

УДК 553.25:549.5:553.2

ПРОСТЫЕ УРАНОВЫЕ ОКСИДЫ, ГИДРОКСИДЫ U^{4+} + U^{6+} , ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ ГИДРОКСИДЫ УРАНИЛА В РУДАХ

А.А. Черников

УРАН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, cher@fmm.ru, mineral@fmm.ru

В результате анализа литературных и новых собственных данных по простым оксидам урана показано, что в урановых рудах возможно формирование 5 простых оксидов — настурана, урановых черней, уранинита, ураноторианита и церианита. Из простых оксидов наиболее широко распространены в разнообразных по генезису и минералогии типах руд настуран, урановая чернь и уранинит. Ураноторианит или ториевый уранинит (адданит) отмечается в рудах в единичных случаях, а присутствие церианита предполагается в уран-фосфорных месторождениях Северного Казахстана.

Из трех гидроксидов урана (IV + VI) в урановых рудах наиболее распространен гидратированный настуран. Янтинит встречается в небольших количествах в нескольких месторождениях, а клэзонит — только в одном.

Простые гидроксиды уранила — скупит, метаскупит и параскупит — широко распространены в окисленных рудах месторождения Шинколобве, в его приповерхностной части. Реже они отмечаются на более глубоких горизонтах и на других месторождениях. Студтит и метастудтит имеют незначительное промышленное значение, но представляют большой интерес для установления генезиса минеральных образований, в которых они наблюдаются, так как характеризуют сильно окислительные условия образования минеральных ассоциаций и руд.

Среди простых гидроксидов уранила достаточно распространенным в окисленных урановых рудах является рентгеноаморфный ургит, ассоциирующий с гидратированным настураном и впервые описанным на месторождении Ласточка (Хабаровский край) рентгеноаморфным гидратированным веществом, содержащим трехвалентное железо и шестивалентный уран.

Большое количество сложных гидроксидов уранила с межслоевыми катионами: K, Na, Ca, Ba, Cu, Pb, Bi, встречаются, главным образом, на нескольких месторождениях — Шинколобве, Марньяк, Вёлсендорф, Серное, Тулукуевское, и реже других, в которых отмечаются достаточно крупные мономинеральные выделения настурана или кристаллов уранинита. В других случаях наблюдается выщелачивание урана вплоть до фонового его содержания из зоны окисления или формирование более богатых окисленных руд (месторождения Серное, Россинг, Шакоптар, Пап и др.). Эти особенности окисления урановых руд имеют важное теоретическое и практическое значение.

В статье 2 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 50 названий.

Ключевые слова: оксиды урана (IV + VI), гидроксиды урана, простые и сложные гидроксиды уранила, промышленные руды, рентгеноаморфное вещество, месторождения урана.

Оксиды урана (IV + VI) входят в состав практически всех промышленных неокисленных руд. Известны простые и сложные оксиды урана. Сложные оксиды, браннерит, давидит, самарскит и другие, здесь не рассматриваются, и данные о них не приводятся, так как для этого требуется обширный дополнительный материал, который значительно увеличил бы объем статьи. Простые оксиды отмечаются в большинстве промышленных руд, по которым в зоне окисления образуется значительное количество гидроксидов, однако, чаще наблюдаются иные варианты изменения руд.

Целью работы является анализ литературных и новых данных для выяснения роли простых оксидов урана (IV + VI) в формировании промышленных руд и характера изменения этих руд в окислительных условиях, а также, что особенно существенно, выявление условий формирования различных гидроксидов урана (IV + VI), простых и сложных гидроксидов

уранила и выщелачивания урана при окислении простых оксидов и их природных ассоциаций на конкретных месторождениях. Важно также рассмотреть случаи формирования, помимо гидроксидов урана, арсенатов либо ванадатов уранила и рентгеноаморфных фаз шестивалентного урана с изменением параметров руд зоны окисления, по сравнению с параметрами неокисленных руд, и другие особенности окисления урановых руд, имеющие важное не только теоретическое, но и практическое значение.

Простые оксиды урана

В таблице 1 приведены основные характеристики для 5 простых оксидов. Здесь не представлен ворланит $(CaU^{6+})O_4$ (Galuskin *et al.*, 2011). Формула его, возможно, установлена неправильно, так как рентгеновские данные — $a = 5.3813\text{Å}$ — соответствуют ураниниту, у которого этот параметр изменяется от

Таблица 1. Простые оксиды урана (IV+VI)

Минерал, формула	Форма выделения, a_0 (Å)	Цвет и др. характерные свойства
Уранинит $UO_{2.0-2.9} \cdot nPbO, ThO_2, TR_2O_3$ и реже CaO, где n меняется от 0 до единиц	Октаэдры и кубы, a_0 5.38-5.65	Черный с полуметаллическим до смоляного блеском. Тв. 5.06-7.6; пл. 7.6-10.8
Настуран $UO_{2.02-2.9} \cdot nPbO$ mCaO, Натечные или почковидные кол- где n и m меняются от 0 до единиц	ломорфные плотные выделения, a_0 5.34-5.45	Черный со смоляным блеском. Тв. 4.7-5.9; пл. 4.9-7.7
Урановая чернь $UO_{2.06-2.98}$ и рентгеноаморфные водные оксиды, другие минералы и образования урана (IV + VI)	Рыхлые налеты, a_0 5.35-5.42 и рентгеноаморфные или плохо раскристаллизованные фазы	Темно-серый до светло-серого, матовый. Тв. 1-3; пл. 3.8-4.8
Ураноторианит (Th,U)O ₂ + UO ₃ + PbO	Кубические кристаллы, часто с мелкими гранями октаэдра, a_0 5.05-5.96	Темно-серый. Просвечивает в тонких срезах. Тв. 6.5-7, пл. 8.7-9.9; n_{cr} 2.2. Изотропный
Церианит-(Ce) (Ce,Th,U)O ₂ + UO ₃ + PbO	Мелкие кубы и октаэдры, порош- ковидные выделения, a_0 5.411-5.482	Темно-зеленоватый, янтарный до буро-желтого со смоляным блеском, просвечивающий, изотроп- ный, $n > 2$

5.38 до 5.65 Å (табл. 1). Можно полагать, что вероятная формула изучаемого Е.В. Галускиным с соавторами минерала — $n(CaU^{4+}O_2) \cdot m(UO_3)$, где n значительно меньше m. Такая формула соответствует сильно измененному кальцийсодержащему ураниниту.

Из других простых оксидов первые три (уранинит, настуран и урановые черни) наиболее распространены в урановых рудах. До самого последнего времени они рассматриваются минералогами как морфологические разновидности единого минерала, уранинита, хотя эти различия уранинита, как видно из таблицы, имеют индивидуальные формы выделения и несколько различающийся состав. Они к тому же имеют и различный генезис. Уранинит — наиболее высокотемпературный оксид урана (400 – 260°C), колломорфный настуран — характерный минерал средне-низкотемпературных отложений (250°C), и рыхлые урановые черни — типичные экзогенные образования. Уранинит имеет четыре разновидности по составу: уранинит, содержащий торий и редкие земли в кларковых или почти кларковых концентрациях; алданит (ураноторианит) (до 46 – 69% ThO₂, 0.7 – 1.3% TR₂O₃); брётгерит (до 15% ThO₂ и 1 – 6% TR₂O₃) и клевет (нивенит), обогащенный редкими землями до 15%. Разновидности уранинита по составу — алданит, брётгерит и клевет — распространены, главным образом, в гранитных и сиенитовых пегматитах и некоторых магматических породах как акцессорные минералы. Руды уранинита, прак-

тически лишённого тория и редких земель, представляющие промышленный интерес, образуются в различных геологических условиях. Известны промышленные скопления уранинита в гранитных пегматитах (Намибия, Норвегия, Канада, Мадагаскар, Аляска и др.), в скарнах, (район Банкрофт, провинция Онтарио, Канада; Мэри-Катлин, Австралия), в базальных протерозойских конгломератах (Витватерсранд, ЮАР; Элиот-Лейк, Канада; Жакобино, Бразилия), иногда в гидротермальных месторождениях (Шинколовбе, Демократическая Республика Конго). Наиболее полно они охарактеризованы в следующих работах: Хейнрих, 1962; Образование..., 1976; Лаверов и др., 1983; Типоморфизм..., 1989; Frondel, 1958; Chernikov, 2006/2007 и других.

Для получения новых представлений об особенностях формирования руд с уранинитом следует остановиться на анализе минерального состава крупного по запасам урана месторождения Россинг в Намибии (Юго-Западная Африка), связанного с гранитными пегматитами, в которых уранинит является основным минералом первичных руд (Berning *et al.*, 1976). Зона окисления этого месторождения имеет общие черты с зоной окисления уранового месторождения Серное (Туркменистан) как по составу минеральных ассоциаций, так, очевидно, и по содержанию урана в них. Основные минералы первичных руд данных месторождений различаются. На месторождении Россинг это кристаллический уранинит; на месторождении Серное —

колломорфный настуран. В зоне окисления обоих месторождений в небольших количествах отмечаются гидроксиды уранила и урана (IV + VI) (беккерелит, скупит и гидронастуран — на месторождении Серное; гуммит-смесь гидроксидов с силикатами уранила (рис. 1) — на месторождении Россинг. В значительных количествах в зоне окисления этих месторождений развиты более поздние образования, силикаты уранила — бета-уранофан и уранофан. На обоих месторождениях широко распространен карнотит. На месторождении Серное, кроме того, отмечаются стрелкинит и тюямунит. Реже в зоне окисления обоих месторождений распространены другие аналогичные минералы уранила. Возможно, характер распределения концентраций урана в вертикальном разрезе этих месторождений также аналогичен. На месторождении Серное окисленные руды на 1 м вниз по разрезу содержат в три раза больше, а смешанные — окисленные с реликтами настурана и урановых черней, в 2,8 раз больше урана в сравнении с неокисленными рудами, т.е. на месторождении Серное, как и на урано-флюоритовом месторождении Томас-Рейнджер, (шт. Юта США), гипергенные процессы играли существенную роль в формировании рудных тел. Вероятно, и на месторождении Россинг эти процессы отразились подобным образом на концентрации урана в рудах.

Настуран — характерный минерал промышленно-гидротермальных и экзогенных месторождений. Он встречается в некоторых оловянно-вольфрамовых месторождениях — Бутыгычаг Северо-Востока России, на некоторых рудопоявлениях, а также месторождениях Хабаровского края, Северного Забайкалья и Корнуолла в Великобритании. Во всех этих объектах (при анализе новых неопубликованных данных по российским объектам и литературных данных по Корнуоллу) настуран наблюдается в ассоциации с арсенипитом, никелином, галенитом, халькопиритом и другими минералами, слагая прожилки, секущие более ранние оловянно-вольфрамовые рудные жилы.

Крупнейшие скопления настурана, наряду с уранинитом и коффинитом, образуются в месторождениях типа «несогласия» с богатями собственно урановыми, золото-урановыми, медно-урановыми, полиметалльно-урановыми рудами. Наиболее характерными представителями таких образований являются месторождения, локализованные в районе Алигейтор-Ривер (Северная территория Австралии) и в районе Атабаска западной части



Рис. 1. Выполнение пустот в пегматите гуммитом (оранжевый) и бета-уранофаном (желтый) на месторождении Россинг (Намибия).

Канадского щита (северо-восточные территории Канады), охарактеризованные в работах различных авторов (Uranium..., 1980; Лавров и др., 1983; Кулиш, Михайлов, 2004 и др.). Характерные крупные представители этих руд в России не встречаются.

Гидротермальные урановые месторождения с настураном известны в России и во многих зарубежных странах. При этом некоторые собственно урановые месторождения, описанные так во время их отработки, при дальнейшем изучении образцов их руд оказались, по новым данным, комплексными — золото-урановыми. Так, на месторождении Серное (Черников, 2001, с. 17–21; Черников, 2010; Chernikov, 2006/2007) с обогащенной ураном зоной окисления и зоной цементации, установлено высокое содержание Au (до 15 г/т) в карбонатных прожилках, наложенных на настуран. Среди других собственно урановых с настураном гидротермальных месторождений выделяются такие подтипы: настуран-карбонатный, настуран-флюоритовый, настуран-кварцевый, настуран-битумный, настуран-гидрослюдистый и другие. Выделяют комплексные руды: уран-циркониевые, уран-мышьяк-свинцово-цинковые, уран-медные, уран-молибденовые и другие, в которых настурансодержащие жилы секут более ранние минеральные ассоциации (Типоморфизм..., 1989, с. 476, 477). Кроме того, на многих месторождениях, особенно на глубоких горизонтах некоторых из них, например, месторождении Тулукуевское Юго-Восточного Забайкалья широко распространены на-

норазмерные и рентгеноаморфные выделения, соответствующие по составу гидратированному настурану.

Известны крупные концентрации настурана, связанные с гидротермальными месторождениями пятиэлементной формации, в которых минерал ассоциирует с арсенидами Co, Ni, Fe, самородным Ag, Bi, иногда As (в Канаде; в Рудных горах в Германии и Чехии). Месторождение Актеле в Узбекистане, относящееся к этому типу, является мелким, возможно, недостаточно разведанным.

В крупнейшем золото-урановом месторождении Витватерсранд настуран с уранинитом в ассоциации с самородным золотом и пиритом отлагается в цементе кварцевых галечников и конгломератов. В уран-фосфорных, уран-ванадиевых, уран-угольных, а также урановых инфильтрационных месторождениях настуран и урановые черни отлагаются в аргиллитах, песчаниках, известняках, угольных пластах. Они образуют ассоциации с сульфидами Mo, Cu, Zn и другими, а также часто с ванадиевыми минералами, самородными мышьяком, селеном и рением.

Урановые черни (остаточные и регенерированные) развиваются ниже зоны окисления (в зоне цементации) эндогенных месторождений или зоны пластового окисления экзогенных руд и часто являются полиминеральными образованиями, в которых помимо настурана устанавливаются силикаты, фосфаты, титанаты урана и, что очень важно в практическом отношении и почти не отмечено в литературе, рентгеноаморфные или наноразмерные урансодержащие фазы. На многих месторождениях пластового окисления и зонах цементации эндогенных месторождений (Черников, 1981) рентгеноаморфные и наноразмерные образования представлены оксидами или силикатами, либо фосфатами урана (IV + VI), которые легко выщелачиваются при любом способе извлечения металла из руд. На других, например, месторождениях Дорнотской группы Монголии, эти образования состоят из урансодержащих оксидов титана, урансодержащих продуктов изменения анатаза и, возможно, ильменита (Черников, Костиков, 2006), которые представляют значительные трудности для извлечения металла из руд, особенно, методом выщелачивания урана скважинами на месте их естественного залегания. Такие же образования, по новым данным, характерны для некоторых перспективных объектов Витимского, Южно-Витимского и Еравненского районов, рассмотренных Б.Н. Хоментовским с соавторами (2000).

Церианит [церианит-(Ce)] впервые был установлен (Graham, 1955) во включениях измененной карбонатной породы из экзоконтакта нефелинового сиенита уранорудного района Садбери (провинция Онтарио, Канада). Включения в виде линз, длиной около 0.3 м, содержат церианит-(Ce), карбонат, нефелин, полевошпат, тремолит, магнетит, ильменит и апатит. Минерал всегда имеет примесь других редких земель и тория. Установлено полное взаимное замещение CeO_2 , UO_2 , ThO_2 , La_2O_3 и частичное — Y_2O_3 , In_2O_3 и ZrO_2 (Duwez, Odell, 1950; Rüdorff, Valet, 1952; Padurow, Schusterius, 1953). Химическими методами уран в природном церианите не определялся. Судя по рентгеновским данным прокаленного при 1000°C сильно радиоактивного метамиктного церианита-(Ce) из микроклиновых пегматитов Несёя в Восточной Антарктиде (Matsumoto, Sakomoto, 1982) и из Актасса в Казахстане (Кудайбергенова, Зубова, 2007), он содержит уран, возможно, в большем количестве, чем торий. Большинство межплоскостных расстояний прокаленного церианита-(Ce) из Несёя и Актасса (табл. 2) почти совпадают с межплоскостными расстояниями синтетического уранинита, а не ториянита. Размер элементарной ячейки прокаленного церианита-(Ce) (5.451Å) заметно отличается от размера ячейки стандартного церианита-(Ce) (5.411Å) и синтетического ториянита (5.6Å). По этим данным он ближе к синтетическому ураниниту (5.46Å). Следовательно, сильная радиоактивность церианита-(Ce) из Восточной Антарктиды и Казахстана, очевидно, в большей степени обязана урану, чем торью.

Церианит, как и церий, в подавляющем большинстве основных типов урановых руд не обнаружен в ощутимых количествах, но его повышенная роль возможна при формировании комплексных урансодержащих карбонатитовых и уран-фосфорных месторождений. По крайней мере, преобладание церия в составе редких земель установлено в некоторых урансодержащих апатитах уран-фосфорных месторождений Северного Казахстана. К.Г. Королев и другие (1983) отмечают наличие 35.5% Ce; при 27.6% La; 15.6% Nd и меньших количеств других редких земель в апатите из руд в гнейсах. Автором данной статьи установлены сходные содержания редких земель в апатите месторождения Тастыколь Северного Казахстана. Вполне допустимо, что этот церий присутствует в минерале в виде церианита.

Ториянит и ураноториянит (U^{4+}Th) O_2 или ториевый уранинит (адданит) встречаются,

Таблица 2. Межплоскостные расстояния и параметр элементарной ячейки церианита, торинанита и уранинита

Церианит-(Ce), Несёя, 1000°C, 7 часов			Церианит-(Ce) (ASTM)		Торинанит син- тетический (ASTM)		Уранинит син- тетический (ASTM)		Церианит-(Ce), Актасс, Казахстан	
<i>hkl</i>	<i>d</i> (Å)	<i>I/I</i> ₁	<i>d</i> (Å)	<i>I/I</i> ₁	<i>d</i> (Å)	<i>I/I</i> ₁	<i>d</i> (Å)	<i>I/I</i> ₁	<i>d</i> (Å)	<i>I/I</i> ₁
	3.193	49	—	—	—	—	—	—	—	—
	3.182	45	—	—	—	—	—	—	—	—
111	3.51	100	3.124	100	3.234	100	3.14	100	3.14	100
200	2.723	40	2.706	29	2.800	35	2.73	50	2.71	10
220	1.929	48	1.913	51	1.980	58	1.926	80	1.90	20
			1.926	46	—	—	1.926	80	—	—
311	1.643	45	1.632	44	1.689	64	1.645	90	1.63	5
222	—	—	1.562	5	1.611	20	1.574	40	1.57	5
400	—	—	1.353	5	1.396	20	1.365	30	1.35	5
<i>a</i> ₀ = 5.451			<i>a</i> ₀ = 5.411		<i>a</i> ₀ = 5.600		<i>a</i> ₀ = 5.46		—	

Таблица 3. Гидроксиды урана(IV+VI)

Минерал, формула	Сингония, параметры эл. ячейки (Å)	Морфология кристаллов. Цвет; блеск; плотность (пл.); твердость (тв.)	Показатели преломления, спайность	Основные рентгеновские линии (интенсивность)	Другие характерные данные
Гидратированный настуран (гидронас- туран) $UO_{2.3-2.9} \cdot 3-9H_2O$	Рентгено-аморфный или плохо раскристал- лизованные кубичес- кие фазы	Плотные агрегаты. Темно-серый; стеклянный; пл. 4.3-4.7; тв. 2-4.5	<i>n</i> 1.715-1.781 снижается с увеличением O_2 и H_2O	Рентгено-аморф- ный, иногда слабые диффузные линии	Отражательная способность 6.4-11.4%.
Янтинит (иантинит) $U_2^{4+}(UO_2)_4(O_6(OH)_4) \cdot 9H_2O$	Ромбическая, <i>a</i> ₀ 11.52; <i>b</i> ₀ 7.15; <i>c</i> ₀ 30.3.	Таблитчатые. Фиолетовый; стеклянный; пл. 5.16 (выч. 5.03); тв. 2-3	<i>n</i> _γ 1.92; <i>n</i> _α 1.9; <i>n</i> _β 1.674, спайность совершенная по (001), отчет- ливая по (100)	7.61 (10); 3.81 (6); 3.59 (6); 3.35 (6); 3.22 (9); 1.68 (5)	Плеохроизм: фиолетовый — <i>Ng</i> , бесцветный — <i>Np</i>
Клёзонит $(Pb,Sr)(U^{4+},U^{6+})$ $(Fe^{2+},Zn)_2(Ti,Fe^{2+},$ $Fe^{3+})_{18}(O,OH)_{38}$	Тригональная, <i>a</i> ₀ 10.576; <i>c</i> ₀ 21.325.	Таблитчатые.	—	—	—

главным образом, в россыпях многих частей мира. Коренные источники его обычно связывают с пегматитами (Шри Ланка, Индия, Сибирь России и др.). В россыпях торинанит ассоциируется с цирконом, ильменитом и торитом, в пегматитах — с цирконом, монацитом и бериллом.

Главным рудным минералом ториевый уранинит, наряду с ураноторитом, является в ультращелочных гранитных комплексах горы Бокан к югу от города Аляски (США). В рудах присутствуют также коффинит и браннерит. На руднике Росс-Адамс этого района в

1957—1971 гг. получено около 1000 т U_3O_8 при содержании этого оксида в руде около 1% (Бозе и др., 1976; Янг, 1988). В других случаях ториевый уранинит отмечается в незначительных количествах в непромышленных рудах и распространен как акцессорный минерал, главным образом, в гранитах и в гранитных пегматитах.

Гидроксиды урана (IV+VI)

В эту группу входят гидратированный настуран, янтинит и клёзонит (табл. 3). Первый

из них, описываемый и как гидронастуран (Гецева, 1956), встречается в рудах достаточно часто. Он образуется как в результате гидратации настурана в зоне гипергенеза, так и благодаря осаждению такого образования из урансодержащих подземных вод, просачивающихся в рудоносных зонах на глубине. В зоне окисления прослеживается постепенное изменение настурана через слабо просвечивающие разности гидратированного настурана до ургита, который в свою очередь замещается ниже впервые описываемыми рентгеноаморфными гидроксидами, содержащими трехвалентное железо и обогащенными Nb_2O_5 и SiO_2 . Химические анализы их также приведены ниже. В свою очередь гидрооксиды урана с трехвалентным железом замещаются силикатами уранила.

Клёзонит, найденный в двух местах западной части Швейцарских Альп в местечке Клёзен (Швейцария) в гнейсовых породах зеленосланцевой фации, является свинцово-стронциевым водным оксидом четырехвалентного и шестивалентного урана, двухвалентного и трехвалентного железа, цинка, а также титана. Он находится в ассоциации с уранинитом, теннантитом, гематитом и другими минералами. Промышленное значение его не ясно.

Янтинит является единственным из гидроксидов минералом уранила, содержащим четырехвалентный уран. Встречается в небольших количествах на месторождении Шинколобве (Thoreau, R. du Trieu de Tendonck, 1933; Герасимовский, 1956), во флюоритовых жилах с настураном в Вёльсендорфе, Бавария, ФРГ, и в месторождениях Бигай, Ля Крузель и Буа Нуар, Франция (Branche *et al.*, 1951; Guillemin, Protas, 1959). На месторождении Тулкуевское янтинит установлен Л.Н. Беловой в гидроксидной подзоне на глубинах 90 – 120 м (Ищукова и др., 2005). Его практическое значение незначительно.

Простые гидроксиды уранила

В данном разделе не рассматривается холфертит $U_{1,75}^{6+}Ti^{4+}Ca_{0,25}O_{7,17}(OH)_{0,67}(H_2O)_3$, обнаруженный в пустотах и трещинах риолитов Сирел Каньон, Томас Ранж, штат Юта в США (Sokolova *et al.*, 2005). В урановых рудах минерал не встречался. Кроме того, он описывается как минерал уранила, а в формуле приводится U^{6+} , тогда как соединения уранила содержат линейную группу UO_2^{2+} – трехатомный двухзарядный катион, входящий в качестве самостоятельной структурной единицы в состав минерала и влияющий

на его свойства. Предложенная авторами формула не соответствует минералам уранила, а приведенные данные не позволяют уверенно её установить.

Скупит, метаскупит, параскупит (Crist, Clark, 1960) – простые водные гидроксиды уранила с разным содержанием свободной воды. При этом для параскупита формула точно не определена. В отчетливых таблитчатых кристаллах скупит и параскупит наблюдались в образцах из месторождения Шинколобве (Демократическая Республика Конго). Там они наиболее широко распространены около поверхности, как продукт изменения уранинита или янтинита. В приповерхностных условиях минералы образуют тесные ассоциации с кюритом и соддеитом, реже они встречаются в более глубоких горизонтах зоны окисления месторождения Шинколобве. На этих горизонтах минералы сопровождаются беккерелитом, выделяясь на корочках янтинита (Vaes, Guillemin, 1959). На других месторождениях – Вёльсендорф, Бавария, ФРГ; Большое Медвежье озеро, Канада; минералы выделяются на настуране или образуют псевдоморфозы по янтиниту на контакте с настураном.

Описывались случаи образования скупита и параскупита в близповерхностных условиях за счет замещения ими отенита и фосфуранилита (Гридаенко и др., 1959; Черников, 1962; Белова, 1975 и др.). Автор в последние годы произвел детальное изучение подобных образований, принимаемых за параскупит и скупит. Изучались они с некоторых рудопроявлений в районе месторождения Кызылсай (Киргизия) и месторождения Табошары (Таджикистан). Во обоих случаях оказалось, что они представляют собой тесную смесь болтвудита или уранофана, глинистых минералов и разностей минерала, описанного совместно с Г.А. Сидоренко (Черников, Сидоренко, 1978) как фосфуранкальцит. Очевидно, и в других случаях образование скупита и параскупита за счет замещения ими отенита и фосфуранилита в приповерхностных условиях описывалось ошибочно.

Студтит $UO_4 \cdot 4H_2O$ и метастудтит $UO_4 \cdot 2H_2O$ (их структурные формулы даны в табл. 4) – чрезвычайно необычные минералы, в которых перекись уранила указывает на очень сильные окислительные условия при их формировании. Они описаны из Шинколобве и из Менцешванде, Южный Черный Лес, ФРГ (Walenta, 1974; Deliens, Piret, 1983; Смит, 1988). Хотя промышленное значение их незначительно, для установления генезиса

минеральных образований они представляют большой интерес.

Сложные гидроксиды уранила

Установлено большое количество гидроксидов уранила, содержащих в межслоевом уранил-кислородном пространстве свободную воду и катионы: K, Na, Ca, Ba, Cu, Pb, Bi. Некоторые из них ранее рассматривались как уранаты, но проводимые кристаллохимические исследования (Crist, Clark, 1960; Protas, 1959, 1964 и др.) показывают принадлежность изученных минералов к гидроксидам уранила. Из них компреньясит из месторождения Марньяк, провинция От Вьен, Франция (Protas, 1964), является очень редким и обнаружен в продуктах окисления урановой смолки (настурана) в ассоциации с биллетитом (биллиетитом) и беккерелитом. Рамоит (Cesbron *et al.*, 1972) практически является кальцийсодержащей, а агриньерит — кальций-стронциевой разностью компреньясита. Они описаны из того же месторождения Марньяк в таких же продуктах изменения настурана.

Месторождение Марньяк состоит из серии окремнелых трещин в граните СЗ и СВ простираения. Иногда эти трещины содержат барит и флюорит с вкраплением настурана. Сопровождающие настуран минералы редки и представлены микроскопическими зернами сульфидов железа, галенита, сфалерита, редко халькопирита и исключительно редко бисмутинита. Локально трещины секутся удлиненными участками альбитизированного и хлоритизированного гранита, содержащего красный кальцит и гематит. В граните встречаются пустоты с выщелоченным кварцем. Урановая минерализация, представленная настураном и коффинитом, полностью замещающими альбит, в этих местах достигает максимума. В зоне окисления отмечается зональность от центра трещин к периферии:

- а — темные желваки «гуммита» с янтинитом, скупитом и с реликтами настурана;
- б — красный и оранжевый «гуммит» с беккерелитом, биллетитом, скупитом, компреньяситом, агриньеритом и рамоитом, из них рамоит является наиболее распространенным минералом;
- в — уранофан, желтый, массивный, иногда порошковатый, бледно-желтый; отмечаются кристаллы с кальцитом в трещинах «гуммита»;
- г — сильно измененный лимонитизированный гранит (Cesbron *et al.*, 1972).

Беккерелит, кальциевый гидроксид уранила, описываемый ранее как простой гидроксид уранила (Гецева, Савельева, 1956; Соболева, Пудовкина, 1957; Frondel, 1958), достаточно широко распространен в зоне окисления месторождения Шинколобве. Он развивается в непосредственной близости от уранинита, но после янтинита, часто замещающегося скупитом (Thoueau, R. du Trieu de Terdonck, 1933; Vaes, Guillemin, 1959). Янтинит, представляющий начальную степень изменения уранинита, быстро переходит в окислительных условиях в скупит. Окисленная полоса, окаймляющая кристаллы уранинита, которые могут достигать 15–20 см в поперечнике, состоит, главным образом, из беккерелита и кюрита. Другие гидроксиды уранила, как и силикаты уранила, в этой зоне, более редки. Оранжевая зона, следующая за зоной беккерелита-кюрита, состоит из кюрита и силикатов уранила. Беккерелит в оранжевой зоне практически отсутствует. Помимо кюрита и беккерелита в окисленной зоне обнаружено значительное количество гидроксидов уранила: биллетит, фурмарьерит, вандендрисшеит, ванденбрандеит, вельсендорфит, масойит, студтит, ришетит и протасит. Но все перечисленные минералы отмечаются там в подчиненном количестве.

Беккерелит надежно диагностирован также в рудах месторождения Вельсендорф как продукт изменения настурана во флюоритовых жилах. На месторождении Марньяк в ассоциации с компреньяситом (см. выше) беккерелит выделяется в зоне оранжевого «гуммита». К. Фрондель (Frondel, 1958) отмечает нахождение в небольших количествах беккерелита как продукта изменения настурана в месторождениях песчаного типа плато Колорадо (США). Образование минерала в ассоциации со скупитом и фурмарьеритом предшествует формированию ванадатов уранила (карнотита и тюямунита) в зоне окисления этих месторождений. К. Фрондель отмечает случаи нахождения минерала в зоне окисления других месторождений урана США и Канады. На территории бывшего Советского Союза беккерелит был установлен в зоне окисления месторождения Серное (Туркменистан) и Ботта-Бурум (Киргизия).

Среди простых гидратированных оксидов шестивалентного урана достаточно распространенным в урановых рудах является, описанный впервые Р.В. Гецовой (1956), ургит, который представлен рентгеноаморфным образованием. Достаточно детально он был изучен на месторождении Ласточка в Хабаровском крае. На рисунке 2 показано замещение

Таблица 4. Гидроксиды шестивалентного урана

Минерал, формула	Сингония, параметры эл. ячейки (Å)	Морфология кристаллов. Цвет; блеск; плотность (пл.); твердость (тв.)	Оптические константы	Основные рентгеновские линии (интенсивность)	Другие характерные данные
Ургит $UO_3 \cdot 1.7-3.1H_2O$	Рентгено-аморфный	Бурый, янтарный; стеклянный; пл. 3.8-4.17; тв. 2-3	n 1.647-1.680	Рентгено-аморфный	–
Студтит $[(UO_2)_2O_2(H_2O)_2] \cdot 2(H_2O)$	Моноклинная; a_0 11.85; b_0 6.80; c_0 4.25; β 93°51' ($C2/m$)	Волокна. Желтый.	n_g 1.68; n_m 1.555; n_p 1.545 (1.537)	5.93 (10) 3.40 (8) 2.96 (6)	– 2.23 (6)
Метастудтит $(UO_2)_2O_2(H_2O)_2$	Ромбическая; a_0 6.51; b_0 8.78; c_0 4.21 ($Immm$)	-//-	–	5.24 (10) 4.41 (7) 3.80 (7) 3.54 (8)	–
Скупит $[(UO_2)_6O_2(OH)_{12}] \cdot 12H_2O$ и метаскупит $[(UO_2)_6O_2(OH)_{12}] \cdot 10H_2O$	Ромбическая; a_0 14.74 и 14.73; b_0 16.66 и 16.72; c_0 14.36 и 13.99 ($Pbca$) и ($Pbna$)	Призматические. Жёлтый; стеклянный; пл. 2-2.7; тв. 2-3	n_g 1.735; n_p 1.685-1.705	7.34 (ос) 3.57 (сс) 3.22 (с) 2.01 (сс)	Плеохроизм: желтый – N_g , N_m ; бесцветный – N_p
Параскупит $(UO_2)_8O_2 \cdot 2H_2O(?)$	Ромбическая; a_0 15.22; b_0 16.83; c_0 14.12 ($Pbca$)	Столбчатые. Жёлтый; стеклянный	n_g 1.74; n_p 1.785	7.88 (7) 3.38 (9) 3.09 (10) 2.89 (10) 2.08 (9) 1.82 (8) 1.59 (8)	-//-
Компреньясит $K_2[(UO_2)_3O_2(OH)_3]_2 \cdot 7H_2O$	Ромбическая; a_0 14.85; b_0 7.175; c_0 12.187; ($Pnmm$)	Призматические. Желтый; пл. 5.03; тв. 3	n_g 1.802; n_m 1.798	7.40 (ос) 3.70 (с) 3.58 (с) 3.53 (сс) 3.34 (с) 3.19 (сс)	Плеохроизм: желтый – N_g ; бесцветный – N_p
Рамоит $K_2Ca(UO_2)_6O_8(OH)_4 \cdot 9H_2O$	Моноклинная; a_0 14.22; b_0 14.26; c_0 13.97 ($C2/c$)	Призматические. Оранжевый; пл. 5.6	$2V$ 32°	7.12 (ос) 3.57 (с) 3.495 (ос) 3.14 (ос) 3.12 (ос)	Спайность совершенная по {010}
Агриньерит $(K_2CaSr)(UO_2)_3O_4 \cdot 4H_2O$	Ромбическая; a_0 14.04; b_0 24.07; c_0 14.13 ($Cmmm$)	Таблитчатые. Оранжевый; пл. 5.7	$2V$ 55°	7.08 (ос) 6.05 (с) 3.52 (с) 3.49 (с) 3.13 (ос)	Спайность совершенная по {001}
Ванденбрандеит $Cu^{2+}(UO_2)(OH)_4$	Триклинная; a_0 7.86; b_0 5.44; c_0 6.10 ($P1$)	Таблитчатые. Темно-зеленый; пл. 5.03; тв. 4	n_g 1.80; n_m 1.78; n_p 1.76; $2V$ бол.	5.25 (6) 3.87 (7) 3.47 (6) 3.16 (10) 1.83 (8)	Спайность совершенная по {110}
Беккерелит $Ca(UO_2)_6O_4(OH)_6 \cdot 8H_2O$	Ромбическая; a_0 13.84; b_0 12.38; c_0 14.92 ($Pnma$)	Призматические. Желтый; алмазный; пл. 5.9; тв. 2-3	n_g 1.820-1.835; n_m 1.805-1.25; n_p 1.725-1.750; $2V$ 32°	7.50 (10) 3.75 (8) 3.56 (8) 3.22 (9) 2.58 (7)	Плеохроизм: желтый – N_m , N_p ; бесцветный – N_g
Протасит $Va(UO_2)_3O_3(OH)_2 \cdot 3H_2O$	Моноклинная; a_0 12.29; b_0 7.22; c_0 6.96 (Pn)	Таблитчатые. Оранжевый; стальной	n_g 1.83; n_p 1.79; $2V$ 60-65°	7.06 (50) 3.14 (100) 3.11 (35) 2.496 (35)	Спайность хорошая по {010}

Простые урановые оксиды, гидроксиды $U^{4+} + U^{6+}$,
простые и сложные гидроксиды уранила в рудах

79

Таблица 4. Продолжение

Биллетит (биллетит) $Ba(UO_2)_6O_4(OH)_6$ $\cdot 8H_2O$	Ромбическая; a_0 7.15; b_0 12.07; c_0 15.08 (<i>Pnma</i>)	Таблитчатый. Желтый; алмазный; пл. 5.18-5.36; тв. 2-3	n_g 1.839-1.79; n_m 1.832-1.78 n_p 1.733-1.725; 2V 35-47°	7.53 (10) 3.77 (9) 3.17 (8) 2.03 (6) 1.654 (4)	Плеохроизм: желтый – N_g ; бесцветный – N_p
Вацендрисшеит $Pb_3(UO_2)_{20}O_{12}(OH)_{22}$ $\cdot 22H_2O$	Ромбическая; a_0 13.96-14.12; b_0 14.36-16.80; c_0 14.30-14.72. (<i>Pnma</i>)	Призматические. Оранжевый; алмазный; пл. 4.5-5.5; тв. 3	n_g 1.820-1.89; n_m 1.81-1.882; n_p 1.76-1.79; 2V до-50°	7.41 (8) 3.61 (9) 3.22 (10) 2.55 (4) 2.01 (4)	Плеохроизм: желтый – N_g ; бесцветный – N_p
Фурмарьерит $Pb(UO_2)_4O_3(OH)_4$ $\cdot 4H_2O$	Ромбическая; a_0 14.00-14.1; b_0 16.47-16.75; c_0 14.39-14.55 (<i>Pbnm</i>)	Таблитчатые. Красный; алмазный; пл. 5.74; тв. 3-4	n_g 1.04-1.94; n_m 1.9-1.92; n_p 1.85-1.865; 2V до 55°	3.45 (9) 3.09 (10) 2.44 (6) 1.996 (6) 1.07 (8)	Плеохроизм: желтый – N_g ; бесцветный – N_m, N_p
Масюйит $Pb(UO_2)_3O_3(OH)_2$ $\cdot 3H_2O$	Ромбическая; a_0 14.09-13.9; b_0 12.08-12.31; c_0 14.27-14.98 (<i>Pbnm</i>)	Таблитчатые. Оранжево- красный; пл. 5.08	n_m 1.906; n_p 1.785; n_g 1.917; 2V -50°	7.10 (10) 3.54 (8) 3.15 (9) 2.51 (5) 1.984 (6)	Плеохроизм: желтый – N_g, N_m ; бесцветный – N_p
Кюрит $Pb_2(UO_2)_5O_7$ $\cdot 4H_2O$	Ромбическая; a_0 12.50-12.55; b_0 13.01; c_0 8.37-8.40 (<i>Pna2</i>)	Призматические. Оранжевый; алмазный; пл. 7.19-7.4; тв. 4-5.	n_g 2.12-2.15; n_m 2.07-2.11; n_p 2.05-2.06; 2V бол.	6.28 (10) 3.97 (9) 3.14 (8) 2.55 (6) 1.74 (5)	Плеохроизм: темно-красный – N_g ; оранжевый – N_m ; желтый – N_p
Вёлсендорфит $Pb_7(UO_2)_{14}O_{19}(OH)_4$ $\cdot 2H_2O$	Ромбическая; a_0 11.92-11.95; b_0 13.96-13.99; c_0 6.90-7.02	Призматические. Оранжевый; пл. 6.8	n_g 2.09 n_p 2.05	3.45 (9) 3.09 (10) 2.44 (6) 1.97 (8)	Спайность хорошая по {001}
Сприггит $Pb_3[(UO_2)_6O_8(OH)_2]$ $\cdot 3H_2O$	Моноклинная. a_0 28.36; b_0 11.99; c_0 13.998 (<i>C2/c</i>)	Призматические. Оранжевый; стеклянный; пл. 7.0; тв. – 4	n_g 1.891 n_p 1.807	6.92 (60) 3.46 (80) 3.10 (100) 1.918 (60)	Плеохроизм сильный, от светло-желтого до темно- оранжевого
Ришетит $Pb_3(UO_2)_{36}(OH)_{24}O_{36}$ -	Триклинная.	Темно-зеленый. Алмазный	n_g 1.99 n_m 1.98	– –	Плеохроизм: зеленый – N_g ; бледно-желтый – N_m
Баураноит $Ba(UO_2)_2O_3 \cdot 5H_2O$ и метабаураноит $Ba(UO_2)_2O_3 \cdot 2H_2O$	Ромбическая.	Плотные агрегаты. Коричневый; алмазный; пл. 5.39-5.42	n_g 1.932-1.960; n_m 1.94; n_p 1.911-1.925	– –	–
Кальциураноит $Ca(UO_2)_2O_3 \cdot 5H_2O$ и метакальциураноит $Ca(UO_2)_2O_3 \cdot 2H_2O$	Неизвестна.	Оранжевый; восковой; пл. 4.62-4.9	–	–	–
Ураносферит $Bi(UO_2)_2(OH)$	Моноклинная.	Удлиненные. Оранжевый; жирный; пл. 6.12-6.89; тв. 2-3.	n_g 2.05-2.06; n_m 1.981-1.985; n_p 1.955-1.959; 2V бол.	5.25 (6) 3.87 (7) 3.47 (6) 3.16 (10) 1.83 (8)	Плеохроизм не наблюдается
Кларкеит (Na,K, Ca,Pb)(UO ₂)O(OH) $\cdot 0-1H_2O$	Тригональная.	Красновато- бурый; восковой; пл. 6.39; тв. 4-5.	n_g 2.11; n_m 2.098; n_p 1.997; 2V 30-50°	5.77 (8) 3.34 (9) 3.17 (10) 1.968 (7)	–

Примечание: *c* – сильные; *ос* – очень сильные; *сс* – средне-сильные линии на рентгенограмме. 2V бол. – угол оптических осей большой.

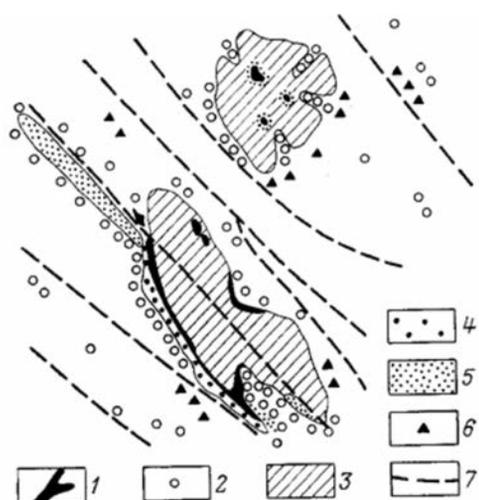


Рис. 2. Замещение настурана окисленными минералами на месторождении Ласточка (Хабаровский край). 1 – реликты настурана; 2 – бета-уранофан и уранофан; 3 – бурый железо- и уран-содержащий минерал; 4 – гидроксиды типа юрита – фурмарьерита; 5 – ургит; 6 – лимонит; 7 – тектонические трещины.

гидратированного настурана вторичными минералами урана. Химические анализы гидратированного настурана, ургита и продуктов их изменения приведены в таблице 5. Начальные продукты изменения ургита и гидратированного настурана замещаются железистым урансодержащим рентгеноаморфным веществом. В результате вокруг настурана или гидроксидов уранила образуются скопления изометричной формы (рис. 2). Природа и механизм образования его неясны. Химическим анализом (табл. 5) устанавливается высокое содержание кремния, воды, окисей трехвалентного железа и шестивалентного урана. Сравнение приведенных анализов четко показывает интенсивный вынос урана в процессе окисления настурана и гипергенной переработки остаточных продуктов его изменения. Одновременно с выносом урана отмечается привнесение кремния, алюминия, воды, железа в остаточные продукты, образующиеся на месте настурана.

Окисленные продукты почти всех стадий гипергенных преобразований, остающиеся на месте настурана, по сравнению с последним обогащаются также цирконием, ниобием, титаном, иногда молибденом. Исключением составляют корки уранофана, вскрытые канавами, в которых определены только сотые проценты молибдена. Уран, выщелоченный из окисляющегося настурана и остаточных продуктов его изменения, отлагается частично по трещинам боковых пород на тех же

горизонтах, частично ниже — в зоне цементации.

Е.В. Копченова с соавторами (1975) изучали стадийное изменение тонкодисперсного настурана в альбититах. Они выявили постепенное замещение настурана рентгеноаморфными гидроксидами урана — гидронастураном и ургитом, по которым затем развивались силикаты урана, кальция и свинца. Л.П. Ищукова и другие (2005) приводят такую схему строения зоны окисления Тулукуевского месторождения (по Л.Н. Беловой). На глубине 120 м и более от поверхности на месторождении отмечаются первичные руды с настураном в собственно урановых рудах и с настураном, коффинитом и молибденитом в уран-молибденовых рудах. На глубинах 90–120 м находится гидроксидная подзона с янтинитом, скупитом, параскупитом по собственно урановым рудам и с умохоитом, моуритом и молибденитом по уран-молибденовым рудам. Настуран, регенерированный и остаточный первичный, наблюдается в обоих типах руд. С глубин 60–90 м прослеживается силикатно-гидроксидная подзона с протаситом, вельсендорфитом, баураноитом, ураноспинитом, новачикитом, черниковитом и другими урановыми слюдками по урановым рудам и с калькурмолитом, иригинитом, молуранитом и умохоитом по уран-молибденовым. Уранофан и бета-уранофан отмечаются в обоих типах руд. По нашим данным, в силикатно-гидроксидной подзоне в небольших количествах наблюдался также кальцураноит, метаформа которого описана В.П. Роговой и другими (1973) с рудопроявлений Мурунского щелочного массива Южной Якутии. С глубин от 60 м до поверхности прослежена силикатная подзона с уранофаном и бета-уранофаном в собственно урановых рудах и с иригинитом и калькурмолитом в уран-молибденовых рудах. До глубины 30 м на месторождении Тулукуевское отмечается подзона выщелачивания урана с гидроксидами железа-марганца, местами с небольшим количеством уранофана и повелита по уран-молибденовым рудам.

На других российских и зарубежных месторождениях стадийное замещение настурана минералами уранила имеет менее отчетливый характер, часто нарушается и последовательность выделения минералов. Чаще всего нарушение стадийности в формировании минералов при окислении плотных урановых руд вызвано присутствием сульфидов, арсенидов, коффинита в прожилках настурана или уранинита. Окисление, например, коффинита в ассоциации с настураном приводит

Таблица 5. Химический состав гидратированного настурана и продуктов его замещения из месторождения Ласточка (Туманное), Хабаровский край, вес. %

Оксиды	Гидратированный настуран	Ургит	Ургит	Урано-железистое образование		Буровато-желтый прожилок		Уранофан	Уранофан
UO ₂	31.76	—	—	—	—	—	—	—	—
UO ₃	51.65	66.02	61.30	26.14	18.72	49.0	46.33	52.75	46.47
SiO ₂	2.25	5.24	5.84	12.12	21.25	9.48	11.51	21.57	23.56
Al ₂ O ₃	2.15	0.17	1.35	4.82	5.67	2.41	3.06	5.92	10.50
Fe ₂ O ₃	—	2.06	7.06	36.95	36.87	2.58	3.70	0.64	0.28
CaO	2.54	2.03	2.50	1.12	1.58	2.40	2.30	5.28	4.63
MgO	—	0.71	0.27	0.58	0.48	0.41	0.36	0.35	0.30
PbO	1.80	1.90	2.43	—	1.00	0.91	1.00	—	—
ZrO ₂	0.55	0.62	1.28	1.22	0.30	2.10	3.35	—	—
Nb ₂ O ₅	4.86	3.70	3.15	2.11	1.40	9.00	8.00	—	—
As ₂ O ₅	0.15	3.33	0.12	—	0.73	—	0.02	—	—
K ₂ O(Na ₂ O)	—	—	—	—	0.23	1.23	1.22	0.32	0.46
MoO ₃	0.06	0.04	0.03	0.05	0.01	4.86	4.65	0.04	—
TiO ₂	—	0.30	0.70	0.67	0.19	1.93	2.55	следы	следы
H ₂ O	2.44	13.33	14.03	11.89	11.9	11.9	11.69	12.85	13.63
Cl	—	—	—	—	—	1.72	—	—	—
Σ	100.21	99.45	100.06	97.67	100.33	99.93	99.74	99.72	99.83

в самом начале процесса их изменения к формированию силикатов уранила, а не гидроксидов; а присутствие арсенидов — арсенатов уранила. На месторождении Ласточка в штольне был встречен блок настурановой руды с мелкими включениями мышьяксодержащего пирита. Гипергенное изменение его сопровождалось выделением трёгерита и ураноспинита по негидратированному настурану.

Повышенная проницаемость рудных тел ведет, главным образом, к растворению настурана, а не гидратации его. Например, на месторождениях Учкудукского типа в Узбекистане и Таджикистане окисление собственно урановых руд, залегающих в песках, в подавляющем большинстве не сопровождалось образованием каких-либо минералов уранила, а рудные тела отделены от окисленных бурых песков, окрашенных гидроксидами трехвалентного железа, осветленной полосой, из которой и уран, и железо практически полностью выщелочены. Сходное явление наблюдается на ролловых месторождениях Ю. Казахстана, Сибири, Забайкалья, осадочных бассейнов Болгарии и других стран. Когда проницаемость рудных тел неравномерная, в плотных участках настуран замещается уранофаном, шрёкингеритом и другими минералами, но не гидроксидами уранила. Так, на месторождении Ризак (Куряминский хребет, Узбекистан), расположенном в высокогорном районе, где современная

зона окисления находится в начальной стадии развития, прожилки гуммита, в составе которых установлены кюрит, беккерелит и биллетит, наблюдались непосредственно у земной поверхности. А на глубине нескольких сантиметров от поверхности сохранились в составе гуммитовых прожилков гнезда настурана и гидратированного настурана. В стороне от гуммитовых прожилков по трещинам вмещающих пород развит уранофан, образующий тонкие корки и земляные налеты. Помимо урановых минералов в этом месте отмечались только оксиды марганца, кальцит и каолинит. Глубже количество настурана и гидратированного настурана в прожилках увеличивается, и на глубине нескольких метров от поверхности они развиты в преобладающем количестве. В данном месте рудоносная трещина сочленяется с послерудной зоной дробления пород. Количество настурана в рудном теле ниже места сочленения рудной трещины с послерудной зоной дробления пород резко уменьшается, в то время как количество уранофана значительно увеличивается. Гидроксиды уранила в этих местах не обнаружены, хотя зона окисления прослеживается глубже. Местами в окисленных рудах появляются урановые черны.

Заключение

Таким образом, привлекая новые данные и литературные сведения, установлено,

что простые оксиды в урановых рудах представлены, главным образом, настураном, урановыми чернями и реже уранинитом, практически лишенным тория и редких земель. Урансодержащий церианит, возможно, присутствует в комплексных карбонатитовых и уран-фосфорных месторождениях, а ториевый уранинит является главным рудным минералом в рудах ультращелочных гранитов горы Бокан на Аляске. Также выявлено, что, главным образом, в зависимости от водопроницаемости руд изменение уранинита и настурана развивается по-разному. По плотным мономинеральным выделениям уранинита и настурана в процессе их окисления происходит формирование гидроксидных минералов. К настоящему времени описано значительное количество простых и сложных оксидов уранила, три гидроксида урана (IV + VI) и несколько рентгеноаморфных образований шестивалентного урана. Подавляющее большинство гидроксидов уранила развито в нескольких месторождениях: Шинколобве, Вэльсендорф, Марньяк, Тулукуевское, Ласточка и реже других, в которых отмечаются крупные выделения настурана или кристаллов уранинита. Они также формируются при окислении уранинита в пегматитах, только в них обнаружен кларкеит.

В водопроницаемых участках простые оксиды замещаются силикатами уранила, минуя гидроксидную стадию, или уран выщелачивается из окисленных руд, не образуя каких-либо минералов уранила. Практически полностью выщелачивается уран при окислении руд с урановыми чернями в песках. Выщелоченные зоны окисления описаны Г.С. Грицаенко и др. (1959). Сильно выщелоченная зона окисления характерна для большинства месторождений Стрельцовской структуры Юго-Восточного Забайкалья и других месторождений России и зарубежных стран. При этом в большинстве случаев значительная часть урана выносится за пределы рудного тела. В других случаях, главным образом в аридных районах, формируются более богатые окисленные руды, месторождение Серное (Туркменистан) и Россинг в Намибии (Юго-Западная Африка), а также уран-ванадиевые месторождения — Шакоптар, Майли-Сай (Киргизия), Пап (Узбекистан) и другие (Черников, 2010).

Кроме того, окисление настурана, находящегося в ассоциации с арсенидами или с мышьяксодержащим пиритом, либо самородным мышьяком, приводит к формированию трёгерита и других арсенатов уранила

на начальной стадии изменения настурана (месторождение Актепе, Узбекистан; месторождение Ласточка, Хабаровский край и другие), но не гидроксидов уранила. Следовательно, стадийность формирования зоны окисления урановых месторождений, предложенная Л.Н. Беловой (1975), явление частное, встречается редко и гидроксиды урана в урановых рудах имеют подчиненную роль. Размеры зоны окисления при её формировании изменяются как в сторону увеличения, так и уменьшения, по сравнению с размерами первичных руд. При этом в зоне окисления уран выщелачивается, особенно в гумидных районах, на значительную глубину, в других случаях содержания урана существенно не изменяются при окислении настурановых и уранинитовых руд или значительно увеличиваются в сравнении с неокисленными рудами.

Эти особенности окисления урановых руд имеют важное не только теоретическое, но также практическое значение. В частности, их необходимо учитывать для разработки поисково-оценочных критериев при поисках урановых месторождений по поверхностным выходам рудных тел, что уже отмечалось ранее (Черников, 2010). Важное практическое значение имеет также тот факт, что в составе окисленных и первичных руд постоянно устанивается плохо раскристаллизованное, наноразмерное и рентгеноаморфное вещество, присутствие которого отражается на их технологических свойствах, особенно при выщелачивании урана скважинами на месте естественного залегания руд.

Благодарности

Автор признателен доктору геолого-минералогических наук, профессору В.К. Гаринову и кандидату геолого-минералогических наук Е.А. Борисовой, ознакомившихся с рукописью и сделавших ценные замечания. Приношу благодарность М.А. Романову за техническую помощь в подготовке текста и рисунков.

Литература

- Белова Л.Н. Зоны окисления гидротермальных месторождений урана. М.: Недра. **1975.** 160 с.
- Бозе Г., Розе-Хансен Дж., Сёрренсен Г. и др. К вопросу о поведении урана в процессе кристаллизации магмы, в особенности щелочей // Образование месторождений урана. М.: Мир. **1976.** С. 54–64.

- Герасимовский В.И.* Минералогические особенности уранового оруденения зоны окисления месторождения Шинколобве (Бельгийское Конго) // Геохимия. **1956.** № 7. С. 73–76.
- Гецева Р.В.* Гидронастуран и ургит – новые минералы из группы гидроокислов // Атомная энергия. **1956.** № 3. С. 135–136.
- Гецева Р.В., Савельева К.Е.* Руководство по определению урановых минералов. М.: Госгеолтехиздат. **1956.** 260 с.
- Грицаенко Г.С., Белова Л.Н., Гецева Р.В., Савельева К.Т.* Минералогические типы зоны окисления гидротермальных урановых и сульфидно-урановых месторождений СССР // Ядерное горючее и радиоактивные металлы. М.: Атомиздат. **1959.** С. 69–84.
- Ищукова Л.П., Ашихмин А.А., Константинов А.К. и др.* Урановые месторождения в вулкано-тектонических структурах. М.: ВИМС. **2005.** 212 с.
- Копченова Е.В., Авдонин А.С., Сигоренко Г.А.* Стадийное изменение настурана в альбититах // Труды Минер. музея им. А.Е. Ферсмана. **1975.** Вып. 24. С. 68–78.
- Королев К.Г., Белов В.К., Путилов Г.С.* Месторождения фосфорно-урановой метасоматической рудной формации. М.: Энергоатомиздат. **1983.** 136 с.
- Кудайбергенова Н.К., Зубова Н.И.* Новые данные о церианите Казахстана // Изв. Нац. акад. наук. Сер. геологич. **2007.** С. 30–33.
- Кулиш А.Е., Михайлов В.А.* Урановые месторождения Мира. Киев: НАН Украины. **2004.** 277 с.
- Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В.* Зарубежные месторождения урана. М.: Недра. **1983.** 320 с.
- Образование месторождений урана. М.: Мир. **1976.** 764 с.
- Рогова В.П., Белова Л.Н., Кузнецова Н.Н., Кузьяров Г.П.* Баураноит и метакальцураноит – новые минералы из группы гидроокислов урана // Зап. ВМО. **1973.** Т. 102. Вып. 1. С. 75–81.
- Смит Д. К., мл.* Минералогия урана // Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождений урана. М.: Мир. **1988.** С. 83–128.
- Соболева М.В., Пудовкина И.А.* Минералы урана. Справочник. М.: Госгеолтехиздат. **1957.** 408 с.
- Типоморфизм минералов. М.: Недра. **1989.** 560 с.
- Хейнрих Э.* Минералогия и геология радиоактивного минерального сырья. М.: ИИЛ. **1962.** 604 с.
- Хоментовский Б.Н., Овсейчук В.А., Шукин С.И.* Перспективы увеличения добычи урана в Забайкалье // Разведка и охрана недр. **2000.** № 1. С. 28–30.
- Черников А.А.* Гипергенная зональность на сульфидно-урановых месторождениях и причина ее возникновения // Труды ИГЕМ АН СССР. **1962.** Вып. 70. С. 162–181.
- Черников А.А.* Поведение урана в зоне гипергенеза. М.: Недра. **1981.** 208 с.
- Черников А.А.* Глубинный гипергенез, минерало- и рудообразование. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН. **2001.** 100 с.
- Черников А.А.* Минералогические и геохимические особенности состава урановых руд, их научное и практическое значение // Новые данные о минералах. **2010.** Вып. 45. С. 101–111.
- Черников А.А., Костилов А.Т.* Урановая минерализация // Минералы Монголии. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Экост. **2006.** С. 313–330.
- Черников А.А., Сигоренко Г.А.* Новые данные о минералах, называемых фосфуранилитом, фосфуранкальцилитом и фосфатным аналогом трёгерита // Минералы и парагенезисы минералов. Л.: Наука. **1978.** С. 168–174.
- Янг Р. Дж.* Урановые месторождения мира (исключая Европу) // Геология, геохимия минералогия и методы оценки месторождений урана. М.: Мир. **1988.** С. 222–243.
- Berning J., Cooke R., Heimstra S.A., Hoffman U.* The Rössing Uranium Deposit, South West Africa // Econ. Geol. **1976.** V. 71. N 1. P. 351–368.
- Branche G., Chervet J., Guillemin C.* Nouvelles espèces uranifères française // Bull. Soc. franc. Min., Crist. **1951.** V. 74. P. 457–488 (на фр. яз.)
- Burns P.C., Hughes K.-A.* Studtite, $[(UO_2)(O_2)(H_2O)_2](H_2O)_2$: The first structure of a peroxide mineral // Amer. Mineral. **2003.** V. 88. N. 7. P. 1165–1168.
- Burns P.C.* The structure of compreignacite, $K_2[(UO_2)_3O_2(OH)_3]_2(H_2O)_7$ // Can. Mineral. **1998.** V. 36. P. 1061–1067.
- Cesbron F., Brown W.L., Bariatand P., Geffroy J.* Rameauite and agrinierite, two new hydrated complex uranyl oxides from Margnac, France // Miner. Mag. **1972.** V. 38. P. 781–789.
- Chernikov A.A.* Mineralogical features of uranium ores, large and superlarge deposits of Russia and adjacent countries // Global Tectonics and Metallogeny. **2006/2007.** V. 9. Nos. 1–4. P. 21–30.

- Christ C.L., Clark J.R.* Crystal chemical studies of some uranyl oxide hydrates // *Amer. Mineral.* **1960**. V. 45. N 9–10. P. 1026–1061.
- Deliens M., Piret P.* Metastudtite $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Shinkolobwe, Shaba, Zaire // *Amer. Mineral.* **1983**. V. 68. N 3–4. P. 456–458.
- Duwez P., Odell F.* Phase relationships in the system zirconia-ceria // *Jour. Amer. Ceramic Soc.* **1950**. V. 33. N 9. P. 274.
- Fron del C.* Systematic mineralogy of uranium and thorium. Washington: U.S. Gov. Print. Off. **1958**. 400 p.
- Graham A.R.* Cerianite, CeO_2 – a new rare-earth oxide mineral // *Amer. Mineral.* **1955**. V. 40. N 7–8. P. 560–564.
- Galuskin E.V., Armbruster T., Galuskina I.O. et al.* Vorlanite $(\text{CaU}^{6+})\text{O}_4$ – a new mineral from the Upper Chegen caldera, Kabardino-Balkaria, Northern Caucasus, Russia // *Amer. Mineral.* **2011**. V. 96. P. 188–196.
- Guillemin C., Protas J.* Ianthinite et wyartite // *Bull. Soc. Franc. Min., Crist.* **1959**. V. 82. N 1–3. P. 80–86. (на фр. яз.)
- Matsumoto Yukito, Sakomoto Arata.* Preliminary report on metamict cerianite from microcline pegmatites of Nesöya, Lützow-Holmbukta, East Antarctica // *Mem. Nat. Inst. Polar Res.* **1982**. Spec. issue. N 21. P. 103–111.
- Padurow N.N., Schusterius C.* Roentgenographische Untersuchungen im system In_2O_3 - Y_2O_3 - CeO_2 - ThO_2 // *Deutschkeram. Gesell. Ber.* **1953**. B. 30. P. 251. (на нем. яз.)
- Pagoaga M.K., Appleman D.E., Stewart J.M.* Crystal structures and crystal chemistry of the uranyl oxide hydrates becquerelite, billietite, and protasite // *Amer. Mineral.* **1987**. V. 72. N 11–12. P. 1230–1238.
- Protas J.* Contribution à l'étude des oxydes d'uranium hydratés // *Bull. Soc. franc. Minér. Crist.* **1959**. V. 82. N 7–9. P. 239–272. (на фр. яз.)
- Protas J.* Une nouvelle espèce minérale: la compreignacite, $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ // *Bull. Soc. franc. Minér. Crist.* **1964**. T. LXXXVII. N 3. P. 365–371. (на фр. яз.)
- Rü dorff W., Valet G.* Über das Ceruranblau und die Halbleitereigenschaften der Mischkristallreihe UO_2 - CeO_2 // *Zeitschr. Naturforschung.* **1952**. B. 7b. P. 57. (на нем. яз.)
- Sokolova E., Hawthorne F.C., Belakovskiy D.I., Pautov L.A.* The OD (order-desorder) structure of holfertite, a hydrated uranyl titanate mineral from Searale Canyon, Thomas Range, Utah, U.S.A // *Can. Mineral.* **2005**. V. 73. P. 1545–1552.
- Thoreau J., R. du Trieu de Terdonck.* Le gîte d'uranium de Schinkolobwe-Kasolo (Katanga). Bruxelles, **1933**. 54 p. (на фр. яз.)
- Uranium in the Pine Creek geosyncline. Vienna: IAEA. **1980**. 712 p.
- Vaes J.F., Guillemin C.* Mineraux D'Uranium Du Haut Katanga. Turvuren, Belgique. **1959**. 84 p. (на фр. яз.)
- Walenta K.* On Studtite and Its Composition // *Amer. Mineral.* **1974**. V. 59. N 1–2. P. 166–171.