

### 3. УРАН В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ

#### 3.1 Распространённость урана

Уран широко распространён в природе; в значительных концентрациях он обнаружен во многих горных породах, в океанах, а также в лунных породах и метеоритах. В земной коре его больше, чем серебра, висмута, кадмия или ртути (по распространённости он занимает 38-е место), но он находится главным образом в рассеянном состоянии.

Имеется ряд причин для предположения, что большая часть урана концентрируется в земной коре, а не распределена равномерно по всей массе нашей планеты. Земля постоянно излучает тепло, выделяющееся при распаде урана, тория и  $^{40}\text{K}$ . Если бы в Земле присутствовал однородно распределённый уран с такой большой концентрацией как  $2 \cdot 10^{-4}$ , то количество выделяемого тепла было бы достаточным для непрерывного повышения температуры Земли. Однако, геологические данные свидетельствуют, что температура земной поверхности никогда не имела значительных колебаний. На основе расчёта теплового баланса Земли в земной коре находится от 35 до 100% всего урана, а среднее его содержание в мантии Земли плюс земной коре изменяется от  $1,6 \cdot 10^{-6}$  до  $5,2 \cdot 10^{-6}\%$  в зависимости от модели расчётов. Приведённый интервал абсолютной распространённости урана согласуется с оценками для звёздного нуклеосинтеза. Установлено также заметное обогащение урана в породах земной коры, особенно в большинстве кислых пород, входящих в состав континентов. Этот вывод подтверждается кристаллографическими данными, указывающими, что уран не может включаться в кристаллические решётки силюносных пород, расположенных на больших глубинах.

Уран – характерный элемент для гранитного слоя и осадочной оболочки земной коры. Среднее содержание урана в земной коре (кларк)  $2,5 \cdot 10^{-4}\%$  по массе (2-4 ppm в зависимости от региона), в кислых изверженных породах  $3,5 \cdot 10^{-4}\%$ , в глинах и сланцах  $3,2 \cdot 10^{-4}\%$ , в основных породах  $5 \cdot 10^{-5}\%$ , в ультраосновных породах мантии  $3 \cdot 10^{-7}\%$ . Количество урана в слое литосферы толщиной 20 км оценивают в  $1,3 \cdot 10^{14}$  т. Он входит в состав всех пород, слагающих земную кору, а также присутствует в природных водах и живых организмах. Мощных месторождений не образует. Основная масса урана содержится в кислых, с высоким содержанием кремния, породах. Наименьшая концентрация урана имеет место в ультраосновных породах, максимальная – в осадочных породах (фосфоритах и углистых сланцах). В океанах содержится  $10^{10}$  т урана. Концентрация урана в почвах варьируется в интервале 0,7 – 11 ppm (15 ppm в сельскохозяйственных почвах, удобряемых фосфорными удобрениями), в морской воде 0,003 ppm.

#### Кларки урана в горных породах

##### Магматические породы

ультраосновные	$0,003 \cdot 10^{-4}$
основные	$0,5 \cdot 10^{-4}$
средние	$1,8 \cdot 10^{-4}$
кислые	$3,5 \cdot 10^{-4}$
щелочные	до $80 \cdot 10^{-4}$

##### Осадочные породы

известняки	$1,3 \cdot 10^{-4}$
песчаники	$2,0 \cdot 10^{-4}$
глинистые сланцы	$3,4 \cdot 10^{-4}$
углистые сланцы	$1,4-80 \cdot 10^{-4}$
фосфориты	$245 \cdot 10^{-4}$

Некоторые типичные концентрации урана в различных средах приведены в Табл. 12 (ppm - промилле, одна миллионная часть).

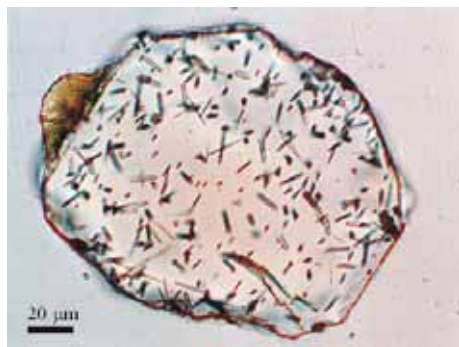
Табл. 12. Концентрация урана в различных природных средах

Богатые руды (Канада) – 20%U	200000 ppm U
Средние руды – 2%U	20000 ppm U
Бедные руды – 0,1%U	1000 ppm U
Очень бедные руды (Намибия)– 0,01%U	100 ppm U
Гранит	4 ppm U
Континентальные разломы	2,8 ppm U
Скальные породы	2 ppm U
Среднее количество в земной коре	1.4 ppm U
Морская вода	0.003 ppm U

**Табл. 13.** Среднее содержание урана в почвах по сравнению с составом литосферы.

	В атомн. %	В вес. %
В литосфере	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
В почвах	$9 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$

При кристаллизации магматических пород уран отжимается в остаточный расплав и сосредотачивается в аксессуарных минералах. Близость ионного радиуса  $U^{4+}$  к ионным радиусам Th, Ca, PЗЭ определяет широкий спектр изоморфных замещений урана в ториево-редкоземельных минералах. В гидротермальном процессе уран активно мигрирует в виде уран-карбонатных комплексов. При понижении окислительно-восстановительного потенциала растворов, падении парциального давления углекислоты, изменении pH растворов происходит разрушение этих комплексов и выпадение урана в виде минеральных фаз. Температурные интервалы образования гидротермальных урановых минералов оценивается в  $100-220^{\circ}$ , иногда  $300-350^{\circ}$ . Процессы метаморфизма от амфиболитовой до гранулитовой фракции обычно сопровождаются выносом урана. При ультраметаморфизме возможен его некоторый привнос. В экзогенных процессах уран способен мигрировать в кислородсодержащих водах и переходить в твердую фазу при смене окислительно-восстановительной обстановки (геохимический барьер).



**Рис. 8.** Треки спонтанного деления урана ( $^{238}U$ ) в природном кристалле апатита, увеличенные путем химического травления  $HNO_3$ . Прямое доказательство спонтанного деления урана – основа трекового метода датирования минералов.

Уран энергично мигрирует в холодных и горячих, нейтральных и щелочных водах в форме простых и комплексных ионов, особенно в форме карбонатных комплексов. Важную роль в геохимии урана играют окислительно-восстановительные реакции, поскольку соединения урана хорошо растворимы в водах с окислительной средой и плохо растворимы в водах с восстановительной средой (например, сероводородных).

Вода океанов, содержащая 3,5% солей, имеет около  $2 \cdot 10^{-6}$  гU/л ( $2 \cdot 10^{-9}$  г/г). Полное содержание урана в океанах составляет  $4 \cdot 10^9$  т, или 0,003 вес.% количества его в земной коре. В морской воде содержание урана находится в пределах  $0,36 \cdot 10^{-6} - 2,3 \cdot 10^{-6}$  г/л. При содержании в океанической воде карбонат-иона больше чем  $n \cdot 10^{-6}$  н. ( $pH > 7,5$  при  $P_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4}$  атм). Уран находится в океанической воде в виде комплекса  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ . В этом состоянии он не способен в значительных количествах переходить в донные отложения. При содержании карбонатного иона в океанической воде, меньшем  $n \cdot 10^{-6}$  н. ( $pH < 7,5$  при  $P_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4}$  атм), уран находится в океанической воде в форме продуктов гидролиза, адсорбированных на кремний содержащих коллоидных частицах. При этом уран уходит на дно со скоростью, определяемой скоростью седиментации частиц, на которых он адсорбирован. В поверхностном слое Баренцова моря концентрация урана равна  $1,6 \cdot 10^{-6}$  г/л, Чёрного моря -  $2,9 \cdot 10^{-6}$  г/л.

Концентрация урана в водах рек европейской части России находится в пределах  $(0,15-3,3) \cdot 10^{-6}$  г/л, в реках азиатской части России  $(0,2-10,0) \cdot 10^{-6}$  г/л, в озёрах России концентрация урана находится в пределах  $(0,15-15,2) \cdot 10^{-6}$  г/л, а концентрация урана некоторых подземных водах России, не связанных с урановыми месторождениями, - в пределах  $(0,2-120) \cdot 10^{-6}$  г/л.

В ходе геологической истории содержание урана в земной коре уменьшилось за счёт радиоактивного распада; с этим процессом связано накопление в земной коре атомов Pb и He. Радиоактивный распад урана играет важную роль в энергетике земной коры, являясь существенным источником глубинного тепла. Из-за большого периода полураспада, урановое тепло выделяется медленно, но оно существенно подогревает Землю (в основном – её верхний слой).

### 3.2 Минералы урана

В свободном виде уран в земле не встречается. Известно 100 минералов урана с содержанием U более 1%. Примерно в одной трети этих минералов уран четырёхвалентен, в остальных – шестивалентен. 15 из этих урановых минералов являются простыми оксидами или гидроксидными, 20 – комплексными титанатами и ниобатами, 14 – силикатами, 17 – фосфатами, 10 – карбонатами, 6 – сульфатами, 8 – ванадатами, 8 – арсенатами. Неопределённые формы урановых соединений встречаются в некоторых углистых сланцах морского происхождения, лигните и угле, а также в межзёрновых плёнках в изверженных породах. Промышленное значение имеют 15 минералов урана.

**Табл. 14. Важнейшие урановые минералы**

Название	Формула	Содержание урана, %
Уранинит	$(U,Th)O_{2x}$	62-85
Настуран	$UO_{2x}$	52-76
Урановые черни	$UO_{2x}$	11-53
Коффинит	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	60-70
Браннерит	$(U,Th)Ti_2O_6$	35-50
Отенит	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10H_2O$	48-54
Уранофан	$Ca[UO_2(SiO_3OH)]_2 \cdot 5H_2O$	55-58
Карнотит	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	52-66
Торбернит	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	48
Тюямунит	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 80H_2O$	57-65
Казалит	$Pb[UO_2 SiO_4] \cdot H_2O$	42-50
Нингиоит	$CaU(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$	20-30
Цейнерит	$Ca(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 12H_2O$	55
Давидит	$(Fe,Ce,U)(Ti,Fe,V,Cr)_3(O,OH)_7$	1-7

В некоторых типах месторождений основным носителем урана является ураноносный фторапатит, в котором уран изоморфно замещает кальций.

Главные урановые минералы в крупных рудных месторождениях представлены оксидами (урановая смолка, уранинит, коффинит), ванадатами (карнотит и тюямунит) и комплексными титанатами (браннерит и давидит). Промышленное значение имеют также титанаты, например, браннерит  $UTi_2O_6$ , силикаты - коффинит  $U[SiO_4]_{1-x}(OH)_{4x}$ , танталониобаты и гидритированные фосфаты и арсенаты уранила - урановые слюдки. Уран не встречается в природе как самородный элемент. Вследствие того, что уран может находиться в нескольких стадиях окисления, он встречается в весьма разнообразной геологической обстановке.

Минералы урана делят на первичные, образовавшиеся при формировании земной коры, и вторичные – те, что образовались на более поздних стадиях ее развития под действием тех или иных природных факторов. Урановые минералы образуются на всех стадиях эндогенного минералообразования.



**Рис. 9.** Слева – образец урановой смолки, справа – друза кристаллов жёлтого отунита.



**Рис. 10.** Кристаллы уранинита.



Рис. 11. Канадский уранинит (слева – месторождение Онтарио, справа – район Большого Медвежьего озера).

Табл. 15. Некоторые минералы урана.

Важнейшие урановые минералы		
Название	Формула	Содержание урана, %
Уранинит	$(U, Th)O_{2x}$	62-85
Настуран	$UO_{2x}$	52-76
Урановые черни	$UO_{2x}$	11-53
Коффинит	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	60-70
Браннерит	$(U, Th)Ti_2O_6$	35-50
Отенит	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10H_2O$	48-54
Уранофан	$Ca[UO_2(SiO_3OH)]_2 \cdot 5H_2O$	55-58
Карнотит	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	52-66
Торбернит	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$	48
Тюямунит	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 80H_2O$	57-65
Казалит	$Pb[UO_2SiO_4] \cdot H_2O$	42-50
Нингиоит	$CaU(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$	20-30
Цейнерит	$Ca(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 12H_2O$	55
Давидит	$(Fe, Ce, U)(Ti, Fe, V, Cr)_3(O, OH)_7$	1-7

Концентрации урана, превышающие в 10 раз среднее содержание урана в земной коре, т.е. 0,003%, образуются в результате магматической деятельности и процессов седиментации, а также в результате процессов рудообразования. Повсеместное присутствие урана объясняется его физическими и химическими свойствами, в частности, многовалентностью, большим атомным радиусом, высокой химической активностью, относительной растворимостью его шестивалентных соединений в водных растворах и его относительно большим распространением по сравнению с некоторыми другими металлами. Эти свойства дают урану возможность образовывать соединения со многими другими элементами, входить в структуру большого количества разнообразных минералов, принимать участие в образовании многих пород и минералов различного происхождения и состава. Свойства, которые обуславливают широкое распространение урана в природе, вызывают в то же время его распыление, поэтому концентрации урана не так велики, как концентрации других столь же распространённых, но менее активных металлов, например свинца и молибдена.

Минералы подразделяются на соединения 4-валентного и 6 – валентного урана (соли уранила). Минералы группы  $U^{4+}$  (всегда содержащие некоторое количество  $U^{6+}$ ) представлены оксидом урана  $UO_2$  – уранинитом и его силикатом -  $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$ - коффинитом. Уранинит  $UO_2$  и настуран  $U_3O_8$  – одна минеральная фаза переменного состава  $UO_x$ , где x изменяется от 2 до 2,6. Обманкой этот минерал называют за переменчивость цвета: темно-серый, черный, зеленовато-черный. А смолкой – за то, что его зерна действительно похожи на капли застывшей смолы. Настуран (разновидность уранинита) и коффинит - главные промышленные минералы гидротермальных и экзогенных месторождений урана; уранинит, кроме того, встречается в пегматитах и альбититах. Порошковатые оксиды (урановые черни) и гидрооксиды урана образуют существенные скопления в зонах окисления различных урановых месторождений. Титанаты урана (бранерит  $UTi_2O_6$  и др.) известны в пегматитах, а также в некоторых гидротермальных месторождениях. Вторая группа объединяет минералы, содержащие  $U^{6+}$ , это гидроксиды (беккерелит  $3UO_3 \cdot 3H_2O$ , кюрит  $2PbO \cdot 5H_2O_3 \cdot 5H_2O$ ), силикаты (уранофан  $Ca(H_2O)_2U_2O_4(SiO_4) \cdot 3H_2O$ , казалит  $Pb[UO_2][SiO_4] \cdot H_2O$ ), фосфаты (отенит  $Ca[UO_2]_2[PO_4]_2 \cdot 8H_2O$ , торбернит  $Cu[UO_2]_2[PO_4]_2 \cdot 12H_2O$ ), арсенаты (цейнерит  $Cu[UO_2]_2[HSO_4]_2 \cdot 12H_2O$ ), ванадаты (карнотит  $K_2[UO_2][VO_4]_2 \cdot 3H_2O$ ), молибдаты (иригинит), сульфаты (уранопилит), карбонаты (ураноталит); все они распространены в зонах окисления урановых месторождений.



На Рис. 12-14 представлены фотографии некоторых урановых минералов.

**Урановые слюдки** - группа минералов, водных фосфатов и арсенатов уранила  $(\text{UO}_2)^{2+}$ , для которых характерна хорошо выраженная слюдоподобная спайность в одном направлении и пластинчатая форма кристаллов. Общая формула  $\text{A}(\text{UO}_2)_2(\text{XO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , где  $\text{A} - \text{H}_3\text{O}, \text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Cu}, \text{Mg}$  и др., а  $\text{X} - \text{P}$  или  $\text{As}$ . Содержит 30 минеральных видов, главные минералы - торбернит и отенит. В основе кристаллической структуры - слои, состоящие из дискретных уранильных групп  $(\text{UO}_2)^{2+}$  и фосфатных или арсенатных тетраэдров  $[\text{PO}_4]^{3-}$ ,  $[\text{AsO}_4]^{3-}$ ; между слоями находятся катионы  $\text{A}$ , координированные молекулами воды. По степени гидратности слюдки подразделяются на основные формы с  $n = 8$  и больше (ряд торбернита) и метаформы с  $n = 8$  и меньше (ряд метаторбернита). Основные формы легко теряют часть воды, переходя в метаформы. Преобладающая окраска жёлтая, зелёная, реже розовая (слюдки с  $\text{Co}$  и  $\text{Mn}$ ). Перламутровый блеск, твёрдость 2-2,5 и плотность 3200-3600  $\text{кг/м}^3$ . Слюдки, не содержащие  $\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Pb}, \text{Co}, \text{Mn}$ , отличаются сильной люминесценцией. Радиоактивны; легко растворяются в кислотах. Гипергенные минералы, особенно характерные для зоны окисления урано-сульфидных месторождений. Входят в состав урановых руд.



Рис. 12. Слева - настуран, справа - гуммит.

**Уранинит** - массивный минерал, смоляного вида, имеющий шаровидную или чашеобразную поверхность, образован смесью  $\text{UO}_2, \text{UO}_3, \text{PbO}$  с примесью  $\text{Ra}, \text{Th}, \text{Ce}, \text{La}$  или  $\text{Er}$ . (Сам минерал - диоксид урана  $\text{UO}_2$ , но в рудах часть урана окислена до  $\text{U}^{6+}$ , состав некоторых разновидностей - вторичных продуктов типа урановых черней - приближаются к  $\text{U}_3\text{O}_8$ . В руде содержит многочисленные, но в незначительном количестве, примеси других элементов, а радиогенный свинец, торий, иттрий и лантаноиды - до 20% и более. Характерно присутствие радия и гелия. Различают две разновидности первичного уранинита: кристаллическую - собственно уранинит - и более распространенную плотную, аморфную - настуран (синоним - урановая смолка, или смоляная обманка). Кристаллизуется в кубической сингонии, образуя кристаллы в форме кубов, реже в комбинации с ромбододекаэдром или октаэдром. Более обычны массивные сплошные агрегаты. Для настурана характерны плотные колломорфные выделения, почковидные и тонкосферолитовые агрегаты; для урановых черней - сажистые и порошковатые налеты и примазки, землистые массы. Образует плотные массы, выполняющие прожилки, и имеет шаровидную или чашеобразную поверхность. Очень редко кристаллизуется в форме октаэдров или кубов. Цвет черный, блеск смоляной, цвет черты черный с буроватым или зеленоватым оттенком. Обычно непрозрачен, излом раковистый, спайность отсутствует, твёрдость 6-7, плотность чистого свежего уранинита 10,6. Перед паяльной трубкой не плавится. Порошок, смешанный с содой, при прокаливании на древесном угле дает желтый налет. Разлагается в горячей концентрированной азотной кислоте. Кристаллический уранинит встречается как аксессуарный минерал в гранитах и в гранитных пегматитах, где иногда образует крупные кристаллы. Он может присутствовать также в грейзенах с вольфрамитом и молибденитом. В гидротермальных месторождениях, тем более в крупных скоплениях, редок (Шинколобве, Конго). Напротив, настуран - типичный минерал гидротермальных жил; он характерен также для гидротермально-метаморфогенных месторождений - золото- и ураноносных конгломератов типа Витватерсранда (Трансвааль, ЮАР), инфильтрационных пластообразных месторождений типа плато Колорадо (США) и экзогенных: осадочных (в том числе связанных с угленосными отложениями) и эпигенетических (в зонах пластового окисления типа Уч-Кудука в западном Узбекистане). Крупнейшие в мире запасы настурановых руд сосредоточены в Канаде, Австралии и ЮАР; за ними следуют Конго, Намибия, США (Мэрисвейл, Юта; плато Колорадо) и пограничный район Германии и Чехии (Рудные горы), а также Украина и Казахстан. В России уранинит в пегматитах известен в Карело-Кольском регионе, настуран - в гидротермальных месторождениях в Забайкалье. Ранее использовался для приготовления урановых красителей, позднее - для извлечения радия при изготовлении лечебных препаратов, в настоящее время является важнейшим сырьем для получения атомной энергии. Широко применяется в биологии, медицине, металлургии и других отраслях промышленности. Уранинит и особенно настуран - главные рудные минералы урана. Вплоть до 1940 уранинит добывали (главным образом из пегматитов) в первую очередь с целью извлечения радия. Во время Второй мировой войны и особенно в послевоенный период уранинит, настуран и другие радиоактивные руды стали разрабатывать как сырье для атомной энергетики и производства ядерного оружия.

**Настуран** (от греч. *nast*- уплотнённый и лат. *uranium* - уран, в сочетании с химическим составом, синонимы названы по смоляному блеску), урановая смоляная руда, урановая обманка, разновидность уранинита. Обычно настурану приписывают формулу  $\text{U}_3\text{O}_8$ , но в действительности состав настурана переменен, и более точной представляется

формула  $UO_{2,25}$ . Обманкой этот минерал называют за переменчивость цвета: темно-серый, черный, зеленовато-черный. А смолкой – за то, что его зерна действительно похожи на капли застывшей смолы. Представляет собой массивные агрегаты, содержащие переменные количества  $UO_3$  (преобладает) и  $UO^2$ . В виде примесей содержит радиогенный свинец, Ca, иногда редкоземельные элементы иттриевой подгруппы, а также  $H_2O$  (до 2-3%). Кристаллическая структура соответствует ураниниту, однако при преимущественном содержании  $UO_3$  переходит в рентгеноаморфное состояние. Цвет чёрный со смоляным блеском, непрозрачен. Твёрдость по минералогической шкале 4-6; плотность 6000 - 9200 кг/м<sup>3</sup>. Очень сильно радиоактивен. Один из наиболее распространённых минералов U. Образуется в рудных месторождениях сложного гидротермального типа, в ассоциации с минералами Sn и W, а также с арсенидами и сульфоарсенидами кобальта, никеля, железа, сульфидами меди, свинца, висмута, серебра и др. В ураново-железородных месторождениях ассоциирует с гематитом, магнетитом и др. Известен также в месторождениях осадочного типа, в конгломератах, где обычно присутствуют и порошковидные, землистые агрегаты - так называемая урановая чернь. Один из основных промышленных минералов в урановых рудах.

**Торбернит** (медный уранит, урановая слюдка),  $Cu(UO_2)(PO_4) \cdot nH_2O$ , назван в честь Торберна Олофа Бергмана – шведского химика и минералога. Сингония тетрагональная, тонкопластинчатые, листоватые кристаллы, нередко землистые массы, почти всегда в сростании с отенитом, блеск стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый. Хрупок. Твёрдость 2 - 2,5. Удельный вес 3,3 - 3,6. Цвет травяно-зеленый или изумрудно-зеленый (более густой, чем у отенита). Блеск перламутровый. Просвечивает. Двойное лучепреломление отрицательное. Сплавляется в черный королек. Растворяется в  $HNO_3$ , при добавлении аммиака раствор окрашивается в синий цвет (присутствие меди), при этом выпадает желтый осадок. Месторождения: ЮАР, Волк-Остров на Онежском озере и др.

**Отунит** (отенит, аутунит),  $Ca[UO_2/PO_4]_2 \cdot (12-10)H_2O$ , назван по городу Отен, Франция. Сильно радиоактивный минерал (из-за наличия актиния и полония), урановая руда. Тонкопластинчатые кристаллы, слюдоподобные массы. Сингония тетрагональная. Цвет зеленовато-желтый, лимонно-желтый, серо-желтый. Плавится при сильном дутье в черный шарик. В закрытой стеклянной трубочке интенсивно выделяет кристаллизационную воду. Растворим в  $HCl$ , раствор окрашивается в зеленый цвет. Встречается в зонах окисления урановых месторождений и часто в трещинах в гранитах и гранитных пегматитах. Месторождения: в гранитах Кирхберг, Шварценберг, на урановых месторождениях Шнеберг, Ауэ, Иоганнгеоргенштадт и в других районах саксонских Рудных гор (ГДР); департамент Сона и Луара (Франция); Редрут в Корнуэлле (Англия); в пегматитах Мадагаскара и др.

**Тюямунит** -  $Ca[UO_2]_2[VO_4]_2 \cdot 8H_2O$ . Сингония ромбическая; распространен в тонкочешуйчатых землистых массах. Наблюдается также в виде налетов и корочек в полостях. Цвет яркожёлтый (канареечный), иногда с зеленоватым или оранжевым оттенком. Блеск сильный, на плоскостях спайности перламутровый. Твердость 1. Хрупок. Уд. вес 3,68. Сильно радиоактивен. От урановых слюдок другого состава отличим лишь по данным химических реакций и оптическим константам. Легко плавится. С бурой дает ясную реакцию на уран (в отсутствии меди). В кислотах легко растворяется. Реакция с перекисью водорода на ванадий. Вместе с другими минералами экзогенного происхождения встречается в приповерхностных частях месторождений уран-содержащих минералов. Встречен в ряде мест обычно в виде землистых скоплений в ассоциации с гипсом в трещинках среди осадочных пород, содержащих органические остатки. Основное месторождение - ванадиеносные песчаники Колорадо (США).

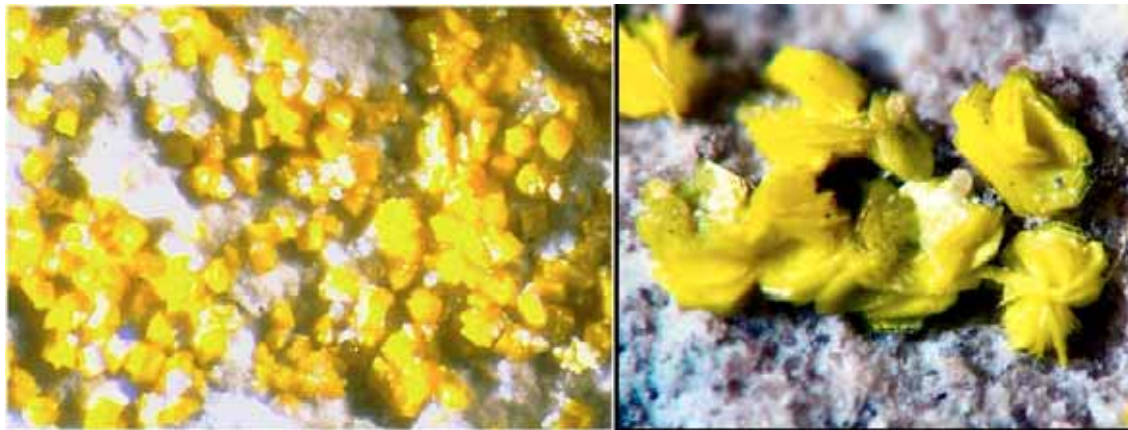


**Карнитит**  $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$ . Название в честь французского горного инженера и химика М.А. Карно. Сингония ромбическая, моноклинная. Обычно наблюдается в порошковатых массах и в виде налетов. Цвет ярко-жёлтый или зеленовато-жёлтый. Блеск сильный, на плоскостях спайности перламутровый. Твердость 2-2,5. Хрупок. Уд. вес 4,46.

Сильно радиоактивен. Во многом похож на тюямунит. Отличим по оптическим константам. Легко сплавляется в черный шарик, окрашивая пламя в бледно-фиолетовый цвет (следует наблюдать сквозь синее стекло, поглощающее желтый оттенок света Na). С бурой дает перл урана. Тугоплавок, растворяется в кислотах. Принадлежит к группе урановых слюдок - ванадат калия и уранила. Встречается в виде вкрапленности в песчаниках, иногда образует налеты и корочки. Продукт окисления первичных минералов урана и ванадия. Одна из главных руд урана и ванадия. Месторождения: в США (шт. Колорадо), Канаде, Мексике, Марокко, Шабе (Заир), Австралии, Узбекистане и Туркмении. Встречается в осадочных породах, в которых отлагается водами, обогащенными ураном.

**Казолит** [по месторождению Казоло],  $Pb_2[UO_2SiO_4]_2 \cdot 2H_2O$ . Монокристаллы призматические и игольчатые, сингония моноклинная бета. Цвет буровато-желтый, желтый, Блеск смолистый, алмазовидный. Твёрдость 4-5. Уд. вес 5,96. Встречается в зоне окисления гидротермических и осадочных месторождений; сопровождается силикатами и фосфатами.

**Лейкбогаит** - новый минерал урана с уникальной кристаллической структурой из Виктории (Австралия)  
 $CaNaFe_3 + 2H(UO_2)_2(PO_4)4(OH)_2(H_2O)_8$



**Рис. 13.** Слева – карнотит, справа - туюмунит

**Гуммит** - минеральные образования непостоянного состава, представляющие смеси скрытокристаллических агрегатов, состоящих из гидроокислов и некоторых гидросиликатов урана. Главные минералы, образующие гуммит: кларкеит  $(\text{Na}, \text{K})_{2-2x}(\text{Ca}, \text{Pb})_x \text{U}_2\text{O}_7 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ , фурмарьерит  $\text{PbO} \cdot 4\text{O}_3 \cdot 7-8\text{H}_2\text{O}$  и казолит  $\text{Pb}(\text{UO}_2) [\text{SiO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$ , редко встречающиеся в чистом виде. Гуммит образует корочки, неправильные или округлые стяжения с раковистым изломом и блеском светло-жёлтого или оранжево-красного цвета. Твердость по минералогической шкале 2,5-3; плотность 4700-5800 кг/м<sup>3</sup>. Хрупок. Развивается за счёт изменения уранинита или настурана в зоне окисления первичных урановых руд.

Часто урану в минералах сопутствуют другие полезные элементы – титан, тантал, редкие земли. Поэтому естественно стремление к комплексной переработке урансодержащих руд.



**Рис. 14.** Слева – казолит, справа - торбернит (Яхимов, Чехия).