/echo.2020.3.5.
3. Чайковский И.И., Иванов О.В. Новые данные по геохимии газов калийных месторождений // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2014. – Т. 4, № 25. – С. 56–65. – doi: 10.17072/psu.geol.25.56.
4. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
5. Prinzhofer A., Pernaton E. Isotopically light methane in natural gas: Bacterial imprint or diffusive fractionation? // Chem. Geol. – 1997. – V. 142, No 3–4. – P. 193–200. – doi: 10.1016/S0009-2541(97)00082-X.
6. Чайковский И.И. Основные этапы формирования тектонических нарушений в водозащитной толще Верхнекамского калийного месторождения // Горный журн. – 2008. – № 10. – С. 41–44.

Поступила в редакцию  
29.06.2021

---

**Чайковский Илья Иванович**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии месторождений полезных ископаемых

Горный институт УрО РАН  
ул. Сибирская, д. 78а, г. Пермь, 614007, Россия  
E-mail: [ilya@mi-perm.ru](mailto:ilya@mi-perm.ru)

**Иванов Олег Васильевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики

Горный институт УрО РАН  
ул. Сибирская, д. 78а, г. Пермь, 614007, Россия  
E-mail: *miner200@mail.ru*

**Паньков Иван Леонидович**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией физических процессов освоения георесурсов

Горный институт УрО РАН  
ул. Сибирская, д. 78а, г. Пермь, 614007, Россия  
E-mail: *ivpan@mi-perm.ru*

**Чиркова Елена Павловна**, инженер лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых

Горный институт УрО РАН  
ул. Сибирская, д. 78а, г. Пермь, 614007, Россия  
E-mail: *zaitseva\_59@mail.ru*

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2021, vol. 163, no. 3, pp. 490–499

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499

**On the Nature of a Large Anticlinal Fold in the Upper Kama Salt Deposit,  
Its Geomechanical and Gas-Geochemical Zonality**

*I.I. Chaikovskiy<sup>\*</sup>, O.V. Ivanov<sup>\*\*</sup>, I.L. Pan'kov<sup>\*\*\*</sup>, E.P. Chirkova<sup>\*\*\*\*</sup>*  
*Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,*  
*Perm, 614007 Russia*

E-mail: *\*ilya@mi-perm.ru, \*\*miner200@mail.ru, \*\*\*ivpan@mi-perm.ru, \*\*\*\*zaitseva\_59@mail.ru*

Received July 29, 2021

**Abstract**

Large (more than 10 m in height) folds complicate the longwall mining of potash salts and are accompanied with the formation of foci of gas-dynamic phenomena. In this study, to identify the folding nature, changes in the physical properties of its rocks, and the distribution of gases, we analyzed the structural plan of the mined formation, performed structural geological observations, determined the amount and composition of associated gases, and identified the deformation parameters of salts.

It was found that a separate flexure-like fold with a height of more than 30 m developed at the intersection of two fold systems of the salt stratum. During the formation of this dislocation, the sylvinite layer underwent folding catagenesis, which led to the boudinage and the appearance of a directive texture, the intensity of which decreases with the distance from the fold. In terms of the geomechanics, the following two zones were formed: near, slightly weakened rocks with subzones of stiffer (about 0 m) and more plastic (about 58 m) rocks, as well as distant, heavily weakened rocks with subzones of more viscous and less elastic (about 131 m) rocks and less viscous and more elastic (about 241 m) rocks. Their formation, along with the flattening of grains, can be associated with the squeezing and spatial redistribution of gas-liquid inclusions. In the process of gas-phase diffusion, zonality in the distribution of gases was observed (methane and its homologues → nitrogen → carbon dioxide). It turned out to be consistent with their migration ability. The high value of the  $C_2H_6/i-C_4H_{10}$  index suggests that a part of the hydrocarbon gases could have been generated in situ from the organic matter of salts during the fold catagenesis. It was established that the zone of influence of a 30-m fold is 380–500 m, which makes it possible to predict the formation of free gases foci in this interval and the adoption of appropriate protection measures.

**Keywords:** Upper Kama salt deposit, folding, gas content, physical and mechanical properties

**Acknowledgments.** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-45-596017 r\_NOTs\_Permskii krai).

### Figure Captions

- Fig. 1. Structural map of the surface of the KrII layer of the Usolskiy mine: 1 – boundaries of the panels and blocks; 2 – isolines of the top of the KrII formation; 3 – synclinal kinks; 4 – the investigated section of the mine.
- Fig. 2. Structural map of the KrII stratum surface in the area of the anticlinal fold: 1 – isolines of the KrII stratum roof; 2 – mine workings; 3 – axes of the synclinal folds; 4 – sampling locations and sample numbers.
- Fig. 3. General view and details of the structure of rocks at different distances from the fold. Red – sylvinite, gray – interlayers of rock salt, black – fragments of clay interlayers.
- Fig. 4. Changes in the physical and mechanical properties of rocks (*a*), their gas content and the composition of bound gases (*b*) at different distances from the fold.
- Fig. 5. Comparison of rocks from the area of the fold with the rocks of the KrII layer and the underlying rock salt of the Usolskiy mine: *a* – the ratio of gas content and the content of hydrocarbon gases; *b* – the ratio of geochemical indicators on A. Prinzhofer and E. Pernaton's diagram [5].

### References

1. Andreiko S.S., Galkin V.I., Shamanskii G.P. Some features of the distribution of hydrocarbon gases in the section of the Upper Kama deposit of potassium salts. In: *Razrabotka solyanykh mestorozhdenii* [Development of Salt Deposits]. Perm, Permsk. Politekh. Inst., 1980, pp. 82–87. (In Russian)
2. Trapeznikov D.E., Chirkova E.P. The relationship between lithology and gas content of salt rocks in the Upper Kama salt deposit. *Gorn. Ekho*, 2020, no. 3, pp. 26–32. doi: 10.7242/echo.2020.3.5. (In Russian)
3. Chaikovskiy I.I., Ivanov O.V. New data on the geochemistry of gases from potash deposits. *Vestn. Permsk. Univ. Ser. Geol.*, 2014, vol. 4, no. 25, pp. 56–65. doi: 10.17072/psu.geol.25.56. (In Russian)
4. Baryakh A.A., Asanov V.A., Pan'kov I.L. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva solyanykh porod Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniya* [Physicomechanical Properties of Salt Rocks of the Upper Kama Potash Deposit]. Perm, Izd. Permsk. Gos. Tekh. Univ., 2008. 199 p. (In Russian)
5. Prinzhofer A., Pernaton E. Isotopically light in natural gas: Bacterial imprint or diffusive fractionation? *Chem. Geol.*, 1997, vol. 142, nos. 3–4, pp. 193–200. doi: 10.1016/S0009-2541(97)00082-X.
6. Chaikovskiy I.I. The main stages of tectonic faults formation in the waterproof strata of the Upper Kama potash deposit. *Gorn. Zh.*, 2008, no. 10, pp. 41–44. (In Russian)

**Для цитирования:** Чайковский И.И., Иванов О.В., Паньков И.Л., Чиркова Е.П. О природе крупной антиклинальной складки на Верхнекамском месторождении солей, ее геомеханической и газовой-геохимической зональности // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 3. – С. 490–499. – doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499.

**For citation:** Chaikovskiy I.I., Ivanov O.V., Pan'kov I.L., Chirkova E.P. On the nature of a large anticlinal fold in the Upper Kama salt deposit, its geomechanical and gas-geochemical zonality. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 3, pp. 490–499. doi: 10.26907/2542-064X.2021.3.490-499. (In Russian)