

УРАН-ТИТАН-МЕТАГЕЛЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ЗОЛОТОУРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЭЛЬКОНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (АЛДАН) И ОСОБЕННОСТИ ЕЁ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕДЕЛА

А.П. АЛЕШИН¹, В.Д. КОЗЫРЬКОВ², К.М. СМЕРНОВ², ВЛ.Б. КОМАРОВ¹,
М.М. ИВАНЧЕНКО¹, ВИКТ.Б. КОМАРОВ¹, И.Г. ГРИБОЕДОВА¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии ИГЕМ РАН
119017, Россия, г. Москва, Старомонетный пер., 35; e-mail: alexei.aleshin@gmail.com

²Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии АО «ВНИИХТ»
115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д.33; e-mail: smirnov@vniiht.ru

Уникальные запасы урана на золотоурановых месторождениях Эльконского района представлены не браннеритом, как это считалось ранее, а неизвестным до настоящего времени минералоидом — полифазным уран-титановым метагелем (УТМ). Браннерит, оксиды и силикаты урана составляют незначительную часть руд. Охарактеризована последовательность выделения фаз УТМ, их соотношение с браннеритом, выделены группы по составу основных и примесных элементов. Изучен кек автоклавного кислотного выщелачивания технологической пробы с остаточным содержанием урана 0,02% и крупностью частиц -0,16 мм. Установлено, что подавляющая часть урана находится преимущественно в виде мелких фаз УТМ, заключенных в кварц-полевошпатовую матрицу частиц кека. Учитывая незначительный размер урановых фаз (несколько микрон, редко n 10 мкм), додраблывание руды до более тонких классов не приведет к заметному повышению выхода урана в конечный продукт.

Ключевые слова: Эльконский рудный район; браннерит; уран-титановый метагель; сернокислотное выщелачивание; кек.

URANIUM-TITANIUM-METAGEL MINERALIZATION OF AU-U DEPOSITS OF THE ELKON ORE DISTRICT (ALDAN, RUSSIA) AND FEATURES OF ITS PROCESSING

A.P. ALESHIN¹, V.D. KOZYR'KOV², K.M. SMIRNOV², VL.B. KOMAROV¹,
M.M. IVANCHENKO¹, VIKT.B. KOMAROV¹, I.G. GRIBOEDOVA¹

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS)
119017, Russia, Moscow, Staromonetny per., 35; e-mail: alexei.aleshin@gmail.com

²Leading Research Institute of Chemical Technology, JSC «VNIHT»;
115409, Russia, Moscow, Kashirskoye sh., 33; e-mail: smirnov@vniiht.ru

Large-scale reserves of uranium in Au-U deposits of the Elkon ore district are composed of newly discovered polyphase uranium-titanium metagel (UTM). Before, it was assumed that brannerite is the major mineral of these ores. However, it has been revealed that brannerite and uranium oxides and silicates are minor components of mineralization. Succession of UTM phases selection, their relations with brannerite are characterized. Few groups of UTM has been revealed by composition of major and trace elements. The filter cake of acidic leaching of a technological sample with residual uranium concentration of 0,02 wt.% and grain size of -0.16 mm was investigated. As it was established, the major part of uranium is in the fine grained UTM phases submerged in quartz-feldspar matrix of the cake particles. Taking into account a small size of the uranium phases (first microns, rarely n 10 mkm), recrusing of the ore to smaller grades will unlikely lead to a noticeable uranium yield into final product.

Keywords: Elkon ore district; brannerite; uranium-titanium metagel; acidic leaching; filter cake.

Комплексные золотоурановые месторождения Эльконского рудного района являются основным резервным источником урана России. Разведанные запасы оцениваются в 345 тыс. т при среднем содержании урана 0,147 %, а прогнозные ресурсы —

еще в 300 тыс. т [9]. Резервный статус этих уникальных по запасам месторождений объясняется наряду со слабым экономическим развитием района относительно высокой себестоимостью переработки руд. В связи с этим вопросы технологического

передела руд имеют первостепенное значение для вовлечения золотоурановых месторождений в освоение.

Эльконский район расположен на северном склоне Алдано-Тимптонского мегаантиклинория, в области погружения архейских пород фундамента под кембрийские отложения чехла Сибирской платформы [6]. В процессе мезозойской тектоно-магматической активизации (ТМА) породы фундамента и чехла платформы были прорваны малыми интрузиями и дайками щелочного и щелочноземельного составов, что сопровождалось блоковыми движениями и образованием сопряжённых горстов и грабенов. Эльконский горст, вмещающий все урановые месторождения рудного района, вытянут в северо-восточном направлении на 60 км при ширине 30 км [8]. Наиболее продуктивной на уран является Южная зона северо-западного простирания, имеющая протерозойский возраст заложения, омоложенная при мезозойской ТМА и контролирующая положение расположенных в ней пяти крупных месторождений (с северо-запада на юго-восток: Элькон, Эльконское плато, Курунг, Непроходимое, Дружное). Кулисообразные смежные рудные залежи этих месторождений прослеживаются практически непрерывно на протяжении 20 км. Месторождения разведаны до глубины 2 км, при этом нижняя граница оруденения не вскрыта.

Главным урановым минералом руд считается браннерит (UTi_2O_6), в резко подчинённом количестве отмечаются оксиды урана (уранинит, настуран) и коффинит $[U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$ [10, 11]. Попутными компонентами в рудах являются Au, Ag, Mo. Браннерит образует тонкодисперсный цемент брекчий, а также встречается в виде микропрожилков в пределах тектонических швов [2, 3]. Предполагается [2, 10], что при пострудных гидротермальных процессах браннерит замещается тонкодисперсным агрегатом оксидов Ti, U, Si, Fe, с постоянным присутствием W, Nb и Zr. Уран частично мигрировал во вмещающие породы, где осаждался в виде коффинита. Цвет урановой минерализации при этом менялся от чёрного и тёмно-коричневого до светло-жёлтого. Возраст оруденения, по данным изотопного датирования [6], составляет 135—130 млн. лет.

Целью проводимых авторами работ явилось уточнение состава урановых руд Эльконского района и изучение поведения их в процессе гидрометаллургического передела. Для решения первой задачи исследовались образцы руд с месторождений Элькон, Эльконское плато, Курунг и Дружное. Для решения второй задачи изучались образцы из технологической пробы ТП-10 весом 59 т, отобранной из отвалов шахт № 2 и № 3 (месторождения Курунг и Эльконское плато), а также кек автоклавного серноокислотного выщелачивания, в котором

остаточная концентрация урана составила 0,02 %. Решался вопрос о формах нахождения урана в кеке и причинах неполного извлечения урана.

Методы минералогических исследований включали микроскопию в проходящем и отраженном свете (микроскоп OlympusBX51 с оптическим разрешением до 1 мкм), сканирующую электронную микроскопию (СЭМ JSM-5300, JSM 5610LV) с энергодисперсионной (ЭДCLink-ISIS) спектроскопией. Химический состав минералов изучался на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8200 SuperProbe, оснащённом пятью волновыми спектрометрами. Общее число проанализированных фаз (точек) для ЭДС составило 287, для ВДС — 195. Микротермометрия флюидных включений в минералах дорудной и пострудной стадий на месторождении Эльконское плато проводилась в термодатчике ТНМС600 фирмы «Linkam», всего было измерено 76 включений.

В результате изучения шлифов из руд различных месторождений Южной зоны было установлено, что практические все уран-титановые фазы не являются кристаллическим браннеритом или продуктами его распада, а представляют собой ранее неизвестное, изначально коллоидное полифазное соединение, названное уран-титановым метателом (УТМ). Первичная природа этого минералоида подтверждается последовательным образованием фаз с различным соотношением U:Ti.

На рис. 1 показан участок руды с брекчиевой микротекстурой, в которой обломки ранней тёмно-серой фазы (УТМ-1а), находящейся в сростании с тонкими, очень мелкими пластинками сульфида железа (предположительно марказитом), цементируются более светлой фазой (УТМ-1б), не содержащей марказита. Содержания U и Ti в фазе УТМ-1а составляют соответственно 32,8—33,6 и 13,8—14,9 мас.% (по данным ЭДС). Содержания этих элементов в более поздней фазе УТМ-1б выше: соответственно 35,8—38,5 и 16,3—16,7 мас.%. Это свидетельствует о последовательном отложении фаз с различным содержанием U и Ti, которые заметно ниже таковых для одновозрастного браннерита Стрельцовского ураново-рудного поля в Забайкалье (в среднем содержание U 45,4, Ti 19,7 мас.%). Кроме того, парагенезис марказита только с первой фазой УТМ-1а свидетельствует о снижении активности серы и железа в процессе эволюции ураноносного раствора, происходившим на фоне тектонических подвижек, разделяющих отложение фаз УТМ-1а и УТМ-1б.

Фаз с различным содержанием U и Ti даже в пределах одного шлифа может быть пять и более, однако все они объединяются в две основные группы по составу. На диаграмме (рис. 2) показаны содержания U и Ti в проанализированных фазах УТМ, причем результаты волно- и энергодисперсионного анализа хорошо согласуются между со-

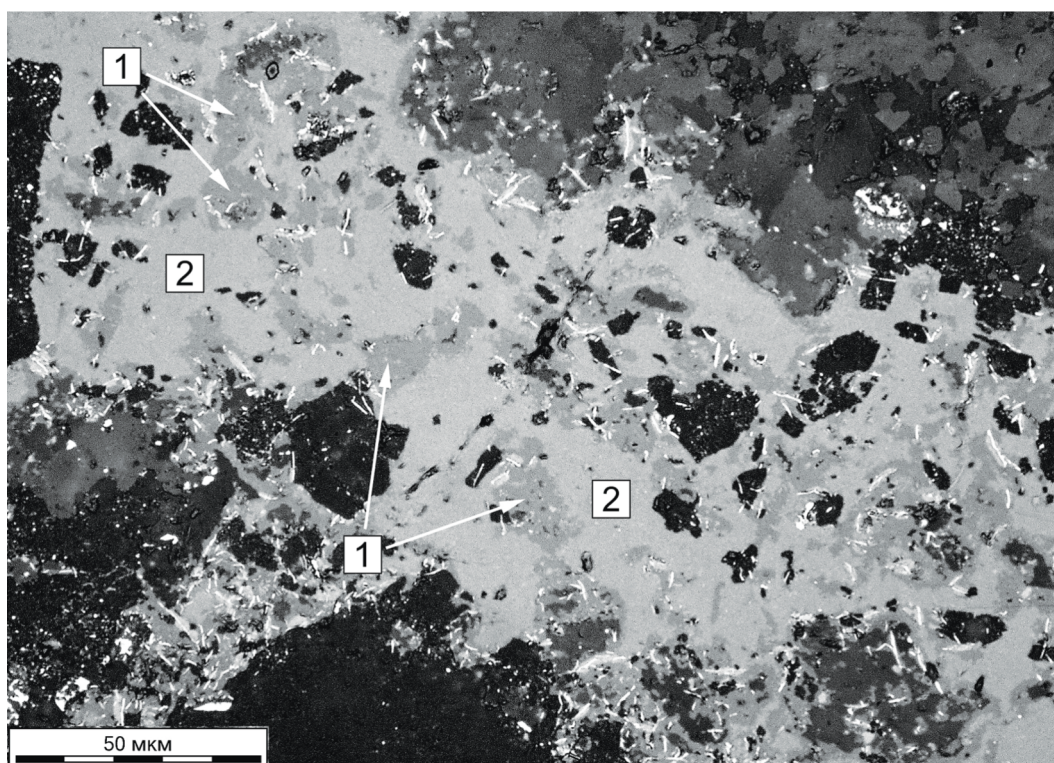


Рис. 1. Обломки пород (тёмно-серое, чёрное) и цементирующей их серой фазы УТМ-1а (1), находящейся в сростании с пластинчатым сульфидом железа (белое), сцементированные светло-серой фазой УТМ-1б (2), не содержащей сульфидов. Месторождение Эльконское плато, микрофотография прозрачно-полированного шлифа в отраженном свете, без анализатора

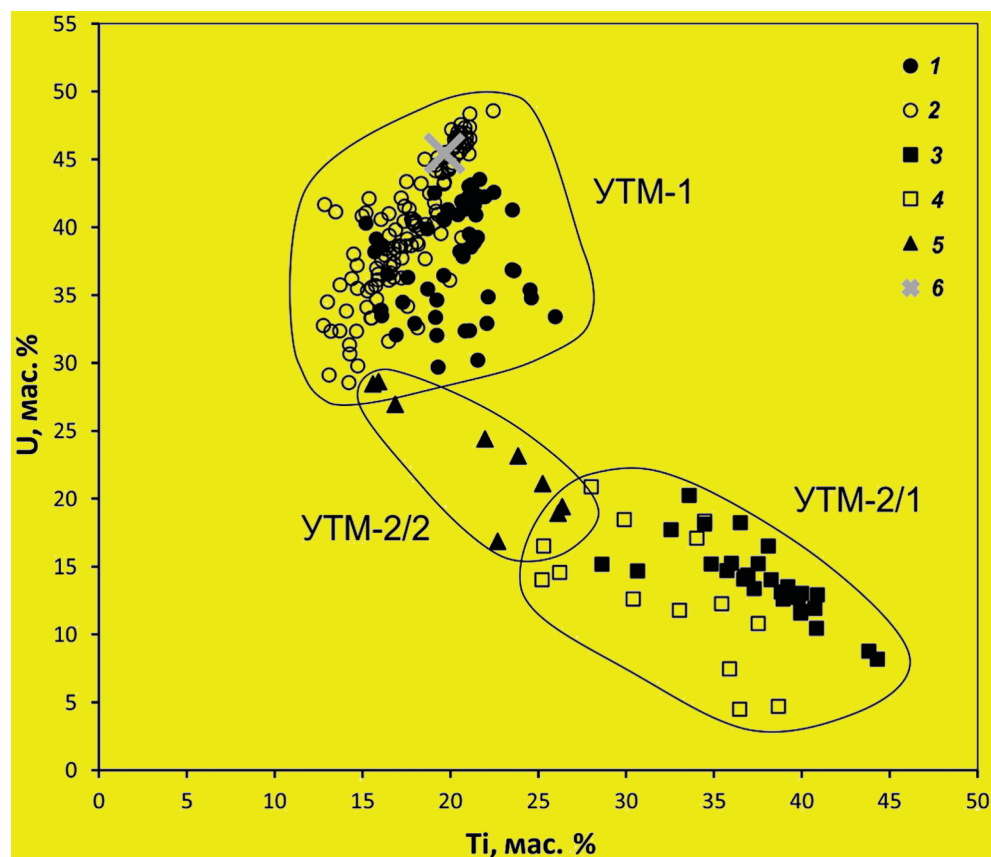


Рис. 2. Диаграмма состава фаз УТМ Au-U месторождений Эльконского района, по данным волно-дисперсионной и энергодисперсионной спектрометрии, а также браннерита Mo-U месторождений Стрельцовского рудного поля: 1 – УТМ-1 (ВДС), 2 – УТМ-1 (ЭДС), 3 – УТМ-2/1 (ВДС), 4 – УТМ-2/1 (ЭДС), 5 – УТМ-2/2 (ВДС), 6 – нормативная точка браннерита

бой. Как видно, на диаграмме отчетливо выделяется группа фаз с высоким содержанием урана (более 30 мас. %) и умеренными содержаниями титана (12–25 мас. %). Для этой группы (УТМ-1) в целом характерна прямая корреляция содержаний U и Ti. Для фаз с более низким содержанием U типична отчетливая обратная корреляция этого элемента с Ti. Данная группа, обозначенная УТМ-2, подразделяется на две подгруппы: с умеренными содержаниями Ti, свойственными для группы УТМ-1, и с повышенными (25–45 мас. %). Как будет показано ниже, фазы этих подгрупп образовались последовательно одна за другой и характеризуются различными содержаниями элементов-примесей.

Количественно преобладают фазы группы УТМ-1. Если исходить из числа проведенных анализов, соотношение фаз УТМ-1:УТМ-2/1:УТМ-2/2 равно 20:5:1, однако в действительности преобладание фаз УТМ-1 еще выше.

Первыми отложились фазы группы УТМ-1. При этом их образование происходило неодновременно (рис. 1), все они цементируются и пересекаются прожилками фаз группы УТМ-2. На рис. 3 показана неодновременная микробрекция, в которой обломки вмещающих пород сцементированы светло-серой фазой УТМ-1, которая в свою очередь сцементирована фазой УТМ-2/1 серого цвета. В послед-

ней отмечаются гнезда и микропрожилки темно-серой фазы УТМ-2/2, завершающей процесс формирования U-Ti минералоида. Границы между фазами могут быть различными: 1) нечеткими диффузными, напоминающими струи молока в кофе, 2) четкими, но извилистыми, в случае гнезд, 3) четкими линейными, в случае микропрожилков. Это свидетельствует о разной степени затвердевания метакласта при его деформации и наложении последующих фаз.

Коллоидная природа выделений УТМ подтверждается частыми трещинами усыхания, развитыми в фазах всех групп, иногда отмечающимися «струйчатыми» выделениями одних фаз в других с диффузионными границами между ними, а также широкими вариациями в содержаниях как основных компонентов (U и Ti), нередко весьма далёких от нормативного состава браннерита (рис. 2), так и широким диапазоном концентраций элементов-примесей.

В составе всех фаз УТМ присутствуют постоянные примеси Si, Ca, Fe, W, Nb, V, в меньших количествах отмечаются Zr и Cr. Их содержания приведены в таблице. Фазы группы УТМ-1 отличаются от фаз группы УТМ-2 только высокими содержаниями U (более 30 мас. %) и положительной корреляцией U с Ti. Фазы группы УТМ-2, образуя единое поле точек с обратной корреляцией между

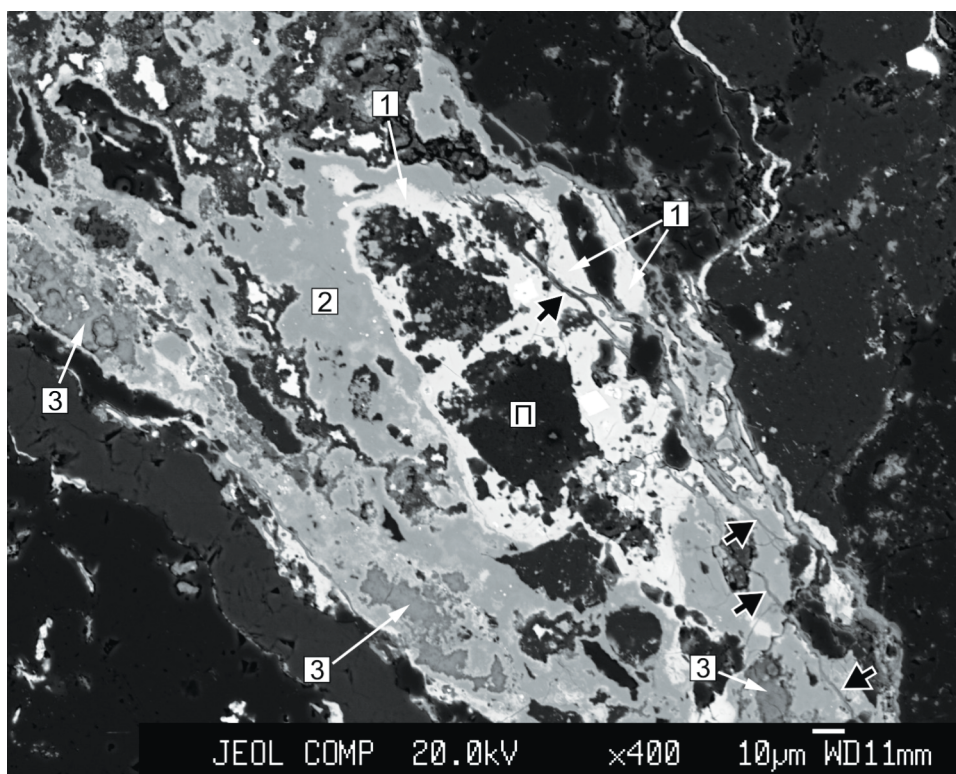


Рис. 3. Обломки вмещающих пород (П), сцементированные светло-серой фазой УТМ-1 / – которая цементируется и обрастается серой фазой УТМ-2/1 (2); в последней отмечаются гнезда темно-серой фазы УТМ-2/2 (3) и её тонкие микропрожилки (чёрные стрелки); месторождение Эльконское плато; Микрофотография в обратно-рассеянных электронах (СЭМ); масштабный отрезок 10 мкм

Средние содержания элементов-примесей в фазах УТМ по данным волнодисперсионного анализа (в мас. %)

Элемент	УТМ-1 (N 58)	УТМ-2/1 (N 28)	УТМ-2/2 (N 9)
U	38,05 (29,72—43,55)	14,00 (8,19—20,26)	23,11 (16,87—28,63)
Ti	20,13 (15,20—25,97)	37,57 (28,63—44,30)	21,63 (15,59—26,37)
Si	3,15 (0,32—6,51)	2,31 (1,19—5,95)	5,99 (5,14—6,84)
Ca	2,09 (1,23—3,86)	1,39 (0,67—3,15)	3,63 (3,06—4,54)
Fe	0,75 (0,09—1,18)	3,32 (1,57—5,39)	1,36 (0,91—2,24)
W	0,61 (0,07—1,18)	1,22 (0,74—2,66)	0,55 (0,14—0,86)
Nb	0,87 (0,55—1,29)	1,41 (0,74—3,10)	0,71 (0,51—1,13)
V	0,88 (0,38—1,54)	1,82 (1,06—3,29)	1,09 (0,83—1,40)

Примечание. Жирным шрифтом показаны средние арифметические значения, в скобках — интервал содержаний; N — число определений.

U и Ti (рис. 2), значительно различаются по концентрации примесей в разных подгруппах. Содержания Si и Ca минимальны в подгруппе УТМ-2/1 и максимальны в подгруппе УТМ-2/2, тогда как группе УТМ-1 присущи промежуточные содержания данных элементов. Обратная ситуация наблюдается для тяжёлых элементов: подгруппа УТМ-2/1 характеризуется высокими содержаниями Fe, W, Nb, V и иногда Zr, а подгруппа УТМ-2/2 — более низкими концентрациями данных элементов, сопоставимыми с таковыми в группе УТМ-1. В фазах группы УТМ-1 с наиболее близкими к браннериту содержаниями U (44—47 мас. %) и Ti (19—21 мас. %), содержания Si минимальны (1—1,5 мас. %), а количество Ca опускается ниже порога обнаружения ВДС (несколько десятых мас. %). Описанные выше закономерности состава различных групп УТМ устойчиво проявляются на всех изученных месторождениях зоны Южная.

Выделения кристаллического браннерита были обнаружены лишь в одном шлифе на месторождении Эльконское плато. Игольчатые и таблитчатые кристаллы титаната урана длиной до 30 мкм нарастали на кристаллы пирита и обломки пород и обрастались тонкой (доли микрона) каймой сульфида железа. В непосредственной близости от кристаллов браннерита были локализованы фазы групп УТМ-1 и УТМ-2, причём состав наиболее светлых (в обратно-рассеянных электронах) фаз УТМ-1 был идентичен браннериту по содержанию U (43—44,5 мас. %) и Ti (33—36 мас. %). Отличие заключалось в более высоких концентрациях Fe в браннерите (2,1—4,5 мас. %) по сравнению с фазами УТМ-1 (1,1—1,9 мас. %).

Кристаллический браннерит был неоднократно идентифицирован на месторождениях Эльконского рудного района и подтверждён микродифракцией на ПЭМ [7, 10], поэтому его существование на данных месторождениях не вызывает сомнений. Однако, как показали проведённые авторами исследования, подавляющая масса U-Ti минерализации представлена не браннеритом, а полифазным уран-титановым метателом с широкими вариациями состава.

Близодновременное образование браннерита и УТМ-1 подтверждается не только их теснейшей пространственной сближенностью и сходством состава по основным компонентам, но и парагенезисом браннерита с выделениями сульфида железа, что также отмечалось для одной из фаз УТМ-1 (рис. 1).

Причину одновременного образования кристаллической и аморфной фаз близкого состава можно предположить, проанализировав результаты гидротермального синтеза браннерита из гидроксидов Ti и U при различных температурах [4, 7]. Как установили авторы этих экспериментов, при температуре >300 °C из смеси гидроксидов Ti и U, находящихся в пропорциях, близких к составу браннерита, синтезируется кристаллический браннерит, а при более низких температурах — рентгеноаморфное вещество. Чем ниже температура, тем шире вариации состава аморфного вещества, что может объяснить наблюдающиеся в изученных рудах широкие интервалы соотношения U:Ti в фазах УТМ-2. Последняя закономерность косвенно подтверждается обнаружением урановых метателов с широким спектром элементов-примесей (в порядке уменьшения содержаний: Fe, Zr, Ti, S, P, Si — в сумме 25—31 мас. %) в рудах экзогенно-эпигенетического Хохловского месторождения урана в Зауралье [5].

Для оценки температурных условий формирования урановой минерализации изучались флюидные включения в минералах дорудной и пострудной стадий, поскольку прозрачных минералов, сингенетичных с U-Ti минерализацией, не установлено. В кварце дорудной стадии определён широкий диапазон температур гомогенизации включений — от 149 до 380 °C. В кварце, флюорите и кальците пострудных прожилков, пересекающих агрегаты УТМ и цементирующих их обломки, температуры гомогенизации включений также варьируют в широких пределах — от 96 до 430 °C, при средних значениях (среднеарифметическом и медианном) 233—243 °C. Установленный диапазон температур значительно шире известного ранее: для дорудной стадии сообщалось об интервале

220—320 °С, а для пострудных прожилков — 95—220 °С [10].

Столь значительные вариации температурных условий, с учётом результатов опытов по гидротермальному синтезу браннерита [7], могут объяснить одновременное отложение рудного вещества как в виде аморфного УТМ при относительно низких температурах, так и кристаллического браннерита при повышенных. Сонахождение браннерита с УТМ в пределах одного шлифа может объясняться метастабильностью системы вблизи граничных температур (250—300 °С). Ещё одним свидетельством в пользу температурного фактора, определяющего отложение рудного вещества в виде кристаллической фазы или минералоида, являются значительные отклонения содержаний как U, так и Ti от нормативного состава браннерита в поздних фазах УТМ-2/1 и УТМ-2/2, что, согласно опытам К.Г. Королева с соавторами [4, 7], возможно для аморфных фаз в области пониженных температур.

Выявленный на месторождениях Южной зоны УТМ не является принципиально новым открытием для эндогенных урановых месторождений. На Мо-U месторождениях Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье) был установлен неизвестный минералоид — полифазный уран-кремниевый метателлурит (УКМ), который ранее считался коффинитом [1]. Он, как и УТМ, характеризуется широкими вариациями содержаний U и Si в различных фазах, повсеместными трещинами усыхания и аморфным состоянием большинства исследованных с помощью микродифракции частиц. В отличие от УТМ он является вторичным, образованным в пострудную стадию позднемезозойского гидротермального этапа при замещении первичных урановых минералов (настурана, уранинита и браннерита). УКМ составляет около четверти (от 250 тыс. т) запасов урана Стрельцовского рудного поля, а кристаллический коффинит, как браннерит на Au-U месторождениях Эльконского района, обнаружен в единичных случаях.

Второй частью проведённых исследований явилось изучение поведения урановой минерализации в процессе гидрометаллургического передела руд. Для этого сначала изучались образцы из технологической пробы ТП-10, отобранной из отвалов шахт месторождений Эльконское плато и Курунг. В образцах существенно преобладали фазы УТМ-1, в значительно меньшем количестве были выявлены фазы УТМ-2/1. Состав и другие свойства этих фаз идентичны описанным выше.

Технология передела руд разрабатывалась в отделе «Обогащение и гидрометаллургия» АО «ВНИИХТ» [12]. Урановые комплексные руды Эльконского района характеризуются сложным минеральным, вещественным и химическим составом. Наличие нескольких целевых компонентов,

присутствие вредных в экологическом плане компонентов, упорность минералов при обогащении требуют создания многооперационных технологических схем переработки, обеспечивающих рентабельность производства с максимальным извлечением целевых компонентов и экологическую безопасность.

Разработанная высокоэффективная технология позволяет на стадии радиометрической сортировки выделить следующие продукты: богатый концентрат в количестве 5,4 % от объёма исходной руды и содержащий часть трудно вскрываемого урана (извлечение урана 30, а ванадия и золота 10—15 %); товарный продукт с выходом 60,3 % и содержанием урана 0,145 %; отвальные кеки с выходом 34,3 % и содержанием урана 0,015 %. Выделение богатого концентрата способствует повышению эффективности последующего флотационного обогащения.

Разработана принципиально новая технология извлечения урана и сопутствующих ценных компонентов, позволяющая оптимально сочетать атмосферное и автоклавное выщелачивание и минимизировать использование энерго- и капиталоемкого процесса автоклавного выщелачивания. На автоклавное выщелачивание поступает 34 % материала от руды крупностью 0,16 мм с содержанием в нём, U — 0,288; V — 0,102 %; Au — 1,63; Ag — 16,79 г/т и извлечением, %: 76,0; 63,3; 70,0; 62,8 соответственно, а также основная масса кислотоёмких компонентов (кислотоёмкость питания составляет 165 кг/т). Материал, поступающий на атмосферное выщелачивание менее, кислотоёмок (45 кг/т) и представлен в основном полевыми шпатами и кварцем (90 %). На атмосферное выщелачивание поступает 31,7 % материала от руды с содержанием в нём: U 0,082; V 0,018 %; Au 0,11; Ag 1,7 г/т и извлечением, в %: 20,0; 10,4; 4,5; 5,9 соответственно. Сочетание таких процессов позволяет в два раза сократить фронт наиболее дорогостоящего автоклавного выщелачивания урана и операции доизвлечения благородных металлов из кеков уранового производства.

Суммарное извлечение урана в раствор (автоклавное и атмосферное) от богатого концентрата и товарного продукта составило: урана 93 и ванадия 54,3 %, расход серной кислоты в пересчёте на исходную руду — 82,7 кг/т.

При гидрометаллургической переработке урановых руд Эльконского региона использованы процессы ионного обмена: сорбционные для извлечения металлов и их концентрирования из растворов и пульп, образующихся на операциях выщелачивания руд и различных продуктов обогащения, и экстракционные — на очистных стадиях и при получении готовой продукции необходимого качества.

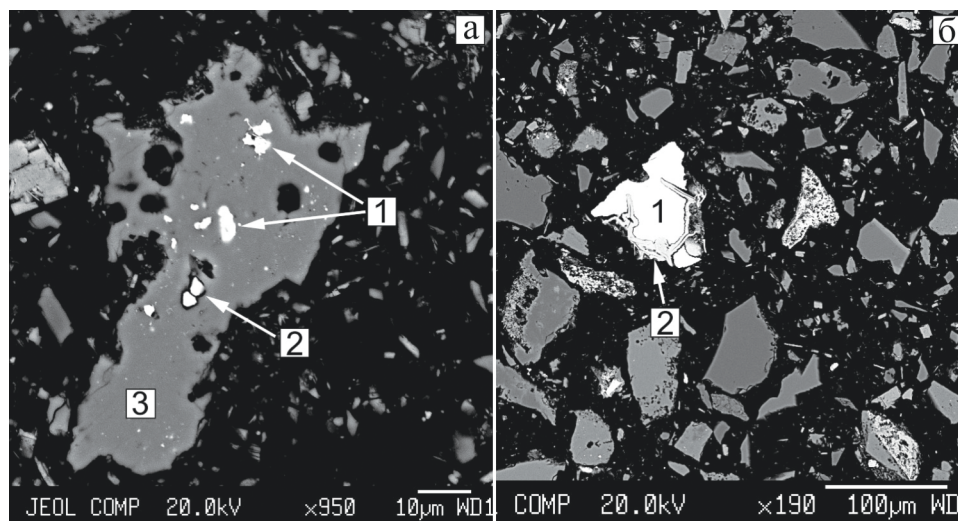


Рис. 4. Формы нахождения урановых фаз в кеке: *а* – мелкие фазы УТМ-1 (1) и пирита (2) в зерне калиевого полевого шпата (3); *б* – более крупное выделение УТМ-1 (1), частично обросшее коркой Fe-Ti-оксида (2). Изображение в обратно-рассеянных электронах (СЭМ), масштабные отрезки – 10 мкм (*а*) и 100 мкм (*б*)

В предлагаемой технологии снижение себестоимости урана обеспечивается за счёт получения высокоценной дополнительной продукции в результате повышения сквозного извлечения золота до 70, серебра до 70, ванадия до 70%.

Таким образом, на основании проведённого комплекса исследований предложена перспективная гидрометаллургическая технология переработки руд Эльконского месторождения, направленная на комплексное извлечение урана и сопутствующих ценных компонентов (золота, серебра, ванадия). Технологическая схема малоотходная, экологически безопасная и обеспечивает получение готовых продуктов требуемого качества.

Содержание урана в кеке автоклавного выщелачивания составляет 0,02 %, что свидетельствует о недоизвлечении урана в товарный продукт. Для изучения форм нахождения урана в кеке были изготовлены шашки для оптической микроскопии и микрозондовых исследований. Изучение шашек в отраженном свете не позволило выявить урановые фазы, поскольку по оптическим свойствам они сходны с оксидами Ti и рутилом. Поиск фаз в обратно-рассеянных электронах на микрозонде JXA-8200SuperProbe в ручном режиме также не дал результата из-за обилия сульфидов, оксидов Fe и Ti, близких по яркости к урановым фазам. Тогда было проведено автоматическое сканирование шашек на уран с диаметром зонда 4 мкм и шагом 5 мкм. Выявленные фазы затем изучались в обычном режиме с последующим волнодисперсионным анализом их состава.

Подавляющее число урановых фаз оказались мелкими (< 10 мкм) фазами УТМ преимущественно 1-й группы (УТМ-1), заключёнными в кварц-полевошпатовую матрицу пород (рис. 4, *а*). Реже были выявлены тонкодисперсные фазы группы

УТМ-2/1. Состав фаз УТМ в кеке соответствовал составу фаз аналогичных групп в исходных образцах технологической пробы ТП-10, а также фазам из других месторождений Южной зоны. Это свидетельствует об отсутствии следов разложения урановых фаз, оставшихся в кеке после сернокислотного автоклавного выщелачивания.

Значительно реже тонкодисперсных фаз встречались более крупные зёрна УТМ и их обломки, достигающие 100 мкм. В некоторых случаях их поверхность была частично экранирована «рубашками» оксидов Fe и Ti (рис. 4, *б*), однако отмечались также зёрна с полностью открытой поверхностью. Причина их сохранности в процессе автоклавного выщелачивания остается неясной.

Поскольку подавляющая часть урановых фаз является тонкодисперсной и заключена в более крупных зёрнах алюмосиликатов, доизмельчение руды до более тонких классов, чем принятый в процессе передела класс 0,16 мм, по-видимому, не даст заметного повышения выхода урана в конечный продукт. Этот вывод подтверждается отсутствием положительного эффекта от доизмельчения исходной руды до класса 0,10 мм, как это было показано при разработке оптимальной технологической схемы передела руд.

Для повышения эффективности переработки эндогенных урановых руд Эльконских и других месторождений целесообразно разработать и внедрить люминесцентную сепарацию мелкокусковой (-25 мм) руды, что повысит обогатимость и понизит себестоимость конечного продукта. Принципиальная возможность данного решения подтверждена лабораторными исследованиями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00549 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин А.П., Величкин В.И., Крылова Т.Л. Генезис и условия формирования месторождений уникального молибден-уранового Стрельцовского рудного поля: новые минералого-геохимические и физико-химические данные // Геология рудных месторождений. 2007. Т.49. № 5. С. 446–470.
2. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. № 4. С. 345–369.
3. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н., Дорожкина Л.А. Золоторудные и золото-урановые месторождения Центрального Алдана // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т. 2. Стратегические виды рудного сырья. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 215–240.
4. Вольфсон Ф.И., Королев К.Г. Условия формирования урановых месторождений. М.: Недра, 1990. 288 с.
5. Дымков Ю.М., Дойникова О.А., Волков Н.И. Находка U-Fe-Zr-Ti-S-P-геля в экзогенно-эпигенетическом урановом месторождении Хохловское (Южное Зауралье) // Геохимия. 2003. № 11. С. 1231–1239.
6. Казанский В.И., Максимов Е.П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) // Геология рудных месторождений. 2000. № 3. С. 212–230.
7. Королев А.Г., Мигута А.К., Полякова В.М., Румянцев Г.В. Минералогия, геологические и физико-химические особенности образования уранотитанатов. М.: Недра, 1979. 144 с.
8. Крупенников В.А. Урановые (браннеритовые) месторождения в разломах фундамента эпиархейских кратонов // Гидротермальные месторождения урана. М.: Наука, 1978. С. 128–138.
9. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
10. Мигута А.К. Состав и парагенетические минеральные ассоциации урановых руд Эльконского района (Алданский щит, Россия) // Геология рудных месторождений. 1997. № 4. С. 323–343.
11. Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Геология рудных месторождений. 2001. № 2. С. 129–151.
12. Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Крылова О.К., Пеганов В.А., Акимов И.Д., Овчаренко Е.В. Современное состояние и перспективы развития химической технологии переработки урановых полиметаллических руд // ВНИИХТ-65 лет. Сборник научных трудов. М.: ООО «Винпресс», 2016. С. 113–123.