ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, 2022, том 64, № 1, с. 135–150

УДК 553.07

ОСОБЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ЭКЗОГЕННЫХ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

© 2022 г. Б. Т. Кочкин*

[a]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

**e-mail: btk@igem.ru*

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.
После доработки 16.02.2021 г.
Принята к публикации 14.07.2021 г.

Для образования месторождений урана из окислительных вод поверхностного происхождения необходимо сочетание нескольких условий и процессов разных рангов, составляющих специфическую минеральную систему. Анализ экзогенных месторождений разного масштаба и качества руд из различных регионов мира показал, что среди совокупности критических процессов, необходимых для формирования крупных месторождений и обширных провинций, особую роль играют глобальные тектонические движения. Геодинамический режим с умеренной вертикальной дифференциацией блоков земной коры наиболее благоприятен для развития в приповерхностных условиях гидродинамической инфильтрационной рудообразующей системы. Инфильтрационная артезианская система способна функционировать в течение миллионов и десятков миллионов лет, что позволяет накопить на геохимическом восстановительном барьере большие запасы урана. Требуемый режим характерен для регионов, находящихся в определенной геотектонической позиции. Таковы, например, периферийные районы орогенных поясов вдоль границ тектонических плит, а также обрамление некоторых внутриплитных долгоживущих глубинных разломов. В этих же регионах возможно соседство инфильтрационной и элизионной гидродинамических систем. На локальных участках взаимодействия подземных вод различного происхождения и состава появляются условия для особенно эффективного концентрирования урана в рудах. Ограничения на продуктивность гидродинамической инфильтрационной рудообразующей системы накладывают исторические факторы, предопределяющие формирование источника урана и литологические условия локализации руд, также климатические условия времени функционирования системы и пострудные условия, определяющие сохранность минерализации, накопленной в системе. Выявленные закономерности могут служить основой для прогноза древних провинций экзогенных урановых месторождений.

Ключевые слова: урановые месторождения, экзогенный эпигенетический класс, генетическая модель, прогнозные критерии

DOI: 10.31857/S0016777022010038

ВВЕДЕНИЕ

Урановые месторождения, образованные из метеорных вод в экзогенных условиях, относятся к нескольким геолого-промышленным типам по классификации МАГАТЭ (Geological ..., 2018). Наиболее важный из них – “в песчаниках” (тип 9). Особая ценность месторождений этого типа для промышленности состоит в том, что их освоение ведется экологичным и экономичным способом скважинного подземного выщелачивания, который дал в 2019 году примерно 57% от общего объема мирового производства урана (Uranium ..., 2020).

Разработка теории экзогенного эпигенетического уранового рудообразования, завершившаяся в основном в 70-х гг. прошлого века, дала возможность быстрого обнаружения по всему миру многочисленных месторождений этого и сопряженных промышленных типов благодаря эффективному поисковому признаку – границе зоны окисления, которая контролирует рудные скопления. Большинство месторождений этого генезиса современные (альпийские) и факторы их рудообразования доступны для анализа. Эта уникальность месторождений, многие из которых продолжают формироваться прямо сейчас, позволила изучать условия и процесс их образования непосредственно. Связь урановых концентраций с границей зоны окисления была обнаружена в середине 50-х гг., а базовые научные публикации появились уже в середине 60-х гг. прошлого века (Экзогенные ..., 1965; Finch, 1967). В них были сформулированы многие особенности локализа-

ции руд на рассматриваемых месторождениях и установлены региональные предпосылки их формирования, определены важнейшие поисковые критерии и признаки.

На сентябрь 2019 г. (World ..., 2020) были известны 1430 месторождений урана этого типа (почти 40% от общего числа) с суммарными запасами ок. 5 млн т (ок. 8% общих ресурсов урана в мире). К сожалению, этот практический успех теории резко понизил вероятность найти новые крупные месторождения альпийского возраста. Именно в силу применения эффективного поискового признака практически все осадочные бассейны оказались хорошо изучены. Перспективы обнаружения интересных для промышленности объектов связаны с древними геологическими эпохами и нетрадиционными условиями реализации экзогенной рудообразующей гидродинамической системы.

Важный теоретический этап практической деятельности по восполнению минерально-сырьевой базы – выявление факторов, определяющих формирование месторождений. Это справедливо и для урана – сырья для атомной энергетики. В российской традиции прогноз новых объектов строится на генетических представлениях, в зарубежной – исходя из условий локализации "эталона". Так, в отношении рассматриваемых месторождений урана в СССР появился термин "экзогенные эпигенетические" (Экзогенные ..., 1965), а в США уже было распространено определение "песчаниковый" тип, например, (Hostetler, Garrels, 1962).

Систематизация урановых месторождений, ориентированная в целом на поиски новых объектов, развивалась преимущественно в этих двух направлениях: эмпирическом и теоретическом. Эмпирический подход, который основан на особенностях вмещающих пород или строения рудных тел, наиболее четко реализован Ф. Далькампом (Dahlkamp, 1978), и впоследствии был положен в основу классификации, принятой и развиваемой МАГАТЭ (Geological ..., 2018). Этот подход, удобный для классификации данных о ресурсах урана, затрудняет оценку перспектив новых районов и вовсе бесполезен для поисков еще неизвестных типов урановых концентраций. Генетический подход, традиционно развивавшийся российской геологической школой (Kazansky, Laverov, 1977; Константинов и др., 2010), также имеет ограничения в силу разных причин. Месторождения, особенно мелкие, отрабатываются быстрее, чем изучаются, мешают ограничения в доступе со стороны собственников или государства, наконец, многие месторождения так сложны, что оказываются среди объектов спорного генезиса (и, следовательно, в неопределенном прогнозном поле) даже после десятков лет научного внимания. Наиболее продвинутая глобальная генетическая классификация урановых месторождений, формирующихся на различных этапах геологического цикла, представлена в работе М. Кюнэ (Cuney, 2009).

Во всех упомянутых классификациях практически выпадает из рассмотрения такая природная особенность рудообразующих процессов, как их эволюция, вызванная медленным изменением глобальных условий в земной коре и атмосфере, которые в основном задаются эндогенными и экзогенными процессами, благоприятными (или нет) для возникновения рудообразующих систем. На такую эволюцию обратил внимание А.И. Тугаринов в 60-е гг. прошлого столетия (Тугаринов, 1967). Первая попытка дать анализ уранового рудообразования на эволюционном фоне представлена в работе В.И Казанского, Н.П Лаверова и А.И. Тугаринова (1978).

М.В. Шумилин (2011, 2015) объединил глобальный и эволюционный анализ циклов уранового рудообразования. В упрощенном виде это выглядит следующим образом. Новые месторождения урана неизменно появляются в одних и тех же крупных блоках земной коры, несмотря на то, что глобальное положение этих блоков периодически меняется в истории суперконтинентальных циклов. Способность урана к "круговороту" в пределах одних и тех же блоков земной коры связана с тем, что в орогенных зонах происходит рассеивание урана из древних образований с его концентрацией в молодых осадках в различных экзогенных месторождениях. Поступление урана в недра Земли связывается с погружением урансодержащих осадков в зонах субдукции. Там они переплавляются, и с магматогенными продуктами уран вновь выносится вверх. Как следствие, в истории развития всех урансодержащих провинций чередуются периоды преимущественно экзогенного и преимущественно эндогенного рудообразования.

Еще один теоретический подход к классификации урановых месторождений сформулирован на базе системного анализа и развивается в основном австралийскими геологами. Системный анализ позволяет учитывать структурную организацию рудоформирующих процессов в их совокупности. Этот подход получил название "концепция минеральных систем" (Wyborn et al., 1994; Descriptive ..., 2020). Концепция минеральных систем ориентирована на анализ всех рангов геологических факторов и процессов, которые играют критическую роль в мобилизации рудных компонентов из их источника, транспортирования и аккумуляции в более концентрированной форме, а также сохранности руд в последующей геологической истории. С позиции системного анализа каждый процесс – часть более общего процесса и,

одновременно, состоит из нескольких частных процессов. С точки зрения прогноза, рудообразующая минеральная система представляет собой частный случай геологических процессов рассеивания и концентрации вещества. По этой причине объект для прогноза и разведки (регион, район) более обширен, чем конкретное месторождение и рудная жила в нем. Практическая попытка реализации такого подхода с целью прогноза новых для Австралии промышленных типов месторождений, в том числе "песчаниковых", предпринята в работе (Skirrow et al., 2009).

В настоящей статье "концепция минеральных систем" применена к критическим процессам, необходимым для прогноза крупных урановых месторождений экзогенного эпигенетического происхождения. Этому способствуют не только современные теоретические разработки, но и широкий спектр известных на сегодняшний день урановых месторождений, отличающихся по запасам и концентрациям урана в рудах, по условиям и возрасту их образования, а также по степени их сохранности.

ЭКЗОГЕННАЯ РУДООБРАЗУЮЩАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРОГНОЗА

Генетическая концепция экзогенной эпигенетической урановой системы базируется на специфических геохимических свойствах урана, определяющих его поведение в гипергенных условиях. В окислительных подземных водах уран в 6-валентном состоянии прекрасно мигрирует в уранильных комплексах, но, как только условия в подземных водах становятся восстановительными, комплексы разрушаются, уран переходит в 4-валентное состояние и осаждается в виде урановых минералов. Прямые измерения перепада содержаний урана между окислительными и восстановительными водами доказывают рудоформирующую роль подземных вод метеорного происхождения. Геохимическая теория формирования урановых концентраций на восстановительном барьере обоснована в классической работе А.К. Лисицина (Лисицин, 1975).

Источником рудной минерализации могут служить кристаллические породы фундамента, обычно гранитоиды, обломочные осадочные породы, обогащенные ураном, а также разрушающиеся древние месторождения урана. Минеральный состав руд представлен настураном с некоторой долей коффинита и реже нингиоита. Кроме урана при наличии источника в качестве элементов-спутников могут присутствовать его геохимические аналоги селен, молибден, рений, которые также способные изменять валентное состояние на восстановительном барьере. Присутствие в эпигенетических рудах урана других элементов, обычно в микроколичествах, объясняется иным, чем восстановление, механизмом концентрирования. Известны ванадий-урановые месторождения в США (тип 9.2.3 по МАГАТЭ). Ванадий там присутствует в окисленных породах, где он адсорбирован на оксидах железа или находится в форме собственных минералов – ванадатов 6-валентного урана (Geological..., 2018).

Важным компонентом любой минеральной системы являются минерализующие флюиды. В экзогенной инфильтрационной системе – это кислородные нейтральные до слабо щелочных подземные воды атмосферной природы. Они легко растворяют уран (и его спутники) и переносят его к участкам концентрирования. Проникновению кислородных вод в приповерхностные водоносные горизонты препятствуют обильная тропическая растительность или мерзлый грунт. В этой связи важным фактором в рассматриваемой экзогенной рудообразующей системе оказывается климат.

Восстановительные условия в инфильтрационном потоке возникают благодаря наличию в породе органических и минеральных веществ биогенной и абиогенной природы, которые окисляются растворенным в воде кислородом, обычно с участием микроорганизмов. В рудовмещающих породах смена окислительных условий на восстановительные выражается сменой желтой окраски на серую. За этой границей в сероцветных породах накапливается урановая минерализация.

Месторождения окислительного эпигенеза

Выше представлена модель классических экзогенных месторождений урана с окислительной эпигенетической зональностью. Условия миграции подземных вод, которые являются рудообразующим агентом, разделяются на два класса в зависимости от их гидродинамических особенностей (Шмариович, Лисицин, 1982):

а) месторождения грунтового окисления образуются кислородными подземными водами, движущимися в безнапорном режиме или при наличии местных напоров среди локальных водоупорных слоев в близповерхностных условиях;

б) месторождения пластового окисления формируются кислородными подземными водами, движущимися в относительно погруженных пластовых напорных системах (артезианских бассейнах).

Месторождения грунтового окисления – самые распространенные в природе. К этому классу относятся месторождения, локализованные как в четвертичных, так и в древних осадках. По классификации МАГАТЭ (Geological ..., 2018) они относятся в типу 11 "Поверхностные" двух подти-

пов “В торфяных болотах” и “В речных долинах”, а также к подтипу 9.1 “В базальных руслах”. Все они представлены, как правило, мелкими объектами (первые тысячи тонн U и меньше). Размеры тел в виде лент или линз небольшие (до первых км при мощности в метры), концентрации урана – низкие (0.0n% U). В связи с этим они редко оказываются практически значимыми. Примерами этого типа месторождений служит месторождение Санарское в аллювии одноименной реки на Восточно-Европейской платформе в Предуралье, Россия (Халезов, 2017). Месторождения и рудопроявления урана, контролируемые современными зонами грунтового окисления, встречаются как в орогенных областях, так и на платформах, без четкой избирательности тектонической позиции. Они встречаются во многих ландшафтных поясах, начиная от пустынного до умеренно теплого таежного, т.е. везде, где близповерхностные подземные воды содержат кислород и обладают окислительными свойствами, что позволяет им транспортировать уран к месту рудоформирования на восстановительном геохимическом барьере. Климатические условия их образования даже более критичны, чем тектонические. Эти современные концентрации урана можно назвать эфемерными, поскольку, если они не будут перекрыты от эрозии, то будут уничтожены гипергенными процессами.

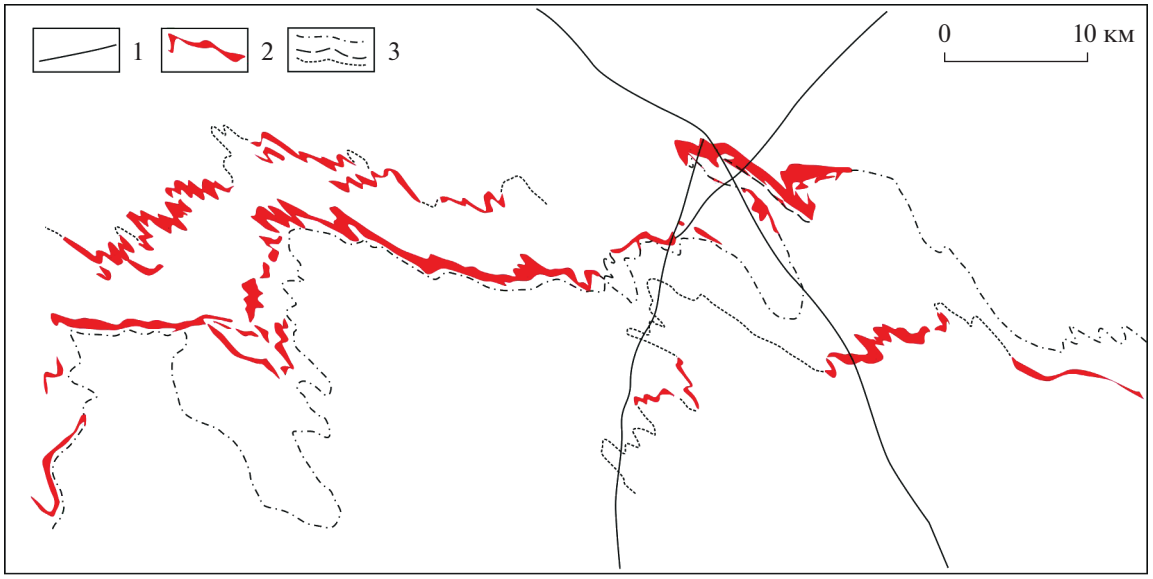
Прогноз расположения эрозионных долин в континентальных комплексах осадочного чехла позволяет обнаруживать скрытые месторождения в палеодолинах, погребенных под мощными толщами более молодых осадков. Пример “палеодолинного” типа (9.1 по МАГАТЭ) – месторождение Долматовское мезозойского возраста в Зауралье, Россия, (Халезов, 2017) с запасами менее 10 тыс. тонн. Из-за древнего возраста рудообразующего процесса, рудоконтролирующая окислительная зональность здесь полностью уничтожена наложенными процессами вторичного восстановления, а рудная минерализация сохранилась только потому, что палеорусла оказались защищены от разрушения перекрывающими осадками мощностью около 400 м.

Основным фактором, сдерживающим формирование масштабных и богатых рудных скоплений рассматриваемого типа, является кратковременность рудообразующего грунтово-окислительного процесса. Локальный характер водоносных бассейнов определяет неустойчивость гидродинамического режима.

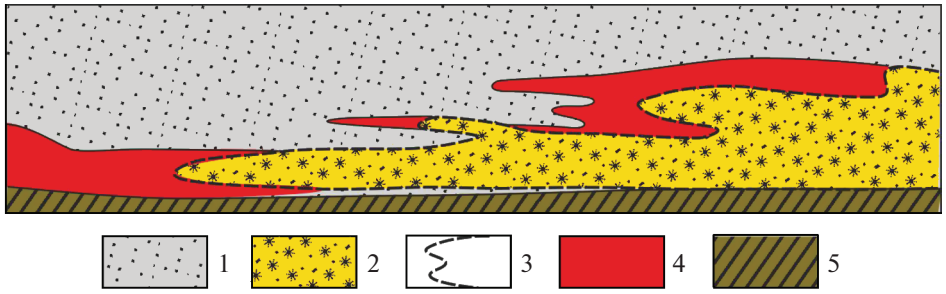
Месторождения пластового окисления (в основном “таблитчатый” и “ролловый” подтипы, 9.2 и 9.3 по МАГАТЭ) имеют основное промышленное значение вследствие значительных масштабов рудных тел. Концентрация урана в рудах выдержанная и сравнительно убогая (обычно 0,n% U). Рудные тела залегают в сероцветных породах водоносных горизонтов артезианских бассейнов. Отличительная особенность месторождений – ярко выраженная рудоконтролирующая граница минерализованных серых песков с окисленными. К этому типу относятся крупнейшие месторождения урана этого типа в мире. Пример – месторождение Мынкудук (ок. 200 тыс. тонн) в Чу-Сырысуйской впадине, Казахстан (фиг. 1). Отдельные рудные тела в плане разделяются безрудными отрезками линий выклинивания зон пластового окисления. В результате месторождение распадается на ряд отдельных участков, которые могут рассматриваться и как самостоятельные месторождения (Урановые ..., 1995).

Масштабы месторождения Мынкудук впечатляют. В плане урановорудные залежи укладываются в субширотную полосу протяженностью около 80 км при ширине примерно 10–15 км и контролируются мощными “многослойными” зонами пластового окисления. В сечении рудные тела имеют серповидную в целом форму (“ролл”), осложненную литологическими неоднородностями вмещающих пород (фиг. 2).

Зоны пластового окисления могут формироваться лишь в артезианских бассейнах с инфильтрационным водонапорным режимом. Для развития зон пластового окисления предпочтительно наличие аридного климата, отвечающего поясам пустынь, сухих и черноземных степей. Пластово-окислительный процесс характерен в основном для внутренних впадин областей постплатформенной тектонической активизации – “субороген-ных” областей платформ, а также для малых артезианских бассейнов высокоамплитудного постплатформенного орогена и прибортовых частей межгорных впадин в пределах гипсометрически высоко поднятых сводовых структур. Масштабы накоплений урана, возникающих на границах зон пластового окисления, находятся в прямой зависимости от нескольких факторов: содержания урана в кислородных водах области инфильтрации (обычно 10^{-5}–10^{-3} г/л), скорости движения вод, длительности процесса и концентрации восстановителей урана в водоносном горизонте. Концентрирование урана на выклинивании зон окисления обеспечивается восстановительной обстановкой, формирующейся в результате метаболизма бактерий, питающихся углефицированными растительными остатками. Наличие в породе рассеянных восстановителей может обеспечить только невысокие концентрации урана в руде из-за постоянного смещения в пространстве геохимического барьера при продвижении фронта зоны окисления. Неравномерность распределения углистых остатков определяет неравномерность распределения и концентрации урана вдоль выклинивания зоны окисления (Лисицин, 1975).



Фиг. 1. Месторождение Мынкудук. План размещения рудных залежей (Геолого-промышленные..., 2008, упрощено). 1 – разломы; 2 – рудные тела; 3 – границы зон окисления в разных горизонтах.

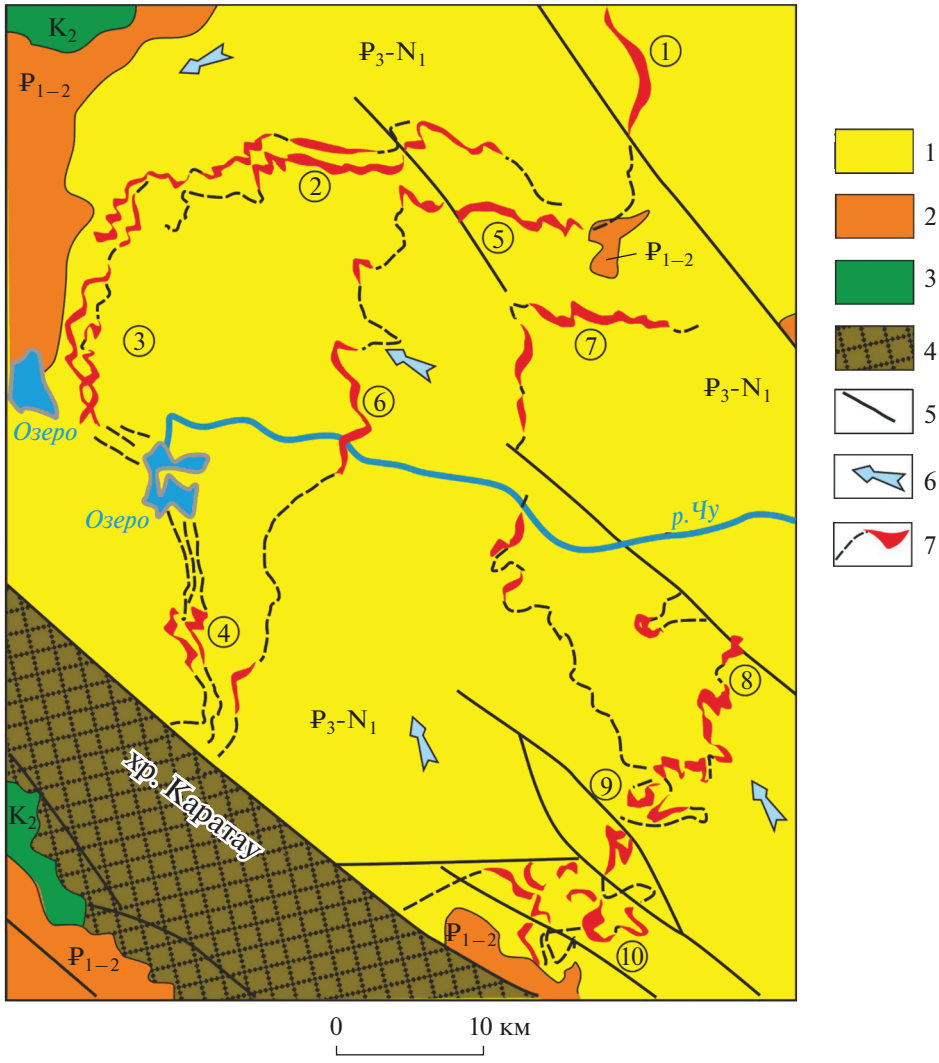


Фиг. 2. Характерная форма рудных залежей месторождения Мынкудук – сдвоенный ролл (Геолого-промышленные..., 2008, упрощено, схема вне масштаба). 1 – первично сероцветные гравийно-песчаные породы и пески с линзами алевритов, 2 – окисленные лимонитизированные породы, 3 – граница выклинивания зоны пластового окисления, 4 – рудные тела: 5 – верхнепалеозойские алевролиты нижнего водоупора.

Протяженность зон окисления зависит от размера артезианского бассейна и может достигать сотен километров. Чу-Сарысуйская впадина, которая располагается на периферии Тянь-Шаньской орогенной области, – лучший пример. Общие запасы урана в ней приближаются к 1 млн тонн. Здесь обнаружены крупнейшие месторождения этого типа в мире Мынкудукское, Инкайское и Буденновское (номера 2, 3 и 4 на фиг. 3). Основные месторождения, имея альпийский возраст, локализованы в меловых отложениях, менее значимые – в палеогеновых осадках (Кисляков, Щеточкин, 2000.).

Считается, что инфильтрация кислородных вод в Чу-Сарысуйском артезианском бассейне началась практически одновременно с началом его формирования в результате неоген-четвертичной тектонической активизации около 20 млн лет назад. Несмотря на очень низкие концентрации урана в кислородных пластовых водах ($n \times 10^{-5}$ г/л), за этот период времени на месторождениях этой впадины накопились огромные ресурсы урана.

Содержание урана в кислородных водах области инфильтрации часто связывают с наличием благоприятных источников урана и условиями дополнительного обогащения им растворов. Такими источниками и условиями могут быть некие разрушающиеся месторождения, первично обогащенные ураном породы, умеренный водообмен в сочетании с испарительным концентрированием в аридном климате. Область питания Чу-Сарысуйской впадины так обширна, что указать какие-либо конкретные источники урана невозможно. Отсюда, видимо, и общее низкое содержание урана в пластовых водах, что не помешало сформировать одну из крупнейших урановых провинций мира.



Фиг. 3. Месторождения Чу-Сарысуйской впадины (Геолого-промышленные..., 2008, с упрощениями). 1–4 – возраст пород, выходящих на поверхность: 1 – олигоцен-неогеновый; 2 – палеогеновый; 3 – меловой; 4 – палеозойский фундамент; 5 – разломы; 6 – направление фильтрации напорных подземных вод; 7 – рудные тела на границах зон пластового окисления.

Месторождения восстановительного эпигенеза

Если в вопросах генезиса (а следовательно, и прогноза) классических месторождений, которые локализуются на выклинивании зон окисления, теоретические дискуссии практически закончились в 80-е гг. прошлого века, то месторождения, особенности которых указывали на то, что их формирование происходило при участии эндогенных веществ, стали предметом дискуссии и остаются им до сих пор.

Это, в частности, касается вопросов, поставленных в статье Е.М. Шмариовича и А.К. Лисицина (1982), о соотношении экзогенных и эндогенных факторов в возникновении некоторых урановых объектов, интерпретации развитых в их пределах эпигенетических изменений пород, зональности и стадийности этих преобразований, их контроля дизъюнктивной тектоникой.

Месторождения восстановительного эпигенеза образуются при участии восходящих восстановительных термальных растворов, что сближает их с объектами гидротермального класса. По представлениям, изложенным в статье (Шмариович, Лисицин, 1982), на месторождениях с восстановительным эпигенезом, кроме урановых минералов в 4-валентной форме и дисульфидов железа, находящихся с ними в парагенетической ассоциации, присутствует комплекс преобразований пород, сопровождающийся дополнительным привносом элементов в восстановленных формах. Они включают сульфидную серу, закисное железо, органический углерод и другие, в том числе породообразующие, элементы.

В статье (Кочкин, 2020) представлена сводка примеров “восстановительных новообразований”, встреченных на урановых месторождениях экзогенного эпигенетического класса, главным образом, песчаникового типа (тип 9 по МАГАТЭ). Не все из этих новообразований при кажущемся сходстве минерального выражения оказались причастны к урановому рудоформированию. В некоторых случаях растворы, ответственные за эту минерализацию, только обеспечивали консервацию и сохранность руд на пострудном этапе. Выше приводился пример Долматовского месторождения. В других случаях восходящие по разломам растворы, подпруживая пластовые инфильтрационные воды, вероятно, обеспечивали только “неподвижность” восстановительного барьера и структурный контроль рудных тел, поскольку сами восстановителей не содержали, как, например, углекислые воды на месторождениях Витимского района в Забайкалье, Россия (Кочкин и др., 2014).

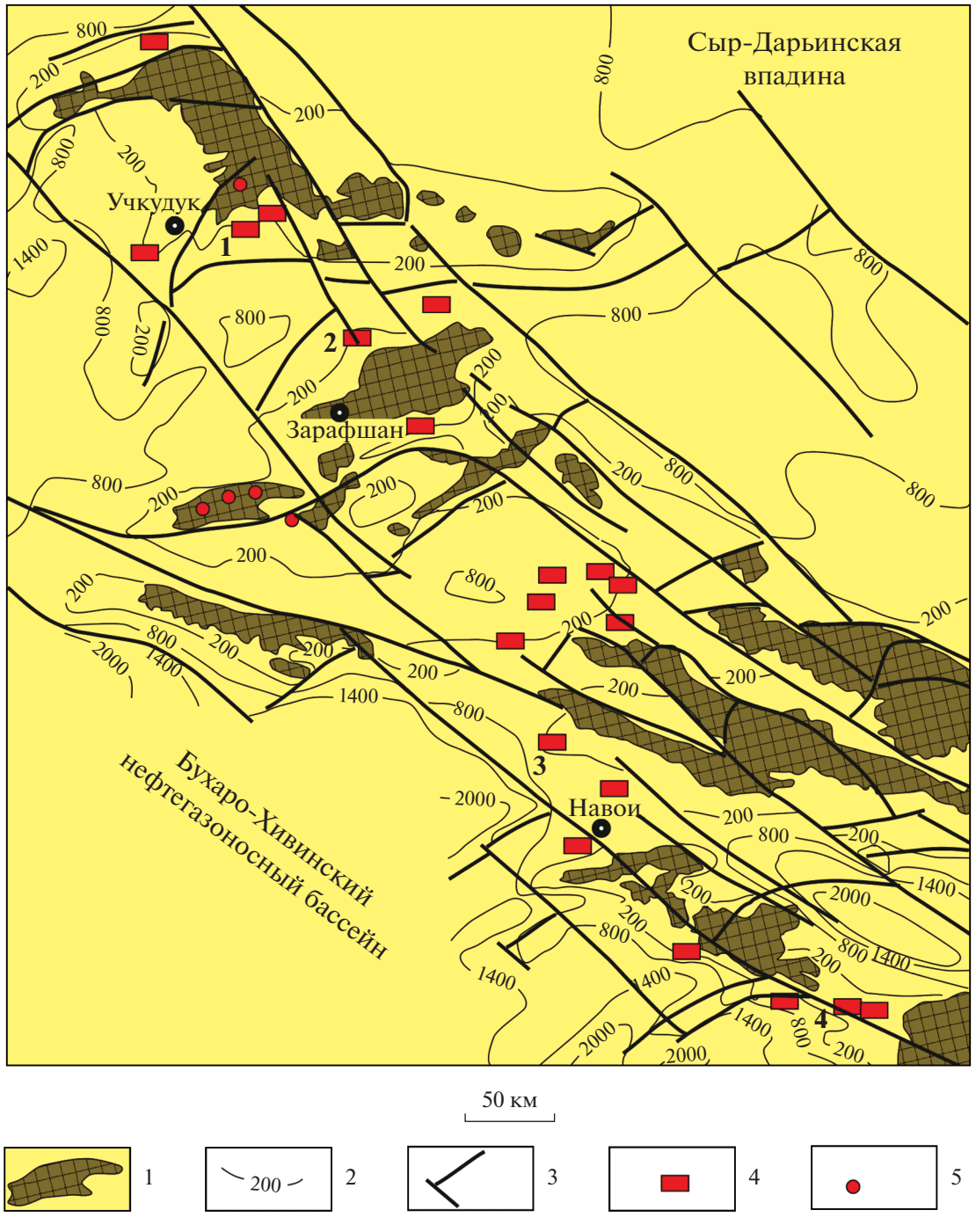
В районах базальтового и андезито-базальтового магматизма восходящие растворы обычно имеют углекислый состав и могут быть агрессивны по отношению к урановой минерализации. На пространственную связь урановых месторождений и основного вулканизма на плато Колорадо (США) указывал Р. Керр (Kerr, 1958) задолго до разработки адекватных представлений о происхождении месторождений песчаникового типа. Тем не менее, частичное разрушение ранее образованных залежей и даже формирование в незначительном количестве переотложенной урановой минерализации в карбонатах установлены на месторождении Семизбай в Северном Казахстане (Кондратьева и др., 1992) и в адсорбированной форме на гидроксидах железа на месторождениях Витимского района (Амалатское базальтовое плато) (Кочкин и др., 2017). Значительные масштабы переотложения оксидов урана углекислыми водами на витимских месторождениях предполагаются на основе косвенных признаков в работе (Винокуров и др., 2017).

По-настоящему для отложения руд имеют значение только те восходящие воды, которые поставляют в рудовмещающий горизонт восстановители урана. К таким флюидам, прежде всего, относятся подземные воды нефтегазоносных бассейнов, поступающие тем или иным образом (обычно по разломам) в зону рудоформирования. Примером служат месторождения Прибрежной равнины в Южном Техасе, США. Они относятся к “ролловому” подтипу месторождений в песчаниках (9.3 по МАГАТЭ) и имеют альпийский возраст. Вмещающие неогеновые породы могут не содержать углистых обломков, поэтому в качестве восстановителей урана в таком случае рассматриваются также углеводороды и сероводород, привнесенные в рудовмещающие горизонты из подстилающих осадочных водоносных горизонтов с нефтегазовой специализацией. Взаимодействие этих вод с вмещающими породами привело к пострудной пиритизации локальных участков месторождений Фелдер и Лампречт и руд и вторичному восстановлению зоны пластового окисления (Goldhaber et al., 1983). На связь песчаниковых месторождений с нефтегагоносными бассейнами США указано также в работе (Jaireth et al., 2008). В классификации МАГАТЭ выделены специальные классы месторождений (9.2.2 и 9.3.2 и другие) с привнесенными (эпигенетическими в российской терминологии) восстановителями урана (Geological ..., 2018).

Обширные очаги восстановительных новообразований обнаружены в Кызылкумской урановой провинции, Узбекистан, где они благодаря своему составу получили наименование “углекисло-битумные” (Щеточкин, 1970). В их состав кроме битума входят пирит, гетит, барит, карбонаты, каолин, кварц и другие минералы.

Зоны окисления в пределах Центрально-Кызылкуского свода имеют локальное развитие, они начали формироваться позже и изолированы друг от друга, в отличие от региональных зон окисления Чу-Сарысуйской впадины. Они обрамляют выступы палеозойского фундамента в пределах осевой части свода. Ширина зон окисления в плане обычно не превышает первых десятков километров и ограничена размерами артезианских бассейнов. Месторождения этой провинции имеют альпийский возраст и локализуются в меловых и палеогеновых отложениях (Учкудукский ..., 1996; Кисляков, Щеточкин, 2000). Запасы наиболее крупных месторождений составляют 40–50 тыс. т урана (Geological ..., 2018).

Провинция, имеющая в целом сводово-блоковую структуру, граничит с Бухаро-Хивинским нефтегазоносным бассейном (фиг. 4). Это создает условия для взаимодействия двух гидродинамических систем: инфильтрационной и элизионной. Если инфильтрационная водонапорная система действует благодаря разнице в напорах между возвышенными областями питания и более низкими участками рельефа в очагах разгрузки, то в элизионной системе напоры в водоносных горизонтах создаются при отжимании седиментационных вод за счет уплотнения осадков в пределах прогибов земной коры. Эти напорные воды изначально приобретают восходящее движение. В областях интенсивной складчатости, напоры могут задаваться благодаря геодинамическому стрессу, что в условиях Бухаро-Хивинского региона, возможно, имеет локальное значение у разломов. В пределах элизионной системы формируются разнообразные месторождения, среди которых углеводороды, свинцово-цинковые руды с подчиненным количеством флюорита, барита, кальцита, проявления целестина, серы,



Фиг. 4 Кызылкумская урановорудная провинция (из Геолого-промышленные ..., 2008, с упрощениями). 1 – выступы палеозойского фундамента из-под осадочного чехла; 2 – глубина кровли фундамента (метры); 3 – разломы; 4 – месторождения (цифры: 1 – Учкудук, 2 – Сугралы, 3 – Южный Букинай, 4 – Сабырсай,); 5 – рудопроявления.

битумов (Печенкин, 2014_1). В инфильтрационной системе наиболее значимыми являются месторождения урана, как грунтовой, так и пластовой окислительной зональности (Печенкин, 2014_2).

Подземные воды, поступающие из элизионной гидродинамической системы Бухаро-Хивинского бассейна, рассматриваются в качестве поставщика эпигенетических восстановителей в сопредельные районы с инфильтрационным режимом подземных вод. На юге Кызылкумской провинции, вблизи сочленения бассейнов с разным гидродинамическим режимом подземных вод, урановые рудные тела подчас совмещаются с ореолами битумов, а зоны пластового окисления вторично восстанов-

лены (например, месторождение Сабырсай). В средней части провинции (месторождение Южный Букинай) в приразломных зонах осадочного чехла встречаются крупные ореолы углекислобитумных новообразований. На удалении от нефтегазоносного бассейна и ближе к центральной оси Кызылкумского свода углекисло-битумные новообразования распространены в меньшей степени и тоже у разломов, секущих и фундамент, и осадочный чехол (месторождения Учкудук и Сугралы).

В целом группа месторождений с восстановительным эпигенезом отличается рядом особенностей от классических месторождений окислительной зональности. Во-первых, в плане урановосные зоны, связанные с восстановительным эпигенезом, часто обнаруживают черты линейности и пространственно совпадают с разрывными нарушениями в фундаменте, представляя собой пластово-надтрещинные, околотрещинные, а иногда и просто трещинные образования. Во-вторых, оруденение на этих месторождениях обычно отличается более высокими концентрациями урана (до n % U) и большей контрастностью, а иногда имеет более сложный, чем обычно, набор элементов-спутников. В-третьих, на месторождениях отмечаются признаки стадийности отложения руд или чередования стадий окисления и восстановления. В одних случаях оруденение носит реликтовый характер и имеет признаки активного разрушения инфильтрационными кислородными водами с переосаждением урана в виде скоплений регенерированных урановых черней. В других случаях оруденение может оказаться и “захороненным” в сероводородной или углеводородной газо-гидрогеохимической обстановке.

В силу того, что рассматриваемая минеральная система относится к экзогенным, критическим фактором ее успешного функционирования является состав атмосферы, климат и жизнь во всех ее проявлениях. Самые древние месторождения в песчаниках образовались около 2 млрд лет назад. Кислород в земной атмосфере тогда уже был, но континентальной растительности, остатки которой могли бы служить восстановителем урана в терригенных осадках, еще не существовало. Считается, что образование этих древних месторождений происходило путем осаждения урана газообразными восстановителями неорганического происхождения (метан, водород), поступавшими по разломам из глубин земной коры. Более или менее типичные месторождения пластовой окислительной зональности с углистой органикой в качестве восстановителя залегают в терригенных породах моложе ордовикских (Descriptive ..., 2020).

ТЕКТОНОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭКЗОГЕННОГО ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО УРАНОВОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

Особенности реализации модели в разных условиях

Благодаря перечисленным выше особенностям, некоторые месторождения с ярко выраженным восстановительным эпигенезом до настоящего времени остаются генетически спорными объектами. На сегодняшний день можно считать господствующей точку зрения о том, что уран, как и в случае месторождений окислительной зональности, привносился к местам его накопления инфильтрационными кислородными экзогенными растворами, осаждаясь на восстановительном барьере при взаимодействии со встречными потоками восходящих газообразных (H_2S, H_2 и др.) или жидких (битумы) восстановительных, часто термальных, флюидов (Лисицин, 1975). Согласно со второй точкой зрения, поставщиками урана являлись глубинные термальные (150–200°С) относительно щелочные сульфидно-карбонатные растворы, имевшие принципиальные черты общности с гидротермальными флюидами, отлагавшими жилы с урановой смолкой (например, тип 4 по МАГАТЭ). Рудоотложение осуществлялось в результате подкисления или дополнительного восстановления этих флюидов и взаимодействия с вмещающими осадочными породами и заключенными в них инфильтрационными водами и органическими компонентами (Опарышева и др., 1973). В последнее время взгляды об эндогенном источнике урана на месторождениях Центральной Азии были поддержаны в статье (Грушевой, Печенкин, 2003). Третий взгляд, который изложен в работах, касающихся месторождений Витимского района, заключается в том, что поствулканические углекислые растворы перераспределяют и обогащают исходно бедные руды окислительной зональности до высоких концентраций с привносом некоторых других элементов (Винокуров и др., 2017; Тарханова и др., 2014). Последняя точка зрения, на наш взгляд, может объяснить частные проблемы генезиса конкретных месторождений и является примером гипотез ad hoc.

Е.М. Шмариович и А.К. Лисицин (1982) обратили внимание на то, что руды рассмотренных ими генетических групп могут не только встречаться разобщенно, но и пространственно совмещаться на одной территории. При обсуждении региональных закономерностей размещения урановых месторождений восстановительного эпигенеза они обращали внимание, прежде всего, на их связь с территориями, претерпевшими постплатформенную тектоническую активизацию, что также характерно и для классических месторождений окислительного эпигенеза. Далее они подчеркивали, что связь урановых месторождений и рудосопровождающего термального восстановительно-

го эпигенеза с магматизмом выражена не всегда, но при ее наличии чаще проявляется базальтовый или андезито-базальтовый магматизм (приводился пример плато Колорадо в США). Во многих регионах, в том числе при отсутствии магматизма, наблюдается связь урановых месторождений с нефтегазоносными бассейнами (например, Ферганская впадина и Кызылкумы в Узбекистане, Южный Техас в США и другие).

Для месторождений окислительного эпигенеза восстановители обычно сингенетичные вмещающей породе – углистый детрит в сероцветных платформенных осадках. Примерами служат месторождения Чу-Сарысуйской урановой провинции в Казахстане и месторождения штата Вайоминг в США. Реже – восстановители эпигенетические, т.е. привнесены в породу после ее образования, но до поступления кислородных ураноносных подземных вод. Примерно таков взгляд на урано-гуматные месторождения, например, Амброзия-Лейк в США (класс 9.2.2 по МАГАТЭ).

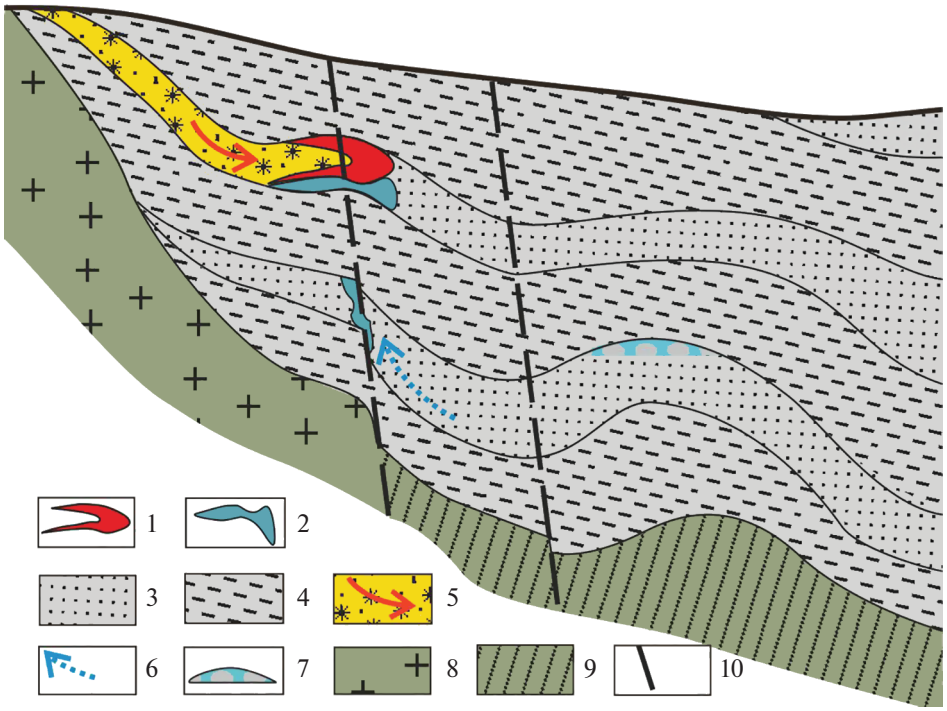
Появление среди классических месторождений окислительной зональности объектов с восстановительным эпигенезом, по нашему мнению, – всего лишь региональная или локальная особенность рудообразующей минеральной системы, которую можно связать с разгрузкой в артезианский бассейн каких-либо глубинных флюидов. Наиболее часто на экзогенных урановых месторождениях распространены минеральные образования восстановительного эпигенеза, связанные с двумя типами глубинных флюидов (Кочкин, 2020). Первый – образования, связанные с водами из нефтеносных бассейнов. Эти флюиды обязательно содержат эпигенетические восстановители урана: метан, битумы, сероводород или водород. Они могут принимать участие в формировании месторождений, пространственно сближенных с нефтегазоносными бассейнами по латерали или с нефтегазоносными горизонтами по вертикали. Самый яркий пример – месторождения Кызылкумской провинции (Кисляков, Щеточкин, 2000). Другой пример – месторождения Фелдер и Лампречт в штате Техас, США (Goldhaber et al., 1983). Второй тип глубинных флюидов – постмагматические термы. Сами по себе эти термы могут и не нести восстановители урана, но могут формировать над разломами стационарный (неподвижный) гидродинамический барьер, благодаря чему формируются очень богатые и контрастные руды. В пострудный этап эти термы участвуют в консервации рудной минерализации и преобразовании вмещающих пород, включая зону окисления. Пример – углекислые воды на месторождениях Витимского района, Бурятия, Россия (Кочкин и др., 2017). Известны и более экзотические составы восходящих флюидов. Например, на месторождении Сулучекинское (Илийская долина, Казахстан) рудоносный горизонт в пострудный этап был затоплен глубоко циркулирующими азотными термами атмосферного происхождения. В соответствии с их пресным бескислородным и бессероводородным составом практически отсутствуют какие-либо восстановительные новообразования в породах. Даже зона окисления сохранила свой желтый цвет (Кочкин и др., 1990).

Примеры наложения, стадийности и особенно чередования восстановительных и окислительных процессов, известные на месторождениях в Кызылкумах (и в некоторых других регионах) говорят о том, что разнонаправленные водные потоки из соседних гидродинамических систем могут взаимодействовать вдоль своих границ. Гидродинамическая модель формирования эпигенетических новообразований на границе, где происходит встреча нисходящего по пласту и восходящего по разлому потоков подземных вод предложена в статье (Белова и др., 1982). Такая модель объясняла структурный контроль руд на месторождениях восстановительного эпигенеза, а также создания длительных и устойчивых в пространстве условий для накопления очень богатой урановой минерализации над локальными участками разломов, поставляющими эпигенетические восстановители. Важное следствие из этой модели – новообразования, генетически связанные с нисходящими и восходящими водами должны накапливаться раздельно, т.е. по разные стороны от границы их раздела. Это было подтверждено на примере реальной залежи в карьере месторождения Учкудук (Кочкин, 1989). Наложение, чередование и стадийное проявление разных видов минерализации на одном участке объясняются в этой модели пульсационным изменением соотношения расходов обоих типов вод (фиг. 5).

Урановые мегапровинции

Экзогенные эпигенетические месторождения урана разных групп благодаря единству происхождения инфильтрационных кислородных рудоформирующих растворов могут образовывать региональные рудоносные зоны (мегапровинции). Движение рудообразующего потока может быть безнапорным грунтовым или напорным в артезианском бассейне. В обоих случаях движущей силой выступает градиент напоров подземных вод, формируемый перепадом высотных отметок рельефа дневной поверхности. Это объясняет локализацию месторождений этого генетического класса на территориях, которым свойственна вертикальная дифференциация рельефа, например, в орогенных и суборогенных областях постплатформенной тектонической (тектоно-магматической) активизации.

На северной периферии Тянь-Шаньского орогена на месте Туранской плиты за неоген-четвертичное время сформировалась суборогенная об-

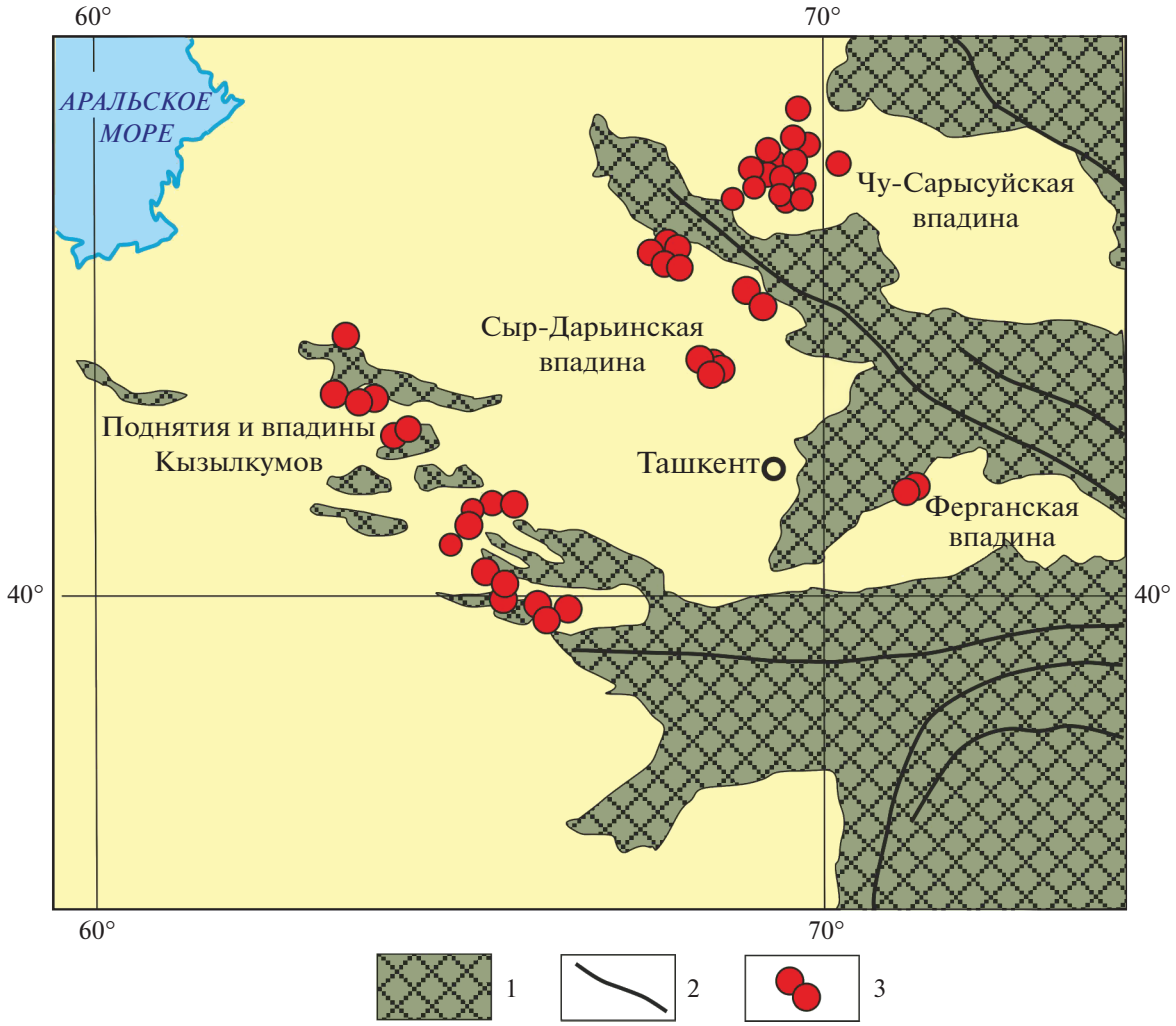


Фиг. 5. Схема уранового рудообразования на границе инфильтрационной и элизионной гидродинамических систем. 1 – рудное тело (ролл); 2 – приразломные восстановительные новообразования; 3 – пески сероцветные; 4 – глины и алевриты сероцветные; 5 – пески желтоцветные в зоне окисления; стрелка – направление фильтрации кислородных вод; 6 – стрелка – направление движения элизионных вод; 7 – нефтегазовые скопления; 8 – граниты; 9 – метаморфические породы; 10 – разломы.

ласть, впадины которой вмещают месторождения Чу-Сарысуйской, Сыр-Дарьинской и Кызылкумской провинций (фиг. 6). Эрозия пород в области самого орогена обеспечивала мобилизацию огромных масс урана. Приуроченность этих урановых провинций к субороgенной области – давно известный факт. На то, что сама эта область – периферия зоны коллизии Индийской и Евразийской тектонических плит, сравнительно недавно обратили внимание Г.В. Грушевой и И.Г. Печенкин (2003). Они указали, что в этом регионе "...большая часть промышленных инфильтрационных месторождений урана тяготеет к внешнему фронту затухающих коллизионных процессов (к области субороgена) ...". С южной стороны этой коллизионной границы уже в Индии также выявлено несколько песчаниковых месторождений урана таблитчатого подтипа (9.2 по МАГАТЭ). Они приурочены к молассовым отложениям миоцен-плейстоценового возраста, заполняющим бассейн Сивалик, протянувшийся от Джамму на западе до долины Брахмапутры на востоке (Uranium ..., 2020).

Второй пример приуроченности крупных провинций экзогенных эпигенетических месторождений урана к зоне взаимодействия тектонических плит – месторождения, которые распространены в трех провинциях США: Бассейны Вайоминга, Плато Колорадо и Прибрежная равнина Техаса (фиг. 7). Три эти района вполне можно объединить в одну мегапровинцию, приуроченную к активизированной части Североамериканской платформы на восточной периферии Североамериканских Кордильер. Это горное сооружение активно воздымается на границе взаимодействия Тихоокеанской и Североамериканской плит. В провинции есть и классические месторождения окислительной зональности (Вайоминг), и близкие к нефтегазовым районам (Техас) и к районам базальтового вулканизма (Колорадо). Все они залегают в отложениях, формировавшихся начиная с позднего мела и представленных разнообразными терригенными осадками.

Менее крупные районы современного инфильтрационного уранового рудообразования известны в поясах альпийской складчатости, отличающихся значительной вертикальной дифференциацией рельефа и подчас проявлением основного вулканизма. Например, к такому поясу приурочены месторождения Франции, Чехии, Болгарии в Западной Европе, Китая и Монголии в Азии (World ..., 2020). Положение о том, что трансконтинентальный пояс экзогенных эпигенетических урановых месторождений, локализованных в осадочных бассейнах Евразии, пространственно приурочен к границам коллизии и

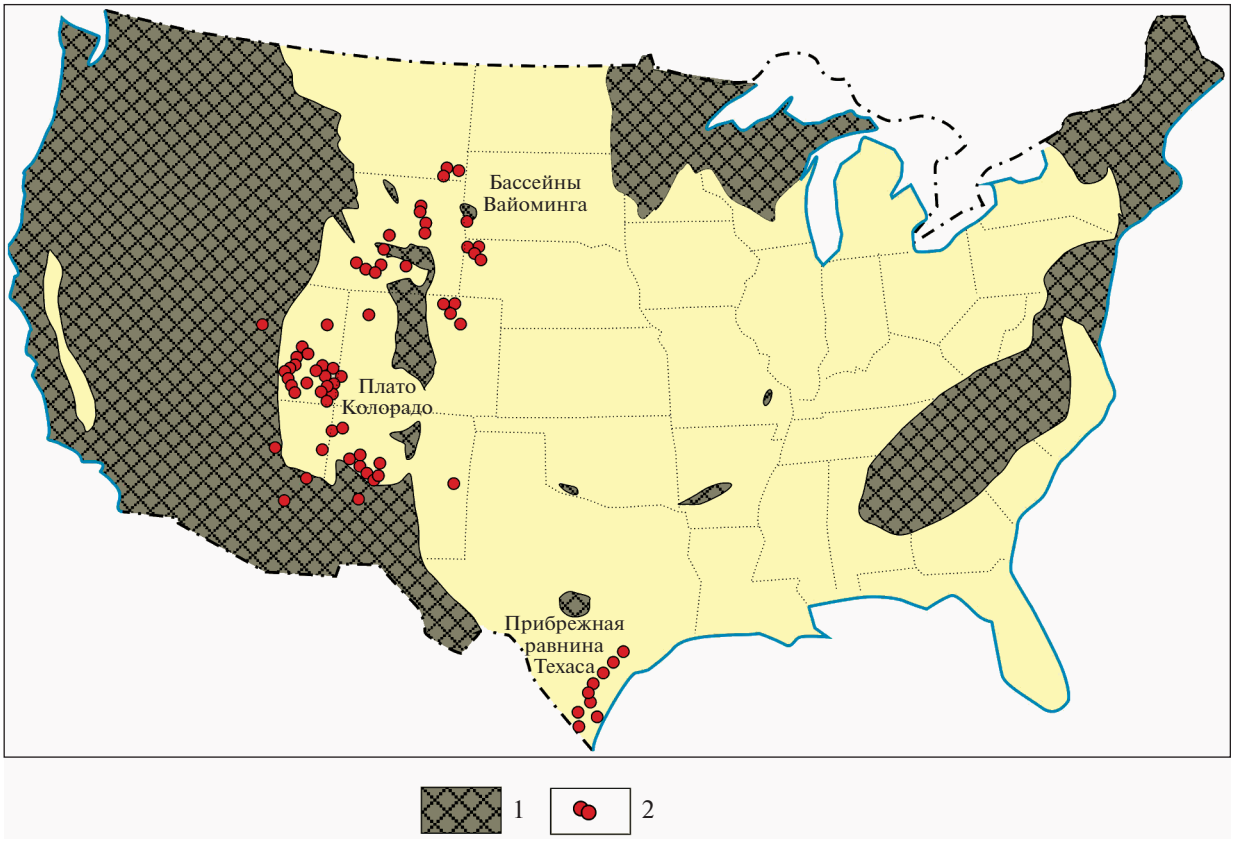


Фиг. 6. Притяньшаньская урановорудная мегапровинция (схематическое изображение размещения месторождений по данным World ..., 2020 и Геолого-промышленные ..., 2008 с упрощениями). 1 – выходы фундамента; 2 – разломы; 3 – месторождения урана.

субдукции тектонических плит в кайнозое и мезозое, обосновано в работе (Печенкин, 2016). Западная часть пояса приурочена к границе Евразийской плиты с Африканской и Аравийской. Восточная часть является внутриплитной долгоживущей структурой с элементами современного рифтообразования и очагами базальтового вулканизма. На некоторых тектонических схемах эта часть орогенного пояса обозначается как граница Евразийской и Китайской плит. Граница субдукции Тихоокеанской плиты под Евразийскую расположена значительно юго-восточнее.

Долгоживущие глубинные внутриплитные разломы, разделяющие воздымающиеся и опускающиеся части платформ (щиты и плиты), выступают как рудоконтролирующие структуры для некоторых мезозойских месторождений. Месторождение Долматовское – один из объектов палеодолинного типа, сформировавшихся в мезозое вдоль протяженных границ поднятых Уральского и Казахстанского щитов с опускавшейся Западно-Сибирской плитой (World ..., 2020).

Еще один протяженный район мезозойских урановых месторождений, имеющих признаки пластовой окислительной зональности, расположен на обширной территории Южной и Восточной Африки в отложениях формации Кару (Catuneanu et al., 2005; Шумилин, Ивлиев, 2018; World ..., 2020). Формация имеет возраст от верхов карбона–ранней перми до верхнего триаса. Отложения накапливались вдоль восточной границы воздымавшейся части африканского континента. В настоящее время отложения выполняют систему грабенов (рифтов), протягивающихся от атлантического на юге до индоокеанского побережья на востоке африканского континента. Логично предположить наличие здесь долгоживущей внутриплит-



Фиг. 7. Песчаниковые месторождения урана разных подтипов на территории США (схематическое изображение по данным World ..., 2020, с дополнениями и упрощениями). 1 – выходы фундамента; 2 – урановые месторождения.

ной структуры. Вероятный возраст окисления, по-видимому, соответствует триасу–юре. Предполагается, что многие из месторождений этого района являются лишь сохранившимися останцами обширной урановой провинции.

Африканский и Западно-Сибирский примеры иллюстрируют некоторые условия, которые способны обеспечить сохранность руд, накопленных экзогенными эпигенетическими системами прошлого. Так, например, позиция мезозойского месторождения Долматовское (и других аналогичных) в борту Западно-Сибирской плиты иллюстрирует благоприятный геодинамический режим погружения рудовмещающей толщи на границе с поднятым древним складчатым поясом. Погружение и накопление толщи более молодых осадков обеспечило сохранность минерализации в основании чехла платформы. Африканский пример иллюстрирует другие геодинамические условия сохранности древних месторождений – опускание рудовмещающих песчаных отложений в современных рифтовых зонах.

В связи с тем, что месторождения рассматриваемого генетического типа формируются сравнительно близко к поверхности, они легко разрушаются после деградации рудообразующей системы. В этой связи условия сохранности накопленной минерализации – особый фактор, который следует учитывать при прогнозе древних месторождений. Редкий случай консервации урановых руд встречен на месторождениях Витимского района – экран многолетней мерзлоты, дополняющий прочную покрышку базальтов (Кочкин и др., 2017).

ОБСУЖДЕНИЕ: КРИТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСЛОВИЯ

Из современных подходов к генетическим классификациям урановых месторождений (Cuney, 2009; Шумилин, 2015; Wyborn et al., 1994; Descriptive ..., 2020) следует, что класс экзогенных эпигенетических концентраций урана занимает определенное место в природном круговороте урана.

Определение границ экзогенной эпигенетической системы является дискуссионным вопросом. Агент транспорта урана – водный раствор, как и во многих иных минеральных системах. Очевидно, что недопустимо включать в эту модель месторождения, на которых перенос урана к местам рудообразования предполагается в 4-валентном состоянии, а концентрирование – за счет

изменения температуры и давления флюидов, как например, месторождения, “связанные с вулканизмом”, тип 4 (Descriptive ..., 2020). Менее очевидна ситуация с месторождениями в “калькретах” (тип “речные долины” 11.2). Там перенос урана осуществляется в 6-валентном состоянии, а механизм концентрирования урана в форме солей не является восстановительным (Descriptive ..., 2020).

Восстановление урана в месте концентрирования на классических месторождениях осуществляется на сингенетических восстановителях. При этом самые древние и многие более молодые месторождения, которые можно отнести к рассматриваемому классу, формировались при участии эпигенетических восстановителей, которые поступали с восходящими глубинными флюидами. Из этого следует, что тип восстановителя урана является критическим, но не дисквалификационным условием в рассматриваемой минеральной системе. Примеры месторождений Ферганской долины в Узбекистане (Холодов и др.. 1961), которые локализованы в известняках, а также месторождений, локализованных в красноцветных песках над нефтяными скоплениями (Зеленова и др., 1969), показывают, что тип вмещающих пород также не дисквалификационное условие. То же самое касается системы внутренней структуры коллектора инфильтрационных вод. Пример месторождений Витимского района, на которых рудные тела из песчаного пласта протягиваются в разломы фундамента и в водоупорную базальтовую кровлю, показывает, что напорный гидродинамический режим позволяет кислородным водам с ураном проникать в оба водоупора и формировать тела сложной морфологии (Кочкин и др., 2014). Внутренняя структура коллектора определяет только форму, которую будут иметь рудные тела: ролловую, таблитчатую или более сложную (подтипы 9.4 и 9.5) из тех, что представлены в классификации МАГАТЭ (Geological ..., 2018; World ..., 2020). Это открывает возможности для расширения границ системы на месторождения таких промышленных типов, как “связанные с несогласием” (тип 7). По этому пути пошли австралийские геологи в работе (Skirrow et al, 2009), объединив месторождения “в песчаниках”, “у древних несогласий” и тип “Westmoreland” во Фромской впадине (Австралия), в одну “бассейновую” минеральную систему. Следует отметить, что название системы дано по морфологическому признаку рудовмещающей структуры (критерий локализации), а не на генетической основе.

Отрицательная структура коллектора – синклинальная складка в осадках или вулканическая кальдера – критичное условие также и с генетической позиции. В таких структурах возможно существование артезианских бассейнов с инфильтрацией метеорных кислородных вод на глубину. По периферии структуры должен существовать источник металла. Также критичен климат региона, как фактор, влияющий на поступление кислорода и урана в подземные воды. В целом самым важным процессом является вертикальная тектоническая дифференциация территории, которая необходима для реализации экзогенной эпигенетической рудообразующей системы с инфильтрационной гидродинамикой подземных вод. Таким образом, геодинамические регионы определенного типа и определенные климатические зоны следует включать в число картографируемых критериев при составлении прогнозных материалов на месторождения рассматриваемой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Особенности критических условий и процессов, которые необходимо принимать во внимание при прогнозе районов образования крупных экзогенных эпигенетических месторождений и провинций:

1. Осадочный или иной коллектор подземных вод как будущее вместилище артезианских инфильтрационных бассейнов должен иметь обширные размеры. Это условие является следствием геологической предыстории развития потенциально рудоносной территории.

2. Устойчивость геодинамического режима с дифференцированными вертикальными тектоническими движениями в течение миллионов и десятков миллионов лет, необходимых для накопления значительных запасов урана, могут обеспечить периферийные области орогенов вдоль активных границ плит и некоторых внутриплитных долгоживущих разломов.

3. Обилие обогащенных ураном пород, которые подвергаются эрозии в области питания инфильтрационных бассейнов. Это условие также является следствием определенной предыстории территории.

4. Обогащение потенциальных рудовмещающих пород восстановителями урана. Сингенетическое или эпигенетическое происхождение восстановителей является следствием предыстории развития территории. Образование особо богатых руд более вероятно при участии эпигенетических восстановителей, особенно когда они поступают по разломам, обеспечивая стабильное положение фронта окисления и геохимического барьера. Начиная с фанерозоя, концентрированный подток по разломам глубинных вод, обогащенных восстановителями урана, обычно является следствием соседства (или совмещения в разрезе) инфильтрационных бассейнов с нефтегазоносными элизионными бассейнами. В более отдаленные геологические эпохи главную роль играли неорганические источники эпигенетических восстановителей урана.

5. Повышенное содержание урана в поверхностных водах области питания в период рудообразования является следствием дополнительного испарительного концентрирования (климатический пресс) в особо засушливых и жарких районах. Не следует ожидать эпигенетических месторождений в эпохи древнее времени образования кислородной атмосферы. С другой стороны, геологические эпохи до появления континентальной растительности были благоприятны для проникновения кислородных вод на глубину в более широком климатическом диапазоне, поскольку кислород не расходовался на окисление органики в почвенном слое.

6. Наконец, поскольку месторождения рассматриваемого класса формируются сравнительно близко к поверхности, то при прогнозе потенциально урановосных районов и провинций прошлого важно принимать во внимание пострудную историю. Сохранность месторождений от разрушения могут обеспечить такие процессы, как захоронение рудовмещающих пород под мощной толщей более молодых осадков, перекрытие рудовмещающих пород прочным плохо проницаемым экраном, типа базальтового покрова, погружение рудовмещающих пород в локальные грабены, затопление рудовмещающего горизонта восстановительными водами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен сотруднику ИГЕМ РАН, д. г.-м. н. Александру Арнольдовичу Пэку, прочитавшему статью в процессе ее подготовки и сделавшему предложения по ее улучшению.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена при финансовой поддержке госзадания ИГЕМ РАН (тема № 0136-2018-0017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белова Л.Л., Кричевец Г.Н., Шмариович Е.М. О гидродинамических условиях формирования эпигенетической минерализации при взаимодействии пластовых вод и восходящих трещинно-жильных растворов // Докл. АН СССР. Геология. 1982. Т. 265. № 2. С. 393–396.

Винокуров С.Ф., Магазина Л.О., Стрелкова Е.А. Редкоземельные и редкие элементы в урановых рудах палеодолинных месторождений Витимского района: характер распределения, форма нахождения, генетическое и практическое значение // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С.141–162.

Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ. М.: ВИМС, 2008. 72 с.

Грушевой Г.В., Печенкин И.Г. Металлогеническое районирование осадочных бассейнов Центральной Азии как предпосылка для прогнозирования ролловых урановых месторождений-гигантов // Региональная геология и металлогения. 2003. № 18. С. 63–73.

Зеленова О.И., Кондратьева И.А., Лисицын А.К. Эпигенетические изменения красноцветных пород и урановое рудообразование над залежами углеводородов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1969. № 2. С. 68–89.

Казанский В.И., Лаверов Н.П., Тугаринов А.И. Эволюция уранового рудообразования. М.: Атомиздат, 1978. 208 с.

Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 2000. 608 с.

Кондратьева И.А., Боброва Л.Л., Нестерова М.В. Роль пострудных процессов в преобразовании древнего инфильтрационного уранового месторождения // Литология и полезные ископаемые. 1992. № 1. С. 70–90.

Константинов А.К., Машковцев Г.А., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Кочкин Б.Т. О пространственном взаимоотношении оруденения и углекисло-битумных новообразований на пластовых инфильтрационных месторождениях урана // Геология руд. месторождений. 1989. Т. 31. №4. С. 88–97.

Кочкин Б.Т. Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 23–35. https://doi.org/10.31857/S0016777020010049

Кочкин Б.Т., Лисицин А.К., Сахарнов О.И. Геолого-геохимическая модель и палеогидрогеологические условия формирования Сулучекинского месторождения // Матер. по геологии урановых месторождений. М., 1990. Вып. 122. С. 64–75.

Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н. Мартыненко В.Г. Морфологические особенности рудных тел и генезис месторождений урана Хиагдинского рудного поля // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56. № 6. С. 539–555.

Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В., Асадулин Эн.Э., Голубев В.Н. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 124–140. https://doi.org/10.7868/S0016777017020022

Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). М.: Недра, 1975. 248 с.

Опарышева Л.Г., Шмариович Е.М., Ларкин Э.Д., Щеточкин В.Н. Особенности урановой минерализации, залегающей в породах осадочного чехла и гранитах фундамента // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1973. № 7. С. 32–44.

Печенкин И.Г. Геолого-генетические типы гидрогенных месторождений (сообщение первое) // Разведка и охрана недр. 2014_1. № 6. С. 13–20.

Печенкин И.Г. Геолого-генетические типы гидрогенных месторождений (сообщение второе) // 2014_2. № 7. С. 12–17.

Печенкин И.Г. Связь металлогении урана с геодинамическими процессами в краевых частях Евразии // Руды и металлы. 2016. № 2. С. 5–17.

Тарханова Г.А, Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И., Никитина Е.С., Прохоров Д.А., Нечелюстов Г.Н., Ружицкий В.В. Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 7–13.

Тугаринов А.И. Геохимическая эволюция Земли // Природа. № 11. 1967.

Урановые месторождения Казахстана (экзогенные). Алма-Ата: "Гылым", 1995.

Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан. Ташкент: Фан, 1996. 334 с.

Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений типа "несогласия" в фанерозое // Минеральное сырье. № 34. М.: ВИМС, 2017. 194 с.

Холодов В.Н., Лисицин А.К., Комарова Г.В., Кондратьева И.А. Об эпигенетической зональности уранового оруденения в нефтеносных карбонатных породах // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 11. С. 50–62.

Шмариович Е.М., Лисицин А.К. Проблемы эпигенетического уранового рудообразования в породах осадочного чехла // Условия образования месторождений редких и цветных металлов. М.: Наука, 1982. С. 7–18.

Шумилин М.В. Урановая металлогения на палеореконструкциях континентов // Разведка и охрана недр. 2011. № 2. *С.* 7–11.

Шумилин М.В. Историческая металлогения урана (опыт глобального анализа). Иркутск: изд. ООО "Репроцентр", 2015. 255 с.

Шумилин М.В., Ивлев И.Л. Урановые месторождения в осадках Кару Африки: стратиграфическое положение, генезис и перспективы. "Минеральное сырье". Серия методическая № 20. М.: ВИМС, 2018. С. 39.

Щеточкин В.Н. Изменения углекисло-битумного типа на урановых месторождениях пластовой кислородной зональности // Литология и полезные ископаемые. 1970. № 4. С. 92–101.

Экзогенные эпигенетические месторождения урана: условия образования. Авт. Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.И. и др. М.: Атомиздат, 1965.

Catuneanu O., Wopfer H., Eriksson P.G. The Karoo basins of south-center Africa // African Earth Sciences. 2005. V. 43. P. 211–253.

Cuney M. The extreme diversity of uranium deposits // Mineral. Deposita. 2009. V. 44. P. 3–9.

Dahlkamp F.J. Classification of uranium deposits // Mineral. Deposita. 1978. № 13. P. 83–104.

Descriptive uranium deposit and mineral system models. Vienna: IAEA, 2020. 313 p.

Finch W.J. Geology of epigenetic uranium deposits in sandstones in the United States // U.S. Geol. Survey, Prof. Papers 538. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1967. P. 121.

Geological classification of uranium deposits and description of selected examples. IAEA-TECDOC-1842. Vienna: IAEA, 2018. 430 p.

Goldhaber M.B., Reynolds R.l., Rye R.O. Role of fluid mixing and fault-related sulfide in the origin of the Ray Point uranium district, South Texas // Econ. Geol. 1983. V. 78. № 6. P. 1043–1063.

Hostetler P.B., Garrels R.M. Transportation and precipitation of uranium and vanadium at low temperatures, with special reference to sandstone-type uranium deposits // Econ. Geol. 1962. № 57. P. 139–167.

Jaireth S., McKay A., Lambert I. Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons // AusGeo News. 2008. № 89. P. 8–12.

Kazansky V.I., Laverov N.P. Deposits of uranium // Ore deposits of the USSR. Ed. *Smirnov V.I.* London: Pitman Publ., 1977. V. II. P. 349–424.

Kerr P.F. Uranium emplacement in the Colorado Plateau // Bulletin of The Geol. Soc. of America. 1958. V. 69. № 9. P. 1075–1112.

Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C. Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework // Geoscience Australia Record. 2009/20. 2009. 44 p.

Uranium 2020: Resources, Production and Demand. NEA No. 7551. OECD, 2020. 484 p.

World Uranium Geology, Exploration, Resources and Production. Vienna: IAEA, 2020. 988 p.

Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // AusIMM Publication Series. 1994. No 5/94. P. 109–115.