

УДК 553.25:549.5:553.2

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА УРАНОВЫХ РУД, ИХ НАУЧНОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

А.А. Черников

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

В настоящее время известно более 150 урановых и урансодержащих минералов. Большинство их составляют минералы уранила, формирующиеся в окислительной обстановке, отражая физико-химические параметры ее составом минеральных видов или минеральных ассоциаций. Минералы уранила образуют следующие промышленные руды: бета-уранофан-цеолитовые – месторождения Березовое и Горное в Забайкалье; минералы уранила с цеолитами – месторождение Северное, северо-восток России, граниты Болгарии; парсонситовые – месторождения Лашо во Франции; фосфаты уранила в аргиллизированных гранитах – месторождение Дурулгуй в Забайкалье, Россия. Кроме того, известны крупные по запасам урана месторождения – карнотитовые калькреты Австралии, калькреты с минералами уранила Намибии. При отработке месторождений с минералами уранила на месте естественного залегания руд или кучным выщелачиванием экономически выгодно вовлекать в разработку забалансовые руды (до 0.01% U) и блоки пород с низким содержанием урана (до 0.005%, может быть, и ниже), например, шрекингеритовые скопления в Монголии, Казахстане и других странах. Запасы урана этих месторождений могут также достигать крупных и суперкрупных размеров.

В неокисленных промышленных рудах минералы урана представлены оксидами (урановые черни, настуран, уранинит), титанатами (браннерит и переходные разности его), силикатами (коффинит и силикаты с переменным составом), реже фосфатами и молибдатами урана. Урансодержащие минералы представлены апатитом, оксидами и силикатами титана, циркония и тория, цеолитами и другими. Выявлено существенное влияние процессов приповерхностного и глубинного гипергенеза на рудообразование. Добавлены дополнительные поисково-разведочные и оценочные критерии для урановых месторождений. Приведены районы, в которых в первую очередь возможно обнаружение месторождений с использованием таких критериев: 1 – Юго-Восточное Забайкалье, севернее Стрельцовской структуры; 2 – Северное Прибайкалье; Аkitканский район и Чаро-Олекминский блок пород; 3 – район Западно-Сибирской плиты.

В статье 1 таблица, 7 рисунков, список литературы из 52 наименований.

Ключевые слова: минералы урана (IV), минералы уранила, урансодержащие минералы, крупные и суперкрупные месторождения урана, прогноз урановых месторождений.

Согласно меткому выражению В.И. Вернадского о всеобщности урана, в настоящее время известно большое количество (более 150) урановых и урансодержащих минеральных видов. Большинство их является минералами уранила, формирующимися в окислительной обстановке, причем состав отдельных минеральных видов и их ассоциаций отражает физико-химические параметры минералообразующей среды. Минералы уранила представлены гидроксидами, силикатами, фосфатами, арсенатами, ванадатами, карбонатами, сульфатами, молибдатами, селенитами, теллуридами и минералами более сложного анионного и катионного состава. К урансодержащим минералам относятся оксиды или гидроксиды железа и марганца, апатиты, цеолиты, повеллит, вульфенит, глинистые, реже другие минералы, концентрирующие уранил. Кроме того, встречаются рентгеноаморфные фазы и плохо раскристаллизованные гидроксиды уранила, а также железистые, кремнистые, титановые, цирко-

ниевые, ториевые и более сложные, собственно уранильные и содержащие уранил гидроксиды. Все эти минералы и минеральные вещества развиваются в зоне окисления урановых месторождений, первичные руды которых залегают глубже зоны окисления. До самого последнего времени такие первичные руды являлись основными объектами урановой разработки. В геологической литературе минералогическая характеристика зон окисления урановых месторождений давалась многократно (Грицаенко и др., 1959; Константинов, Куликова, 1960; Хейнрих, 1962; Евсеева, Перельман, 1962; Экзогенные..., 1965; Образование..., 1976; Черников, 1981; 2001; 2009; Минералогия..., 1983; Крупные..., 1998; Типоморфизм..., 1989; Кулиш, Михайлов, 2004; Черников, Дорфман, 2004; Черников и др., 2009; 2009; Frondel, 1958; Chernikov, 1982, 1996, 2008 и др.). В практическом отношении важно остановиться на характере перераспределения урана в зоне окисления урановых месторождений.

Типы зон окисления, развивающихся по промышленным неокисленным урановым рудам

Практически важно выделить существование следующих типов зон окисления урановых месторождений по характеру распределения урана в них: **1.** Выщелоченные зоны окисления или существенно обедненные ураном руды по сравнению с первичными рудами. **2.** Зоны окисления с рудами, содержащими такие же концентрации урана, что и неокисленные руды. **3.** Зоны окисления, руды которых обогащены ураном в сравнении с первичными рудами. В каждом из этих трех типов зон окисления урановых месторождений может быть выделено несколько подтипов. Среди первого типа отмечаются 3 подтипа. Подтип **1а:** в зонах окисления отсутствуют минералы уранила или они встречаются в незначительном количестве — месторождение Бык (Кавказские минеральные воды, Россия); месторождение Адрасман (Кара-Мазар, Таджикистан) и другие. В этом же подтипе можно рассматривать ролловые или подобные им месторождения Ю. Казахстана, Средней Азии, Сибири, Забайкалья, осадочных бассейнов Болгарии и других стран. Подтип **1б:** зоны окисления с минералами уранила, которые составляют кондиционные руды только на отдельных горизонтах — месторождения Дружное, Эльконское Плато и другие. (Эльконский район на Алдане). Подтип **1в:** зоны окисления с минералами уранила в рудах, обедненных ураном по сравнению с неокисленными рудами, которые они замещают — месторождения Стрельцовское, Лучистое и Тулукуевское Юго-Восточного Забайкалья.

В зонах окисления второго типа может быть выделен подтип **2а**, где концентрации урана в окисленных и первичных рудах примерно одинаковы — месторождение Часовое, Забайкалье; месторождение Черкасар (Кураминский хребет, Узбекистан) и другие, а также подтип **2б**, где концентрации урана в отдельных горизонтах зоны окисления меньше его содержания в неокисленных рудах. Большинство зон окисления подтипа **1в** практически является близким к подтипу **2б**. Главное различие заключается в том, что в подтипе **1в** зоны окисления во всем профиле обеднены ураном, тогда как в подтипе **2б** обедненными ураном являются только отдельные горизонты. В качестве наиболее характерного примера можно привести Главную зону месторождения Табашары (Кара-Мазар, Таджикистан, Черников, 1981,

пример V, подтип **1**, с. 163, 164). Геохимические и минералогические особенности зон окисления этих двух типов используются, главным образом, для прогноза оруденения на глубину, ниже зоны окисления. Состав минералов уранила и ассоциирующих с ними минералов других элементов, а также частое зональное расположение их определяет формационный тип месторождений и их экономическое значение.

Среди зон окисления третьего типа выделяются подтип **3а** — месторождения с более богатыми рудами во всем профиле зоны окисления, и подтип **3б** — месторождения с обогащенными окисленными рудами в приповерхностном горизонте, который сменяется окисленной выщелоченной зоной. Примером подтипа **3а** может быть месторождение Серное (Туркменистан, ~ 200 км на восток от Туркменбаши, бывшего Красноводска). В зоне окисления его установлены гидрооксиды, фосфаты и другие минералы уранила. Однако, более распространенными являются силикаты (главным образом, уранофан) и ванадаты уранила (стрелкинит, карнотит и тюмунит). Полностью окисленные руды этого месторождения, в которых отмечаются только минералы уранила, содержат на 1 м углубления в три раза больше, а смешанные руды (с минералами уранила, урановыми чернями и реликтами настурана) — в 2.8 раза больше урана по сравнению с черниве-настурановыми рудами. Обогащенные ураном по сравнению с неокисленными рудами зоны окисления образуются также в урано-ванадиевых месторождениях, например, Шакоптар, Майли-Сай (Киргизия), Пап (Узбекистан) и другие.

Очевидно, к подтипу **3а** нужно отнести повышенные концентрации урана в окисленных углях, неизменные разности которых имеют фоновые содержания этого элемента. Уран часто, наряду с редкими и благородными металлами, концентрируется в количестве 0.0п — 0.п% в золе окисленных углей многих угольных бассейнов Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока, Монголии, Казахстана, Болгарии и других регионов. Например, в золе окисленных углей месторождения Адун-Чулун (Монголия) содержится 0.11 — 0.33% урана, до 0.45% лантаноидов, 0.36 — 2.1 г/т золота, до 350 г/т кобальта и повышенные количества других химических элементов, важных для промышленности (Арбузов и др., 2008). Переработка золы электростанций, работающих на таких углях, благоприятно отразится на экологической обстановке в районах их хранения, так как

извлечение урана из них решит проблемы, связанные с радиоактивным загрязнением окружающей среды.

В качестве примера подтипа 3б может быть приведена зона окисления редкометалльно-уранового месторождения Комсомольское (Черников, 1981, пример IX, с. 171 – 173; Черников и Дорфман, 2004), западный экзо- и эндоконтат гранитного массива Куу, Центральный Казахстан. В самой верхней части зоны окисления этого месторождения развивается, главным образом, шрекингерит (рис. 1), в небольших количествах отмечается уранофан. Скопления шрекингерита образуют приповерхностную подзону (вертикальная мощность от 2 до 5 м), значительно обогащенную ураном. Минерал выделяется вдоль тектонических трещин далеко от рудных тел, образуя крупные скопления также в рыхлых четвертичных отложениях и в верхних горизонтах тектонических зон, никак не связанных с основными рудоносными структурами.

Ниже подзоны развития шрекингерита на глубину от десятков до сотни метров отмечается подзона выщелачивания урана с небольшим количеством уранофана и отенита (возможно, также ураноспинита). Глубже — зона обогащения ураном (вертикальная мощность в несколько десятков метров) с урановыми чернями и глинистым веществом, сорбирующим уран, сменяемая зоной низкого содержания урана и зоной бедных руд. В зоне бедных руд установлены настуран, уранинит и браннерит.

Интенсивность гипергенного перераспределения урана в геологических разрезах месторождения Комсомольского отчетливо фиксируется изотопным составом свинца и радиоактивных изотопов в минералах и минеральных ассоциациях. Анализ распределения минеральных ассоциаций в разрезах и соотношений изотопов свинца и радиоактивных изотопов в них позволил установить, что до верхнего триаса, когда произошел основной эрозионный срез палеозойских образований, в районе развивалась гематитизация пород. Она интенсивно проявилась на месторождении Комсомольское. После, в течение юрского, мелового, третичного и большей части четвертичного периода, на месторождениях и рудопроявлениях в эндо- и экзоконтактах гранитного массива Куу, с которым связано месторождение Комсомольское, отмечается экзогенное формирование минералов с широким перераспределением урана и других рудных элементов. Наблюдалось интенсивное выщелачивание урана и молибде-



Рис. 1. Шрекингерит в глинистой массе месторождения Комсомольское, Центральный Казахстан. Размер выделения 6,5 x 7 мм.

на с ограниченным формированием их минералов в зоне окисления и отложение вновь образованных регенерированных образований в зоне цементации. И только в конце четвертичного времени началось отложение гипса и шрекингерита в почве, четвертичных отложениях и в верхних горизонтах кор выветривания, в том числе в верхних горизонтах ранее выщелоченных зон окисления. Поскольку верхнечетвертичная обширная аккумуляция шрекингерита происходила на разных расстояниях от первоисточника, а выщелоченные зоны слабо изучены на глубине, возможность обнаружения промышленных масштабов урана в глубинных горизонтах месторождения Комсомольское является достаточно высокой. При этом приповерхностные аккумуляции шрекингерита могут представлять значительный самостоятельный экономический интерес как объекты кучного выщелачивания урана.

Месторождения урановых минералов зоны окисления без очевидной связи их с неокисленными промышленными рудами

Кроме месторождений с перечисленными типами зон окисления, известны месторождения, в которых минералы уранила являются основными компонентами промышленных руд, сформированных без очевидной связи с какими-либо неокисленными промышленными концентрациями урана. В первую



Рис. 2. Радиально-лучистые выделения бета-уранофана с настураном (Н) в центральных частях этих выделений. Месторождение Горное, Центральное Забайкалье. $\times 7500$.

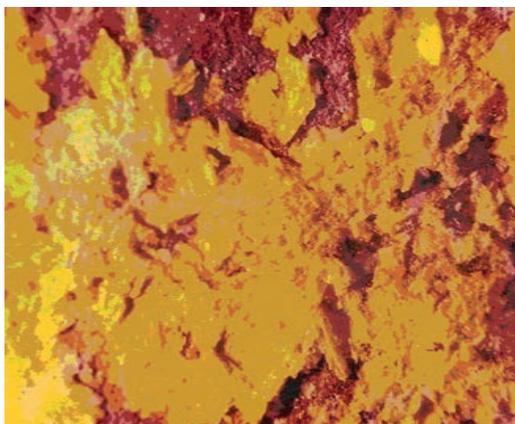


Рис. 3. Пластинки желтого отенита на лимонитизированном граните, месторождение Березовое, Центральное Забайкалье. $\times 10$.



Рис. 4. Пластинки темно-зеленого отенита Месторождение Дурулгуй, Центральное Забайкалье. $\times 10$.

очередь, это относится к бета-уранофан-цеолитовым рудам месторождений Березовое, Горное (Черников, 1981, 2001; Черников и др., 1983) и многочисленных рудопроявлений юга Центрального Забайкалья, а также некоторых приграничных рудопроявлений Монголии. Такими же являются руды с минералами уранила в цеолитизированных гранитах месторождения Северное и некоторых рудопроявлений Северо-Востока России, а также зоны цеолитизированных гранитов Болгарии.

В зонах цеолитизированных гранитов юга Центрального Забайкалья (Чикой-Ингодинская структурно-формационная зона) бета-уранофан является единственным или резко преобладающим урановым минералом руд глубоких горизонтов (от глубин более 700 до 300–150 м от поверхности). В небольших количествах в них отмечены апатитовые, кварц-апатитовые и кремнистые прожилки, в которых с помощью электронного микроскопа установлены тончайшие выделения настурана и коффинита. Настуран выявлен с помощью электронного микроскопа также в центре радиально-лучистых выделений бета-уранофана (рис. 2). Однако, вклад ураносодержащих апатитовых, кремнистых прожилков и настурана бета-уранофановых образований в общие запасы урана на месторождениях не превышает сотых или тысячных долей процента. Основным рудным минералом в месторождениях Березовое и Горное является бета-уранофан, отлагающийся в щелочной обстановке (Черников, 1981; 2001; Типоморфизм..., 1989, с. 481–485). Минерал вверх по разрезу с увеличением pH просачивающихся сверху вод замещается уранофаном, а с глубин 150–50 м в слабосильных условиях – желтым отенитом (рис. 3). Далее к поверхности, в слабо восстановительной кислой среде, желтый отенит, уранофан и бета-уранофан постепенно уступают место темно-зеленому отениту (рис. 4), содержащему U^{4+} . Около поверхности в этом случае наблюдается редкое явление. Здесь отмечается не увеличение окисленности руд, что обычно происходит, а восстановление урана (VI), содержащегося в ураниле, до четырехвалентной формы, вследствие поступления органического вещества, вымываемого из почв и заболоченных участков. На месторождении Горное отмечалось небольшое количество казолита, а на месторождении Березовое среди выделенных разновидностей отенитов в единичных случаях встречался сабугалит. На месторождениях Северное и рудопроявлениях Шумиловского массива,

где интенсивнее проявился грейзеновый этап минерализации, помимо бета-уранофана, уранофана и отенитов, широко распространены торбернит и арсенаты уранила: цейнерит, ураноспинит и реже другие минералы.

В рудах Дурулгуевского месторождения (юг Восточного Забайкалья), в которых обнаружены только минералы уранила, наиболее распространенным является отенит. Именно в этом месторождении был впервые в России в 1958 году встречен темно-зеленый отенит, содержащий четырехвалентный уран (Черников и др., 1964). Реже здесь отмечались торбернит (рис. 5) и сабугалит. Минералы уранила ассоциируют с глинистыми минералами, лимонитом и оксидами марганца. На месторождениях Лашо (Франция) главным рудным минералом является парсонсит (Branche *et al.*, 1951). Он развивается по трещинам и пустотам дымчатого кварца в ассоциации с опаловидным кварцем, церусситом, пироморфитом, лимонитом, оксидами марганца. Редко в этих ассоциациях отмечаются другие минералы уранила — торбернит, отенит, ренардит, казолит. В рудопроявлениях на плато Сила в Калабрии (Южная Италия) описан только отенит (Образование..., 1976, с. 41 — 46).

Карнотит является единственным рудным минералом, установленным в калькретах Йилирри в Западной Австралии, образующим крупные по запасам урана скопления (Sofoulis, 1962; Premoli, 1976; Образование..., 1976, с. 37 — 53; Лаверов и др. 1983). Минерал встречается в виде тонких налетов по плоскостям горизонтального напластования водопроницаемых карбонатных или богатых карбонатом пород. В других ураноносных калькретах Западной Австралии преобладает тюнамунит над карнотитом. Калькреты Намибии и, возможно, Сомали в Африке, близки к калькретам Йилирри, но в Намибии с минералами уранила, кроме того, тесно ассоциирует гипс, но он не содержит урана. Налеты карнотита в Сомали, как и в Йилири, присутствуют в интерстициях, выполняют трещины и пустоты в калькретах, мраморах, глинах и карбонате в участках его разрушения на глубинах до 8 метров от поверхности, только выше уровня грунтовых вод.

Приповерхностные рудные тела типа калькретов Австралии или Африки, но с иным составом минералов уранила, встречаются в северной части месторождения Уч-Кудук (Узбекистан), примыкающей к палеозойскому гранитному массиву. Рудные тела залегают на глубине 1 — 3 м от поверхности в четвертичных суглинках, концентрируясь в

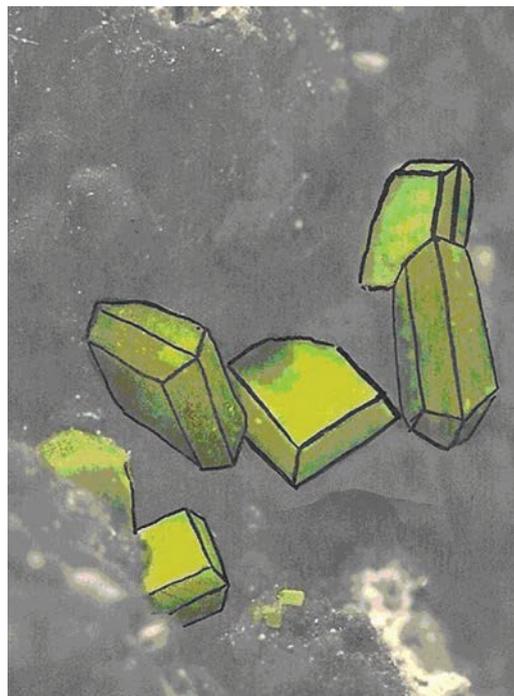


Рис. 5. Кристаллы торбернита в пустоте выщелачивания. Месторождение Дурулгуй. $\times 15$.

основании делювия и пролювия, частично захватывая верхнюю часть карбонатизированных отложений (калькретов). Четвертичные суглинки сильно загипсованы, урановые минералы в них выделяются в виде глазков и мелких линз размером от нескольких миллиметров до 3 см. Глазки и линзы представляют собой мелкозернистые рыхлые массы, пропитанные землистыми силикатами и карбонатами уранила. В тех местах, где мощность оруденелых суглинков наибольшая (3 м), они слабо загипсованы. Полосы сильно загипсованных суглинков здесь располагаются выше урановой минерализации. По мере уменьшения мощности четвертичных отложений рудный горизонт постепенно пространственно совмещается с полосами загипсованных суглинков. При этом процесс загипсования сопровождается выносом урана. Химический анализ проб, взятых по профилям через разрез четвертичных отложений, не показывает какой-либо четкой связи концентрации урана с содержанием кальция, магния, марганца или железа. Пробы, обогащенные SO_4^{2-} , резко обеднены ураном. Под микроскопом наблюдается замещение урановых минералов гипсом. В участках наиболее интенсивного выделения гипса уран выщелочен до 0.02 — 0.03%.

Таблица 1. Возраст урановой минерализации в калькретах и суглинках

| Характеристика проб | U^{234}/U^{238} | Io/U^{238} | Ra/U^{238} | Возраст, тыс. лет |
|---|-------------------|--------------|--------------|-------------------|
| Калькреты с минералами уранила | 2.18 | 1.09 | — | 230 |
| Нижняя часть суглинка, обогащенная минералами уранила | 1.46 | 1.18 | 1.06 | 190 |
| То же | 1.68 | 1.25 | 1.18 | 185 |
| Загипсованный суглинок с минералами уранила | 1.45 | 1.27 | — | 180 |
| Либигит с гипсом | 1.45 | 0.89 | — | 120 |
| Уиксит и хейвиит с гипсом | 1.46 | 0.39 | — | 40 |

В районе рудного поля месторождения Уч-Кудук в подошве четвертичных отложений часто наблюдаются линзы гравелитов с карбонатным цементом, но рудными они являются только в приконтактной полосе с гранитами, в которых наблюдаются реликты урановой минерализации. Урановые минералы, представленные хейвиитом, уикситом и карбонатом уранила типа либигита, в верхней части калькретов выделяются по трещинам и пустотам. Однако наибольшие скопления их отмечаются в суглинках, где они образуют полосу (мощность от нескольких сантиметров до 10–15 см), окрашенную в желтый цвет и следующую по кровле калькретов. Следовательно, урановое оруденение в четвертичных суглинках образовалось ранее загипсования пород, но позже их карбонитизации. Судя по соотношению радиоактивных изотопов в рудных образцах (табл. 1), карбонатизация пород произошла ранее 230 тыс. лет, а загипсование их — позже 40 тыс. лет. Эти данные находятся в удовлетворительном согласовании с ранее полученными результатами (Черников, 1981₂; Chernikov, 1982) по интенсивности формирования минералов уранила в переходные периоды от потеплений к похолоданиям (рис. 6).

Минеральные ассоциации и их зональное расположение определяют формационный тип месторождений и их экономическое значение. Месторождения с минералами уранила могут отрабатываться методом подземного выщелачивания урана на месте естественного залегания руд или кучным выщелачиванием. При такой отработке рудных залежей будет экономически выгодно вовлекать в разработку не только богатые, но и забалансовые руды (до 0.01% U) и блоки пород с низким содержанием урана. Учитывая легкую растворимость минерала, можно допускать использование для отработки пород с 0.005% U, а может быть, и ниже, в приповерхностных шрекингеритовых аккумуляциях Казахстана, Монголии, возможно, США (FrondeI, 1958; Sheridan *et al.*, 1961) и других аридных районов. Запасы урана в таких мес-

торожениях могут значительно увеличиваться, возможно, до крупных и даже суперкрупных. В Монголии, например, в месторождении Нарс (Минералы Монголии, 2006, с. 328) шрекингеритовые скопления прослеживаются поверхностными горными выработками на протяжении 11 км по простирающуюся рудоносных пластов. Обширные площади со шрекингеритовой минерализацией зафиксированы в других районах Монголии, Южного и Центрального Казахстана, в Киргизии.

Урановые минералы неокисленных промышленных руд

В промышленных рудах, не затронутых окислением, минералы урана представлены меньшим количеством видов: оксидами (урановые черни, настуран, уранинит), титанатами (браннерит и переходные разности его), силикатами (коффинит и силикаты урана переменного состава), реже фосфатами и молибдатами урана (IV). Кроме того, в месторождении Радиум Хил, Южная Австралия, где урановые руды связаны с высокотемпературными гидротермальными жилами, рудным минералом считается слабо изученный давидит, в котором железо частично замещено редкими землями и ураном. В рудах стран бывшего Советского Союза он не встречался. Многие исследователи представляют этот минерал как ильменит с включениями уранинита.

Урансодержащие минералы представлены апатитом, оксидами и силикатами титана, оксидами и гидроксидами ниобия и тантала, циркония и тория, глинистыми минералами, цеолитами и другими. Отмечается большое разнообразие минеральных ассоциаций урановых и урансодержащих видов с не урановыми минералами (Лаверов и др., 1992) и существенные изменения состава урановых минералов и их свойств. Автором описано 11 минералогических типов руд России и сопряженных стран (Черников и др., 1997; Chernikov, 1996; 1998; 2006/2007). Среди выделенных типов отсутствуют борнитовые и

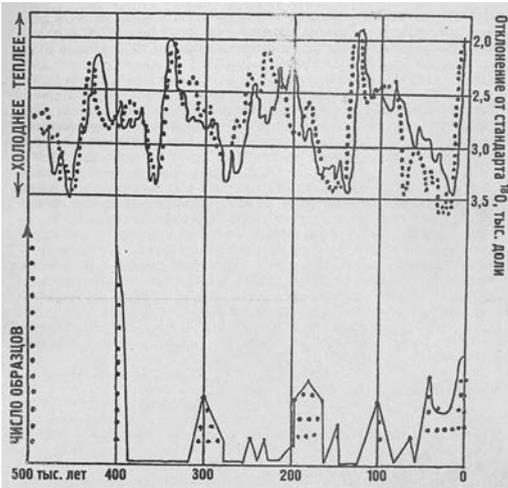
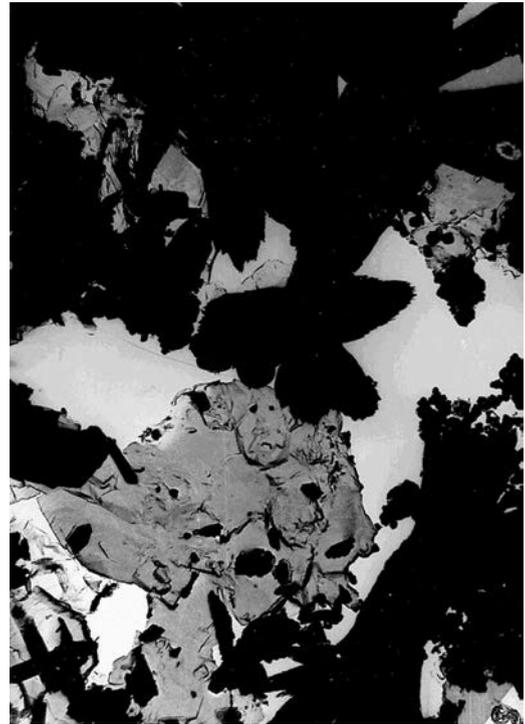


Рис. 6. Соотношение изменения изотопов кислорода в океанических осадках (верхние кривые) и интенсивности минералообразования в окисленных урановых рудах (нижняя кривая) в течение последних 500 тысяч лет. Сплошная верхняя линия получена Ч. Эмилиани (Emiliani, 1978); точечная кривая — К. Кови (1984); нижняя кривая — А.А. Черникова (Черников, 1981; Chernikov, 1982).

Рис. 7. Кристаллы коффинита (темное), Месторождение Стрельцовское. Юго-Восточное Забайкалье. $\times 2000$. Фото: В.Т. Дубинчук.



халькопиритовые руды с настураном (очень редко с браннеритом), самородным золотом и минералами серебра в гематитовых брекчиях, которые отмечаются в крупнейшем в мире месторождении Олимпик Дэм в Южной Австралии. Нет в России и сопряженных странах руд с уранинитом (реже настураном, браннеритом, коффинитом, урансодержащим углеродистым веществом) и самородным золотом, характерных для докембрийской системы Витватерсранда в ЮАР. С другой стороны, браннеритовый тип руд с самородным золотом в калиево-полевошпатовых метасоматитах, как и некоторые другие разности, описанные нами, являются оригинальными или редко отмечающимися в других урановых регионах мира. Все эти руды достаточно полно охарактеризованы. Поэтому конкретные изменения состава руд позволяют оценить физико-химические параметры их формирования, формационные типы минеральных скоплений и их возраст, глубину эрозионного среза и другие особенности, важные в научном и практическом значении. Так установлено, что выявленное нами (Черников и др., 2008) изменение минерального состава и размерности минеральных выделений в рудах Стрельцовской структуры Юго-Восточного Забайкалья по мере просачивания подземных вод сверху

вниз является закономерностью формирования минерального сообщества, отмечаемой и в живой природе. На границе атмосферы и земли наряду с простейшими микроорганизмами обитают высшие существа и обладающие, к тому же, наибольшими размерами, тогда как на глубине (от сотен метров до нескольких километров) — только простейшие микроорганизмы. В верхних горизонтах Стрельцовской структуры минералы урана часто являются хорошо раскристаллизованными (рис. 7) и образуют наиболее крупные кристаллы. С глубиной размер их уменьшается, и с 1500 до 2600 м они являются плохо раскристаллизованными или рентгеноаморфными, представляя собой наноразмерные выделения уран-силикатов и уран-титановых, реже уран-оксидных, образований. Они обычно гидратированы, и состав их меняется от коффинита до браннерита или оксидов урана и титанатов типа анатаза, ильменита или титаномагнетита. В подавляющем большинстве этих образований содержание PbO ниже сотых долей процента, что свидетельствует об их молодом геологическом возрасте и формировании минералов из метеорных вод, инфильтрующихся от поверхности в глубинные горизонты месторождения. При этом вывод о метеорном происхождении минералообразующих растворов согласуется с

ранее полученными результатами (Андреева и др., 1996, 1998; Черников и др., 2008, 2009₂). Общность в наблюдаемом формировании минерального вещества и живой природы в вертикальном разрезе приповерхностных горизонтов Земли является фундаментальной закономерностью.

Заключение

Установленное значительное влияние процессов приповерхностного и глубинного гипергенеза на рудообразование в Стрельцовской структуре и некоторых других регионах позволило заметно изменить поисково-разведочные и оценочные критерии, подробно рассмотренных ранее (Черников и др., 2009₁), для основных типов урановых месторождений. Можно привести несколько районов, которые, наиболее полно отвечают этим критериям: **1.** Севернее Стрельцовской структуры: а — в отложениях Восточно-Урулюнгуйской впадины; б — вдоль Урулюнгуйской зоны разломов, оперяющих и секущих её структурах фундамента; в — в породах фундамента северного борта Восточно-Урулюнгуйской впадины, прежде всего, вдоль ССВ зоны разломов, от Кислого ключа с содержанием урана в воде $1 - 2 \cdot 10^{-4}$ г/л и севернее известного в районе радонового источника Ямкун. Еще севернее в Восточном Забайкалье Оловское месторождение со стратиформными и полигенными рудами является недостаточно разведанным. В первую очередь, руды в гранитах фундамента должны быть оценены как по простиранию рудных жил и зон, так и на глубину. **2.** В Северном Прибайкалье таким критериям наиболее полно отвечает Аakitканский район (Голубев и др., 2008; Толкачев, 2008; Бавлов, Машковцев, 2009; Шашорин, 2009) и Чара-Олекминский блок пород. **3.** Западно-Сибирская плита, где сочетание процессов глубинного преобразования глинистых пород, обогащенных ураном, с разгрузкой глеевых рудоформирующих пластовых вод нефте-газозосных бассейнов, позволяет поддержать возможность выявления крупных уран-многометалльных месторождений в Чулимо-Енисейской впадине, а так же инфильтрационных месторождений, связанных с Алтае-Саянским и Енисейскими кряжами или месторождений иного генетического типа в пределах Западно-Сибирской плиты (Воробьев и др., 2008; Домаренко и др., 2008). В юго-западной окраине Западно-Сибирской плиты (описываемой часто, как Уральский регион) известны инфильтрационные месторождения урана,

оруденение которых локализовано в отложениях речных палеодолин, врезанных в породы фундамента (Кондратьева, Нестерова, 1997; Халезов, 2009). Перспективными на этот тип руд остаются северо-восточная окраина плиты и регионы, связанные с Алтае-Саянским и Енисейскими кряжами. Первостепенной задачей для этих районов является выявление достаточно проявленных и протяженных зон пластового окисления или речных палеодолин, врезанных в породы фундамента.

Кроме того, дополнительно к комплексным уранованадиевым рудам (Черников, 1997, 2001; Черников и др., 2000, 2005, 2007, 2009₁) назрела необходимость вовлечения в промышленное освоение в качестве уранового сырья редкометалльного оруденения и, особенно, карбонатитовых месторождений, учитывая комплексный характер их руд (промышленные содержания урана, тантала, ниобия, фосфора, циркония и других химических элементов). Попутная добыча урана, наряду с золотом, серебром и платиноидами, осуществляется уже из апатитсодержащих карбонатитов Палабора, ЮАР, (The geology..., 1976; Лавров и др., 1983). В них обнаружено крупное медное месторождение, содержащее в рудах 0.01 — 0.001% урана. Медные руды образуют штокообразное тело, сечением 1.4 x 0.8 км, в центре карбонатитового массива и прослеживаются до глубины более 1000 м. В рудах установлен халькопирит, борнит, кубанит, халькозин, пирротин, пентландит, миллерит, бравоит, линнеит, апатит, магнетит, титаномagnetит, урансодержащий торит, бадделеит, вермикулит и реже другие минералы. Более богатые урановые карбонатитовые руды были разведаны в Канаде, в провинции Онтарио — месторождение Ньюмен, на островах Мониту, озеро Ниписсин. Главным рудным минералом этих руд является бетафит (гатчетолит) — титанотанталониобат урана из группы пирохлора-микролита. Его состав $(Ca, Na, U)_2 (Ti, Nb, Ta)_2 O_6 (O, OH, F)$ отличается от пирохлора и микролита более высоким содержанием урана (до 30% U_3O_8 при колебании Nb_2O_5 от 25 до 45%) и примерно таком же — Ta_2O_5 . Кроме того, в нем почти всегда присутствует торий в количестве целых процентов и редкие земли — до десятых долей или первых целых процентов. Такие комплексные руды часто содержат фосфор, промышленные концентрации урана и ниобия или тантала и других элементов. На месторождении Ньюмен, например, к 1955 году выявлено 5431 тыс. тонн такой руды с содержанием

~ 0.53% Nb_2O_5 и ~ 0.039% U_3O_8 (Rowe, 1954; Gill, Owens, 1956; Хейнрих, 1962). Дальнейшая разведка урансодеждающих комплексных карбонатитовых месторождений специально на урановые руды была прекращена в связи с открытием в том же регионе богатых урановых месторождений. Тем не менее, в результате поисково-разведочных работ только на комплексные тантало-ниобиевые руды, в мире установлено около 50 ураноносных карбонатитов, примерно третья часть их находится в России. Ряд таких комплексных карбонатитовых месторождений содержат 0.05%, иногда 0.12% U_3O_8 . Но чаще эти концентрации изменяются от 0.01 до 0.03%, и запасы только урана достигают средних и крупных размеров при значительных концентрациях других химических элементов. Так, в некоторых зонах Белозиминского и Среднезиминского месторождений, Восточные Саяны, Россия, разведанные запасы бетафитовых руд оцениваются в 10 тыс. тонн Ta_2O_5 и U_3O_8 с примерно равным содержанием их в рудах — 0.012–0.028%. В коре выветривания Белозиминского месторождения разведанные запасы по категориям $B + C_1 + C_2$ составляют около 1 млн. тонн Nb_2O_5 , при содержании его 0.5% в рудах, около 40 тыс. тонн Ta_2O_5 и примерно столько же U_3O_8 (при 0.014% этих оксидов в рудах); 3 млн. тонн редких земель, при содержании 1.8% TR_2O_3 ; и 15 млн. тонн P_2O_5 , при содержании 13.6% его в рудах (Белов и др., 2008). Имеются и другие примеры, позволяющие констатировать наличие комплексных бетафитовых руд с содержанием 0.01–0.05% U_3O_8 , и формирующих крупные запасы урана. Поэтому, нужно считать весьма перспективным вовлечение в разработку крупных комплексных карбонатитовых руд России, особенно, учитывая импорт ниобия, тантала, а также дефицит фосфора и урана в нашей стране.

В недалеком будущем, очевидно, будут вовлекаться в эксплуатацию комплексные сульфидные уран-фосфорные залежи с редкими металлами месторождений Калмыкии (Столяров, Ивлева, 2008; Шарков, 2008) и сходные рудные объекты в других регионах.

Таким образом, большое разнообразие урановых и урансодержащих минеральных видов и их ассоциаций позволяет определять: 1 — физико-химические параметры среды формирования минеральных образований по конкретным их изменениям; 2 — возраст минеральных видов; 3 — формационные типы урановых руд; 4 — интенсивность экзогенного выщелачивания или обо-

гащения ураном определенных горизонтов эндогенных рудопроявлений и месторождений и другие данные, важные в научном и практическом значении. При этом, возрастающий дефицит энергетических ресурсов (Лаверов, 2009) в ближайшем будущем может быть устранен не только за счет более широкого вовлечения в разработку богатых руд, в том числе вновь открываемых, но также бедных комплексных руд и бедных руд с минералами уранила. Запасы таких руд могут достигать крупных и сверхкрупных размеров при снижении бортового содержания урана до 0.005% или ниже. Альтернативы этому пока не существует.

Литература

- Андреева О.В., Алешин А.П., Головин В.А. Вертикальная зональность околорудных преобразований на месторождениях урана Антей-Стрельцовское (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. **1996**. Т. 38. Т. 5. С. 396–411.
- Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. **1998**. Т. 40. Т. 3. С. 205–220.
- Арбузов С.И., Машенкин В.С., Рихванов Л.П. Ресурсный потенциал в зонах окисления угольных месторождений Северной Азии и перспективы его освоения // Тезисы Второго международного симпозиума «Уран: ресурсы и производство» М.: ВИМС. **2008**. С. 16.
- Бавлов Б.Н., Машковцев Г.А. Минерально-сырьевая база урана России: состояние, перспективы освоения и развития // Сборник трудов. Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и потребление. М.: ВИМС. **2009**. С. 11–23.
- Белов С.В., Фролов А.А., Чистов Л.Б. Промышленные перспективы урансодержащих карбонатитовых месторождений // Тезисы Второго международного симпозиума «Уран: ресурсы и производство». М.: ВИМС. **2008**. С. 20.
- Воробьев Е.А., Новгородцев А.А., Домаренко В.А. Возможность выявления ураново-полиэлементного оруденения в Западно-Сибирском нефтегазоносном бассейне // Тезисы Второго международного симпозиума «Уран: ресурсы и производство». М.: ВИМС. **2008**. С. 30.
- Голубев В.Н., Макарьев Л.Б., Былинская Л.В. Отложение и ремобилизация урана в Се-

- веро-Байкальском регионе, по данным анализа U-Pb-изотопных систем урановых руд // ГРМ. **2008**. Т. 50. № 6. С. 548–557.
- 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.
- Домаренко В.А., Воробьев Е.А., Мазуров А.К., Новгородцев А.А., Рихванов Л.П.* Критерии ураноносности Западно-Сибирской плиты // Тезисы Второго международного симпозиума «Уран: ресурсы и производство». М.: ВИМС. **2008**. С. 40–42.
- Евсеева Л.С., Перельман А.И.* Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Госатомиздат. **1962**. 240 с.
- Кондратьева И.А., Нестерова М.Н.* Литолого-геохимические особенности урановых месторождений в мезозойских речных палеодолинах // Литология и полезные ископаемые. **1997**. № 6. С. 577–594.
- Кови К.* Орбита Земли и ледниковые эпохи // В мире науки. **1984**. № 4. С. 303–316.
- Константинов М.М., Куликова Е.Я.* Урановые провинции. М.: Атомиздат. **1960**. 306 с.
- Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. СПб: Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В. Плеханова. **1998**. 324 с.
- Кулиш Е.А., Михайлов В.А.* Урановые руды мира. Геология, ресурсы, экономика. Киев. НАН Украины. **2004**. 276 с.
- Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В.* Зарубежные месторождения урана. М.: Недра. **1983**. 320 с.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Шумилин М.В.* Урановые месторождения стран дружества: Основные промышленно-генетические типы и их размещение // ГРМ. **1992**. Т. 34. № 2. С. 3–18.
- Лаверов Н.П.* Топливо-энергетические ресурсы: состояние и рациональное использование // Сборник трудов. Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и потребление. М.: ВИМС. **2009**. С. 6–10.
- Минералы Монголии. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН. **2006**. 352 с.
- Минералогия рудных месторождений. М.: Наука. **1983**. 182 с.
- Образование месторождений урана. М.: Мир. **1976**. 764 с.
- Столяров А.С., Ивлева Е.И.* Ергенинский ураново-редкометалльный район Калмыкии // Минеральное сырьё. № 19. М.: ВИМС. **2008**. 170 с.
- Толкачев А.Е.* Возможные направления развития работ на уран в Ачитканском районе // Тезисы Второго международного симпозиума «Уран: ресурсы и производство». М.: ВИМС. **2008**. С. 117.
- Типоморфизм минералов. М.: Недра. **1989**. 560 с.
- Халезов А.Б.* Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. М.: ВИМС. **2009**. 146 с.
- Хейнрих Э.Н.* Минералогия и геология радиоактивного минерального сырья. М.: Изд. иностр. лит. **1962**. 606 с.
- Черников А.А., Сигоренко Г.А., Князева Д.Н.* Некоторые новые данные о четырехвалентном уране в темно-зеленом отените. // Химический анализ минералов и их химический состав. М.: Наука. **1964**. С. 94–104.
- Черников А.А.* Поведение урана в зоне гипергенеза. М.: Недра. **1981**. 208 с.
- Черников А.А.* Типоморфизм минералов урана и его практическое значение // Сов. геология. **1981**₂. № 4. С. 85–98.
- Черников А.А., Зенченко В.П., Шивторов И.В.* Ассоциация минералов уранила с цеолитами в новом типе урановых месторождений // Минералогия рудных месторождений. М.: Наука. **1983**. С. 5–13.
- Черников А.А.* Соотношение процессов коры выветривания и гипогенных факторов при формировании комплексных (V, Pd, Pt, Au, U) месторождений онежского типа // Главные геологические и коммерческие типы месторождений кор выветривания и россыпей, технологическая оценка и разведка. М.: ИГЕМ РАН. **1997**. С. 117.
- Черников А.А., Пеков И.В., Минаева Е.А.* К истории изучения минералов урана отечественными исследователями // Записки ВМО. **1997**. Вып. 4. С. 111–128.
- Черников А.А., Хитров В.Г., Белоусов Г.Е.* Роль углеродистого вещества в формировании крупных полигенных комплексных месторождений онежского типа // Углеродод. формации в геолог. истории. Петрозаводск: КНЦ РАН. **2000**. С. 194–199.
- Черников А.А.* Глубинный гипергенез, минерало- и рудообразование. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН. **2001**. 100 с.
- Черников А.А., Дорфман М.Д.* Минеральный состав редкометалло-урановых, бериллиевых с изумрудом и других месторождений в эндо- и экзоконтактах гранитного массива Куу (Центральный Казахстан) //

- Новые данные о минералах. Вып. 39. **2004**. С. 73–81.
- Черников А.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др.* Новые данные о ванадиевом гематите, микро- и нанокристаллах ассоциирующих с ним минералов благородных металлов, меди, цинка и железа // Новые данные о минералах. **2005**. Вып. 40. С. 65–71.
- Черников А.А., Дубинчук В.Т., Толкачев А.Е. и др.* 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.* Научное и практическое значение особенностей минерального состава урановых руд. // Тезисы V международного симпозиума – Минеральное разнообразие, исследование и сохранение. Софийская инициатива «сохранение минерального разнообразия». София, Болгария. 9–12 октября 2009. С. 15.
- Черников А.А., Дубинчук В.Т., Ожогин Д.О., Чистякова Н.И.* Минералогические особенности некоторых многометалльных месторождений России, Средней Азии, Казахстана и роль минералов-сорбентов при концентрации металлов в зоне гипергенеза // Новые данные о минералах. **2009**. Вып. 44. С. 45–54.
- Черников А.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И., Нечелюстов Г.Н.* Особенности строения, минералогии и геохимии месторождений юго-восточного Забайкалья для прогноза урановых руд // Сборник трудов. Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и потребление. М.: ВИМС. **2009**. С. 275–285.
- Шарков А.А.* Ураново-редкометалльные месторождения Мангышлака и Калмыкии, их генезис. М.: Эслан. **2008**. 220 с.
- Шашорин Б.Н.* Тектоническая эволюция и ураноносность Аkitканского вулканогенного пояса // Сборник Трудов. Второй международный симпозиум. Уран: ресурсы и потребление. М.: ВИМС. **2009**. С. 286–295.
- Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Кол. авторов под ред. А.И. Перельмана. М.: Атомиздат. **1965**. 324 с.
- Branche G., Chervet J., Guillemmin C.* Nouvelles espèces uranifères francaises // Bull. Soc. Franc. minéral. et crist. **1951**. N. 74. P. 457–487.
- Gill J.E., Owens O.E.* Niobium-uranium deposits near North Bey, Ontario // 20th Congr. Geol. Intern. Resumenes. **1956**. P. 90.
- The Geology and the Economic Deposits of Cooper, Iron and Vermiculite in the Palabora Igneous Complex. Geol. and Mineralog. Staff // Econ. Geol. **1976**. V. 71. N. 1. P. 177–192.
- Chernikov A.A.* Typomorphism of uranium minerals and its practical significance // Intern. Geolog. Review. **1982**. Vol. 24. N. 5. P. 567–576.
- Chernikov A.A.* The history of the study of uranium minerals by Russian mineralogists // Symposium on the History of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Abstracts. Munich (Germany). **1996**. P. 25.
- Chernikov A.A.* Mineralogical types of uranium ores of Russia and contiguous to countries, mineralogical types of large and superlarge deposits // 17th General meeting. International Mineralogical Association. Toronto. **1998**. P. A142.
- Chernikov A.A.* Mineralogical features of uranium ores, large and superlarge deposits of Russia and adjacent countries // Global Tectonics and Metallogeny. Vol. 9. Nos. 1–4, **2006/2007**. P. 21–30.
- Emiliani C.* The cause of the ice ages // Earth and Planet, Sci. let. **1978**. V. 73. N. 73. P. 349–354.
- Fron del C.I.* Systematic mineralogy of uranium and thorium. Washington, U. S. Govt. Print. Off. **1958**. 400 p.
- Premoli C.* Formation of and prospecting for uraniferous calcretes // Australian mining. **1976**. Vol. 68. N. 4. P. 13–16.
- Rowe R.B.* Notes on geology and mineralogy of the Newman colubium-uranium deposit, Lake Nipissing, Ontario // Can. Geol. Survey. Paper 54. **1954**. P. 5.
- Sheridan D.M., Maxwell C.H., Collier I.T.* Geology of the Lost Creek Schroeckingerite Deposits Sweetwater County, Wyoming // Geol. Surv. Bull. 1087-J. U.S. **1961**. P. 391–478.
- Sofoulis J.* The occurrence and hydrological significance of calcrete deposits in Western Ausstralia // Geol. Surv. Western Australia. Ann. Rept. **1962**. P. 38–42.