

УДК 549.01

Современное минералообразование в месте разгрузки рассолов Людмилинской скважины (г. Соликамск, Пермский край)

И.И. Чайковский^{a,b}, О.В. Коротченкова^{a,b}, Т.В. Федоров^{a,b}

^aГорный институт УрО РАН

614007, Пермь, ул. Сибирская 78а. E-mail: ilya@mi-perm.ru

^bПермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева 15

(Статья поступила в редакцию 4 сентября 2019 г.)

Охарактеризованы минералы, сформировавшиеся из холодных (4°C) хлоридно-натриевых растворов, разгрузившихся с 1923 по 2019 г. из Людмилинской рассолодобывающей скважины. За это время минерализация упала с 260 до 9 г/дм³, а в приустье скважины сформировалась экосистема, в которой представлены беспозвоночные животные, диатомовые и харовые водоросли, железо- и серобактерии. Минералы осаждаются как на поверхности галек, так и в глинисто-песчаных аллювиальных отложениях. Наряду с кальцитом и пиритом здесь сформировались микронные выделения самородных фаз (Cu, Ag, Ni, бронза), сульфидов (Cu, Ag, Ni, Fe), сульфохлоридов (Cu, Ag, Ni), хлоридов (Ag, Cu), барит и сахамалит-(Ce). Исследуемые рассолы обогащены относительно морской воды сидерофильными (Co, Ni), халькофильными (Zn, Ge, As, Se, Sn, Sb, Bi, Pb, Tl (Cu?)) и литофильными элементами (Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, W, Th). Повышенные содержания этих элементов объясняются геохимической специализацией глинистых надсолевых пород их гидролизом и выщелачиванием металлов ионами Cl⁻ и SO₄²⁻. Показано, что осаждение минералов происходит как химически, так и биохимически.

Ключевые слова: *Верхнекамское месторождение, гипергенные рассолы, серо- и железобактерии, сульфатредукция, самородные минералы, сульфиды и хлориды халькофильных металлов.*

DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.347

Введение

Людмилинская скважина была пробурена в 1906 г. и впервые в России вскрыла прослойки сильвинита. В дальнейшем она использовалась для добычи хлор-натриевого рассола с минерализацией около 260 г/дм³ (Курнаков, Белоглазов, Шмитько, 1917). С 1923 г. добыча прекращена и рассол самоизливается из обсадной деревянной трубы, питая мелкий ручей, впадающий в р. Усолка (рис. 1). Ручей протекает по современному аллювию низкой поймы, сложенному песчано-галечными отложениями с незначительным содержанием глинистой фракции. Вода имеет характерный сернистый запах, а в ручье зафиксированы харовые водоросли с беловатым налетом.

В многочисленных геологических и гидрогеологических исследованиях показано, что рассолы Соликамской впадины формируются в так называемом рассольном горизонте в основании соляно-мергельной толщи

уфимского яруса, залегающей над кунгурскими солями Верхнекамского месторождения. Выше по разрезу залегают терригенно-карбонатная и пестроцветная толщи уфимского возраста. Для надсолевого разреза характерна хорошо выраженная зональность состава подземных вод. Снизу-вверх их состав сменяется с хлоридно-натриевого через сульфатно-кальциевый на гидрокарбонатно-кальциевый. В грубом приближении пестроцветной и терригенно-карбонатной толщам отвечают гидрокарбонатно-кальциевые воды, а соляно-мергельной – сульфатно-кальциевые и хлоридно-натриевые. При откачке вод рассольного горизонта выделяется сернистый газ, что отражает активно протекающие в настоящее время процессы сульфатредукции в кровле соляной толщи, растворяющейся инфильтрационными водами.

Актуальность исследования определяется необходимостью выявления воздействия на сообщества организмов в зоне разгрузки как рассолов, так и формирующихся минераль-

ных фаз, поскольку известно, что хлоридные растворы обладают высокой транспортирующей способностью в отношении многих металлов.

Методика исследования

Для исследования отобраны пробы воды, растительности, поверхностного слоя галек и нижележащего грунта (объемом 20 л) до глубины 30 см. Состав основных компонентов рассола определен в лаборатории гидрохимического анализа (аналитик Е.А Орлова), а микрокомпоненты выявлены на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Auroga M90 на геологическом факультете ПГНИУ (аналитики М.А Волкова, А.Ю

Пузик). Определение биоты проведено к.б.н. Т.В. Фадеевой (ГИ УрО РАН). Новообразованные минеральные фазы на поверхности галек и в шлиховом концентрате диагностировались на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20 в ГИ УрО РАН.

Основные результаты

Результаты химического анализа показали, что в настоящее время минерализация снизилась до $8,95 \text{ г/дм}^3$, однако его хлор-натриевый состав сохранился (табл.1).



Рис. 1. Общий вид устья Людмилинской скважины и харовых водорослей с налетом белесых серобактерий

Таблица 1. Состав рассолов Людмилинской скважины

Ионы	Содержание, г/дм ³	Элемент	Содержание, мкг/дм ³						
K ⁺	0,158 (14,0)	Sr	>1000	Cu	n.d.	Co	0,33	Ga	0,03
Na ⁺	3,183 (85,5)	Rb	55,15	Zn	1,24	Sb	0,21	Y	0,02
Mg ²⁺	0,145 (0,8)	Li	40,64	Cr	1,16	Sn	0,19	Ag	0,01
Ca²⁺	0,245 (1,4)	Al	22,48	Mo	0,99	V	0,12	U	0,01
Cl⁻	4,689 (144,4)	Se	13,55	Te	0,73	Be	0,10	Hf	0,01
SO ₄ ²⁻	0,406 (4,5)	Ba	9,19	W	0,64	Cs	0,10	Ta	0,008
HCO ₃	0,113	Ti	6,99	Ge	0,52	Cd	0,09	TR	n.d.
CO₃²⁻	0,015	As	4,03	Bi	0,50	Th	0,04		
Br ⁻	<0,0005	Mn	3,33	Pb	0,44	Nb	0,04		
H ₂ S	<0,000002	Ni	1,24	Zr	0,35	Tl	0,03		

Примечание. Современный состав компонентов рассола определен 19.03.2019. В скобках приведен анализ по данным Курнакова и др. (1917). n.d. - элемент не определялся. Жирным шрифтом выделены элементы, образующие собственные минералы.

В составе биоты диагностированы веслоногие рачки, малощетинковые черви, 8 видов диатомей, в том числе два – галофильных (Fadееva et al., 2019). Кроме того, зафиксированы харовые водоросли, нитчатые тиобактерии, содержащие элементарную серу, а также глобулярные образования гидроксидов железа, предположительно являющиеся продуктами жизнедеятельности кокковидных форм железобактерий (рис. 2).

На освещенной поверхности галек, чаще всего кварцевого состава, наряду с диатомовыми водорослями диагностированы кристаллы кальцита, скопления фрамбоидального пирита, единичные сгустки гидроксидов железа и зерна сульфидов меди ряда халькозин-ковеллин (рис. 3). В приповерхностном слое также встречена плохо сохранившаяся

монета из латуни с железным сердечником, на которой кроме каймы из сульфата меди и цинка (шULEBERGIT?), гидроксидов железа, пирита и сульфидов меди установлены диатомеи, а также серо- и железобактерии. Наиболее богатым новообразованными минеральными фазами оказался рыхлый глинисто-песчаный осадок. Самыми распространенными и крупными являются гладкогранные и скелетные кристаллы пирита, реже марказита. На их поверхности встречены многочисленные микронные выделения фрамбоидального пирита, самородных фаз (Cu, Ag, Ni, бронза), сульфидов (Cu, Ag, Ni, Fe), сульфохлоридов (Cu, Ag, Ni) и хлоридов (Ag, Cu). Отмечены также сульфаты (стронцийсодержащий барит) и редкоземельный карбонат (сахамалит-(Ce)).

Таблица 2. Встречаемость минеральных фаз на поверхности дна и в аллювиальном осадке

Минералы и их теоретическая формула	Приближенная эмпирическая формула	Освещенная поверхность		Глинисто-песчаный осадок
		галек	латунной монеты	
Кальцит CaCO_3	$(\text{Ca}_{0,94-0,98}\text{Mg}_{0,01-0,03})(\text{CO}_{3-2,99}\text{S}_{0-0,01})$	++*	++	
Пирит FeS_2	$\text{Fe}_{0,94-1,08}\text{S}_{1,92-2,06}$	++	+	++
Ряд халькозин – ковеллин	$\text{Cu}_2\text{S} - \text{CuS}$	++	++	++
Гидроксиды железа $\text{FeO}(\text{OH})$	$(\text{Fe}_{1-0,74}\text{Cu}_{0-0,16}\text{Zn}_{0-0,05})(\text{OH})$	+	++	
Сера S	$(\text{S}_{0,98-0,99}\text{P}_{0,01-0,02})$	+?	++	
Шулебергит $(\text{Cu}, \text{Zn})_7(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Cu}_{5,75}\text{Zn}_{1,77})(\text{SO}_4)_{1,77}(\text{OH})_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$		+	
Марказит FeS_2	$\text{Fe}_{0,95}\text{S}_{2,05}$			++
Медь Cu	Cu			++
Медь серебросодержащая (Cu, Ag)	$\text{Cu}_{0,94-0,97}\text{Ag}_{0,01-0,04}\text{Ni}_{0-0,01}\text{Sn}_{0-0,04}$			++
Серебро Ag	$\text{Ag}_{0,79}\text{Cu}_{0,19}\text{Ni}_{0,01}$			+
Аргентопентландит $\text{Ag}(\text{Fe}, \text{Ni})_8\text{S}_8$	$(\text{Ag}_{2,93}\text{Cu}_{0,60}\text{Fe}_{0,16}\text{Ni}_{4,31})\text{S}_8$			+
Акантит Ag_2S	$\text{Ag}_{2,07}\text{S}_{0,93}$			+
Сульфохлорид серебра $(\text{Ag}, \text{Cu}, \text{Ni})_3(\text{Cl}, \text{S})$	$(\text{Ag}_{1,49-1,64}\text{Cu}_{0,95-1,03}\text{Ni}_{0,34-0,35}) \times (\text{Cl}_{0,74-0,75}\text{S}_{0,49-0,23})$			+
Хлорид серебра Ag_3Cl	$(\text{Ag}_{1,81-2,69}\text{Cu}_{1,03-0,12})\text{Cl}_{1,16-1,19}$			++
Миллерит NiS	$\text{Ni}_{1,04-1,13}\text{S}_{0,92-0,87}$			+
Никель Ni	$\text{Ni}_{0,80}\text{Cu}_{0,20}$			+
Халькопирит CuFeS_2	$\text{Cu}_{1,17}\text{Zn}_{0,10}\text{Fe}_{0,72}\text{S}_{2,01}$			+
Бронза (Cu, Sn)	$\text{Cu}_{1,01}\text{Sn}_{0,99}$			+
Сахамалит-(Ce) $(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})_2(\text{CO}_3)_4$	$\text{Fe}_{0,91}(\text{Ce}_{1,17}\text{La}_{0,93})(\text{CO}_3)_4$			+
Барит BaSO_4	$(\text{Ba}_{0,83-0,92}\text{Sr}_{0,05-0,06})\text{S}_{1,03-1,11}\text{O}_4$			++

*++ – характерные минералы; + – единичные находки.

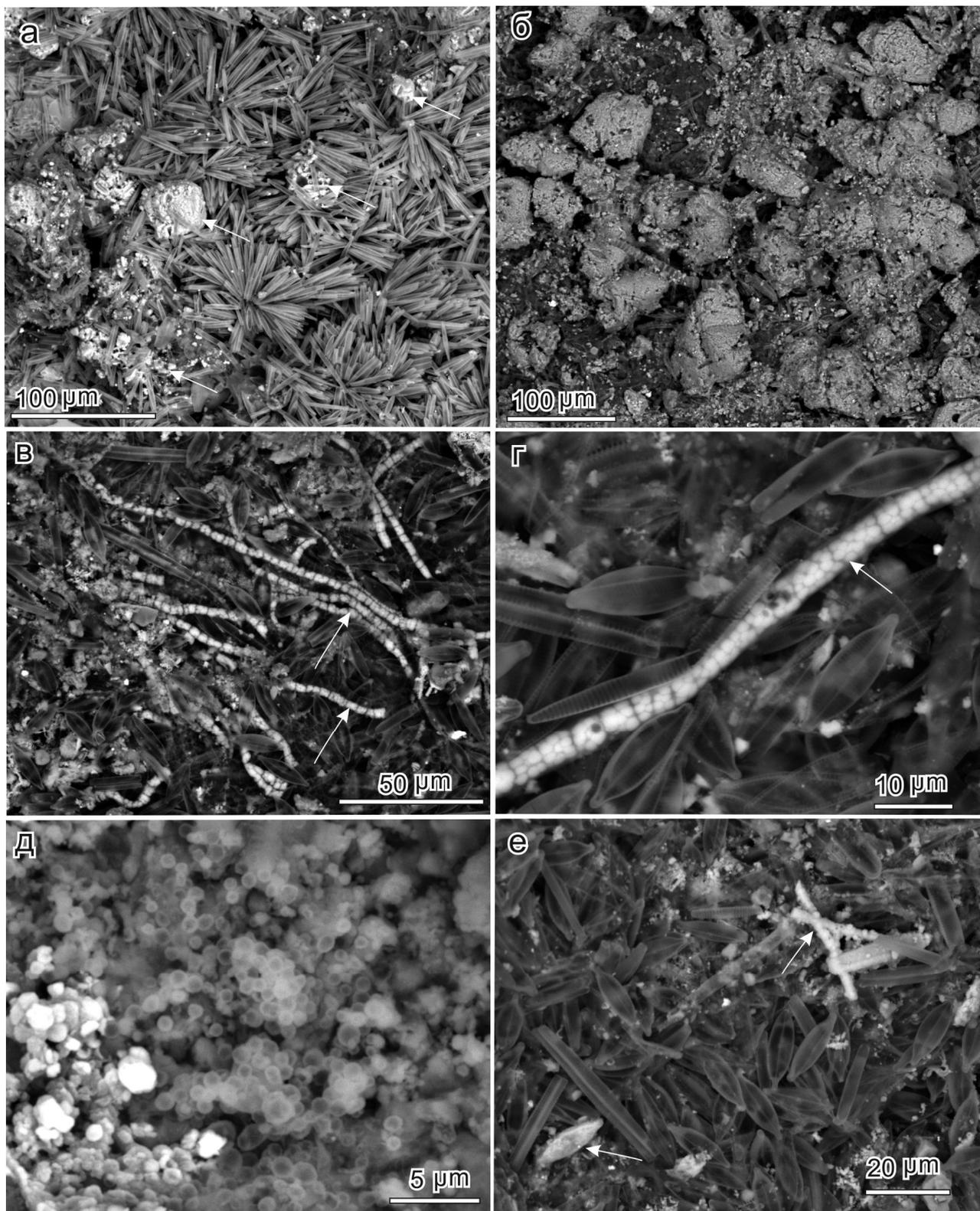


Рис. 2. Обитатели зоны разгрузки рассолов Людмилинской скважины и связанные с ними минеральные образования: а, б – сгустки и кристаллы кальцита среди диатомей; в, г – тиобактерии, содержащие гранулы самородной серы; д, е – замещенные гидроксидами железа коккоидные формы (д), обрастание и замещение ими диатомей (е)

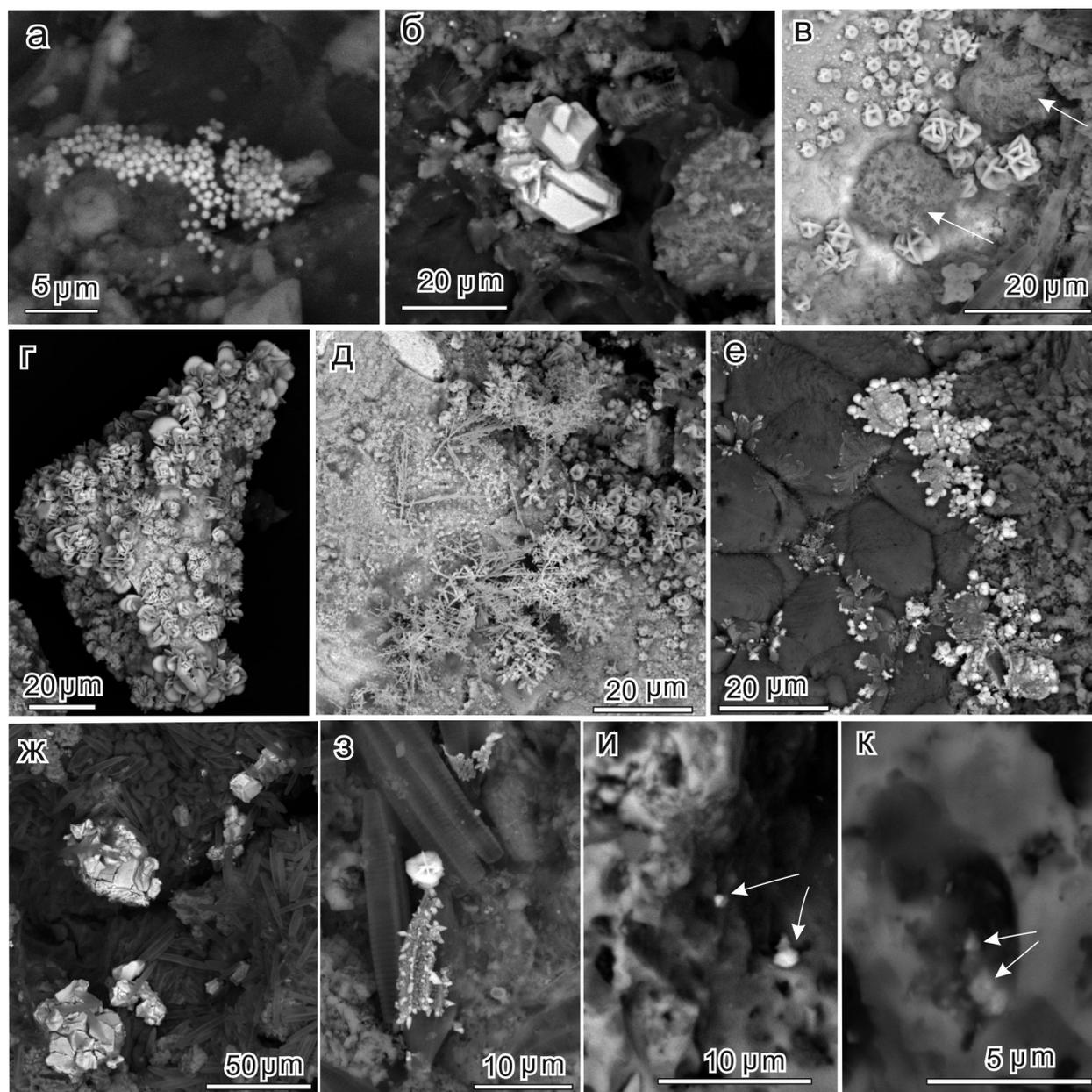


Рис. 3. Минеральные новообразования зоны разгрузки рассолов Людмилинской скважины: а, б – фрамбоидальный и кристаллический пирит; в – рыхлые сгустки гидроксидов железа среди липисфер сульфидов меди; г-ж – листоватые, дендритовидные и зернистые формы проявления сульфидов меди ряда халькозин-ковеллин; з – обрастание и замещение диатомеи сульфидом меди; и, к – серебро-содержащая самородная медь (и) и хлорид серебра (к) на поверхности зерен пирита

Обсуждение

Выявление новообразованных минеральных фаз свидетельствует о металлоносности данных рассолов, необходимости определения источника рудного вещества и механизма его осаждения.

Установлено, что большинство гидротермальных месторождений сформировано из хлоридно-натриевых горячих растворов (Jowett, 1986; Large et al., 2005; Roedder, 1971, 1984; White, 1974). Самыми яркими примерами яв-

ляются стратиформные свинцово-цинковые типа SEDEX, а также медно-серебряные месторождения Польши, залегающие ниже эвапоритов цехштейна.

В настоящее время разгрузка горячих (около 60°C) рассолов происходит и в красноморском рифте, где формируются стратиформные месторождения полиметаллов (Бутузова, 1998). Сульфидная и полиметаллически-серебряная хлорсодержащая минерализация формируется в области разгрузки горячих, преимущественно кальциево-

натриевых рассолов, связанных с нефтяными залежами Челекена (Лебедев, Никитина, 1983). благородные металлы и полиметаллы содержатся в значимых количествах и в горячих подземных рассолах озера Салтон-Си (Skinner et al., 1967). Все эти проявления объясняются высокой растворимостью хлоридов металлов в горячих растворах и вовлечением рассолов в рудообразующий процесс эндогенными источниками тепла.

В отличие от них исследуемые рассолы характеризуются низкой температурой (4°C). Сопоставление содержания микроэлементов в рассолах Людмилинской скважины с кларком морской воды показывает, что они обогащены рядом сидерофильных (Co, Ni), халькофильных (Zn, Ge, As, Se, Sn, Sb, Bi, Pb, Tl) и литофильных элементов (Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, W, Th). Повышенные содержания сидеро- и халькофилов объяснимы подвижностью их хлоридных соединений и наличием в исходном субстрате. Ранее было показано (Калинина, 2016), что расположенная в основании надсолевого разреза нижняя часть соляно-мергельной толщи отличается от вышележащих пород повышенным содержанием большинства малых элементов. Это объясняется привнесом в затухающий эвапоритовый бассейн существенно глинистого материала, который сорбировал растворенные в рассоле компоненты.

Находки новообразованных гидроксидов и оксидов Al, Ti, Cr и Zr в соляной и соляно-мергельной толщах (Чайковский и др. 2016, 2017, 2019a) дают основание предполагать, что рассолы вызывают не только выщелачивание металлов, но и гидролизное разложение породообразующих глин с образованием растворимых соединений литофильных элементов. Высокое содержание сульфат-иона в рассольном горизонте способствует активному протеканию сульфатредукции, образованию сероводорода и дополнительной экстракции металлов из надсолевых пород, часть которых (сульфиды кадмия, цинка, серебра и др.) отлагается здесь в так называемой гипсовой шляпе (Чайковский и др., 2015, 2019б). Таким образом, холодные сульфатно-хлоридные рассолы также обладают высокой растворяющей способностью в отношении многих металлов.

Разнообразие выявленных минеральных форм (сульфиды, сульфохлориды, хлориды, самородные, гидроксиды, сульфаты и карбонаты) позволяет предполагать и различные механизмы их отложения.

Часть гидроксидов железа осаждается в результате насыщения кислородом при излиянии рассолов на земную поверхность. Отмечены и псевдоморфозы гидроксидов железа по коккоидным формам, а также обрастание ими диатомовых водорослей, что позволяет предполагать участие в осаждении железа и железобактерий, которые способны окислять Fe^{2+} до Fe^{3+} и использовать освобождающуюся при этом энергию на усвоение углерода из углекислого газа, карбонатов или отмерших организмов.

Предполагается, что основным механизмом отложения самородных металлов, сульфидов, сульфохлоридов и хлоридов является прямое осаждение из рассолов, обогащенных сероводородом еще в рассольном горизонте. Находки фрамбоидального пирита свидетельствуют о проявлении бактериальной сульфатредукции и связывании металлов в рыхлом, насыщенном растительным детритом осадке уже в русле ручья. Замещение сульфидом меди отмерших диатомовых водорослей говорит об осаждении металла и за счет разложения органического вещества. Приуроченность микронных выделений минералов меди, никеля и серебра к поверхности крупных кристаллов пирита и марказита может свидетельствовать об их осаждении за счет влияния затравок. Выявленное разнообразие форм проявления сульфидов меди (леписферы, дендриты, зернистые агрегаты) и широко варьирующий состав (от Cu_2S до CuS) отражают неустойчивые фациальные условия и различную степень окисления серы.

Образование хлоридов серебра, а не бромидов, которые характерны для соляной толщи Верхнекамского месторождения (Чайковский и др., 2019б), может объясняться низким содержанием брома, типичным для гипергенных вод.

Отложение карбонатов кальция может быть связано с падением давления углекислого газа, что типично для известковых туфов и травертинов. Такое возможно за счет излияния на поверхность, нагревания или

органического фотосинтеза (Leeder, 1982). Локализация кристаллов кальцита среди колоний диатомей позволяет предполагать преимущественно биогенную природу, обусловленную усвоением углекислого газа водорослями и снижением его парциального давления в растворе. Вероятно, свой вклад в осаждение кальция в форме карбоната вносят и бактерии (серо- и сульфатредуцирующие), восстанавливающие серу сульфат-иона и тем самым вызывающие пересыщение рассолов кальцием, который до этого находился в растворе преимущественно в сульфатной форме. Предполагается, что осаждение кальцита преобладает в летнее время года, когда окружающая температура воздуха положительная, рассолы нагреваются и активность водорослей и микроорганизмов увеличивается.

Выводы

Место разгрузки холодных хлоридно-натриевых рассолов Людмилинской скважины представляет собой зону современного минералообразования. Источником металлов является нижняя часть надсоляной (соляно-мергельной) толщи, обогащенная литофильными и халькофильными элементами. Транспортёром металлов выступают сульфатно-хлоридные рассолы, способные растворять многие металлы и гидrolитически разлагать глинистые минералы. Повышенное содержание сульфидов металлов в растворе обусловлено и проявлением сульфатредукции в рассольном горизонте. Осаждение вещества на земной поверхности происходит как химически, в том числе за счет обогащения кислородом и падения давления углекислого газа, так и при участии бактерий и водорослей. Таким образом, деятельность живых организмов проявилась как при формировании химического состава рассола в кровле соляной залежи (сульфатредуцирующие бактерии), так и при его разгрузке (сульфатредуцирующие, железо- и серобактерии, водоросли).

Сопоставление современного минералообразования из холодных хлоридных рассолов Людмилинской скважины с таковым из сульфатных вод бассейна р. Шаквы (Чайковский, 2011), существенно обусловленным

сульфатредукцией и жизнедеятельностью харовых водорослей (известковые туфы), показывает значительно меньшие масштабы отложившегося вещества, но большее минеральное и элементное разнообразие, обусловленное более высокой растворимостью хлоридов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00046.

Библиографический список

Бутузова Г.Ю. Гидротермально-осадочное рудообразование в рифтовой зоне Красного моря. М.: ГЕОС, 1998. 312 с.

Калинина Т.А., Чиркова Е.П., Чайковский И.И. Геохимия терригенно-карбонатных и сульфатных пород соликамской свиты Соликамской впадины (Предуральский краевой прогиб) // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. Вып. 1(30). С.14–25. DOI 10.17072/psu.geol.30.14

Курнаков Н.С., Белоглазов К.Б., Шматько М.И. Месторождение хлористого калия Соликамской соленосной толщи // Известия АН. 1917. № 8.

Лебедев Л.М., Никитина И.Б. Челекенская рудообразующая система. М.: Наука, 1983. 240 с.

Чайковский И.И. Современное биогенное минералообразование в бассейне реки Шаквы // Вестник Пермского научного центра. 2011. № 1. С.4–8.

Чайковский И.И., Калинина Т.А., Коротченкова О.В. Тектонические и эпигенетические процессы в надсолевой толще Верхнекамского месторождения // Литосфера. 2015. № 5. С. 71–80.

Чайковский И.И., Коротченкова О.В. Новые хлор- и алюминийсодержащие минералы Верхнекамского месторождения солей // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. Вып. 2(31). С. 6–13. DOI 10.17072/psu.geol.31.6

Чайковский И.И., Чиркова Е.П., Трапезников Д.Е. Хромжелезистые метаколлоидные образования из белых карналлититов Верхнекамского месторождения // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. №3. С. 20-25.

Чайковский И.И., Чайковская Е.В., Коротченкова О.В., Чиркова Е.П., Уткина Т.А. Аутигенные минералы титана и циркония Верхнекамского месторождения солей // Геохимия. 2019а. Т. 64, № 2. С. 182–194.

Чайковский И.И., Коротченкова О.В., Чиркова Е.П. Минералы благородных металлов Верхнекамского месторождения солей // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст./ Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2019б. Вып. 22. С. 29–36.

Fadeeva T., Chaikovskiy I., Chirkova E. The biota in the brine discharge area of Ludmilinskaya well (Solikamsk, Russia) // IMWA 2019 «Mine Water: Technological and Ecological Challenges». P. 656–659.

Jowett E.C. Genesis of Kupferschiefer Cu-Ag Deposits by Convective Flow of Rotliegende Brines during Triassic Rifting // Society of Economic Geologists. 1986. Vol. 81, № 8. P.1823–1837.

Leeder M.R. Sedimentology. Process and Product. Published by Allen and U. 1982. 344 p.

Large R.R., Bull S.W., McGoldrick P.J., Walters S., Derrick G.M. and Carr G.R. Stratiform and stratiform Zn-Pb-Ag deposits in Proterozoic sedimentary basins, northern Australia// Society of Economic Geologists. 2005. P. 931–963.

Roedder E. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado// Econ. Geol. Vol. 66. P. 98–120.

Roedder E., Fluid inclusions. Mineralogical Society of America// Reviews in Mineralogy. 1984. Vol. 12. P. 644.

Skinner B.J., White D.E., Rose H.J., Mays R.E. Sulfides associated with the Salton Sea geothermal brine // Economic Geology. 1967. Vol. 62. P. 316–330.

White D.E. Diverse Origin of Hydrothermal Ore Fluids// Economic Geology. 1974. Vol. 69. P. 954–973.

Modern minerals formation at the site of brine discharge from the Lyudmilinskaya well (Solikamsk, Perm region)

I.I. Chaikovskiy^{a,б}, O.V. Korotchenkova^{a,б}, T.V. Fedorov^{a,б}

^a Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences

78a Sibirskaya Str., Perm, 614007, Russia. E-mail: ilya@mi-perm.ru

The minerals formed from cold (4°C) sodium chloride solutions discharged between 1923 and 2019 from the Lyudmilinskaya brine-producing well were studied. During this time, the mineralization dropped from 260 to 9 g/dc³, and, at the wellhead area, an ecosystem presented by invertebrate animals, diatoms, iron and sulfur bacteria has been formed. Minerals, such as calcite and pyrite, and micron precipitates of native phases (sulfur, copper, silver, nickel, bronze), sulphides (series chalcocite-covellite, marcasite, argentopentlandite, acantite, millerite, chalcopyrite), sulfochlorides ((Ag,Cu,Ni)₃(Cl,S)), chlorides (Ag₃Cl), iron hydroxides, barite and sahamalite (Ce), were deposited both on the surface of pebbles and in clay-sand alluvial sediments. The studied brines are enriched with respect to sea water by siderophilic (Co, Ni), chalcophilic (Zn, Ge, As, Se, Sn, Sb, Bi, Pb, Tl (Cu?)), and lithophilic elements (Be, Al, Ti, Cr, Mn, Y, Zr, Nb, W, Th). The increased concentration of these elements is explained by the hydrolysis and metal leaching the suprasalt clayey rocks with chlorides and sulfates. It is shown that the deposition of minerals occurs both chemically and biochemically.

Keywords: *Verkhnekamskoye deposit; hypergenic brines; sulfur and iron bacteria; sulfate reduction; native minerals; sulfides and chlorides of chalcophilic metals.*

References

Butuzova G.Yu. 1998. Gidrotermalno-osadochnoye rudoobrazovaniye v riftovoy zone Krasnogo morya [Hydrothermal-sedimentary ore formation in the rift zone of the Red Sea]. Moskva, GEOS, p. 312. (in Russian)

Kalinina T.A., Chirkova Ye.P., Chaikovskiy I.I. 2016. Geokhimiya terrigenno-karbonatnykh i sulfatnykh porod solikamskoy svity Solikamskoy vpadiny (Preduralskiy krayevoy progib) [Geochemistry of terrigenous-carbonate and sulphate rocks of the Solikamskaya Suite (Solikamskaya Depression of Uralian foredeep)]. Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya, 1(30):14-25. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.30.14

Kurnakov N.S., Beloglazov K.B., Shmitko M.I. 1917. Mestorozhdeniye khloristogo kaliya Solikamskoy solenosnoy tolshchi [Potassium chloride deposit of the Solikamsk saliferous stratum]. Izvestiya AN, no. 8. (in Russian)

Lebedev L.M., Nikitina I.B. 1983. Chelekenskaya rudoobrazuyushchaya sistema [Cheleken ore-forming system]. Moskva, Nauka, p. 240. (in Russian)

Chaikovskiy I.I. 2011. Sovremennoye biogennoye mineraloobrazovaniye v bassejne reki Shakvy [Modern biogenic mineral formation in the Shakva river basin]. Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra, 1:4-8. (in Russian)

Chaikovskiy I.I., Kalinina T.A., Korotchenkova O.V. 2015. Tektonicheskiye i epigeneticheskiye

protssy v nadsolevoy tolshche Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [Tectonic and epigenetic processes in the suprasalt layer of the Verkhnekamskoye deposit]. *Litosfera*, 5:71–80. (in Russian)

Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V. 2016. Nove khlor- i alyuminiysoderzhashchiye mineraly Verkhnekamskogo mestorozhdeniya soley [New chlorine- and aluminum-bearing minerals from the Verkhnekamskoye salt deposit]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2(31):6-13. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.31.6

Chaikovskiy I.I., Chirkova E.P., Trapeznikov D.E. 2017. Khromzhelezistye metakolloidnye obrazovaniya iz belykh karnallitov Verkhnekamskogo mestorozhdeniya [Chrom-iron metacolloid formations from white carnallites of the Verkhnekamskoye deposit]. *Vestnik IG Komi Scientific Center, Ural Branch of RAS*. 3:20-25. (in Russian)

Chaikovskiy I.I., Chaikovskaya E.V., Korotchenkova O.V., Chirkova E.P., Utkina T.A. 2019. Autigenic titanium and zirconium minerals at the Verkhnekamskoye salt deposit. *Geochemistry International*, 57(2):184–196.

Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V., Chirkova E.P. 2019. Mineraly blagorodnykh metallov Verkhnekamskogo mestorozhdeniya soley [Minerals of noble metals of the Verkhnekamskoye salt deposit]. *In: Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm. State. Univ., Perm*, pp. 29-36. (in Russian)

Fadeeva T., Chaikovskiy I., Chirkova E. 2019. The biota in the brine discharge area of Ludmilinskaya well (Solikamsk, Russia). *In: Mine Water: Technological and Ecological Challenges*, p. 656-659.

Jowett E.C. 1986. Genesis of Kupferschiefer Cu-Ag Deposits by Convective Flow of Rotliegende Brines during Triassic Rifting. *Society of Economic Geologists*. 81(8):1823-1837.

Leeder M.R. 1982. *Sedimentology. Process and Product*. Published by Allen and U., p. 344.

Large R.R., Bull S.W., McGoldrick P.J., Walters S., Derrick G.M. and Carr G.R. 2005. Stratiform and stratabound Zn-Pb-Ag deposits in Proterozoic sedimentary basins, northern Australia. *Society of Economic Geologists*, p. 931–963.

Roedder, E., 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado. *Econ. Geol.* 66:98–120.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*. v. 12, p. 644.

Skinner B.J., White, D.E., Rose, H.J., Mays, R.E. 1967. Sulfides associated with the Salton Sea geothermal brine. *Economic Geology*. 62:316-330.

White D.E. 1974. Diverse Origin of Hydrothermal Ore Fluids. *Economic Geology*. 69:954-973.