

## Некоторые особенности поведения урана при формировании уран-молибденовых месторождений

И. В. МЕЛЬНИКОВ, И. Г. БЕРЗИНА

УДК 553.495:553.21.24:553.3/4.065—(571.5)

В последние годы опубликовано значительное число работ, посвященных минералогическим, структурно-геологическим и некоторым геохимическим особенностям формирования уран-молибденовых месторождений [1, 2, 3]. Однако сведений о поведении урана в течение всего процесса формирования месторождений получено пока недостаточно. В настоящей работе представлен материал, в какой-то мере восполняющий этот пробел.

Месторождения, на которых проводились исследования, являются характерными представителями месторождений уран-молибденовой формации. Они размещаются в пределах кальдеры обрушения, выполненной слоистой осадочно-эффузивной толщей, в которой наиболее распространены покровы трахидацитов, трахиандезитов, трахибазальтов и фельзитов. Рудные тела в них приурочены к системам трещин северо-западного и субмеридионального простирания. Результаты детальных минералогических исследований (им будет посвящена отдельная статья) позволяют прийти к выводу, что месторождения сформированы в течение одного гидротермального этапа, в пределах которого выделяется шесть стадий минералообразования: 1) альбитизация вмещающих пород; 2) кварц-альбитовое изменение пород; 3) кварц-карбонатно-гидрослюдистая (аргиллизация); 4) кварц-карбонатно-сульфидная; 5) молибденит-наступрановая; 6) кварц-флюорит-кальцитовая.

Наибольшее развитие получили процессы, протекавшие в первые три стадии. При этом самый ранний процесс (альбитизация) проявился почти во всех породах. В течение трех последних стадий сформированы жильные образования, сопровождающиеся маломощным ореолом около жильных изменений.

Для изучения особенностей поведения урана применен метод  $f$ -радиографии [4], основанный

на выявлении следов от осколков вынужденного деления урана. Этот метод позволяет определять пространственное распределение и концентрацию урана в минералах и минеральных образованиях, сформированных в течение всего процесса минералообразования. Состав минералов, в которых был обнаружен уран, определялся на основании их физических свойств и уточнялся с помощью лазерного спектрального анализа и рентгеновского микроанализатора типа «Сатеса».

В пределах кальдеры обрушения практически не оказалось пород, не затронутых в той или иной степени изменениями. К наиболее слабым изменениям, которые в ряде случаев можно считать «фоновыми», относится гематитизация пород, связанная с их окислением в верхних и нижних участках покровов и придающая породам вишневый или сиреневый цвет. При этом сохраняются все особенности распределения урана, характерные для негематитизированных эффузивов. Уран находится главным образом в основной массе породы, где он равномерно распределен. Содержание урана во вкрапленниках породообразующих минералов (кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, темноцветные минералы) составляет  $n \cdot 10^{-7}$  вес.%. Содержание урана в целом по породе колеблется в пределах  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  % для трахиандезитов и  $(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$  % для трахидацитов.

В стадию альбитизации, получившую широкое развитие, породы изменяются относительно слабо. Изменениям подвергаются вкрапленники полевых шпатов. Микроклин частично замещается шахматным альбитом, а плагиоклаз — воднопрозрачным несдвойникованным альбитом. Основная масса и темноцветные минералы не изменяются. Характер распределения урана и его содержание в альбитизированной породе сохраняется таким же, как и в неизменной

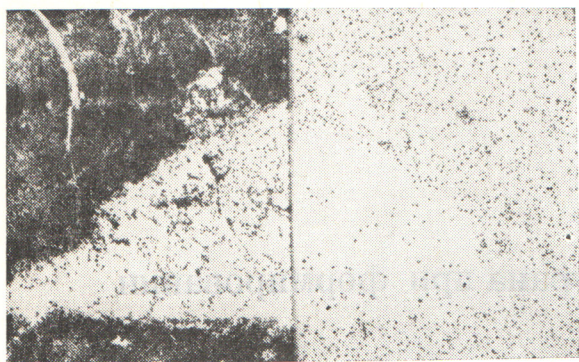


Рис. 1. Распределение урана в альбитизированном трахидаците:

а — прозрачный шлиф; б — детектор (изображение зеркальное).

породе (рис. 1). Наблюдается приуроченность урана к основной массе породы и обеднение им вкрапленника частично альбитизированного плагиоклаза.

Распределение урана в породах, которые подверглись кварц-альбитовому изменению, изучить не удалось в связи с их частичным совмещением с ореолами рассеяния урана вокруг уранорудных тел. В эту стадию минералообразования наряду с развитием кварц-альбитового агрегата образовались вкрапленники ильменорутила, циркона, апатита, сфена, ильменита. В конце стадии местами сформировались прожилковидные образования, состоящие из кварца и апатита и содержащие вкрапленники циркона и титановых минералов.

В течение следующей стадии (кварц-карбонатно-гидрослюдистой) изменению подвергались большие объемы пород, выходящие далеко за пределы ореолов рассеяния урана вокруг рудных тел. Распределение урана в этих породах изучалось с особой детальностью. При этом исследовались только те образцы, которые отбирались далеко за пределами ореолов рассеяния урана и не содержали микроскопических скоплений каких-либо минералов, сопровождавших отложение настурана в рудную стадию минералообразования. Следует отметить, что при появлении указанных минералов (даже при низких содержаниях урана по породе в целом) меняется характер распределения урана в породе.

Наиболее благоприятными участками для отбора образцов оказались контакты пород, из-

мененных в третью стадию, с вишневыми и сиреневыми породами, гематитизированными и альбитизированными во вторую стадию.

Породы, подвергшиеся кварц-карбонатно-гидрослюдистому изменению, характеризуются зональным распределением метасоматических минералов в пространстве. Зональность хорошо выражена около отдельных трещинок, но становится неразличимой в результате слияния ореолов изменения в местах развития более интенсивной трещиноватости.

Во внешней зоне измененных трахиандезитобазальтов вкрапленники плагиоклаза (частично ранее альбитизированного), пироксена и биотита интенсивно замещаются доломитом. При этом по биотиту развивается также пирит. Основная масса породы сохраняет офитовую структуру и темно-зеленую окраску. У всей породы появляется слабояркая (за счет осветления вкрапленников) окраска.

Во второй зоне (анкерит-гидрослюдистой) окраска породы меняется до зеленовато-серой. Как вкрапленники, так и лейсты (в основной массе породы) плагиоклаза полностью замещаются агрегатом анкерита и тонковолокнистой гидрослюды. Анкерит, кроме того, образует скопления в основной массе породы. Темноцветные минералы замещаются анкеритом, лейкоксеном и пиритом, вкрапленники магнетита — пиритом, а титановые минералы — лейкоксеном.

Внутренняя зона ореола (кварц-анкерит-гидрослюдистая) характеризуется интенсивным замещением основной массы и вкрапленников агрегатом кварца, анкерита и гидрослюды с вкрапленниками пирита. Лейкоксен, ранее развившийся по титановым минералам, сохраняется. Порода приобретает белый цвет и окончательно теряет свою структуру.

Кварц-карбонатно-гидрослюдистое изменение трахидацитов приводит к образованию метасоматической колонки, состоящей из четырех зон.

Во внешней зоне (гидробиотит-доломитовой) порода сохраняет свою первичную окраску. Реликты альбитизированного плагиоклаза здесь избирательно замещаются доломитом, а биотит — гидробиотитом. Ранее образованный альбит при этом сохраняется без изменений. Основная масса породы, в том числе нередко присутствующий в ней гематит, а также вкрапленники апатита, сфена, ильменита и магнетита не изменяются.

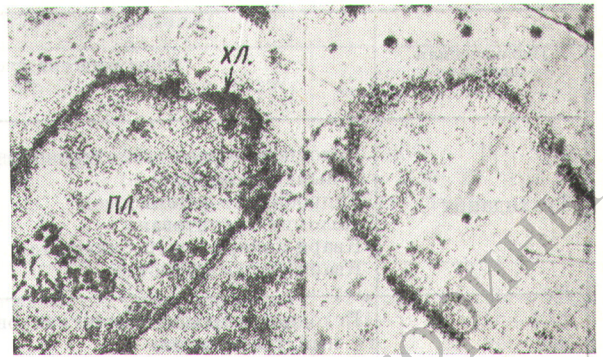
Во второй зоне изменения (доломит-хлоритовой) породы характеризуются зеленоватой или

розовой окраской. По вкрапленникам микроклина и плагиоклаза развиваются хлорит и доломит. Ранее образованный альбит замещается хлоритом, а гидробиотит — хлоритом с мелкими зернышками пирита и лейкоксена. Титановые минералы (сфен, ильменит и ильменорутил) лейкоксенизируются. Вокруг зерен ильменита и магнетита развиваются сильно корродирующие их пиритовые каемки. Апатит в этой зоне не изменяется.

В третьей зоне (кварц-анкерит-гидрослюдистой) порода имеет светло-серый или кремовый цвет. Основная масса полностью изменена и превращена в агрегат скрытокристаллического кварца и тонкочешуйчатой гидрослюды, не содержащей гематита. Реликты вкрапленников плагиоклаза, зерен альбита и микроклина полностью замещены кварцем и гидрослюдой. Ранее образованные хлорит и доломит замещены анкеритом. Титановые минералы полностью лейкоксенизированы. Наблюдается вкрапленность пирита и его развитие по ильмениту. Апатит замещен кварцем и гидрослюдой.

Внутренняя зона изменения (кварц-гидрослюдистая) развивается только в участках максимальной трещиноватости и в наиболее мощных зонах дробления. Породы приобретают белый цвет, их структура полностью меняется. Вся порода замещена агрегатом кристаллического кварца и тонковолокнистой гидрослюды. В кварц-гидрослюдистом агрегате наблюдаются отдельные реликты гнезд анкерита, сильно корродированные кварцем. Вкрапленники ильменорутила и сфена полностью лейкоксенизированы.

В процессе кварц-карбонатно-гидрослюдистого изменения трахидацитов происходил привнос урана, который концентрировался в новообразованных минералах во всех зонах, кроме внешней. В пределах доломит-хлоритовой зоны уран присутствует в хлорите, замещающем плагиоклазы и калиевый полевой шпат, в лейкоксене, развивающемся по биотиту и роговой обманке, а также в лейкоксене и титанатах урана, замещающих сфен, ильменорутил и ильменит (рис. 2а — 2в). В кварц-анкерит-гидрослюдистой и кварц-гидрослюдистой зонах изменения уран, кроме того, находится в мельчайших вкраплен-



а, II

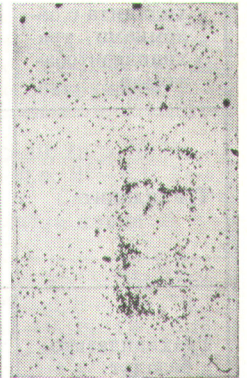
а, III



б, I



б, II



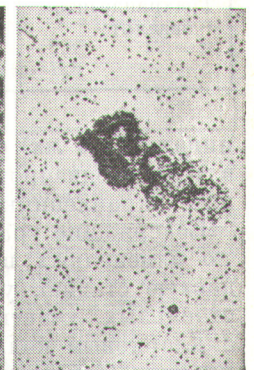
б, III



в, I



в, II



в, III

Р и с. 2. Распределение урана в трахидаците при развитии кварц-карбонатно-гидрослюдистого изменения. Приуроченность урана к минералам: а — хлориту (хл), развивающемуся по вкрапленнику плагиоклаза (пл); б — лейкоксенизированным (л) участкам роговой обманки; в — псевдоморфозам лейкоксена (л) и титанатов урана (т. у) по ильменорутилу; I — прозрачный шлиф при косом освещении; II — в проходящем свете; III — детектор со следами от осколков вынужденного деления урана (изображение зервальное).

Средняя концентрация урана в образцах измененных пород

Таблица 1

| Неизменная порода   | Зоны метасоматической колонки                                       | Плотность треков в поле зрения | Нейтронный поток $\times 10^{-13}$ , нейтр/см <sup>2</sup> | Концентрация урана $C \times 10^{13}$ , вес. % |
|---|---|--------------------------------|--|--|
| Трахидацил  | Исходная порода (гематитизированный и альбитизированный трахидацил) | 34                             | 9,4  | 6,15   |
|   | Гидробиотит-доломитовая   | 40                             | 9,4  | 6,42   |
|   | Доломит-хлоритовая  | 43                             | 9,4  | 7,73   |
|   | Кварц-анкерит-гидрослюдистая  | 65                             | 9,4  | 11,86  |
|   | Кварц-гидрослюдистая  | 95                             | 9,4  | 17,17  |
| Трахидацил  | Исходная порода (гематитизированный и альбитизированный трахидацил) | 11                             | 3,6  | 4,49   |
|   | Гематитизированная гидробиотит-доломитовая                          | 13                             | 3,6  | 5,99   |
|   | Доломит-хлоритовая  | 12                             | 3,6  | 5,19   |
|   | Кварц-анкерит-гидрослюдистая  | 8                              | 2,3  | 5,07   |
|   | Кварц-гидрослюдистая  | 36                             | 2,3  | 25,26  |
| Лавобрекчия трахидацила с обломками трахиандезитобазальта | Кварц-гидрослюдистая  | 7                              | 2,3  | 5,11   |
|   |   |                                |  |  |
| Трахидацил  | Исходная порода (доломит-хлоритовая)                                | 12                             | 3,2  | 5,41   |
|   | Реликты гематитизированной породы в доломит-хлоритовой зоне         | 16                             | 3,2  | 7,06   |
|   | Кварц-анкерит-гидрослюдистая  | 14                             | 3,2  | 6,22   |
|   | Кварц-анкерит-гидрослюдистая  | 23                             | 3,2  | 11,57  |
|   | Кварц-гидрослюдистая  | 68                             | 3,2  | 34,38  |
| Трахиандезитобазальт                                      | Исходная порода (альбитизированный трахиандезитобазальт)            | 20                             | 32,3   | 1,02   |
|   | Доломитовая   | 4                              | 3,6  | 1,64   |
|   |   | 31                             | 32,3   | 1,59   |
|   | Анкерит-гидрослюдистая  | 7                              | 3,6  | 3,09   |
|   | Кварц-анкерит-гидрослюдистая  | 5                              | 3,6  | 2,53   |
| Трахиандезитобазальт                                      | Исходная порода (андезитобазальт)                                   | 2                              | 3,6  | 1,05   |
|   | Доломитовая   | 20                             | 32,3   | 1,11   |
|   |   | 3                              | 3,6  | 1,3  |
|   | Анкерит-гидрослюдистая  | 23                             | 32,3   | 1,24   |
|   | 5   | 3,6                            | 2,23   |  |

никах (2—4 мк) силикатов урана, рассеянных в гидрослюдизированной массе, а также в отдельных вкрапленниках минерала типа циркелита.

Содержание урана в породах, наиболее сильно измененных в кварц-карбонатно-гидрослюдистую стадию, увеличивается в 3 раза, а на отдельных участках в 5 раз по сравнению с кварцевым количеством в слабо измененных породах (табл. 1). В кристаллической решетке новообразованных минералов вместе с ураном в качестве основных компонентов присутствуют торий, редкие земли, цирконий, титан (табл. 2). О нахождении указанных элементов именно в кристаллической решетке свидетельствует их равномерное распределение в минералах, установленное лазерным спектральным анализом

и рентгеновским микроанализатором. Поскольку большинство из этих компонентов (торий, редкие земли, цирконий) отсутствует в ранее сформированных титановых минералах (см. табл. 2) и появляется лишь в новообразованных минералах (лейкоксен, циркелит), замещающих первые (рутил, ильменит, сфен), несомненно, что указанные компоненты привнеслись растворами, а титан перераспределялся на месте.

В кварц-карбонатно-сульфидную стадию минералообразования отложились кварц, пирит, арсенопирит, сидерит, гидрослюда, анкерит и доломит. Нередко кварц, замещаемый последовательно гидрослюдой и сидеритом с пиритом, образует прожилковидные выделения, пересекаемые прожилками анкерита и доломита.

Содержание урана в кварце, пирите, доломите и гидрослюде, установленное методом *f*-радиографии, меняется в пределах  $n \cdot 10^{-6}$  —  $n \cdot 10^{-7}$  вес. %.

В рудную молибденит-настурановую стадию образовались последовательно две парагенетические ассоциации кварца с настураном, парагенезис молибденита с пиритом и небольшим количеством настурана и главный продуктивный парагенезис настурана с гидрослюдой и хлоритом. В конце стадии отложились кварц, гидрослюда и небольшое количество гематита. Пржилки сопровождаются вкрапленниками тех же минералов в породе (рис. 3). В эту стадию произошло отложение из растворов основного количества урана. Во вкрапленных рудах уран преимущественно находится в основной массе породы. Полосы флюидалности, сложенные кварцем, нередко являются микроэкранами (см. рис. 3), обуславливающими в микромасштабах неравномерное распределение урана в породе. Наблюдается также образование каемок настурана вокруг разъединенных зерен пирита.

На основании данных спектрального анализа установлено, что во вкрапленных урановых рудах заметно увеличиваются концентрации свинца, молибдена, сурьмы, бериллия и мышьяка. Торий и редкие земли в скольких-нибудь заметных количествах отсутствуют. Проведенные химические и рентгенохимические анализы настуранов различных генераций из прожилков показывают присутствие в них тех же примесей. В кварц-флюорит-кальцитовую стадию минералообразования были последовательно сформированы следующие парагенетические ассоциации минералов и отдельные минералы: сидерит + анкерит; кварц + анкерит; кварц + адуляр; шамозит; темно-фиолетовый флюорит + пирит + марказит + переотложенный настуран; зеленый флюорит + пирит + марказит; коричневый флюорит + пирит; фарфоровидный флюорит + кварц + гидроокислы железа + гидрослюда; медово-желтый сферолитовый флюорит с переотложенным настураном; марказит; пирит + бравоит; халькопирит; борнит + блеклая руда; галенит + халькозин по халькопириту; кальцит + киноварь + пирит; кварц + барит; кальцит пластинчатый + марказит + пирит; узвеллит.

В эту стадию, как показало изучение характера распределения урана в агрегатах зерен кварца, анкерита, хлорита и кальцита, не происходило обогащения ураном ни самих зерен, ни межзеренного пространства (рис. 4). Однако при пересечении рудных тел прожилками и жилами, сложенными указанными минерала-

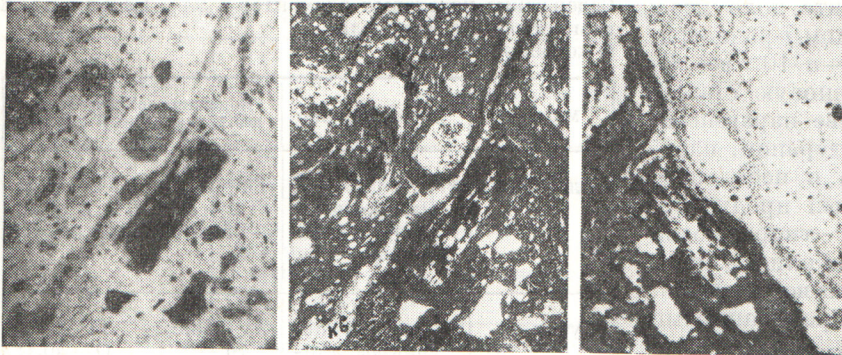
Содержание некоторых элементов в акцессорных минералах и новообразованиях

Таблица 2

| Минерал                        | Метод анализа                            | Содержание элементов, вес. % (частичный анализ)   |
|--------------------------------|--|---|
| Ильменит                       | Рентгеновский (микроанализатор «Самеса») | Fe—36,3; Ti—31,5; O—31,9; Th и U не обнаружены  |
| Рутил                          | Рентгеновский (микроанализатор «Самеса») | Ti—58,6; Fe—0,6; Si—0,1; O—40,1; Th, U, Zr не обнаружены  |
| Лейкоксен по ильмениту         | Рентгеновский (микроанализатор «Самеса») | Fe—0,7; U—0,1; Ti—35,8; Si—0,1; Zn—0,6; Th < 0,1; Pb—0,1; O—11,4; Sc, Y—0,05; V, As не обнаружены                         |
| Циркелит по рутилу и ильмениту | Лазерный спектральный                    | Ti > 10; Zn > 10; Mn—0, <i>n</i> ; Si—0,1; Fe—0, <i>n</i> ; Ca—0, <i>n</i> ; Y—слабые линии                               |
|                                | Рентгеновский (микроанализатор «Самеса») | Ca—0,53; Mg—0,1; Pb—0,2; Fe—2,7; Al—0,16; Ce—0,15; Y—2,3; Si—3,3; Ti—18,5; Zr—17,6; Sc—0,3; Th—1,6; U—0,4; As—0,1; O—42,4 |
| Силикаты урана                 | Рентгеновский (микроанализатор «Самеса») | U, Si, O—10 <i>n</i> ; Ti— <i>n</i> ; Ca—0, <i>n</i> ; Pb— <i>n</i> ; Th—0, <i>n</i>                                      |

ми, концентрация в них урана в ряде случаев возрастает. При этом между зернами и по границам роста отдельных кристаллов образуются каймы и отдельные сферолиты переотложенных настурана и молибденита. Наряду с этим во флюорите из жил, секущих рудные тела, как в местах пересечения, так и вверх по восстанию жил содержание урана в кристаллической решетке минерала независимо от его окраски достигает  $(1,4 \div 3,8) \cdot 10^{-5}$  % [5].

Приведенный фактический материал позволяет следующим образом представить поведение урана при формировании месторождений. В период ранних преобразований пород (в стадию альбитизации) уран в растворах не переносился.



I

II

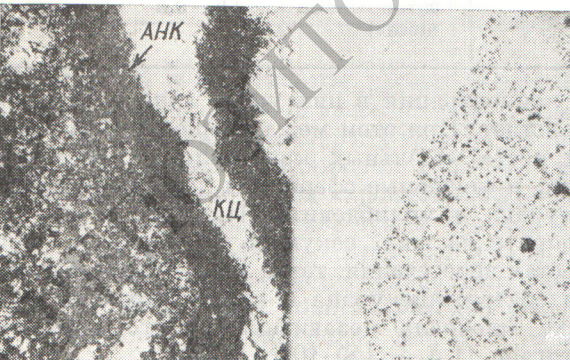
III

Рис. 3. Распределение урана при вкрапленном характере оруденения, сформированного в молибденит-настурановую стадию минералообразования. Наблюдается микрокранирование урана кварцевой полосой флюидальности (кв) в трахидацитах:

I — прозрачный шлиф при косом освещении; II — в проходящем свете; III — треки на лавсане (изображение зеркальное).

В стадию кварц-карбонатно-гидрослюдистого изменения уран привносился в небольших количествах вместе с торием, редкими землями, цирконием; вторично уран вместе с молибденом, сурьмой, свинцом, мышьяком, бериллием привносился в основную продуктивную молибденит-настурановую стадию минералообразования. Между этими двумя стадиями (в стадию кварц-карбонатно-сульфидную) переноса урана в заметных количествах не происходило. В послерудную кварц-флюорит-кальцитовую стадию переноса урана также не было, однако осуществлялось переотложение урана, который фиксировался в решетке флюорита и в виде самостоятельных новообразований настурана. Таким образом, уран в течение единого гидротермального процесса переносился дважды.

Объяснить особенности поведения урана в процессе формирования месторождений можно, по-видимому, по-разному. Авторы предла-



I

II

Рис. 4. Распределение урана в прожилке анкерит (анк)-кальцитового (кц) состава. Заметно отсутствие трещок на детекторе в участке, соответствующем прожилку:

I — прозрачный шлиф в проходящем свете; II — треки на лавсане (изображение зеркальное).

гают следующее объяснение. Как показывают результаты определения состава газов в газо-жидких включениях в минералах месторождений различных типов, основными газами во включениях являются  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , реже  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$  [6, 7]. Имеющиеся сведения дают представления только об относительных концентрациях газов. Для анализа поведения урана в

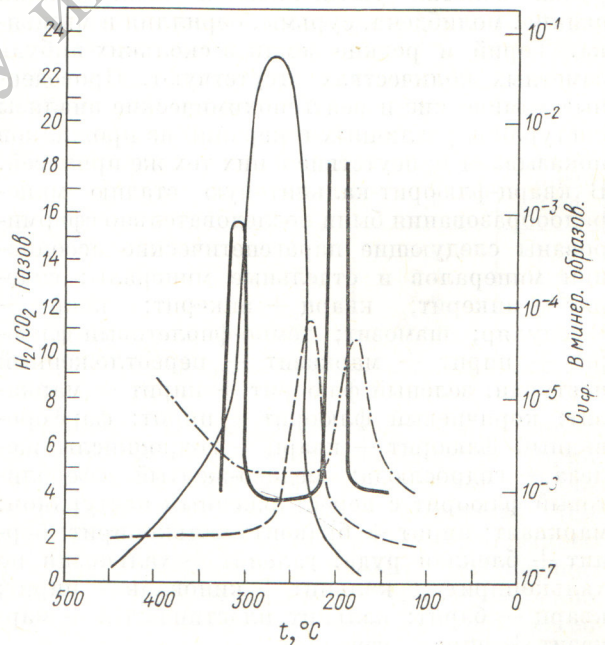


Рис. 5. Изменение концентрации урана в гидротермальных образованиях и величины отношения  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  в газовой фазе газо-жидких включений минералов по данным [6, 7].

По оси абсцисс отложены температуры гомогенизации газо-жидких включений.

— изменение  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  на полиметаллическом месторождении; - - - изменение  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  на молибден-вольфрамовом месторождении; — изменение содержания урана в гидротермальных образованиях уран-молибденового месторождения; - · - · - изменение содержания урана во флюоритовых образованиях флюорит-полиметаллического месторождения.

гидротермальных растворах наибольший интерес представляет отношение  $H_2/CO_2$ , величины которого, отнесенные к температурам гомогенизации газожидких включений, приведены на рис. 5. Как видно на графике, два максимума концентрации урана в минеральных агрегатах и отдельных минералах уран-молибденовых и флюорит-полиметаллического месторождений разделены максимумом кривой, характеризующей отношение  $H_2/CO_2$ . В связи с тем что увеличение этого отношения в основном обусловлено изменением концентрации водорода [6, 7], естественно предположить, что именно увеличение концентрации водорода мешало переносу урана в растворах. Это предположение согласуется с общепринятыми взглядами о переносе урана гидротермальными растворами преимущественно в виде хорошо растворимых комплексных соединений уранила. Следует также подчеркнуть, что при формировании полиметаллических месторождений именно стадия минералообразования с температурой гомогенизации газожидких включений  $220-300^\circ C$  обычно является основной продуктивной.

Таким образом, приведенные данные позволяют говорить о следующих особенностях поведения урана при формировании уран-молибденовых месторождений: 1) ураноносные стадии гидротермального процесса разделяются безурановой стадией, что свидетельствует о перерыве

в переносе урана; 2) наблюдаются резкие различия в геохимических ассоциациях элементов, переносившихся и отлагавшихся вместе с ураном в различные ураноносные стадии; 3) в более позднюю (продуктивную) стадию отлагалось несоизмеримо больше урана по сравнению с более ранней ураноносной стадией, что, по видимому, обусловлено разной концентрацией урана в растворе. Эти особенности поведения урана позволяют предполагать разные источники поступления его в раствор в течение единого гидротермального процесса.

Поступила в Редакцию 20/X 1972 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дымков Ю. М. В кн.: Вопросы прикладной радиогеологии. Вып. 2. М., Атомиздат, 1967, с. 5.
2. Дымков Ю. М. и др. В кн.: Месторождения урана, зональность и парагенезисы. М., Атомиздат, 1970, с. 274.
3. Наумов Г. Б., Миронова О. Ф. В кн.: Геохимия гидротермального рудообразования. М., «Наука», 1971, с. 61.
4. Берзина И. Г. и др. «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 6, с. 520.
5. Берзина И. Г., Мельников И. В., Попенко Д. П. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 3, с. 211.
6. Элинсон М. М., Польшковский В. С. «Изв. высш. учебн. заведений. Геология и разведка», 1961, № 11, с. 31.
7. Элинсон М. М., Сазонов В. Д. «Изв. высш. учебн. заведений. Геология и разведка», 1966, № 4, с. 48.

---

#### *Уважаемые читатели!*

Если Вы хотите приобрести отдельные номера журнала «Атомная энергия», извещайте нас об этом за 1,5—2 месяца до выхода интересующего Вас номера в свет (июньский номер заказывайте в апреле, июльский — в мае). Заявки шлите по адресу: 101876, Москва, Центр, ул. Кирова, 18, редакция журнала «Атомная энергия».

---