

УДК 553.495+553.493.5

УГЛЕРОДИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УРАНОВЫХ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

А.А. Поцелуев

Томский политехнический университет

E-mail: PoceluevAA@ignd.tpu.ru

Показано, что в рудах урановых и редкометалльных месторождений широко распространены твердые углеродистые вещества (графит, аморфный углерод, антраксолит, керит) и углеводороды в составе газов (от метана до гексана) флюидных включений. Изотопно-геохимические и минералогические данные указывают на их образование в едином процессе с основной рудной минерализацией из единого металлоносного флюида с формированием зонального их распределения.

Ключевые слова:

Урановые и редкометалльные месторождения, углеродистые вещества, минералогия, геохимия, изотопы углерода, условия образования.

Key words:

Uranium and rare-metal deposition, carbonaceous substances, mineralogy, geochemistry, the isotopes of carbon, condition for formation.

Введение

Углеродистые вещества широко встречаются в самых разнообразных эндогенных образованиях и, в том числе, в различных по составу полезных ископаемых [1–5 и др.].

На многих гидротермальных месторождениях именно в связи с углеродистыми веществами устанавливаются повышенные концентрации золота, серебра и платиноидов [6–9]. При этом сам факт их наличия в составе руд и метасоматитов позволяет получить ценную информацию о природе металлоносных флюидов и условиях формирования оруденения.

Основные определения

Термин углеродистые вещества (УВ) является собирательным. Они представляют собой широкий класс самородных образований углерода и соединений углерода с водородом. В природных условиях они встречаются в различном физическом состоянии – твердом, жидком, газообразном. Традиционно твердые углеродистые вещества (ТУВ) подразделяют на крупные группы (классы). Это графиты, антраксолиты, кериты, асфальтиты, асфальты, мальты, озокериты, элатериты, оксалаты, смолы [4, 5].

В составе ТУВ, соответственно, преобладает углерод (от 69 % в керитах до 99,8 % в графитах) и, как правило, присутствуют в достаточно высоких концентрациях водород (до 15,3 % в озокеритах), азот (до 3 % в асфальтитах), сера (до 7 % в асфальтах), кислород (до 11 % в асфальтитах). По сути моноэлементным является графит, но и в нем отмечаются значимые концентрации водорода до 0,3 % [10].

УВ относятся к органическим соединениям (ОС), т. е. соединениям углерода с другими элементами, в том числе металлами. Как подчеркивает Р.М. Слободской [11] часто произвольно используемые понятия «органические» и «биогенные» не тождественны. ОС могут иметь как биогенное, так и абиогенное происхождение.

В современной литературе широко используется понятие элементоорганические соединения (ЭОС). ЭОС называют такие соединения, в молекуле которых имеется непосредственная химическая связь атома элемента с атомом углерода. К ЭОС относятся и металлоорганические соединения. Среди ЭОС различают два типа соединений – полные и смешанные. В полных ЭОС все валентности атома элемента используются для связи с углеродом. В смешанных соединениях часть валентностей элемента используется для связи с неуглеродными атомами (кислород, водород, галогены и др.) [11].

Результаты исследований

Твердые углеродистые вещества выявлены во многих гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях центральной и восточной Азии (табл. 1). Представлены они, главным образом, графитом, аморфным углеродом, антраксолитом и керитом. Редко встречаются оксалаты [12–14].

В редкометалльных грейзеновых месторождениях основным ТУВ является графит, реже встречается аморфный углерод. Графит выявлен в грейзенах и редкометалльных кварцевых жилах различных районов Алтае-Саянской области (Калгутинское месторождение, Кунушский массив, месторождение Чердожак), Центрального Казахстана (месторождение Коктенколь), Западного Узбекистана (гранитоидные массивы Кульджук-Тау, Аумыныза-Тау, Кара-Тюбе, Зияятдин), Приморья (Фестивальное месторождение), Верхояно-Колымской складчатой области (ВКСО) [3, 5, 15–18].

Графит, как правило, образует мелкую рассеянную вкрапленность и чешуйки размером до 0,5 мм в жильном кварце в сростках с кварцем, касситеритом, вольфрамитом, молибденитом и другими сульфидами, отмечается в тонких пластинках в по-

Таблица 1. Твердые углеродистые вещества в редкометалльных и урановых месторождениях (с использованием данных [7, 12–15 и др.].)

Тип ТУВ	Месторождения, рудопроявления	Минеральные ассоциации	Элементы примеси в ТУВ (микровключения)
Графиты (аморфный углерод)	Редкометалльные: Калгутинское, Чердож, Коктенколь, Фестивальное, Ковалеровский рудный район, Сарычевская вулcano-плутоническая структура и др.	Кварц, топаз, мусковит, вольфрамит, молибденит, халькопирит, пирит, висмутин, пованит, галенит, ильменит, самородные – Au, Cu, Fe, Pb+Sn, реже Al, Pb, Sn, Fe+Zn, Os+Ir	Bi, Cu, Pb, Fe, Zn, Sb, Ag, Au, Hg, Te, S
	Урановые: Акканбурлук, Дергачевское, Косачинское	Кварц, турмалин, мусковит, апатит, марказит, браннерит, настуран, молибденит, арсенопирит, пирротин	Н.д.
Антраксолиты	Урановые: Ишимское, Акканбурлук, Восток, Косачинское, Маныбайское, Стрельцовское	Кварц, апатит, пирит, настуран, коффеинит, халькопирит, галенит, анкерит, доломит, монтмориллонит, пирротин	Mg, Si, Zr, Pb, U, Hg, Sb, As, Ag, Hf, Ti
Кериты	Урановые: Ишимское, Онкажинское, Стерлитамакское	Кварц, анкерит, пирит, настуран, сфалерит, галенит, самородные Au, Ag	Si, Ca, Al, Hg, Mg, Ti, Mn, Fe, Pb, Cu
Оксалаты (вевеллит)	Урановые: Стрельцовское	Кварц, кальцит, флюорит	Н.д.

Н.д. – нет данных.

левых шпатах и по спайности в биотите. В ряде случаев он совместно с кварцем, полевыми шпатами, реже с биотитом и хлоритом образует желваки размером до 7 см.

В большинстве случаев графит образуется в составе поздних кварц-сульфидных минеральных ассоциаций – сфалерит-молибденит-халькопирит-кварцевой и сульфосольной на Калгутинском и арсенопирит-сфалеритовой на Фестивальном месторождениях [9, 16]. В самом графите отмечаются более поздние включения и микропрожилки халькопирита, пирита, висмутина, Вi-теннантита, пирротина и галенита.

На некоторых объектах отмечается несколько генераций графита. Так, в герцинских гранитоидах Кунушского массива Калба-Нарымской зоны выделяется две стадии графитизации гранитов – до-рудная и послерудная, а также графитизация даек плагиогранитпорфиров. Здесь же, на месторождении Чердож, графит отмечается в грейзенизированных плагиогранитах и жилах в ассоциации с кварцем, турмалином, мусковитом, флюоритом, касситеритом, шеелитом, арсенопиритом, пиритом, вольфрамитом, молибденитом и др. [18].

Совместно с графитом встречаются разнообразные самородные минералы – золото, серебро, висмут, алюминий, медь, железо, олово, свинец, сурьма, цинк, цинкистая медь, природная латунь, сти-стайт, графит [3, 8, 9, 16–18 и др.].

Графитовая минерализация проявляется как в виде локальных образований, так и образует весьма значительные по размерам зоны. На Калгутинском месторождении она отмечается во всем объеме основной промышленной жилы № 87 и околожилных грейзенах и прослежена на $n \times 100$ м. В некоторых массивах Верхояно-Колымской складчатой области (Арга-Салинский интрузив) площадь участков графитизированных гранодиоритов достигает 1,6 км².

В большинстве случаев подчеркивается, что содержание графита растет с глубиной, при этом уве-

личивается мощность и протяженность зон графитизации, либо графитсодержащие породы и руды отмечаются только на глубоких горизонтах месторождений [3, 5].

Содержание графита изменяется в значительном диапазоне. Так на Калгутинском месторождении в рудных жилах концентрация минерала изменяется от 0,02 до 0,12 %. А максимальные концентрации до 0,34 % отмечаются в сульфидных концентратах. На некоторых объектах концентрация графита достигает 2...3 %, в силу чего измененные гранитоиды приобретают серую окраску [17].

В составе графита отмечается широкий спектр лито-халько-сидерофильных элементов, в том числе золота и серебра. Они находятся в форме микровключений собственных минералов. При этом в минералах, ассоциирующих с графитом, и в его зернах концентрация ряда элементов (золота, серебра, мышьяка и ртути) значительно выше, чем в рудах (Калгутинское месторождение) [9].

ТУВ урановых месторождений представлены различными группами – графиты, антраксолиты, кериты, оксалаты (табл. 1). Преобладают антраксолиты (месторождения Ишимское, Акканбурлук, Восток, Косачинское, Маныбайское, Стрельцовское) и кериты (Ишимское, Онкажинское), крайне редко встречается графит (Акканбурлук, Дергачевское, Косачинское) и оксалаты (вевеллит, Стрельцовское месторождение) [1, 12, 13 и др.]. Они входят в единую минеральную ассоциацию с основными рудными минералами – оксидами, сульфидами, сульфосолями, селенидами, образующимися в завершающие стадии основного этапа рудообразования. ТУВ также встречаются в составе околорудных метасоматитов (эйситов, березитов, грейзенов) и в магматических образованиях.

Графит выявлен в составе кварц-турмалин-мусковит-апатитовых и кварц-карбонат-марказитовых жил (Акканбурлук), ураноносных эйситов (Косачинское), кварц-хлорит-биотитовых сланцах и в дайках диабазов (Дергачевское). В большинстве

случаев минерал образует тонкую вкрапленность, но отмечаются и скопления до 5 см в поперечнике.

Для графита характерна ассоциация с кварцем, турмалином, мусковитом, апатитом, марказитом, браннеритом, настураном, молибденитом, арсенипиритом, пирротинитом. На месторождениях Акканбурлук и Косачинское он встречается в ассоциации с антраксолитом.

Антраксолиты наиболее распространенные ТУВ в гидротермальных урановых месторождениях. Они образуют тонкие прожилки, почковидные агрегаты в жилах, тонкую вкрапленность в кварце, кальците, флюорите. Антраксолиты встречаются в ассоциации с настураном, коффинитом, браннеритом, коломорфным цирконом, пиритом, халькопиритом, пирротинитом, галенитом, гетитом, анатазом, флюоритом, кальцитом, анкеритом, доломитом, альбитом, монтмориллонитом.

В самом антраксолите отмечаются высокие концентрации основных элементов рудных тел и их спутников (табл. 2), которые, как правило, присутствуют в виде микровключений собственных минералов (настуран, браннерит, пирит и др.). Среди них следует отметить U, Ca, Mg, Si, Al, Cu, P, Fe, Mn, Ti, Pb, As, Be, V, Mo, Sb, Zn, Sc, Yb, Ag.

Антраксолиты образуются либо в урановорудную стадию вслед за отложением основных масс урана (Ишимское рудное поле, месторождения Акканбурлук, Маныбай, Стрельцовское рудное поле), либо перед формированием пострудной минерализации (Стерлитамак), как правило, кварц-карбонатного состава [1, 12].

Кериты также широко распространены на урановых месторождениях. Они образуют мелкие шаровидные, каплевидные и дендритовидные выделения в жилах и тонкие прожилки. Керит встречается в ассоциации с кварцем, пиритом, карбонатами, реже с урановыми минералами.

Интересными являются находки самородного свинца, меди, золота и серебра в цементе брекчии, представленной высшим керитом, на Онкажинском месторождении [7]. Своеобразным является и состав элементов примесей в керите. Помимо урана и ряда других элементов в них отмечаются высокие концентрации As, Hg, Ag. Это подчеркивает ассоциативную связь с самородными элементами. Наличие ртути в керите Стерлитамакского рудопроявления и Ишимского месторождения согласуется с увеличением концентрации этого элемента в заключительных стадиях урановорудного процесса.

Вевеллит ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, одноводный оксалат кальция) выявлен на Стрельцовском месторождении в жилах кварца в ассоциации с крупнокристаллическим флюоритом и кальцитом. Вевеллит образует кристаллы до 1 см в ромбоэдрическом кальците. По мнению Л.П. Ишуковой [12] наличие вевеллита является признаком того, что в ураноносных растворах наряду с уголекислотой присутствовало органическое вещество.

В химическом составе антраксолитов и керитов в значительных количествах отмечается кислород и водород. При явном преобладании углерода над водородом в мас. %, атомное отношение C/H изменяется от 1,1 до 3,8, что подчеркивает значительную роль водорода в этих соединениях (табл. 2).

Газообразные УВ (ГУВ) встречаются в составе газов флюидных включений многих урановых и грейзеновых месторождений. Они отмечаются на урановых месторождениях Восток, Звездное, Косачинское и Стрельцовское рудное поле [12, 13, 19 и др.]. ГУВ широко распространены в грейзеновых месторождениях Алтае-Саянской области, Забайкалья, Приморья, Монголии, Якутии и др. [9, 20].

Суммарная доля ГУВ в составе газов не велика, от 1 до 5 %. Среди них основным компонентом является CH_4 , иногда встречаются другие УВ вплоть до гексана (C_2H_2 , $\text{C}_2\text{H}_{4,6}$, C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_6H_{14}). Основными компонентами флюидных включений являются H_2O и CO_2 , доля которых составляет 90...95 % и 3...8 % соответственно. В малых, но уверенно определяемых количествах отмечаются водород, азот, угарный газ.

ГУВ отмечаются как в составе флюидных включений минералов, главным образом, основного продуктивного этапа рудообразования, значительно реже и в меньших концентрациях они встречаются в дорудных образованиях и, как правило, отсутствуют в пострудных минеральных ассоциациях.

Необходимо отметить, что более разнообразен состав ГУВ грейзеновых месторождений. На урановых месторождениях более высокие содержания ГУВ отмечаются в березитах, нежели в эйситах.

На детально изученных объектах установлено, что с глубиной в рудных зонах заметно снижается общая флюидонасыщенность минералов, уменьшается содержание воды, уголекислого газа, при этом увеличивается содержание угарного газа, ГУВ, водорода, что закономерно отражается на увеличении восстановленности флюида (отношение суммы восстановленных газов к окисленным). Это редкометалльные месторождения Калгутинское, Депутатское, урановые – Косачинское, Восток, Стрельцовское [9, 12, 19, 20].

Изотопный состав углерода ТУВ. Различные типы ТУВ характеризуются близким изотопным составом углерода (табл. 3). Величина $\delta^{13}\text{C}$ составляет: в графитах $-23,90\text{‰}$, в антраксолитах $-25,00$, в керитах $-25,50$. Следует отметить тенденцию «облегчения» изотопного состава в ряду ТУВ от графита к антраксолиту и далее к кериту, т. е. с увеличением содержания в ТУВ водорода, азота и кислорода.

Углерод ТУВ грейзеновых месторождений характеризуется пониженным содержанием изотопа ^{13}C . В графитах Верхояно-Колымской складчатой области (массивы Труд, Одонканский, Капризный, субвулкан Тарынский) $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от $-19,7$ до $-21,7\text{‰}$

Таблица 2. Состав твердых углеродистых веществ урановых месторождений. Составлено с использованием данных [1, 7, 14].

Объект	ТУВ	Элементный состав сухого беззольного вещества, мас. %						Содержание примесей, мас. %			
		C	H	S	N	O	C/H	>1	0,1...0,9	0,01...0,09	0,001...0,009
Ишимское рудное поле (Казахстан)	Антракосилит	78,5	3,0	1,1	–	17,4	2,2	U, Ca	Mg, Si, Zr, Pb	Al, Sb, Hf, Ti, V, Sr	Fe, Mn, Cu, Yb, Ni, Mo
	Керит	83,5	6,2	–	–	10,3	1,1	–	Si, Al, Ca, Hg	Mg	Ti, Mn
Маньбайское месторождение (Казахстан)	Антракосилит	86,7	1,9	–	–	11,4	3,8	–	Si, Al, Ca	Fe, Mg, Ti	Mn, Cu, V, Ni,
Акканбурлукское месторождение (Казахстан)	Антракосилит	76,9	2,9	–	–	20,9	2,2	U, Ca, Si, Al, Mg, Cu, P	Fe, Mn, Ti, Pb, As, Be	V, Mo, Sb, Zn, Sc, Yb	Ni, Co, Ag, Ge, Be
Онкажинское месторождение (Россия)	Керит	Н.д.						U, Fe	Ti, V, As, Mo, Y, Zr,	Mn, Zn, Ni, Co, Sr	Pb, Cu, Ag
Месторождение Дорнот (Монголия)	ТУВ	Н.д.						U, Ti, S, Si	Fe, Ca	–	–

Примечание: C/H – атомное отношение.

[3]. Углерод в жилах и околожильных грейзенах Калгутинского месторождения имеет еще более «легкий» изотопный состав от –23,0 до –25,9 ‰ [9].

Таблица 3. Изотопный состав ТУВ редкометалльных и урановых месторождений (с использованием данных [3, 4, 9, 15]).

Тип ТУВ	Месторождение, рудопроявление	$\delta^{13}\text{C}$, ‰
Редкометалльные		
Графиты (аморфный углерод)	Калгутинское: жилы	–23,0...–25,1
	грейзены	–24,4...–25,9
	Массивы Труд и др. (ВКСО)	–19,7...–21,7
	Ковалеровский рудный район	–16,0...–25,0
	Среднее	–23,90
Урановые		
Антракосилиты	Добрей, Ласточка, Даховское, Шаханское, Уллукол и др.	–20,5 ... –31,38
	Среднее	–25,00
Кериты	Даховское, Бадильское, Сабырсай, Таланджа	–20,6 ... –33,95
	Среднее	–25,50
	Среднее	–24,80

Углерод ТУВ урановых месторождений, так же характеризуется «легким» изотопным составом. Но значения $\delta^{13}\text{C}$ изменяются в более значительном диапазоне от –20,05 до –33,95 ‰. Значительные вариации изотопного состава могут быть обусловлены характером эрозийного среза или глубиной изучения месторождения. Так, отмечается увеличение вариаций изотопного состава легких элементов по восстановлению в месторождениях Восток [21] и Стрельцовское [12]. Это обусловлено более активным фракционированием изотопов в области рудообразования.

Обсуждение результатов

В магматических породах и рудах эндогенных месторождений содержание восстановленных форм углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$), как правило, не высокое и ко-

леблется в пределах 0,1...1,0 %. Но здесь важным является сам факт присутствия $\text{C}_{\text{орг}}$. Как отмечал В.И. Вернадский, значение соединений углерода «... несоизмеримо велико по сравнению с количеством его атомов, находящихся в земной коре» [22].

Весьма сложным является сопоставление полученных характеристик по гидротермальным урановым и редкометалльным месторождениям с данными по валовому содержанию углерода в различных геологических образованиях. Так, например, данные концентрации (0,1 %) весьма обычны для осадочных пород, но являются относительно высокими для кислых магматических пород и ксенолитов мантии. В работе [23] на большом фактическом материале показано, что в подавляющем числе изученных проб ксенолитов мантии валовое содержание углерода не превышает 0,01 %.

ТУВ редкометалльных и урановых представлены графитом, аморфным углеродом, антракосилитом, керитом и, в редких случаях, вевеллитом. При этом, в более высокотемпературных жилах и грейзенах (редкометалльные месторождения) отмечается исключительно графит и аморфный углерод, а в средне- и низкотемпературных рудоносных метасоматитах (березиты, эйситы) ТУВ более разнообразны от графита до вевеллита, но преобладают антракосилит и керит.

ТУВ в рудах входят в единую минеральную ассоциацию с основными рудными минералами редкометалльных и урановых месторождений (оксидами, сульфидами, сульфосолями, селенидами), образующимися в завершающие стадии основного этапа рудообразования. В редкометалльных грейзеновых месторождениях с вольфрамитом, молибденитом и другими сульфидами и сульфосолями, в месторождениях урана с настураном, браннеритом, коффеинитом, сульфидами, флюоритом и др. Распространенным является присутствие в этих ассоциациях самородных минералов – мышьяка, висмута, золо-

та, серебра, железа, свинца, олова, меди и др. ТУВ также встречаются в составе околорудных метасоматитов (эйситов, березитов, грейзенов) и в магматических образованиях рудных полей.

В самих ТУВ отмечаются высокие концентрации основных элементов рудных тел и их спутников, которые, как правило, присутствуют в виде микровключений собственных минералов.

Концентрация ТУВ и ГУВ закономерно возрастает в рудных зонах с глубиной, либо они встречаются только на глубоких горизонтах месторождений. Это установлено как на редкометалльных (Калгутинское, Депутатское и др.), так на урановых месторождениях. Например, исследование урановых месторождений Стрельцовского рудного поля, показывает, что углеродистые соединения принимали участие в урановом рудообразовании на всех горизонтах месторождений, включая граниты фундамента [12].

Углерод ТУВ характеризуется легким изотопным составом. $\delta^{13}\text{C}$ изменяется в диапазоне от -20 до -36‰ , наиболее часто встречаются значения в интервале $-(24...26)\text{‰}$. На большом объеме представительных данных по мантийным ксенолитам [23] показано, что в распределении $\delta^{13}\text{C}$ выделяется два интервала с ярко выраженными модалными значениями -5 и -25‰ . Близкие изотопные характеристики $-(21,96...26,46)\text{‰}$ были получены при изучении графита, рассеянного в силикатной массе пород мантии [24].

При изучении руд гидротермальных месторождений в магматических породах проблема источника углерода ТУВ решается однозначно [3, 5, 9, 17, 18]. В ряде случаев предполагается, что углерод мог быть заимствован флюидами на более глубоких горизонтах из вмещающих пород. Но результаты изучения газового состава флюидных включений и изотопии углерода, доказывают его гомогенный состав и мантийную природу [9, 12].

Заимствование УВ из вмещающих пород возможно, но не на уровне формирования оруденения, а на значительно более глубоких горизонтах. Доказательством этого может быть наличие ТУВ в составе руд в магматических породах и их отсутствие в рудах в углеродистых сланцах в пределах одних рудных полей (Верхояно-Колымская складчатая область, Калба-Нарымская зона).

Так, на месторождении Чердож, расположенном в пределах Кунушского массива (Алтай), графит накапливается только в измененных изверженных породах и залегающих в них рудных телах, но его нет в жилах, залегающих в углистых сланцах [18]. В данном случае речь идет о вмещающих изверженные породы сланцах, которые могли быть возможным источником углерода.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о гомогенном, глубинном (мантийном) характере источника углерода ТУВ урановых [12] и грейзеновых [9] месторождений.

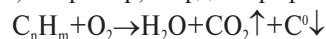
Наличие ТУВ в составе руд и метасоматитов согласуется с данными по наличию ГУВ в составе флюидных включений указывает на их генетическую связь. Так в рудах Калгутинского месторождения установлено закономерное изменение состава газов ФВ и появление графита в жилах [9]. Детальное исследование эволюции состава флюидов и изменение содержания углерода в жилах, доказывает, что в условиях частичного окисления ГУВ углерод ушел из флюида в твердую минеральную фазу и отложился в виде графита.

Эволюцию физико-химических условий в области рудообразования, изменение состава флюида, отложения ТУВ и зонального распределения элементов можно представить в виде единой модели (рисунок).

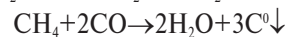
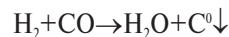
В области транспортировки флюид был «сухим» безводным, в его составе преобладали углеводородные соединения и водород. На это указывает резкое повышение содержания ГУВ во ФВ и общее снижение концентрации воды и углекислоты с глубиной на изученных месторождениях. В таких флюидах металлы присутствовали в виде подвижных ЭОС. Предполагается, что основной областью существования ЭОС является переходная зона между глубинной областью, где углерод и водород имеют отрицательный заряд (гидриды и карбиды) и поверхностной областью, где углерод и водород с положительным зарядом входят в состав воды и углекислоты [11].

В области окисления первично восстановленного водорода — углеводородного флюида происходит распад ЭОС, появление оксидов и формирование рудной минерализации. Очевидно, что неполное частичное окисление ГУВ является основной причиной образования ТУВ.

Это можно представить в виде развития неравновесной системы — переход газообразных восстановленных форм углерода (углеводороды) в газообразный оксид и, например, твердый графит по схеме:



Важным фактором, определяющим появление ТУВ, по данным А.А. Маракушева является также резкое изменение давления и температуры [25]. В сложном многокомпонентном флюиде при понижении температуры в системе появление самородного углерода и ТУВ, может быть следствием реакции между углеродными и водородными компонентами флюида:



Предметом постоянных дискуссий по проблеме гидротермального рудообразования являются вопросы источника воды, а по сути, как в данном случае, необходимо рассматривать источники кислорода. Выше показано, что появление воды и

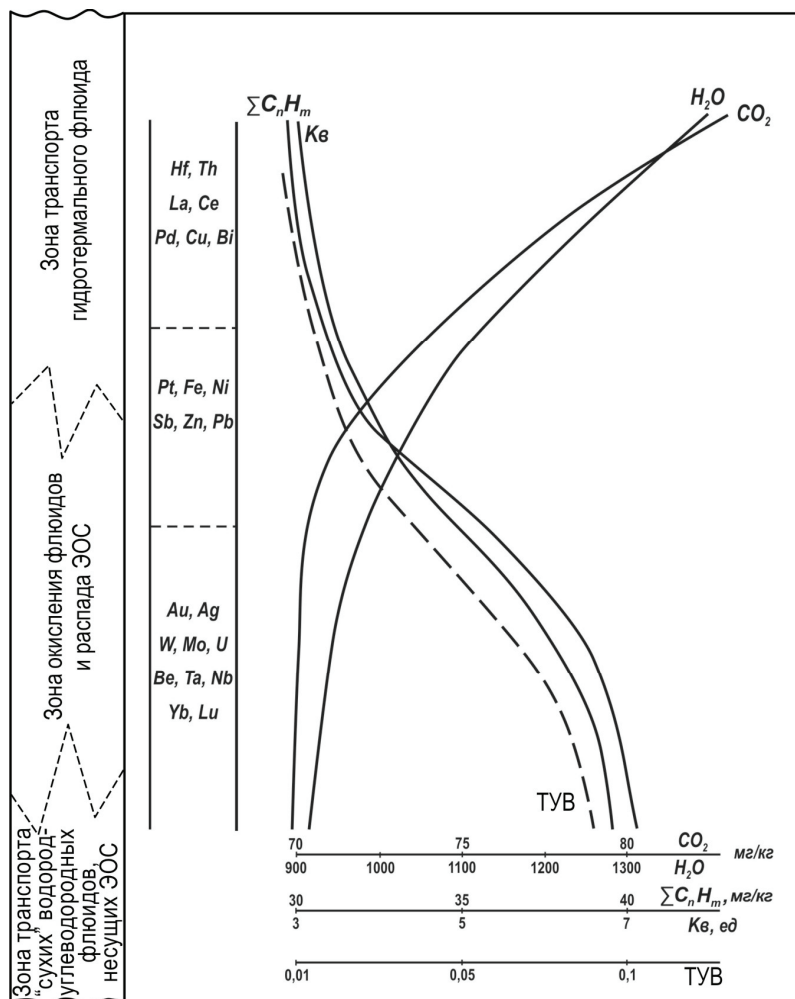


Рисунок. Геолого-генетическая модель формирования гидротермального редкометалльного и уранового оруденения с участием УВ. K_b – коэффициент восстановленности флюида, $\Sigma C_n H_m$ – суммарная концентрация ГУВ во флюиде

ТУВ, может быть результатом реакции между углеводородными и водородными компонентами флюида.

Исследованиями Ф.А. Летникова и Н.В. Сизых [26] показано, что глобальные процессы появления кислорода в составе флюидов связаны с гранитизацией базит-гипербазитовой протокоры Земли. При этом отмечается синхронизация в изменении содержания свободного кислорода в атмосфере с метаклизмами гранитизации и гранитообразования.

Нами установлено, что значительные выделения кислорода происходят и при локальных (околорудных) изменениях средних и основных пород, в которых доля кислорода максимальна. При этом происходит значительная потеря элемента до 31,5 %.

Высвобождающийся кислород будет взаимодействовать с газовыми компонентами флюида, с образованием оксидных соединений и, в первую очередь, воды. Именно этот механизм может быть наиболее важным при переходе газового восстановленного металлоносного флюида в гидротермальный раствор, и соответственно играть важнейшую роль в рудогенезе.

Представляется, что процесс появления кислорода и воды в системе связан с водородным воздействием на вмещающие породы. Экспериментально установлено, что при повышенной концентрации водорода (атомарного) и температуре 450...300 °С (и менее 300 °С) коэффициент диффузии кислорода повышается в $10^5...10^6$ раз, и резко падает его концентрация в материалах [27, 28]. Данные температурные режимы соответствуют условиям формирования основных продуктивных минеральных ассоциаций и зон измененных пород, гидротермальных высоко и среднетемпературных месторождений.

Это позволяет рассматривать процесс метасоматического преобразования пород, как один из источников воды гидротермальных месторождений.

Вверх по восстановлению рудных зон концентрация углеводородов стабильно снижается и исчезает водород, что является свидетельством большей окисленности флюида.

Таким образом, появление в рудных зонах гидротермальных месторождений ТУВ является сви-

детельством резкого изменения состава флюидной фазы. Основной предпосылкой для их формирования является наличие углеводородов в составе флюида и поступление в систему кислорода в концентрациях, недостаточных для полного окисления всех компонентов.

На многих гидротермальных месторождениях в связи с УВ устанавливаются повышенные концентрации золота и платиноидов. На детально изученных месторождениях отмечаются нелинейные закономерности в распределении углерода, основных рудных и благородных металлов [9]. Участки с наиболее высоким содержанием металлов располагаются вблизи изолинии с определенной концентрацией углерода. Это подчеркивает генетическое единство ТУВ и благородных металлов в рудах и их общую связь с процессами распада ЭОС и эволюцией флюида в области рудообразования. Как правило, эти месторождения контролируются зонами глубинных долгоживущих разломов и в составе руд отмечается широкий спектр элементов, отражающих слабо дифференцированную мантийную природу рудообразующих флюидов [6, 9].

Появление на глубоких горизонтах гидротермальных редкометалльных и урановых месторождений ТУВ и увеличение концентрации УВ в составе ФВ, возможно является распространенной закономерностью и касается более широкого круга гидротермальных месторождений. Так показано на примере золоторудных месторождений карлинского типа, что формирование этих месторождений происходило из углеводородных металлоносных флюидов [29]. Это подтверждается сменой с глубиной золотоносных гидротермально-метасоматических ассоциаций золотоносными углеродистыми образованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ашихмин А.А. Твердые углеродистые вещества в гидротермальных образованиях Ишимского рудного поля и некоторых других месторождений Северного Казахстана // Материалы по геологии урановых месторождений. Информационный сборник. – М.: ВИМС, 1971. – Вып. 19. – С. 73–84.
- Банникова Л.А. Органическое вещество в гидротермальном рудообразовании. – М.: Наука, 1990. – 207 с.
- Бахарев А.Г., Шкодинский В.С., Жданов Ю.А. Графитсодержащие кислые магматические породы Тас-Кыстабытского магматического пояса Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. – 2005. – № 5. – С. 54–57.
- Мелков В.Г., Сергеева А.М., Сучкова И.П. Твердые углеродистые вещества эндогенных урановых месторождений – М.: ВИМС, 1983. – 301 с.
- Поцелуев А.А., Котеков В.И., Акимцев В.А. Графиты Калгутинского редкометалльного грейзенового месторождения (Горный Алтай) // Доклады РАН. – 2004. – Т. 399. – № 2. – С. 241–244.
- Летников Ф.А., Савельева В.Б., Аникина Ю.В. и др. Высокоуглеродистые тектониты – новый тип концентрирования золота и платины // Доклады РАН. – 1996. – Т. 347. – № 6. – С. 795–798.
- Мельников В.И., Варданыц А.В. Особенности минералогии гидротермального этапа в молассоидных осадочных толщах Онкажинского урановорудного месторождения в Тувинском прогибе // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов – М.: ВИМС, 1987. – Вып. 108. – С. 82–90.
- Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. – М.: Наука, 1983. – 288 с.
- Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Владимиров А.Г. и др. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез. – Томск: СТТ, 2008. – 226 с.
- Пеньков В.Ф. Генетическая минералогия углеродистых веществ. – М.: Недра, 1996. – 224 с.
- Слободской Р.М. Элементоорганические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. – Новосибирск: Наука, 1981. – 136 с.
- Ишукова Л.П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. – Иркутск: Типография «Глазовская», 2007. – 260 с.
- Наумов С.С., Николаев С.Л., Пигульский В.Н. Основные черты геологии Северо-Казахстанской урановорудной провинции (СКУРП): Пояснительная записка к атласу СКУРП ПГО «Степгеология», ВНИИХТ, ЦГХК. – М.: ВИМС, 1989. – 165 с.

Выводы

- Показано, что основными ТУВ грейзеновых редкометалльных месторождения является графит, а урановых месторождений в березитах и эйситах – антраксолит и керит. Формирование ТУВ происходило из металлоносных флюидов в завершении основного этапа рудообразования.
- В рудах, содержащих ТУВ, в ассоциации с основными рудными минералами (оксидами, сульфидами) отмечается значительное разнообразие самородных металлов – свинца, меди, золота, серебра, висмута, алюминия, меди, железа, олова, свинца, сурьмы, цинка, цинкистой меди и др.
- Установлено, что содержание ТУВ в большинстве изученных месторождений увеличивается с глубиной, либо они встречаются только на глубоких горизонтах; как правило, возрастает также концентрация ГУВ и восстановленность газов ФВ. Формирование ТУВ происходит за счет частичного окисления углеводородных газов, входящих в состав металлоносных флюидов.
- Углерод ТУВ характеризуется легким изотопным составом. $\delta^{13}\text{C}$ изменяется в диапазоне от –20 до –36 ‰, наиболее часто встречаются значения в интервале –(24...26) ‰. Это указывает на гомогенный источник углерода.
- Минералого-геохимические и изотопные исследования говорят о глубинном мантийном источнике УВ в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-00115).

14. Стрельцов В.А., Дойникова О.А. О причинах радиоактивности углеродистого вещества в залежи 7 месторождения Дорнот // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов – М.: ВИМС, 1987. – Вып. 106. – С. 75–77.
15. Томсон И.Н., Сидоров А.А., Полякова О.П. и др. Графит-ильменит-сульфидная минерализация в рудных районах Востока СССР // Геология рудных месторождений. – 1984. – № 6. – С. 19–31.
16. Коростелев П.Г. Графит в рудах Фестивального месторождения // Геология окраин континентов. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. – С. 204.
17. Хамрабаев И.Х. Магматизм и постмагматические процессы в Западном Узбекистане. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1958. – 472 с.
18. Щерба Г.Н. Геология Нарымского массива гранитоидов на Южном Алтае. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1957. – 216 с.
19. Хитаров Д.Н., Шмариович Е.М., Ашихмин А.А. и др. Растворы газовойжидких включений на гидротермальных урановых месторождениях Северного Казахстана // Материалы по геологии урановых месторождений. Информационный сборник. – М.: ВИМС, 1983. – Вып. 77. – С. 102–114.
20. Борисенко А.С., Холмогоров А.И., Боровиков А.А. и др. Состав и металлоносность рудообразующих растворов Депутатского оловорудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 11. – С. 1830–1841.
21. Жуков Ф.И., Фомин Ю.А., Рябоконт А.С. Некоторые генетические особенности уранового месторождения Восток (по изотопно-геохимическим данным) // Геология месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Информационный сборник. – М.: ВИМС, 1989. – Вып. 121. – С. 69–76.
22. Вернадский В.И. Очерки геохимии // Избранные сочинения. – М.: Изд-во АН СССР. – 1954. – Т. 1. – С. 11–392.
23. Deines P. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // Earth-Sci. – 2002. – Rev. 58. – P. 247–278.
24. Галимов Э.М., Соловьева Л.В., Беломестных А.В. Изотопный состав углерода метасоматически измененных пород мантии // Геохимия. – 1989. – № 4. – С. 508–515.
25. Маракушев А.А. Рудоносность взрывных кольцевых структур // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 6. – С. 500–511.
26. Летников Ф.А., Сизых Н.В. Роль процессов гранитизации в формировании кислородной атмосферы Земли // Доклады РАН. – 2002. – Т. 386. – № 4. – С. 1–4.
27. Булярский С.В., Светухин В.В., Приходько О.В. Моделирование неоднородной по объему преципитации кислорода в кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – Вып. 11. – С. 1281–1286.
28. Маркевич В.П., Мурын Л.И., Lindstrom J.L., Suezawa M. Начальные стадии преципитации кислорода в кремнии: влияние водорода // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып. 9. – С. 1039–1045.
29. Зубков В.С. Мантийная углеводородно-неорганическая модель образования золотых месторождений Карлинского типа // Руды и металлы. – 2001. – № 1. – С. 76–82.

Поступила 23.12.2009 г.