

УДК 553.25: 549.5:553.2

## СЛОЖНЫЕ ОКСИДЫ УРАНА В УРАНОВЫХ РУДАХ

А.А. Черников

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

В природе существуют содержащие  $U^{4+}U^{6+}$  или только  $U^{6+}$  титанаты. Для них описаны характерные физические, химические и оптические свойства, выявлена их роль в формировании урановых руд. Наиболее распространенный — браннерит — по составу подразделяется на ториевый (до 30% Th) и безториевый (0.0л% Th и ниже). В большинстве из 12 минералогических типов руд России и сопряженных стран, а также в конгломератах Канады и Бразилии он и другие титанаты являются рудообразующими минералами. Выявлено наличие наноразмерного ортобраннерита в урановых рудах Дружное на Алдане (РФ). Молибдаты  $U^{4+}$  мало влияют на формирование, состав и качество урановых руд. Бетафит, урансодержащие микролит и пирохлор распространены в карбонатитовых рудах, из которых уран извлекался как попутный элемент. Нужно считать перспективным вовлечение в разработку крупных комплексных карбонатитовых руд России.

В статье 3 таблицы, 4 рисунка, список литературы из 50 названий.

Ключевые слова: браннерит, ортобраннерит, давидит-(Ce), давидит-(La), давидит-(Y), урансодержащий анатаз, урансодержащий ильменит, бетафит, уранмикролит, уранпирохлор.

Известны простые и сложные оксиды урана. Первые, как и гидроксиды уранила, рассмотрены ранее (Черников, 2011). К сложным оксидам относятся титанаты, титано-ниобаты и молибдаты урана. Наиболее широко распространены в урановых рудах титанаты урана и, особенно, браннерит. Однако, некоторые другие из сложных оксидов, например, бетафит, реже уранпирохлор и уранмикролит, могут формировать комплексные уран-тантал-ниобиевые или уран-ниобий-танталовые руды с попутным извлечением из них U, Zr, TR, Sr, P и других элементов. Молибдаты урана — седовит, моурит и молуранит — отмечаются в рудах некоторых месторождений. Кроме того, в урановых рудах широко распространены сложные урансодержащие оксиды титана и плохо диагностируемые сложные титановые продукты, которые содержат четырехвалентный + шестивалентный или только шестивалентный уран. Целью этой работы является анализ литературных и некоторых новых собственных данных автора для установления мест распространения минералов\*, выявления характерных для них физических, химических и оптических свойств и роли сложных оксидов урана (IV + VI) и слабо диагностируемых титанатов в формировании урановых руд.

### Уран-титановые минералы и минеральные образования

Эти минералы и окисленные минеральные фазы подразделяются на образования, содержащие четырехвалентный уран, и ми-

нералы и минеральное вещество, в которых уран находится только в шестивалентном состоянии; последние иногда описываются в геологической литературе как «окисленный браннерит». Уран-титановые образования четырехвалентного урана, как показали детальные исследования руд месторождений Стрельцовского рудного поля (Юго-Восточное Забайкалье, РФ), Дорнотской группы месторождений в Северо-Чойбалсанской уран-рудной провинции Восточной Монголии и месторождений Алдана (РФ), состоят из рентгеноаморфного браннерита, обогащенного железом уранового титаната, урансодержащих продуктов их изменения, анатаза и, возможно, ильменита. В рудах месторождения Дружное, Эльконский горст на Алдане (Готман и др., 1971; Черников и др., 1997) описан урансодержащий анатаз  $Ti(U)O_2 + UO_3$ . Кроме того, неназванный уран-титановый минерал  $(U,Ca,Pb,Ce)_2(Ti,Fe)_3O_{10}$  изучался из руд месторождений Мичуринского рудного поля, Украина (Копченова и др., 1970; Черников и др., 1997). Он представлен в таблице 1 как «неназванный железо-титановый минерал», описанный как возможная разновидность давидита-(Ce).

**Браннерит  $(U,Ca,Th,Y,Ce)(Ti,Fe^{3+})_2O_6$ .** Синонимы: кордобаит (George, 1949), абсит и лодочникит (Повилайтис, 1963). Минерал моноклинной сингонии, пр. гр.  $C2/m$ ,  $C2$ ,  $Cm$  или  $I2/m$ . Параметры элементарной ячейки кристаллического браннерита в естественном состоянии:  $a_0 = 8.87(1)$ ,  $b_0 = 3.703(2)$ ,  $c_0 = 6.797(4)\text{\AA}$ ,  $\beta = 104.07^\circ$ ,  $V = 217\text{\AA}^3$ ,  $Z = 2$  (Graeser, Guggenheim, 1990). Синтетический

\* — с 1945 по 1992 гг. всякое упоминание о нахождении радиоактивных минералов на территории бывшего СССР и стран Европы и Азии, а также Кубы строго запрещалось, поэтому в настоящей работе места находки описанных урановых минералов из этих стран заново восстановлены.

Таблица 1. Титанаты урана и другие минералы, содержащие уран и титан

Минерал, формула	Сингония. Форма выделения. Параметры эл. ячейки (Å)	Цвет и другие характерные свойства
Браннерит (U,Ca,Th,Y,Ce)(Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Моноклинная. Призматические кристаллы, изометричные выделения. В естественном состоянии: $a_0 = 8.87$ , $b_0 = 3.70$ , $c_0 = 6.797$ , $Z = 2$ . Прокаленный: $a_0 = 9.76 - 9.78$ , $b_0 = 3.75 - 3.82$ , $c_0 = 6.89 - 6.99$	Черный до бурого. Пл. 6.35 (изм.), 6.36 (выч.)
Ортобраннерит (U <sub>0.5</sub> <sup>4+</sup> U <sub>0.5</sub> <sup>5+</sup> )Ti <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH)	Ромбическая. Призматические кристаллы и изометричные выделения. Прокаленный: $a_0 = 7.37$ , $b_0 = 11.67$ , $c_0 = 6.33$ , $Z = 2$	Черный. Пл. 5.46 (изм.), 5.46 (выч.)
Урансодержащий анатаз Ti(U)O <sub>2</sub> + UO <sub>3</sub> – TiO <sub>2</sub> (UO <sub>3</sub> ,UO <sub>2</sub> )	Тетрагональная. $a_0 = 3.78$ , $c_0 = 9.5$	Желтый до темно-бурого. Пл. 3.85 – 3.95 (изм.),
Незванный железо – титановый минерал (U,Ca,Pb,Ce) <sub>2</sub> (Ti,Fe) <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	Игольчатые кристаллы	Светло-желтый до темно-бурого и почти чёрного. Пл. – 4.2.
Давидит-(Ce) (Ce,La)(Y,U,Fe <sup>3+</sup> )(Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O,OH) <sub>38</sub>	Тригональная. Сплошные массы и таблитчатые кристаллы. $a_0 = 10.35 - 10.36$ , $c_0 = 20.84 - 20.85$ минерал – темно-бурый.	Черный и серо-черный, слегка измененный
Давидит-(La) (La,Ce)(Y,U,Fe <sup>2+</sup> )(Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O,OH) <sub>38</sub>	Тригональная. Сплошные массы и таблитчатые кристаллы. $a_0 = 10.35 - 10.36$ , $c_0 = 20.84 - 20.85$	-//-
Давидит-(Y) (Y,U,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>2</sub> (Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>20</sub> (O,OH) <sub>38</sub>	Тригональная. Сплошные массы и таблитчатые кристаллы. $a_0 = 10.37$ , $c_0 = 20.87$	-//-
Бетафит (U <sup>4+</sup> ,Ca) <sub>2</sub> (Nb,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	Кубическая. $a_0 = 10.27 - 10.39$	Желтый, бурый до черного. Пл. 3.7 – 5.2; $n = 1.91 - 2.2$ .
Содержащие уран микролит – пирохлор (U,Ca,Ce) <sub>2</sub> (Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	Кубическая. $a_0 = 10.40$ Кубическая. $a_0 = 10.44$	Буровато-черный до светло-бурого. Пл. 4.2 – 6.4.
Уранмикролит (U <sub>0.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> )(Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	Кубическая. $a_0$ промежуточный между микролитом и бетафитом	
Уранпирохлор (U <sub>0.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> )(Nb,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	Кубическая. $a_0$ промежуточный между пирохлором и бетафитом	
Окисленные титанаты урана: остаточные продукты окисления браннерита, анатаза, возможно, ильменита и переходных разностей	Рентгеноаморфные или слабораскислизованные рыхлые и стекловатые массы	Желтый, светло-бурый и бурый. Пл. 3.95 – 3.29

Примечание: Пл. – плотность, (изм.) – измеренная, (выч.) – вычисленная;  $n$  – показатель преломления.

браннерит:  $a_0 = 9.87$ ,  $b_0 = 3.76$ ,  $c_0 = 6.95\text{Å}$ ,  
 $\beta = 119.5^\circ$ ,  $V = 224\text{Å}^3$ ,  $Z = 2$ . Плотность изме-  
ренная 6.35, вычисленная – 6.36 (Patchett,  
Nuffield, 1960). Рентгеноаморфный в есте-  
ственном состоянии браннерит после прокали-  
вания (Patchett, Nuffield, 1960) имеет парамет-  
ры элементарной ячейки синтетического  
аналога. Параметры рентгеноаморфного  
браннерита (Bianconi, Simonetti, 1967; Сидо-  
ренко, 1978) главным образом зависят от со-  
держания тория.

Главные линии рентгенограммы минерала  
в естественном состоянии: ( $I_2/m$ ) 3.402 (100);

2.446 (80); 1.860 (70); 1.615 (60); после прокали-  
вания: 4.70 (5); 3.42 (10); 3.32 (6); 2.91 (5); 2.45 (7);  
2.276 (7); 1.903 (8); 1.623 (6); 1.569 (5).

Кристаллический и рентгеноаморф-  
ный минерал слабо прозрачный, не имеет  
спайности. Излом раковистый. Блеск смо-  
ляной или стеклянный. Твердость 4.5 – 5  
(520 – 720 кг/мм<sup>2</sup>) для кристаллов, понижает-  
ся до 4 – 3.5 (387 кг/мм<sup>2</sup>) для рентгеноаморф-  
ных разностей. Удельный вес повышается с  
4.32 для рентгеноаморфного браннерита до  
6.35 для кристаллов. Показатель преломле-  
ния рентгеноаморфного Алданского бран-

нерита (Готман и др., 1968)  $2.06 < n < 2.11$  и повышается до 2.2–2.4 для кристаллического образца.

Цвет браннерита в проходящем свете меняется от темного красновато-коричневого до темного красно-бурого, почти черного, в отраженном свете минерал серый. Отражение зависит от степени окисления урана: 18–19% для минерала, содержащего только четырехвалентный уран; 17–18% — у частично измененного, содержащего шестивалентный и четырехвалентный уран, и 16–15% — у окисленного браннерита. Как кристаллическая, так и рентгеноаморфная разности минерала изотропны с красновато-бурыми и бурными внутренними рефlekсами.

По составу выделяют два типа браннерита: содержащий торий до 30 мас.% и практически лишенный тория. Ториевый браннерит, обычно в повышенных концентрациях содержащий и редкие земли, образует вкрапленники единичных кристаллов и ассоциирует с уранинитом, торианитом и тантало-ниобатами в полях развития гранитоидов и различных метаморфизованных пород, присутствуя в многочисленных проявлениях уран-ториевой и уран-редкоземельной минерализации в пегматитах, грейзенах, в различных по составу метасоматитах, в кварцевых, кварц-полевошпатовых и кварц-молибденит-вольфрамитовых жилах.

Браннерит, лишенный тория (0.0л% и ниже) и содержащий  $TR_2O_3$  в малых концентрациях (1.5% и ниже), распространен в урановых рудах различного типа. М.Ф. Стрелкин с соавторами (1967) рассмотрели условия образования браннерита в гидротермальных, осадочных и метаморфогенных месторождениях. Как ранее уже отмечалось (Черников и др., 1997; Chernikov, 2006/2007), в большинстве из 12 выделенных минералогических типов урановых руд России и сопряженных стран обнаружен браннерит и плохо диагностируемые титанаты, содержащие высокие концентрации урана.

Первый тип — браннеритовые руды, содержащие самородное золото и, иногда, молибденит, из калиевополевошпатовых метасоматитов долгоживущих зон Эльконского горста на Алдане. К нему относятся месторождения: Дружное, Эльконское плато, Курунг и другие. Руды их, особенно из глубокой зоны гипергенеза, помимо браннерита включают трудно определяемые, наноразмерные минеральные продукты, содержащие U, Ti, Ca, Zr, Si и другие химические элементы. Настуран, коффинит и минералы уранила редки в этом типе руд.

Второй — браннерит-уранинитовый тип — встречается в березит- и карбонат-альбитовых зонах Северо-Казахстанской провинции. Настуран и коффинит присутствуют в рудах в небольших количествах. Камышевое, Шокпак и Молодежное в Чистопольском рудном поле являются наиболее крупными месторождениями этого типа руд.

Третий — уранинит-коффинит-настуран-браннеритовый тип — формируется в альбититах древних трещин Кировоградского складчатого блока Украинского щита (Украина). Мичуринское, Северинское и Ватутинское являются характерными месторождениями руд данного типа. Урансодержащий апатит, коффинит, настуран, малакон (гидратированный циркон), а также гипергенные урановые продукты типа ненадежита — смеси урановых минералов, болтвудита, казолита или коффинита — присутствуют в рудах.

Четвертый — коффинит-браннеритовый тип — обнаружен в хлорит-карбонат-альбитовых метасоматитах в зоне Володарского глубинного разлома Кокчетавского срединного массива, Северный Казахстан. Косочинское и Кутузовское месторождения являются типичными объектами. Настуран присутствует в рудах в подчиненном количестве.

В коффинит-апатитовых рудах (пятый тип) карбонат-хлорит-альбит-апатитовых метасоматитов зон Володарского глубинного разлома, Северный Казахстан, браннерит, настуран, урансодержащий циркон (циртолит, аршиновит, по Королеву и др., 1983) и железистый торит присутствуют в рудах в переменных количествах, при этом коффинит и урансодержащий апатит в них преобладают.

В фосфоритовых рудах Тастыколь-Коксорского рудного поля Северного Казахстана (шестой тип) титанаты урана в ощутимых количествах не обнаружены.

Коффинит-уранинит-браннерит-настурановый (седьмой) тип руд в магнетит-альбит-карбонатных метасоматитах Криворожского бассейна на Украине (Жёлтореченское и Первомайское месторождения), где титановые минералы содержатся в подчиненном количестве.

Коффинит-настурановый (восьмой) тип комплексных (V, Pd, Au, U) руд Карелии (РФ) редко содержит браннерит.

Девятый — настурановый тип с большим количеством подтипов минеральных парагенезисов, только в уран-молибденовых месторождениях Стрельцовского рудного поля Восточного Забайкалья (РФ) и в Дорнотской группе (Дорнотское, Гурванбулакское и другие месторождения Восточной Монголии)

браннерит и другие титанаты урана широко развиты в урановых рудах, особенно в зоне глубинного гипергенеза. В других уран-молибденовых месторождениях на территории бывшего Советского Союза (Каттасай-Алтангинское рудное поле, Приташкентский район в Узбекистане; Кызылсайское рудное поле и месторождение Ботга-Бурум в Чу-Илийских горах Киргизии; Джидели, Центральный Казахстан; Маныбай, Восток, Шатское и другие в Северном Казахстане) титанаты урана и браннерит не обнаружены. Не встречены они и в многочисленных собственно урановых месторождениях — Бык и Бештау (район Кавказских Минеральных Вод); Серное (Туркменистан); в месторождениях Болгарии и Северного Казахстана.

Нет достоверных данных о нахождении браннерита в 10 (с урансодержащим апатитом) и 12 (с минералами уранила) минералогических типах руд.

Сильно окисленный браннерит (с отношением  $UO_3:UO_2 = 15:1$ ) установлен Е.З. Бурьяновой и Е.И. Барановой (1963) в песчаниках терригенных отложений средне-познедевонского возраста (11 тип), комплексного, как теперь выявлено, урано-селенового месторождения Усть-Уюк, Центрально-Тувинский район (Республика Тува, РФ). Урановое оруденение, помимо браннерита, представлено в рудах настураном и коффинитом, а селеновое — клаустолитом и кадмоселитом.

Браннерит является одним из рудных минералов в древних кварц-галечных конгломератах Блайн-Ривер — Эллиот-Лейк (пров. Онтарио, Канада), конгломератах Жакобина и Беду-Оризонти Бразилии и Витватерсранд (ЮАР). В небольших количествах браннерит и бетафит отмечаются в месторождении Россинг (Намибия, Ю-З Африка), где бетафит-браннеритовые руды составляют 5% запасов этого крупного уранового месторождения (Лаверов и др., 1983).

В рудных пластах медного пояса Северной Родезии (Южная Африка) также установлен браннерит, наряду с настураном и уранинитом (Медный пояс..., 1963). Браннерит из этих руд имеет самый молодой возраст из урановых минералов региона,  $500 \pm 15$  млн. лет (медное месторождение Кансанши), а жильный уранинит из уранового месторождения Нкана имеет больший возраст 520 млн. лет, в то время как уранинит из золото-уранового месторождения Шинколобве в соседнем Конго, значительно старше — 620 млн. лет (Darnley, 1960; Медный пояс..., 1963). В урановом месторождении Миндола возраст настурана равен так же приблизительно 520 млн.

лет (Bowie, 1960). Следовательно, можно допустить, что браннерит формировался после гипергенных и гипогенных переработок минерализации с уранинитом и настураном.

Браннерит в урановых рудах обычно наблюдается в цементе песчаника или тектонических брекчий в виде сплошных масс или скоплений призматических, удлинённых, главным образом, наноразмерных кристаллов, реже достигающих 0.25 мм в длину. В рудах Дорнотских (Дорнотское, Гурванбулакское, Мардайнгольское, Нэмэрское) месторождений (Черников, Костиков, 2006) он образует вкрапленники изометрические формы, игольчатые и линзовидные выделения. Иногда такие кристаллы раздроблены и сцементированы настураном, что обычно обнаруживается при электронно-микроскопическом изучении образцов. Были встречены друзовые скопления боченковидных или призматических выделений браннерита при исследовании под электронным микроскопом (рис. 1). Некоторые микро- и наноразмерные кристаллы (рис. 1, 2) подобны более крупным кристаллам браннерита размером 1 см (рис. 3) и 0.6 см (рис. 4) из Швейцарии (Bionconi, Simonetti, 1967; Graeser, Guggenheim, 1990), у которых четко выражены формы:  $\{10\bar{2}\}$ ,  $\{101\}$ ,  $\{001\}$ ,  $\{410\}$ ,  $\{111\}$  и  $\{023\}$ ,  $\{211\}$ ,  $\{2\bar{1}1\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{40\bar{1}\}$ ,  $\{41\bar{1}\}$ ,  $\{1\bar{1}0\}$ ,  $\{21\bar{1}\}$ ,  $\{10\bar{1}\}$ ,  $\{023\}$ .

Браннерит урановых месторождений, согласно многочисленным публикациям (Бурьянова, Баранова, 1963; Готман и др., 1968; 1971; Стрелкина и др., 1977; Королев и др., 1979; Мигута, 1989; Черников, Костиков, 2006; Черников и др., 2008; и др.) и новым неопубликованным данным автора, всегда содержит воду,  $SiO_2$ , CaO; почти всегда —  $ZrO_2$ , иногда — оксиды железа и вольфрама, в количестве от десятых долей до процента. Вольфрам и реже ниобий характерны только для браннерита из месторождений Алданского золото-уранового района, тогда как цирконий отмечается в браннерите всех других урановых месторождений. Минерал ассоциирует с дисперсными уран-титанатами, водными силикат-титанатами урана, простыми оксидами урана и коффинитом, которые, как и браннерит, являются протоминералами в глубоких частях месторождений.

Таким образом, браннерит широко распространен в урановых рудах месторождений мира и России. Его присутствие отрицательно отражается на технологических особенностях руд, и когда наблюдается значительное преобладание браннерита над простыми оксидами и силикатами урана (IV),

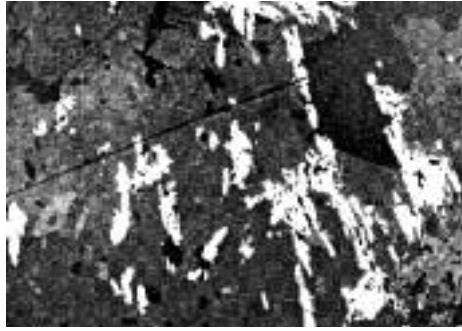


Рис. 1. Боченковидные кристаллы браннерита из руд месторождений Дорнотской группы Монголии. Электронно-микроскопический снимок.

Рис. 2. Игольчатый (светло-серый) браннерит из руд месторождений Эльконского горста Алдана. В отраженном свете,  $\times 160$ .

Рис. 3. Идеализированный удлиненный кристалл браннерита (Vianconi, Simonetti, 1967) из пегматита Швейцарии.

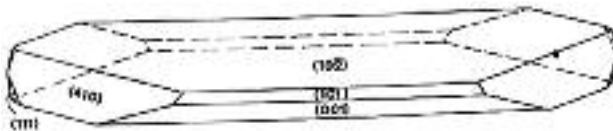


Рис. 4. Идеализированный призматический кристалл браннерита (Graeser, Guggenheim, 1990) из пегматита Швейцарии.

особенно в бедных и рядовых рудах, извлечение урана из них осложняется. Поэтому золото-урановые руды Эльконского горста на Алдане, как и руды глубоких горизонтов месторождений Стрельцовского рудного поля Забайкалья или Дорнотских месторождений Монголии, в настоящее время представляют собой только потенциальные запасы урана.

**Ортобраннерит** ( $U_{0.5}^{6+}U_{0.5}^{4+}Ti_2O_6(OH)$ ). Минерал ромбической сингонии, пр. гр.  $P2_122$ . Параметры элементарной ячейки минерала из Китая (Peiking..., 1978):  $a_0 = 7.37$ ,  $b_0 = 11.67$ ,  $c_0 = 6.33\text{\AA}$ ,  $Z = 2$ ; X-фаза Г.К. Кривоконовой (1972):  $a_0 = 7.415 \pm 0.003$ ,  $b_0 = 11.77 \pm 0.01$ ,  $c_0 = 6.38 \pm 0.002\text{\AA}$ . Кристаллы призматические; простые формы  $\{001\}$ ,  $\{120\}$ ,  $\{021\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{140\}$ ; некоторые кристаллы имеют дополнительные простые формы  $\{210\}$ ,  $\{180\}$ .

Ортобраннерит описан в работе Пекинского института урановой геологии (Peiking..., 1978) из выветрелых биотит-пироксеновых сиенитов в провинции Юньнань и из щелочных лампрофиров в провинции Сычуань (КНР). Он также распространен в урановых рудах Алданских месторождений России в виде мелких ( $8 \times 12$  мм и мельче) призматических кристаллов и изометричных выделений, рентгеноаморфных при нормальной температуре. Как отмечают китайские ученые и Дин К. Смит (1988), ортобраннерит конформен с X-фазой Г.К. Кривоконовой (1972), которая, не называя месторождений, изучала

браннерит из Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (№№ 61558, 64935, 64865, 67310) и образец В.М. Поляковой (призматические кристаллы и изометричные выделения). Теперь мы можем указать, что первый образец, записанный в музее как браннерит, происходил из Джидинского молибден-вольфрамового месторождения в Бурятии (РФ), а образец В.М. Поляковой — из месторождения Дружное Эльконского горста на Алданском щите, Республика Саха (Якутия), РФ). Позже Е.М. Стрелкина с соавторами (1977), как нами установлено, из того же месторождения Дружное изучали непрокаленный образец уранового титаната, который, по рентгеновским данным, приведенным в таблице 2, относится к плохо раскристаллизованному, наноразмерному ортобраннериту. Следовательно, на месторождении Дружное обнаружен рентгеноаморфный при нормальной температуре ортобраннерит и слабораскристаллизованный наноразмерный его аналог.

**Давидит-(Ce)**  $(Ce, La)(Y, U, Fe^{2+})(Ti, Fe^{3+})_{20}(O, OH)_{38}$ ; **давидит-(La)**  $(La, Ce)(Y, U, Fe^{2+})(Ti, Fe^{3+})_{20}(O, OH)_{38}$ ; **давидит-(Y)**  $(Y, U, Fe^{2+})_2(Ti, Fe^{3+})_{20}(O, OH)_{38}$ . Синонимы давидита: «радиоактивный минерал из Мозамбика», уфергит (уферит), мавудзит (мавузит), ферутит (Минералы, 1967).

Давидит, открытый Д. Моусоном (Mawson, 1906) в самом начале XX века и названный в честь Т. Давида, оставался долгое вре-

Таблица 2. Данные рентгенометрического исследования браннерита, X-фаза (ортобраннерита) Г.К. Кривоконовой и непрокаленного образца Е.М. Стрелкиной и соавторов

Прокаленный при 900°C;			Непрокаленный образец (Стрелкина и др., 1977)			Прокаленный при 1200°C		
X-фаза (Кривоконова, 1972)						браннерит (Кривоконова, 1972)		
<i>I</i>	<i>d</i> (Å)	<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d</i> (Å)	<i>I</i>	<i>d</i> (Å)	<i>hkl</i>	
54	4.93	110	—	—	—	—	—	
11	4.60	012	—	—	—	—	—	
81	3.92	030	—	—	—	—	—	
13	3.42	—	1	3.45	100	3.41	110	
27	3.34	013	8	3.35	54	3.32	202-	
22	3.24	—	—	—	—	—	—	
100	3.19	200	4	3.23	—	—	—	
15	3.10	121	3	3.00	24	3.00	002	
19	2.84	211	1	2.91	57	2.89	201	
—	—	—	1	2.78	54	2.75	111	
77ш	2.47	030,203,123	2	2.43	54	2.50	112-	
					50	2.45	311-	
15	2.42	031,220	—	—	10	2.42	401-	
45	2.30	130,024	—	—	—	—	—	
6	2.26	131	—	—	64	2.27	310	
6	2.22	105	—	—	—	—	—	
13	2.13	115,132	1	2.16	29	2.145	400	
—	—	—	—	—	—	—	—	
36	1.595	400	1	1.57	21	1.571	221	

мя дискуссионным в отношении существования в качестве самостоятельного минерала. К настоящему времени решена кристаллическая решетка минерала (Gatehouse *et al.*, 1979) и выделяются три минеральных вида: давидит-(Ce), давидит-(La) и давидит-(Y) (Кривовичев, 2008). Кристаллическая решетка определена после прокаливания на воздухе при 920°C в течение 2-х часов метамиктного в естественном состоянии давидита из штата Аризона (США). Эти минералы имеют тригональную симметрию группы кричтонита. Пр. гр.  $R\bar{3}$ ;  $a_0 = 10.35 - 10.36$ ,  $c_0 = 20.84 - 20.85 \text{ \AA}$  для давидита-(Ce) и давидита-(La),  $a_0 = 10.37$ ,  $c_0 = 20.87 \text{ \AA}$  для давидита-(Y) (Strunz, 1966; Минералы, 1967). Плотность вычисленная — 4.72; измеренная (Pabst, 1961) — 4.4. По другим данным (Королев и др., 1979); измеренная плотность в связи с вариациями состава минерала изменяется от 4.29 до 4.89. Микротвердость его 669 — 1100 кг/см<sup>2</sup>, или в пределах 6 — 7 по шкале Мооса. Отражательная способность

составляет 15 — 21%. Показатель преломления 2.11 — 2.37. Главные межплоскостные расстояния прокаленного давидита: 3.41(6); 3.25(9); 3.06(6); 2.898(9); 2.854(6); 2.496(6); 2.257(6); 1.808(6); 1.605(10); 1.513(6); 1.443(10) (Минералы, 1967).

Давидит-(Y) отмечается в пегматитах (Урал, Россия; Аризона, США и Ивеланд, Норвегия), а в некоторых породах как акцессорный минерал. Он всегда содержит помимо Y также Ce и La. Давидит-(Ce) распространен в пегматитах и в урановых рудах Радидум Хилл Южной Австралии, в которых развит и давидит-(La). В урановых рудах России и сопряженных стран давидит не обнаружен. Незаванный железо-титановый минерал (U,Ca,Pb,Ce)<sub>2</sub>(Ti,Fe)<sub>3</sub>O<sub>10</sub>, изучавшийся Е.В. Копченовой с соавторами (1970) в рудах месторождений Мичуринского рудного поля на Украине наиболее соответствует давидиту-(Ce), отличаясь от него как по составу, так и по физическим данным. Окраска минерала изменяется от светло-желтой до сургучно-красной, темно-бурой, что также отличает его от давидита-(Ce).

**Бетафит** (U<sup>4+</sup>,Ca)<sub>2</sub>(Ti,Nb,Ta)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(OH,F) из группы микролит (Na,Ca)<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(O,F) — пироклора (Na,Ca)<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(O,F), уранмикролит (U<sub>0.5</sub>Ca<sub>0.5</sub>)(Ta,Ti)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(OH,F), уранпироклор (U<sub>0.5</sub>Ca<sub>0.5</sub>)(Nb,Ti)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(OH,F). Все указанные минералы, даже если в их формулы не входят титан и уран, содержат их. Бетафит отличается от перечисленных минералов более высоким содержанием урана (до 30 мас.% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Синонимы его: блонстрандит, менделеевит, эльсвортит, виикит (Минералы, 1967). Минерал кубической сингонии,  $a_0 = 10.27 - 10.39 \text{ \AA}$ , часто метамиктный, пр. гр.  $Fd\bar{3}m$  (Смит, 1988). Кристаллы октаэдрические, реже додекаэдрические. Наблюдаются простые формы {100}, {110}, {111}, {311}; реже {332} и {320}. Плотность 3.7 — 5.2, твердость 4 — 5.5, изотропный, показатель преломления 1.91 — 2.2, изменяются в связи с изменением состава и степени гидратации, а также метамиктности. Цвет желтый, бурый, серовато-бурый до черного. Излом раковистый. Просвечивает до непрозрачного в темноокрашенных кристаллах. Иногда наблюдаются кристаллы с зонами, имеющими различную окраску. В отраженном свете серый. Главные межплоскостные расстояния бетафита (Мадагаскар): 3.99(3), 2.98(10), 2.49(3), 1.82(8), 1.55(6), 1.154(3) (Frondele, 1958).

Уранмикролит (синонимы: джалмаит, танталгачеттолит) отличается от микролита повышенным содержанием урана (0.6 — 2.17% UO<sub>2</sub><sup>+</sup> 6.8 — 14.6% UO<sub>3</sub>) и титана (более 1% TiO<sub>2</sub>).

Минерал метамиктный, гидратированный. По физическим и оптическим свойствам является промежуточным между микролитом и бетафитом. Параметр элементарной ячейки  $a_0 = 10.397\text{\AA}$ , возможно увеличение до  $10.40\text{\AA}$  ( $Fd3m$ ) (Смит, 1988).

Уранпирохлор (синоним гатчеттолит) составу отличается от пирохлора повышенным содержанием урана (от 15 до почти 20%  $UO_3$  или 17–19%  $U_3O_8$ ) и часто титана (6.5–10.5%  $TiO_2$ ). Минерал метамиктный, значительно гидратированный. По физическим и оптическим свойствам является промежуточным минералом между пирохлором и бетафитом. Параметр элементарной ячейки  $a_0 = 10.44\text{\AA}$  (пр. гр.  $Fd3m$ ). Показатель преломления  $n = 1.98–2.03$ .

Минералы распространены в карбонатах, входя в состав комплексных руд с повышенным содержанием урана, из которых уран иногда извлекался как попутный элемент, например, из карбонатитов Палабора, ЮАР (Geology..., 1976; Лаверов и др., 1983).

Главным рудным минералом бетафит является в карбонатитовых рудах месторождения Ньюмен, на островах Мониту озера Ниписсин (провинция Онтарио, Канада) (Geology..., 1976, Черников, 2010). Кроме урана, тантала и ниобия, в его составе присутствует торий, а в рудах – фосфор (Rowe, 1954; Хейрих, 1962). В результате поисково-разведочных работ только на комплексные тантало-ниобиевые руды, в мире установлено более 50 ураноносных карбонатитов, примерно третья часть их находится в России. Ряд таких комплексных руд (Ta, Nb, TR, P) месторождений в карбонатитах содержит 0.05%, иногда 0.12%  $U_3O_8$ . Но чаще эти концентрации изменятся от 0.01 до 0.03%, и запасы только урана достигают средних и крупных размеров (Белов и др., 2008; Черников, 2010). Поэтому, нужно считать перспективным вовлечение в разработку крупных комплексных карбонатитовых руд России, особенно учитывая импорт ниобия, тантала, а также дефицит фосфора и урана в нашей стране.

**Оксиды титана типа анатаза, содержащие U(IV+VI):  $Ti(U)O_2+UO_3$ .** Сложные оксиды титана, содержащие U(IV + VI), описаны на нескольких месторождениях. Еще А. Пабст (Pabst, 1954), изучавший браннерит из Айдахо (Idaho) в Калифорнии (США), отмечал, что минерал изменяется до землистого буро-желтого материала, который дает слабые рефлексы на рентгенограмме, соответствующие анатазу, и после прокалывания получилась порошкограмма рутила. М.М. Повилайтис (1961), изучавшая, как теперь установлено,

браннерит Джидинских молибден-вольфрамовых месторождений (Бурятия), описала вторичные продукты, замещающие браннерит, средний показатель преломления которых  $2.24\pm 0.03$ , а рентгеновские межплоскостные расстояния соответствуют анатазу.

Наиболее достоверно урансодержащий анатаз установлен в рудах Алданских месторождений в России (Готман и др., 1971) и Дорнотских – в Монголии (Филоненко и др., 1993; Черников, Костиков, 2006). Он встречается также в зоне глубинного гипергенеза на средних и глубоких горизонтах месторождений Стрельцовкое-Антей и некоторых других месторождений. Я.Д. Готман с соавторами (1971) выделяют желтые «анатазовые» охры, содержащие только шестивалентный уран, и черный, темно-коричневый, коричневый и желтый браннерит, в которых количество титана и четырехвалентного урана уменьшается последовательно от черного до желтого. Рентгеновское исследование этих разновидностей браннерита в то время не проводилось. Но более позднее рентгенометрическое изучение их показало присутствие минерала типа анатаза в темно-коричневой и коричневой разновидностях «так называемого браннерита».

Детальное изучение таких оксидов титана, содержащих четырехвалентный уран, из Дорнотских месторождений (Филоненко и др., 1993; Черников, Костиков, 2006) показало, что они являются урансодержащим разновидностью анатаза. Тетрагональная сингония (пр. гр.  $I4_1/amd$ );  $a_0 = 3.78 (3.74)\text{\AA}$ ;  $c_0 = 9.5 (9.39)\text{\AA}$ , в скобках даны значения для не содержащего урана анатаза, по Штрунцу (Strunz, 1966). Главные линии на рентгенограмме: 3.508(10); 1.887(9); 1.696(7); 1.662(7); 1.447(7); 1.261(7); 0.952(7); 0.917(7); 0.911(7) (Минералы, 1965).

Цвет этого минерала меняется от желтовато-бурого до темно-бурого, почти черного. Просвечивает в бурых тонах; темноокрашенные разности просвечивают в тонких сколах. Излом раковистый. Спайность совершенная по {001}. В полированных шлифах минерал серый, немного светлее сфалерита. Плеохроизм заметный и в темноокрашенных кристаллах сильнее проявлен. По *No* – бледно-бурый; по *Ne* – бурый. Показатель преломления  $n > 2.5$ . Обнаружена целая группа близких разновидностей минерала, представленных комковатыми скоплениями кристаллов типа анатаза. Минерал встречается также в виде единичных таблитчатых и пластинчатых кристаллов.

Урансодержащий анатаз характеризуется переменным и невысоким содержанием че-

Таблица 3. Микрорентгеноспектральный анализ титанатов, содержащих только  $U^{6+}$ , и первичных титанатов, по которым они развивались, мас.%

№ ан.	1	2	3	4–10
$UO_2$	–	–	–	16.92–54.75
$UO_3$	46.52	31.87	15.60	–
$TiO_2$	28.33	31.56	63.40	31.38–59.23
$SiO_2$	5.15	4.82	4.30	2.50–8.08
$ZrO_2$	3.05	5.15	1.40	0.98–2.75
$Al_2O_3$	н.о.	0.70	0.80	н.о.–0.72
$F_2O_3$	2.89	6.82	7.80	н.о.–2.17
$FeO$	н.о.	н.о.	–	1.05–2.10
$CaO$	2.30	1.24	0.70	0.79–2.10
$MgO$	н.о.	н.о.	–	н.о.–0.12
$PbO$	0.52	0.52	0.40	н.о.–0.46
$SO_3$	0.82	0.78	–	н.о.–0.13
$\Sigma$	89.58	83.46	94.40	91.18–100.86

Примечание: н.о. – не обнаружено; прочерк – не определено.

тырехвалентного урана: от 0.85 до 8.12%  $UO_2$ . Концентрация диоксида титана в нем изменяется в пределах 69.68–82.07%, при почти одинаковом содержании диоксида циркония ~ 1% (1.06–1.34%) и оксида кальция (колебания в пределах 0.23–0.68%). Значительный недостаток суммы оксидов (меньше 100%), очевидно, является результатом гидратации минерала, а отсутствие оксида свинца в нем говорит о его молодом геологическом возрасте.

Урансодержащий анатаз и близкое к нему минеральное вещество являются самыми распространенными носителями урана забалансовых руд Дорнотских месторождений. Минерал выделяется в ассоциации с коффинитом в виде микропрожилков и микровключений в стекловатой основной массе базальтов (Филоненко и др., 1993). В бедных рудах радиоактивность урансодержащего анатаза повышается, увеличивается в них количество коффинита, образуя «коффинит-анатазовую» разность руд. В богатых рудах отмечаются наиболее обогащенные ураном разновидности анатаза в ассоциации с браннеритом и простыми оксидами урана – настураном, уранинитом. На долю урансодержащего анатаза в рудах покровных базальтов приходится 70% урансодержащих минералов. Урансодержащий анатаз и продукты его изменения (и, возможно, ильменита) отмечаются также в рудах месторождений Стрельцовское-Антей (Юго-Восточное Забайкалье), в некоторых перспективных объектах Витимского, Южно-Витимского и Еравненского районов

Прибайкалья (Черников, 2011). Их наличие отрицательно сказывается на извлечении металла методом подземного выщелачивания урана скважинами на месте естественного залегания руд.

**Уран-титановые минеральные образования с  $U^{6+}$**  изучались (Готман и др., 1971) из месторождений Эльконского горста на Алдане (РФ) и из Дорнотских месторождений Восточной Монголии (Черников, Костиков, 2006). Для титанатов шестивалентного урана месторождений Алдана известны определения в них только  $UO_3$  и  $TiO_2$ . Желтая разность этого титаната содержит 21.36%  $TiO_2$  и 36.24%  $UO_3$ . Микротвердость её 342 кг/мм<sup>2</sup>, твердость по Моосу 4.9. Плотность 3.29. Показатель преломления  $1.834 < n < 1.841$ . Данное минеральное образование распространено не только в зоне окисления месторождений, но встречается и в зоне глубинного гипергенеза месторождений Эльконского горста.

Из Дорнотских месторождений Восточной Монголии изучалось светло-бурое, переходящее в темно-бурое стекловатое рентгеноаморфное или дающее еле заметные линии, не поддающееся расшифровке, минеральное вещество. Плотность его изменяется от 3.95 до 3.28, показатель преломления – от 1.840 до 1.836. По приведенным данным микрорентгеноспектральных анализов (табл. 3, ан. 1, 2) видно, что анализированный материал является глубоко окисленным, так как железо в обоих анализах представлено только оксидом, и присутствуют достаточно высокие концентрации  $SO_3$ . Образцы характеризуются высокими концентрациями  $UO_3$  (31.87 и 46.52 мас.%) и  $TiO_2$  (28.33 и 31.56 мас.%). В них отмечаются соответственно и другие оксиды, присутствующие в исходных титанатах (табл. 3, ан. 4–10), то есть анализировались продукты окисления исходных титанатов четырехвалентного урана. Анализы характеризуются значительным дефицитом суммы оксидов, что, вероятно, объясняется гидратацией изучаемого материала. Химический состав, пределы колебания плотности и показателей преломления позволяют предполагать наличие в изучаемом минеральном веществе окисленного гидратированного браннерита, анатаза и переходных разностей его до ильменита.

Третий анализ (табл. 3) – неопубликованные результаты К.В. Скворцовой (ВИМС), рассматривался ею предположительно как анализ минерала типа давидита. Но приведенные данные свидетельствуют, что это минеральное вещество находится в глубоко окисленном состоянии. В нем самое высокое



из проанализированных образцов титанатов содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 7.8 мас.%, при отсутствии  $\text{FeO}$ . Образец характеризуется высокой концентрацией титана, 63.4 мас.%  $\text{TiO}_2$ , что также отличает его от давидита, и умеренным количеством урана (15.6 мас.%  $\text{UO}_3$ ), при обычных для титанатов урана Дорнотских месторождений значениях  $\text{CaO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2$ . Это свидетельствует о том, что данное образование сформировано на месте отложения исходной фазы типа ильменита или переходной формы между анатазом и ильменитом. Минеральное вещество бурого цвета, в проходящем свете оно красновато-бурое, в отраженном — серое.

Таким образом, в рудах Дорнотских месторождений установлены рентгеноаморфные или трудно идентифицируемые рентгеном продукты окисления титанатов урана, сформированные на месте исходных продуктов, содержащих четырехвалентный уран. Среди них встречается по химическому составу фаза типа окисленного ильменита или переходная форма между окисленным ильменитом и гидратированным анатазом. Ввиду слабо проявленных кристаллических свойств более определено диагностировать эту фазу не представляется возможным. В рудах Алданских месторождений подобные образования, за исключением железистых разновидностей, химически охарактеризованы частично, но, по приведенным физическим и оптическим данным, они соответствуют окисленным титанатам урана Дорнотских месторождений и распространены достаточно широко. Присутствие их положительно отражается на технологических особенностях урановых руд.

## Молибдаты урана

Упомянутый еще О.М. Шубниковой (1945) ураномолибдат  $\text{UO}_2 \cdot \text{UO}_3 \cdot 2\text{MoO}_4$  Раммельсберга из Калабрии (Италия) совсем не изучен. Кроме приведенной формулы, другие данные о нем отсутствуют. Существуют три молибдата урана IV, достоверно установленные в урановых рудах — седовит, моурит и молуранит, которые описываются ниже.

**Седовит  $\text{U}^{4+}(\text{MoO}_4)_2$  (?)**. Ромбический,  $a_0 = 6.36 \pm 0.06$ ,  $b_0 = 11.08 \pm 0.03$ ,  $c_0 = 6.42 \pm 0.05 \text{ \AA}$ . Впервые описан К.В. Скворцовой и Г.А. Сидоренко на месторождении Кызылсай, Чу-Илийские горы, Киргизия (Скворцова, Сидоренко, 1965; Черников и др., 1997). Назван в честь исследователя Арктики Г.И. Седова. Минерал образует порошковатые или тонко-игольчатые рыхлые выделения, иногда

образующие радиально-игольчатые скопления красно-бурых кристаллов, размером десятые или сотые доли миллиметра. Спайность, параллельная удлинению кристаллов, различается с трудом. Удельный вес составляет около 4.2. Твердость 105 кг/мм<sup>2</sup>, или 3.3 по шкале Мооса. В шлифах в проходящем свете цвет его меняется от красно-бурого до черного, непрозрачного. Двуосный. Удлинение положительное; угол угасания  $Ng$  по отношению к удлинению кристаллов равен  $38^\circ$ . Слабо плеохроирует от красно-бурого по  $Ng$  до темного красно-бурого по  $Nm$  и  $Np$ . Показатель преломления более 1.789. Формируется в узкой полосе зоны цементации на границе с зоной окисления и выделяется ранее моурита в местах распространения скрытокристаллического железосодержащего молибденита (?) (фемолита), аморфного дисульфида молибдена йордизита (йордизита) и мелкозернистого пирита (участок 4 месторождения Кызыл-Сай). В этом месте отмечается также настуран, урановые и уран-молибденовые черни, сфалерит и галенит. Нерудные минералы представлены небольшим количеством кварца, серицита и карбоната. Поскольку минерал развит на границе с зоной окисления, в ассоциации с седовитом установлено большое количество минералов этой зоны: вольфенит, повеллит, иригинит, отенит, натриевый ураноспинит, фосфуранилит, тюамунит и другие, образовавшиеся после седовита минералы. Химические анализы чистого седовита отсутствуют. Имеется микрохимический анализ Н.Н. Кузнецовой (ВИМС) предполагаемой смеси  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{UO}_2 \cdot 2\text{MoO}_3$  и  $\text{MoS}_2$  (в вес.%):  $\text{UO}_2$  4.16;  $\text{MoO}_3$  5.50;  $\text{CaO}$  27.89;  $\text{SO}_3$  41.51;  $\text{H}_2\text{O} \pm 19.72$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.17;  $\text{SiO}_2$  0.60;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{UO}_3$  не обнаружены. Неполный микрохимический анализ смеси седовита с иллитом, сульфидами молибдена и железа, выполненной также Н.Н. Кузнецовой (вес.%):  $\text{UO}_2$  31.05;  $\text{MoO}_3$  40.83;  $\text{H}_2\text{O} \pm 1.81$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.16;  $\text{CaO}$ ,  $\text{S}$  и  $\text{UO}_3$  не обнаружены. Хотя результаты этих анализов не позволяют точно судить о химическом составе минерала, они показывают, что уран в этом молибдате находится только в четырехвалентном состоянии. Порошковатый и тонкоигольчатый седовит имеют аналогичные порошкограммы, основные линии которой следующие: 11.04(9); 5.53(8); 3.702(8); 3.37(9); 3.193(10); 3.064(9); 2.775(6); 2.559(6); 1.926(5ш.); 1.900(5ш.); 1.677(5). Минерал выделяется в центральных частях моурит-седовитовых скоплений.

**Моурит  $\text{U}^{4+}\text{MO}_5^{\text{6+}}\text{O}_{12}(\text{OH})_{10}$  (?)**. Моноклинный. Впервые описан Е.В. Копченовой и другими (1962) на месторождении Кызылсай,

Чу-Илийские горы, Киргизия (Черников и др., 1997) из того же места, что и вышеописанный седовит. Моурит встречается в виде овальных желваков, размером до 3–4 см, или корочек и тонких мелко-чешуйчатых выделений. Цвет черты минерала фиолетово-синий. Удельный вес, определенный в тяжелых жидкостях > 4.2. Минерал растворяется с трудом в концентрированной HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 10% растворе едкого калия при нагревании.

Результаты микрохимического анализа минерала, выполненного Н.Н. Кузнецовой, дали следующие результаты (вес.%): MoO<sub>3</sub> 63.67; UO<sub>2</sub> 19.38; UO<sub>3</sub> 2.40; SiO<sub>2</sub> 1.72; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.36; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.57; CaO 2.09; MgO 0.49; K<sub>2</sub>O 0.58; Na<sub>2</sub>O 0.54; +H<sub>2</sub>O (t = 850°) 6.07; H<sub>2</sub>O (t = 110°) 1.67; сумма 100.52. Соотношение оксидов в минерале Е.В. Копченова с соавторами (1962) ориентировочно представляют как (UO<sub>2</sub> + UO<sub>3</sub>)•5.5MoO<sub>3</sub>•5.3H<sub>2</sub>O, полагая, что часть CaO также входит в его состав.

Под микроскопом минерал наблюдается в виде веерообразных, радиально-лучистых или вытянутых, изогнутых, червеобразных агрегатов микронных размеров, расщепляющихся по спайности чешуек. Показатель преломления выше 1.780, с положительным удлинением. Угасание косое, угол погасания относительно спайности ~ 10°. Наблюдается отчетливый плеохроизм: по *Ng* – темный сине-фиолетовый, по *Nm* и *Np* – светлый фиолетово-синий с зеленоватым оттенком.

В отраженном свете наблюдается ярко выраженный двуграние: по *Ng* – синий, по *Nm* – зеленый, по *Np* – розовый. Очень сильно проявлена анизотропия: от красного, оранжевого и желтого до зеленого и синего. Отражательная способность, определенная на приборе ПМТКО, равна 10.2%, твердость ~ 75 кг/мм<sup>2</sup>, что соответствует 3 по шкале Мосса. Удельный вес > 4.2. Основные линии рентгенограммы минерала: 12.77(9); 5.897(10); 3.285(7); 3.193(7); 3.148(7); 2.871(8); 2.464(6); 2.024(6); 1.788(6); 1.728(8); 1.716(6); 1.675(6); 1.639(7); 1.565(6); 1.553(6); 1.165(6). Минерал замещает седовит и встречен только в узкой полосе зоны цементации на границе с зоной окисления рудного тела четвертого участка месторождения Кызыл-Сай.

**Моуранит** H<sub>4</sub>U(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>•18H<sub>2</sub>O (?). Рентгеноаморфный. Назван по составу. Открыт Г.Ю. Эпштейн, исследовался также Ю.В. Казициным и В.А. Искюль (все из ВСЕ-ГЕИ, Санкт-Петербург), на уран-молибденовом рудопроявлении при изучении альбититов, содержащих браннерит, настуран и молибденит, на гольце Александровский в верховьях реки Четканда хребта Удокан в Се-

верном Забайкалье (Гецева, Савельева, 1956; Соболева, Пудовкина, 1957; Эпштейн, 1959; Черников и др., 1997). Минерал образует тонкие корочки и натечные агрегаты, приуроченные к трещинам в альбититах. Толщина агрегатов 0.1–0.2 мм, цвет черный. В тонких осколках минерал иногда просвечивает коричневым цветом. Черта буровато-черная. Блеск смолистый. Излом раковистый. Твердость 3–4. Удельный вес ~ 4. Показатель преломления 1.97–1.98. В отраженном свете минерал светло-серый, близкий к настурану по отражательной способности. Химический анализ показал присутствие 4.56% SiO<sub>2</sub>; 38.50% MoO<sub>3</sub>; 10.30% UO<sub>2</sub>; 32.35% UO<sub>3</sub> и 14.03% – потеря при прокаливании. Сумма – 99.74%. За вычетом SiO<sub>2</sub> и после приведения результатов анализа к 100% эмпирическая формула получилась следующей: UO<sub>2</sub>•3UO<sub>3</sub>•7MoO<sub>3</sub>•20H<sub>2</sub>O. Приведенные данные показывают, что этот молибдат является значительно более окисленным по урану и более гидратированным минералом в сравнении с двумя выше описанными молибдатами урана. После прокалывания до температуры 800°C моуранит имеет следующие наиболее интенсивные линии: 4.17(10); 3.44(5); 2.58(5); 2.12(5); 2.03(5); 1.971(5p); 1.926(5p); 1.797(5); 1.314(6p); 1.305(6p). Минерал замещается иригинитом, который образует каемки вокруг моуранита.

Таким образом, надежно установлено три молибдата урана (IV), но они формируются в очень ограниченных количествах и только в двух рудных участках. При этом на гольце Александровский хребта Удокан моуранит обнаружен в канаве и его пространственное распространение, а также особенность минеральных ассоциаций, характерных для его формирования, выявить не представлялось возможным. Условия образования седовита и моурита установлены лучше. Они формируются только в одном рудном теле месторождения Кызыл-Сай в узкой полосе зоны цементации на границе с зоной окисления в месте обильного выделения скрытокристаллического железосодержащего молибденита (фемолита ?), аморфного дисульфида молибдена, иордизита, и мелкозернистого пирита – минералов, малоустойчивых в окислительных условиях и образующихся в резко восстановительных условиях, в которых исключается образование минералов шестивалентного урана. В других рудных телах этого молибден-уранового месторождения (их на месторождении 13) и на соседнем месторождении Ботта-Бурум, где отсутствуют или отмечаются в ограниченных количествах фемо-

лит и иордезит, но развит обычный молибденит, молибдаты урана (IV) не образуются, хотя в зоне окисления всех рудных тел месторождений Кызыл-Сай и Ботта-Бурум молибдаты уранила, урансодержащие вульфенит и повеллит широко распространены.

## Заключение

Таким образом, уран-титановые минералы и минеральные образования широко распространены в урановых рудах. Среди них выделяются два типа: 1 – содержащие четырехвалентный уран и 2 – содержащие уран только в шестивалентном состоянии. Из титанатов урана, содержащих метатетравалентный уран, наиболее широко распространен в урановых рудах браннерит, который в свою очередь по составу, минеральным ассоциациям и морфологическим данным подразделяется на два типа: ториевый браннерит и браннерит, лишенный тория. Ториевый браннерит, обогащенный торием до 30% и содержащий редкие земли в повышенных концентрациях, образует вкрапленники единичных кристаллов и ассоциирует с уранинитом, торианитом и тантало-ниобатами в полях развития гранитоидов, различных метаморфических пород, присутствуя в многочисленных урановых рудопрооявлениях в пегматитах, грейзенах, в кварцевых, кварц-полевошпатовых и кварц-молибденит-вольфрамитовых жилах. Браннерит, практически лишенный тория (< 0.0n% ThO<sub>2</sub>), распространенный в различного типа урановых рудах, выделяется в виде бесформенных рентгеноаморфных масс и очень мелких (микронных) кристаллов. Он распространен в урановых рудах различного типа: гидротермальных, осадочных и метаморфогенных. В большинстве из выделенных минералогических типов урановых руд России и сопряженных стран обнаружен браннерит и плохо диагностируемые титанаты, содержащие высокие концентрации урана. Кроме этого, браннерит является одним из главных рудных минералов в конгломератах Блайнд-Ривер – Эллиот-Лейк (Канада), Жакобина и Белу-Оризонти Бразилии. Помимо браннерита впервые выявлено наличие слабо кристаллического, очевидно, наноразмерного ортобраннерита в урановых рудах месторождения Дружное на Алдане.

Давидит-(Ce) и давидит-(La) установлены только в урановых рудах Южной Австралии, месторождение Радиум Хилл. Достоверно установленные молибдаты урана (IV), седовит, моурит и молуранит, встречены каждый только в одном месте и в малых количествах.

Хотя для них получены достаточные диагностические данные, состав минералов подлежит уточнению, и формулы их будут, вероятно, изменены. В виду узких пределов их распространения влияние минералов на формирование, состав, качество руд весьма ограничено.

Бетафит, а также уранмикролит и уранпироксид распространены в карбонатитах России и зарубежных стран. Кроме того, бетафит-браннеритовые руды составляют 5% запасов крупного уранового месторождения Россинг в Намибии Ю-З Африки. Ряд комплексных (Ta, Nb, TR, P) месторождений в карбонатитах России содержат повышенные концентрации урана, запасы его иногда достигают крупных размеров. Нужно считать перспективным вовлечение в разработку карбонатитовых руд России, учитывая импорт ниобия, тантала, а также дефицит фосфора и урана в нашей стране.

В урановых рудах достаточно широко распространен, особенно в глубинной зоне гипергенеза, урансодержащий анатаз и продукты его изменения, а также, возможно, продукты изменения ильменита. Присутствие анатаза, как и неокисленного браннерита, отрицательно сказывается на технологических свойствах руд, в то время как наличие продуктов изменения анатаза и, возможно, ильменита, содержащих только шестивалентный уран, наоборот положительно влияет на их технологические особенности.

## Литература

- Белов С.В., Фролов А.А., Чистов Л.Б. Промышленные перспективы урансодержащих карбонатитовых месторождений // Уран: ресурсы и производство. Тез. Второго между. симпозиума. М.: ВИМС. 2008. С. 20.
- Бурьянова Е.З., Баранова Е.И. Аутигенный водный минерал титана, урана и кальция, близкий к браннериту // Труды ВСЕГЕИ. 1963. Т. 96. Минералогический сборник. № 3. С. 117 – 130.
- Гецева Р.В., Савельева К.Т. Руководство по определению урановых минералов. М.: Госгеолтехиздат. 1956. 260 с.
- Готман Я.Д., Полякова В.М., Мирута А.К. О новой разновидности браннерита. ДАН СССР. 1968. Т. 179. № 2. С. 429, 430.
- Готман Я.Д., Полякова В.М., Мирута А.К. Новое о браннерите и продуктах его окисления // Новые данные о минералах СССР. 1971. Вып. 20. С. 76 – 87.
- Иванова О.А., Мельников И.В., Горшков А.И., Вампилов М.В. Браннерит в свете данных

- аналитической электронной микроскопии // Изв. АН СССР. Сер. геол. **1982**. № 2. С. 63–71.
- Копченова Е.В., Авдонин А.С., Сигоренко Г.А., Быков В.П.* К изучению тонкодисперсных уран-титановых минералов из альбититов // Изв. АН СССР. Сер. геолог. **1970**. № 1. С. 73–83.
- Копченова Е.В., Скворцова К.В., Силантьева Н.Н. и др.* Моурит — новый гипергенный урано-молибденовый минерал // Зап. ВМО. **1962**. Ч. 91. Вып. 1. С. 69–71.
- Королев К.Г., Белов В.К., Путилов Г.С.* Месторождения фосфорно-урановой метасоматической рудной формации. М.: Энергоатомиздат. **1983**. 136 с.
- Королев К.Г., Мигута А.К., Полякова В.П., Румянцева Г.В.* Минералогия, геологические и физико-химические особенности образования уранотитанатов. М.: Недра. **1979**. 144 с.
- Кривовичев В.Г.* Минералогический словарь. СПб.: С.-Петербург. ун-т. **2008**. 556 с.
- Кривоконева Г.К.* Новые данные о поведении метамиктного браннерита в процессе термообработки // Зап. ВМО. **1972**. Ч. 101. Вып. 5. С. 254–267.
- Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В.* Зарубежные месторождения урана. М.: Недра. **1983**. 320 с.
- Медный пояс Северной Родезии / Ред. И.Н. Томсон. М.: Иностран. лит-ра. **1963**. 474 с.
- Мигута А.К.* Браннерит // Типоморфизм минералов. М.: Недра. **1989**. С. 91–95.
- Минералы. Справочник. Т. II. Вып. 2. М.: Наука. **1965**. С. 342.
- Минералы. Справочник. Т. II. Вып. 3. М.: Наука. **1967**. С. 676.
- Повилайтис М.М.* Новые данные о браннерите // Тр. Минерал. музея АН СССР. **1961**. Вып. 2. С. 64–79.
- Повилайтис М.М.* По поводу новых минералов — лодочникита, аксита и торутита // Зап. ВМО. **1963**. Ч. 92. Вып. 1. С. 113–123.
- Сигоренко Г.А.* Кристаллохимия минералов урана. М.: Атомиздат. **1978**. 216 с.
- Скворцова К.В., Сигоренко Г.А.* Седовит — новый гипергенный минерал урана и молибдена // Зап. ВМО. **1965**. Ч. 94. Вып. 5. С. 548–554.
- 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.
- Стрелкин М.Ф., Железняк Н.Н., Заварзин А.В., Кашеев А.П., Никольский А.Л.* Некоторые вопросы формирования браннеритовых руд // Вопросы прикладной радиогеологии. М.: Атомиздат. **1967**. С. 60–89.
- Стрелкина Е.М., Рябева Е.Г., Дубакина Л.С.* Новые данные о браннерите гидротермального месторождения // ДАН СССР. **1977**. Т. 237. № 2. С. 445–448.
- Филоненко Ю.Д., Петров В.А., Козлова П.С., Головин В.А., Стрельцов В.А.* Урановые месторождения в покровных базальтах (Восточная Монголия) // Геол. рудн. месторожд. **1993**. Т. 35. № 5. С. 394–404.
- Хейнрих Э.У.* Минералогия и геология радиоактивного минерального сырья. М.: ИИЛ. **1962**. 606 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.* Простые урановые оксиды, гидроксиды  $U^{4+}$  +  $U^{6+}$ , простые и сложные гидроксиды уранила в рудах // Новые данные о минералах. **2011**. Вып. 46. С. 71–84.
- Черников А.А., Дубинчук В.Т., Толкачев А.Е., Чистякова Н.И., Нечелюстов Г.Н.* Минералогические и геохимические особенности месторождений Юго-Восточного Забайкалья для локального прогноза урановых руд // Новые данные о минералах. **2008**. Вып. 43. С. 45–52.
- Черников А.А., Костилов А.Т.* Урановая минерализация // Минералы Монголии. М.: Экоист. **2006**. С. 313–330.
- Черников А.А., Пеков И.В., Минаева Е.Л.* К истории изучения минералов урана отечественными исследователями // Зап. ВМО. **1997**. Вып. 4. С. 111–128.
- Шубникова О.М.* Минералы редких элементов и их диагностика. М.: Госгеолтехиздат. **1945**. 176 с.
- Эпштейн Г.Ю.* О молибдатах урана — моураните и иригините // Зап. ВМО. **1959**. Ч. 88. Вып. 5. С. 56–70.
- Bianconi F., Simonetti A.* La Brannerite e le sua paragenesi nelle pegmatiti di Lodrino (Ct. Ticino) // Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. **1967**. В. 47. Н. 2. Р. 887–934. (на итал. яз.).
- Bowie S.H.U.* Uranium and thorium in the Federatio // Rhodesian Min. and Eng. Jour. **1960**. Т. 25. N 6. Р. 37–38.
- 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. N 1–4. P. 21–30.
- Darnley A.G.* Petrology of some Rhodesian Copperbelt orebodies and associated sediments. *Trans. Inst. Min. Metall.* **1960**. London. 69. P. 540–569.
- Fronzel C.* Systematic Mineralogy of Uranium and Thorium. Washington: US Government Printing Office. **1958**. 400 p.
- Gatehouse B.M., Grey I.E., Kelly P.R.* The crystal structure of davidite // *Am. Miner.* **1979**. V. 64. N 9/10. P. 1010–1017.
- Geology and the economic deposits of cooper, iron and vermiculite in the Palabora igneous complex. *Geol. and Mineralog. Staf // Econ. Geol.* **1976**. V. 71. N 1. P. 177–192.
- George D.* Mineralogy of uranium and thorium bearing minerals. U.S. Atomic Energy Comm. RMO–563. **1949**. 198 p.
- Graeser S., Guggenheim R.* Brannerite from Lengenbach, Benntal (Switzerland) // *Schweiz. Mineralog. und Petrograph. Mitt.* B.70. H. 3. **1990**. S. 325–331.
- Mawson D.* On certain new mineral species associated with carnotite in the radioactive ore body near Olary // *Trans. Proc. Roy. Soc. S. Australian.* **1906**. V. 30. P. 203–212.
- Pabst A.* Brannerite from California // *Am. Miner.* **1954**. V. 39. N 1/2. P. 109–117.
- Pabst A.* X-ray cristallography of davidite // *Am. Miner.* **1961**. V. 46. N 5/6. P. 700–718.
- Patchett J.E., Nuffield E.W.* Stadies of radioactive compounds X: the synthesis and cristallography of brannerite // *Canad. Min.* **1960**. V. 6. Part 4. P. 483–490.
- Peking Institut of Uranjum Geology and X-ray Laboratory, Wuhan Geological College. Orthobrannerite – a new mineral of the brannerite group. *Acta Geol. Sinica.* **1978**. P. 241–251.
- Rowe R.B.* Notes on geology and mineralogy of the Newman columbium-uranium deposit, lake Nipissing, Ontario // *Can. Geol. Survey. Paper* 54. **1954**. P. 5.
- Strunz H.* Mineralogische Tabellen. Leipzig. Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Porting K.-G. **1966**. 560 S. (на нем. яз.).