

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Д. Я. Суражский

Природные концентрации урана образуются в самых разнообразных условиях, диапазон которых охватывает последние стадии собственно магматического процесса, явления метаморфизма, осадочный цикл и процессы выветривания.

Соответственно урановые месторождения делятся на четыре класса: 1) магматогенные месторождения; 2) осадочные сингенетические месторождения; 3) осадочно-метаморфогенные месторождения; 4) месторождения выветривания.

К месторождениям первого класса относятся пегматиты, пегматоидные жилы, гидротермальные жилы, сформировавшиеся путем выполнения открытых полостей и пластообразные залежи гидротермально-метасоматического происхождения.

Месторождения второго класса представлены ураноносными морскими сланцами и фосфоритами.

Месторождения третьего класса включают в себя промышленные скопления урана в известняках и углисто-кремнистых сланцах.

К месторождениям четвертого класса относятся пластообразные залежи в песчаниках, конгломератах, суббитуминозных углях и лигнитах.

В статье дается общее описание месторождений урана и рассматриваются вопросы, касающиеся источников рудного вещества, характера рудоконтролирующих и рудолокализирующих структур, состава и физических свойств рудоносных растворов и условия отложения металла.

Известные в настоящее время промышленные месторождения урана по форме рудных тел, а также по характеру оруденелых и рудовмещающих пород можно разделить на шесть больших групп. К первой группе относятся ураноносные пегматиты и пегматоидные жилы; ко второй группе—кварцевые, кварцево-карбонатные и флюоритбаритовые жилы в изверженных и сильно метаморфизованных осадочных породах; к третьей группе—пластообразные залежи в сильно метаморфизованных осадочных породах;

к четвертой группе—урансодержащие пласты осадочных пород морского происхождения; к пятой группе—пластообразные залежи в слабо метаморфизованных осадочных породах; к шестой группе—пластообразные и линзообразные залежи в нормальных осадочных породах континентальных фаций.

Эта группировка принята здесь главным образом для удобства дальнейшего описания. Наряду с общей характеристикой месторождений отдельных групп, составленной на основе литературных данных, в статье будут рассмотрены основные черты их генезиса и в первую очередь вопросы, касающиеся источников рудного вещества, характера рудоконтролирующих и рудолокализирующих структур, состава и физических свойств рудоносных растворов и условий отложения металла. В заключение в качестве выводов из изложенного фактического материала будет дана схема генетической классификации.

Ураноносные пегматиты и пегматоидные жилы

Эти рудные образования самой разнообразной формы генетически наиболее близки к гранитным интрузиям. Преобладающая форма—плитообразные жильные тела; часто встречаются четковидные и линзовидные жилы.

Уран в пегматитах обособляется либо в виде самостоятельных минералов (уранит и продукты его окисления), либо в виде изоморфной примеси в ниобо-танталатах и

титанониобатах различного состава. Иногда встречается также и карбуран. Уранинит и сложные окислы урана, ниобия, тантала и титана обычно приурочены к наиболее дифференцированным участкам пегматитовых тел. Чаще всего они встречаются в зонах, богатых пертитом, причем уранинит тесно ассоциирован преимущественно с мелкозернистым мусковитом и альбит-олигоклазом. Эвксенит-поликразовые минералы встречаются обычно вместе с бериллом, микролит и пироклор—с липидолитом и сподуменом, самарскит—с мусковитом, ортит и бетафит—с биотитом [1].

Все эти минералы, повидимому, представляют собой продукты фракционной кристаллизации пегматитового расплава. Магматическое происхождение ураноносных пегматитов (и заключенного в них урана) в большинстве случаев считается бесспорно установленным.

Практическое значение пегматитов как источников урановых минералов очень невелико. Из многих сотен пегматитовых жил, входящих в состав отдельных пегматитовых полей, только единицы, в лучшем случае—десятки, могут представлять интерес по содержанию урана. Но и в них скопления урановых минералов носят узко локальный характер, образуя отдельные гнезда, обычно очень небольшого размера. До недавнего времени годовая добыча урановых минералов из этих месторождений исчислялась десятками килограммов, получаемых в качестве побочных продуктов при разработке пегматитов на слюду и полевои шпат. Сравнительно недавно в Канаде, в районе озера Шарлебуа и в других пунктах провинции Саскачеван, открыты участки мигматизированных пород, содержащих уранинит в качестве составной части кварцево-полевошпатовых прожилков [2]. Эти месторождения рассматриваются как возможные крупные источники бедных, но хорошо обогащаемых урановых руд.

По последним данным промышленное месторождение ураноносных пегматитов обнаружено также и в передовом хребте Колорадо [3].

К пегматитам довольно близки своеобразные ураново-титановые жилы, сложенные в основном кварцем и урановыми титанатами—преимущественно давидитом $[(\text{Fe}, \text{Ce}, \text{U})(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{V}, \text{Cr})(\text{OH})]$, ильмени-

том и рутилом. К этому типу относится жильное месторождение Радиум-Хилл в Южной Австралии, имеющее крупное промышленное значение [4], [5].

Кварцевые, кварцево-карбонатные и флюоритбаритовые жилы

Эти жилы залегают как в изверженных породах (преимущественно в кислых гранитоидах, кислых эффузивах и в породах субэффузивной фации), так и в сильно метаморфизованных осадках.

Положение рудных полей в большинстве случаев определяется крупными разрывными деформациями различного характера и происхождения: нормальными сбросами, взбросо-сдвигами, мощными сколовыми зонами и т. д., прослеживающимися обычно на десятки километров. Все эти нарушения, как правило, уранового оруденения не несут, являясь рудоконтролирующими, но не рудовмещающими структурами.

Урановые руды локализуются обычно в более мелких трещинах разрыва и скалывания, оперяющих крупные разломы, либо располагающихся в родственно связанных с ними зонах дробления.

Наиболее продуктивные участки рудных жил залегают обычно в породах, богатых двухвалентным железом или органическим веществом, т. е. в амфиболитах, углистых, хлоритовых и роговообманковых сланцах. В тех случаях, когда вмещающими являются изверженные породы, урановая минерализация связывается с зонами хлоритизации и оталькования, образовавшимися в доурановые стадии рудного процесса.

По характеру минеральных парагенезисов месторождения этого типа чрезвычайно разнообразны. Наиболее важными рудными формациями являются—*собственно урановая, ураново-никель-кобальт-висмут-серебряная* («пятиэлементная») *ураново-полиметаллическая, ураново-молибденовая.*

Собственно урановые жилы имеют весьма простой состав. Из рудных минералов, кроме настурана, в них встречается только гематит и незначительное количество обычных сульфидов—халькопирита, галенита, пирита, иногда блеклых руд. Жильные минералы в основном представлены кварцем и карбонатом. Нередко с ними ассоциирует темно-

фиолетовый, почти черный флюорит. Изредка в составе жильного выполнения принимают участие цеолиты и медово-желтый барит. Обычно минералы отлагаются в следующем порядке: кварц (нередко инкрустирующий стенки жил), настуран, розовый доломит.

Ураново-никель-кобальт-висмут-серебряные жилы резко отличаются от собственно урановых жил значительно более сложным минеральным комплексом, преобладанием в составе руд арсенидов и сульфоарсенидов никеля, кобальта, железа (никелин, смальтин-хлоантит, раммельсбергит-сафлорит, герсдорфит, глаукоdot, леллингит, арсенопирит), заметным развитием в них самородных элементов (серебро, мышьяк, висмут), а также арсенидов и сульфоантимонитов (прустит, стефанит, тетраэдрит, тенантит, пираргирит и др.) и, наконец, многоэтапностью процессов рудообразования. Типичными представителями этой формации являются жилы Б. Медвежьего озера в Канаде, в которых выделяется четыре последовательных этапа минерализации [6]: 1) кварцево-настурановый (кварц, настуран с небольшим количеством диарсенидов никеля и кобальта), 2) кварцево-арсенидный (кварц, диарсениды, кобальтин, гематит, самородный висмут), 3) карбонатно-сульфидный (доломит, сфалерит, галенит, тетраэдрит, фрейбергит, халькопирит, борнит), 4) карбонатно-серебряный (родохрозит, строймерит, ялпайт, аргентит, гессит, самородное серебро). На некоторых месторождениях, представленных жилами этой формации, устанавливается наличие двух минеральных зон: верхней—серебряной и нижней—никель-кобальт-висмутовой. В этом случае урановые руды встречаются на различной глубине. На верхних горизонтах месторождений они сопровождаются рудами серебра, ниже—арсенидами никеля и кобальта, самородным висмутом и др.; еще ниже они проявляются в форме монометаллических настурановых жил. Подобные соотношения позволяют рассматривать серебряные и никель-кобальтовые руды как продукты отложения из одного и того же раствора, изменявшегося в своем составе путем фракционной дистилляции. Настурановые руды, повидимому, возникли в результате самостоятельного этапа рудообразования, предшествовавшего серебро-кобальтовой минерализации и фиксировавшегося в тех же

трещинах, но в более ранние моменты их приоткрывания.

Ураново-полиметаллические жилы характеризуются обилием простых сульфидов—пирита, галенита, сфалерита, халькопирита, иногда с арсенопиритом, висмутином и сложными свинцово-висмут-серебряными сульфосолями. Жильные минералы представлены преимущественно кварцем нескольких генераций, а также карбонатами, баритом и флюоритом. Последний иногда слагает главную массу руд.

В процессе минералообразования, как правило, удается выделить несколько этапов. В одном из ураново-полиметаллических месторождений ранние этапы минерализации представлены кварцем с сульфидами, промежуточные—кварцем, баритом и карбонатом и поздние—карбонатом с настураном. В других месторождениях, например в Джилпин (Колорадо, США), кварцево-настурановый этап предшествует кварцево-карбонатно-сульфидному [7].

Ураново-молибденовые жилы наряду с настураном и продуктами его окисления содержат примесь молибденита в количествах, представляющих практический интерес. Из аксессуарных минералов встречаются гематит и обычные сульфиды: халькопирит, галенит, пирит, иногда—теннантит. Жильная масса состоит из кварца, карбоната и небольшого количества темного флюорита. В этих месторождениях настурановый этап минерализации является одним из наиболее ранних.

Во всех жильных месторождениях урана собственно настурановая стадия характеризуется колломорфными структурами не только урановой смолки, но иногда и таких минералов, как карбонаты, сульфиды, хлорит и т. д. Типично метаколлоидная структура руд свидетельствует о сильном пересыщении растворов и образовании гелей, не обладающих способностью к химическим реакциям с боковыми породами. Поэтому формирование рудных тел происходит исключительно путем выполнения открытых полостей. Роль метасоматоза незначительна.

Наиболее характерным типом околорудного изменения боковых пород является так называемое «красное изменение», отмеченное, в частности, при изучении месторождений Б. Медвежьего озера [8] и месторождения Эйс в районе озера Биверлодж [9].

Оно охватывает как изверженные, так и метаморфические породы и обусловлено гематитизацией главных породообразующих минералов—кварца, альбита и карбонатов. Местами в околорудных зонах образуется яшмовидная порода («джаспероид»), состоящая в основном из кварца, магнетита, серицита, хлорита и карбонатов.

Настураново-полиметаллические жилы часто сопровождаются зонами окварцевания, хлоритизации и серицитизации. Весьма обычна также и пропилитизация, следствием которой является интенсивный вынос из боковых пород щелочей, преимущественно натрия. В сравнительно редких случаях наблюдается также и эпидотизация.

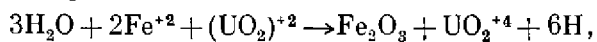
Высокотемпературные формы околорудных изменений боковых пород—грейзенизация, мусковитизация, турмалинизация—для эндогенных месторождений урана не характерны.

В настоящее время подавляющее большинство исследователей считает, что уран, присутствующий в жильных месторождениях, был вынесен из магмы вероятнее всего в виде уранил-иона в сульфатных или карбонатных растворах [10].

Совместное изучение жильного выполнения и околорудных изменений боковых пород наводит на мысль о высококонцентрированных растворах сложного состава с высоким содержанием летучих компонентов—мышьяка, фтора, бора, углекислоты и пр., несущих, кроме того, значительное количество кремнекислоты, а также кальция, магний, барий и трехвалентное железо. Довольно часто (но не всегда) к этим элементам присоединяются висмут, серебро, кобальт, никель, цинк, свинец и молибден.

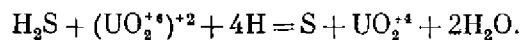
По ассоциациям минералов громадное большинство жильных месторождений урана относится к мезотермальным месторождениям, которые формируются при температурах от 175 до 300° С и на глубинах от 1200 до 3600 м [11].

В осаждении первичных урановых минералов из растворов главную роль играют, повидимому, окислительно-восстановительные реакции типа



приводящие к образованию одновременно урановой смолки и гематита. Возможно также, что настуран из уранилсульфатных

растворов осаждается сероводородом по уравнению



Поскольку рудные тела образуются исключительно путем отложения материала в открытых полостях, чрезвычайно важное значение имеет структурный контроль. Главными рудоконтролирующими структурами являются региональные разломы, рудокализирующими—связанные с ними трещины разрыва и скалывания второго и высшего порядков.

Жильные месторождения собственно урановой, «пятиэлементной», ураново-полиметаллической и ураново-молибденовой формаций служат главными источниками получения уранового сырья на земном шаре. Кроме того, заметные скопления урановых минералов встречаются также во многих олово-вольфрамовых, медных, золоторудных и др. жилах, однако их промышленное значение очень невелико.

Пластообразные залежи в сильно метаморфизованных осадочных породах

Как правило, эти месторождения не обнаруживают явной зависимости от крупных дизъюнктивов. В процессе их формирования доминирующую роль играет избирательное замещение материала осадочно-метаморфических толщ, причем главным фактором, контролирующим распределение руды, является состав боковых пород. Наиболее благоприятны для рудоотложения железистые роговики, углистые и окремненные доломитизированные сланцы.

Выделяются три рудные формации:

а) собственно урановая, в которой настуран является единственным промышленно ценным рудным материалом;

б) железо-урановая, характеризующаяся резким преобладанием в составе руд магнетита и гематита;

в) медно-урановая, в которой доминирующую роль играют сульфиды меди, иногда в ассоциации с сульфидами кобальта, никеля и молибдена, а также с самородными элементами (медь, серебро) и минералами таллия.

Во всех этих месторождениях урановое оруденение в главной своей массе представ-

лено тонкой и относительно равномерной вкрашенностью мелких зерен первичных урановых минералов; среди последних, наряду с аморфными, заметную роль играют также и кристаллические модификации урановой смоляной руды.

Явления метасоматоза проявлены резко и разнообразно. Обычно они выражаются в последовательных процессах альбитизации, карбонатизации и окварцевания рудовмещающих пород. Урановая минерализация начинается на первой (щелочной) стадии, но главным образом она связана с второй (карбонатной) стадией метасоматических процессов.

Нередко наблюдается, что даже в однородных по составу прослоях или пластах замещение охватывает не всю массу породы, а локализуется в отдельных участках, иногда резко отграниченных от участков, сравнительно слабо затронутых процессами метасоматоза. Причина этого кроется в самом механизме метасоматического замещения, которое может иметь место только в породах, характеризующихся определенными (весьма небольшими) размерами пор [12]. Повидимому, именно зоны подобной капиллярной пористости, вдоль которых явления замещения протекают особенно интенсивно, и являются в данном случае каналами, контролирующими движение растворов даже в среде, совершенно однородной по химическому и минералогическому составу. Судя по характеру новообразований, агентами переноса и отложения урана являлись относительно слабо концентрированные и поэтому весьма подвижные щелочные гидротермальные растворы, вступающие в энергичное взаимодействие с боковыми породами. Для них характерны относительно простой состав и полное отсутствие летучих компонентов, за исключением воды и углекислоты. Вопрос об источнике урана в этих месторождениях является предметом дискуссии. По одним представлениям уран извлекается из кристаллизующейся на глубине магмы; по другим — роль гидротермальных растворов сводится к перераспределению урана, первоначально рассеянного во вмещающих осадочных породах.

Примером месторождений этого типа являются, повидимому, собственно урановые и медно-урановые залежи района Катерин-Дарвин в Северной Австралии [13].

Ураноносные пласты нормальных осадочных пород морского происхождения

Это обычно не дислоцированные, иногда весьма слабо дислоцированные отложения морских бассейнов, развитые на обширных площадях. Уран в них не образует или почти не образует самостоятельных минеральных форм, связываясь главным образом с органическим веществом и с фосфатами кальция. Главными представителями месторождений этой группы являются темноокрашенные битуминозные сланцы и фосфориты морского происхождения.

Ураноносные сланцы характеризуются относительно небольшой мощностью по сравнению с другими формациями, отложившимися в такой же промежуток времени, высоким содержанием органического вещества (преимущественно в форме органических остатков), а также отсутствием или совершенно незначительным содержанием карбонатов кальция.

В *фосфоритах* содержание урана увеличивается примерно пропорционально увеличению содержания фосфатов и уменьшается в разностях, богатых карбонатом кальция. Как указывают, грубозернистые фосфатные образования содержат больше урана, чем тонкозернистые: иногда в значительной степени обогащены ураном алюмофосфаты, образовавшиеся в результате выветривания фосфоритсодержащих горизонтов [14].

В настоящее время принято считать, что источником урана в морских сланцах и фосфоритах явились непосредственно океанические воды и что уран выпадал из них более или менее одновременно с накоплением осадков. Отложение урана в сланцах и фосфоритах происходит скорее всего путем адсорбции этого металла углеродистым веществом или фосфатом кальция.

Многие особенности ураносодержащих сланцев и фосфоритов указывают на формирование их близ края континентального шельфа. Известно, в частности, что самые богатые участки ураносодержащих кварцевых сланцев Швеции представляют собой лагунные фации верхнекембрийского моря и что в подобных условиях сформировались ураноносные сланцы штата Вайоминг в США.

Месторождения ураноносных морских сланцев и фосфоритов характеризуются весьма

крупными запасами урана, но ввиду низкого содержания металла в руде (тысячные и первые сотые доли процента) используются пока в незначительной мере.

Пластообразные залежи в слабо метаморфизованных осадочных породах

Месторождения этой группы связаны с отложениями как морских, так и континентальных бассейнов и, как правило, приурочены к поясам интенсивной складчатости. От собственно осадочных (сингенетических) месторождений они отличаются значительно меньшими размерами, более высоким и резко неравномерным содержанием металла, а также обособлением главной массы урана в форме индивидуальных урановых минералов—урановых черней и в незначительной мере—настурана. В верхних окисленных частях этих месторождений изредка развиваются уранованадаты типа карнотита и гюмунита.

В качестве рудовмещающих пород наиболее важную роль играют углисто-кремнистые сланцы и органогенные известняки. Обычно в них устанавливаются отчетливые признаки метаморфизма: серицитизация глинистого вещества, углефикация органики, развитие таких явно метаморфических образований, как порфиروبласты, метакристаллы и псевдогидротермальные прожилки с анкеритом, кварцем, пиритом и халькопиритом.

Р. В. Гедева (личное сообщение) в результате тщательного изучения одного из таких месторождений пришла к выводу, что формирование рудных тел, возможно, является следствием перераспределения сингенетично отложившегося урана в процессе метаморфизма вмещающих толщ, причем главным фактором, способствующим извлечению урана из метаморфогенных растворов, являлась сорбция его органическим веществом.

Пластообразные и линзообразные залежи в нормальных осадочных породах континентальных фаций

Эти месторождения делятся на две подгруппы. Одна из них связана с породами флювиального происхождения—преимущественно с песчаниками и конгломератами, другая—с каустобиолитами.

Месторождения первой группы наиболее хорошо изучены на плато Колорадо в США. Здесь «первичные» руды содержат уран в виде окислов низшей валентности (настуран и силикаты четырехвалентного урана) и ванадий в виде гидроокислов [15]; обычно в них присутствуют также сульфиды меди и железа, а также небольшие количества молибдена, кобальта, никеля, свинца, цинка, селена и мышьяка. Окисленные руды характеризуются развитием высоковалентных соединений урана и ванадия, главным образом карнотита и тюямунита. Рудные тела имеют линзовидную форму, ориентированы согласно напластованию пород и, как правило, приурочены к местам скопления растительных остатков. По наблюдениям американских геологов локализация руд зависит также от водопроницаемости пород, «коэффициента пропускания» (т. е. произведения проницаемости данного пласта на его мощность) и наличия водонепроницаемых барьеров [16].

Нередко устанавливается четкая приуроченность уранового оруденения к границам между породами с различной водопроницаемостью, например между песчаниками и аргиллитами. Наиболее продуктивными оказываются площади, в пределах которых наблюдается быстрая смена фаций на коротких интервалах. Благоприятным является наличие в верхней части стратиграфического разреза пластов с большим «коэффициентом пропускания» и пачек, содержащих в своем составе вулканический пепел или обломки других эффузивных пород. Во многих случаях, особенно в свите Солт Уош формации Моррисон, рудные тела заключены в изолированных линзах аркозовых песчаников, окруженных значительно менее проницаемыми аргиллитами. В триасовых отложениях формации Шайнарамп (Аризона) высокие концентрации урана несут также изолированные линзы конгломератов в косослоистых песчаниках.

В ряде важных рудных районов плато Колорадо ураноносные рудные залежи ограничены в своем распространении руслами древних потоков, врезанными в породы подстилающих формаций. Установлено, что наибольший интерес в отношении ураноносности представляют флювиальные породы, заполняющие извилистые, неправильной формы эрозийные впадины с глубокими и узкими поперечными сечениями и неровным дном [17].

Руда концентрируется главным образом в вершинах русел, в промоинах дна, на флангах и в местах изгибов палеопотоков. Нижние части русел, перегруженные аргиллитовым материалом, не благоприятны для уранового оруденения. Красноцветные песчаники и аргиллиты вблизи скоплений урановых руд обесцвечиваются и приобретают сероватую окраску [18]—[20]. Разница в окраске рудоносных и безрудных пород широко используется для направления поисков новых месторождений урана на Плато. Для этой цели иногда составляются специальные колориметрические карты.

К той же подгруппе месторождений можно отнести золотоносные конгломераты Витватерс-Ранда в Южной Африке, содержащие наряду с золотом заметное количество пирита, уранинита, тухолита, серицита и хлорита, а также небольшие количества сульфидов кобальта, никеля, меди, свинца и цинка. [21] и сходные с ними древние конгломераты района Блайнд-Ривер (Канада), которые в настоящее время вызывают усиленный интерес благодаря присутствию в них уранинита, тухолита и браннерита в количествах, имеющих промышленное значение [22].

Вопрос о происхождении урановых руд в песчаниках и конгломератах до сих пор является предметом ожесточенных споров.

Следует подчеркнуть существенные отличия в условиях формирования уранового оруденения в конгломератах Витватерс-Ранда и Блайнд-Ривер, с одной стороны, и Колорадского плато, с другой, что проявляется в различии их вещественного состава, морфологии и др. Поэтому их отнесение к одной генетической группе носит условный характер.

Однако большинство исследователей полагает, что эти руды в их современной форме были отложены после образования вмещающих пород, т. е. что месторождения являются эпигенетическими. К отказу от господствовавшей ранее сингенетической гипотезы [23] приводят, в частности, такие факты, как наличие урановых залежей более чем в 20 стратиграфических горизонтах плато Колорадо, возраст которых варьирует от пермского до третичного; малая вероятность сохранения уранинита в россыпях; обычная ассоциация урана, осаденного в результате химических и биохимических процессов

с тонкозернистыми сланцами или фосфоритами, но не с грубозернистыми песчаниками [11]. Серьезное возражение против гипотезы сингенетического образования урановых руд в песчаниках было выдвинуто Стиффом, Стерном и Милки (цитировано по [24]), показавшими, что средний возраст руд Плато, определенный по свинцовому методу, составляет 71 миллион лет, или, примерно, в два раза меньше, чем возраст вмещающих пород.

Однако и среди сторонников гипотезы эпигенетического образования руд Плато нет единого мнения в вопросе об источниках оруденения.

Одни из них полагают, что рудные залежи являются результатом действия грунтовых вод, извлекавших уран из вулканических туфов и других пород, ассоциированных с месторождениями [25], [26]. Другие считают, что агентами переноса урана являлись гипогенные растворы, возможно сильно разбавленные грунтовыми водами, и что источник металла заключался в кристаллизующейся на глубине магме [21]. Такое предположение представляется в общем маловероятным, если учесть, что большинство рудных месторождений этого типа не обнаруживает какой-либо связи с изверженными породами и разрывными дислокациями и что вещественный состав руд (в частности наличие ванадия) и околорудные изменения рудовмещающих пачек не характерны для гидротермального процесса.

Ураноносные угли содержат уран главным образом в форме урановых черней или уранорганических соединений невыясненного состава. Как правило, наибольшее содержание урана отмечается в полубитуминозных высокозольных углях, наименьшее — в битуминозных углях и антрацитах. Угли, представляющие собой промышленную урановую руду, как правило, являются весьма низкосортным минеральным топливом [27].

Происхождение урана в углях, повидимому, такое же, как и в песчаниках плато Колорадо.

Установлено, что лигнит в Южной Дакоте (США) содержит заметные концентрации урана только там, где он находится непосредственно под несогласно залегающей туфогенной свитой Уайт-Ривер [28]; нижние слои лигнита могут нести оруденение,

Схема генетической классификации промышленных месторождений урана

Классы и типы месторождений	Основные черты генезиса			
	вероятный источник урана	вероятный характер рудоносного раствора	вероятные способы осаждения урана	рудолонализующие и рудоконтролирующие структуры
I. Магматогенные месторождения				
1) Пегматиты и пегматоидные жилы: а) гранитные пегматиты с уранинитом и (или) сложными окислами урана, тантала, ниобия, титана и др.; б) пегматоидные жилы с титанатами железа и урана	Кристаллизующаяся магма	Остаточный магматический расплав	Непосредственная кристаллизация из расплава	Не установлено
2) Гидротермальные месторождения: а) собственно урановые, ураново-полиметаллические, ураново-никель-кобальт-висмут-серебряные, ураново-молибденовые и др. жилы, сформировавшиеся в открытых полостях б) собственно урановые, железо-урановые, медно-урановые и др. залежи, сформировавшиеся путем метасоматоза боковых пород	То же	Гипогенные высококонцентрированные сульфатные и карбонатные растворы сложного состава с высоким содержанием летучих компонентов	Окислительно-восстановительные реакции в присутствии двухвалентного железа	Трещины разрыва и скалывания, оперяющие региональные разломы
	То же или рассеянная минерализация в окружающих породах	Гипогенные слабоконцентрированные щелочные и щелочно-земельные растворы относительно простого состава с низким содержанием летучих компонентов	То же	Зоны оптимальной пористости
II. Осадочные (сингенетические) месторождения				
1) Морские сланцы 2) Морские фосфориты	Океаническая вода	—	1) Сорбция органическим веществом 2) Соосаждение с фосфатами кальция	—
III. Осадочно-метаморфогенные месторождения				
1) Залежи в известняках 2) Залежи в углестокремнистых сланцах	Породы, содержащие уран в рассеянной форме	Метаморфогенные растворы не установленного состава	Окислительно-восстановительные реакции в присутствии органического вещества	Межпластовые трещины, складчатые деформации высших порядков
IV. Месторождения выветривания				
1) Залежи в песчаниках и конгломератах 2) Залежи в суббитуминозных углях и лигнитах	То же	Грунтовые воды, содержащие щелочные и щелочно-земельные уранилкарбонаты	Разложение уранилкарбонатных комплексов в зоне с низким pH; сорбция органическим веществом	Зоны оптимальной пористости

если они залегают в грубозернистых песчаниках или других водопроницаемых породах. Кроме того, максимальное содержание урана наблюдается обычно в верхней части каждого данного слоя. Это приводит к выводу, что уран в углях отложен грунтовыми водами и что источником урана являются урансодержащие вулканические породы формации Уайт-Ривер. Относительно высокое содержание урана в высокзолных углях объясняется тем, что они более водопроницаемы, чем малозольные битуминозные угли и антрациты [19].

В процессе отложения урана наибольшее значение имела, повидимому, адсорбция этого металла органическим веществом. Некоторые экспериментальные работы показали, что суббитуминозный уголь, лигнит и торф необратимо извлекают более 98% урана из раствора, содержащего около 0,02% металла [29]. Полагают, что обогащение углей ураном является скорее всего следствием осаждения этого металла из растворов щелочных уранилкарбонатов или уранилкарбонатов щелочных земель, распадающихся в присутствии кислот, извлекаемых из лигнита, с образованием металлоорганических соединений, относительно устойчивых в зоне с низким рН [30].

Таким образом, эпигенетический характер урана в углях устанавливается, в общем, с достаточной определенностью. Другое предположение — о том, что уран в угле первоначально концентрировался живыми растениями, — мало вероятно, так как даже при самых благоприятных условиях содержание урана в золе живых растений редко достигает 0,01%, в то время как для золы урансодержащих углей и лигнитов свойственно более высокое содержание.

Из месторождений в осадочных породах континентальных фаций наибольшее зна-

чение имеют пока урансодержащие песчаники и конгломераты, являющиеся, в частности, основным источником уранового сырья в Соединенных Штатах.

Общие выводы

Приведенный краткий обзор показывает, что природные концентрации урана образуются в самых разнообразных условиях, охватывающих последние стадии собственно магматического процесса, явления метаморфизма, осадочный цикл и процессы выветривания.

Соответственно этим условиям образования урановые месторождения целесообразно разделить по генетическому признаку на четыре класса: 1) магматогенные месторождения; 2) осадочные сингенетические месторождения; 3) осадочные метаморфогенные месторождения; 4) месторождения выветривания.

К месторождениям первого класса относятся пегматиты и гидротермальные жилы (первая и вторая из описанных выше групп). К ним же можно, повидимому, отнести и пластообразные залежи в сильно метаморфизованных осадках (третья группа), хотя вопрос об источнике заключенного в них урана является еще спорным. К месторождениям второго класса относятся ураноносные пласты нормальных осадочных пород (четвертая группа). Месторождения третьего класса включают в себя пластообразные залежи в слабо метаморфизованных породах (пятая группа). Месторождения четвертого класса представлены пластообразными и линзовидными залежами в нормальных осадочных породах континентальных фаций (шестая группа).

Общая схема классификации месторождений урана, вытекающая из изложенного выше материала, приводится в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. R. Page, *Econ. Geology* 45, 12—34 (1950).
2. J. B. Mawdsley, *Canadian Min. Met. Bull.* 482, 366—375 (1952).
3. V. E. McKelvey, *U. S. Geol. Survey Bull.* 1030 A (1955).
4. L. W. Parkin, K. P. Glasson, *Econ. Geol.* 49, 815—825 (1954).
5. R. D. Ninger, *Minerals for Atomic Energy*, N. J. D. van Nostrand Company Inc. (1954).
6. R. Murphy, *Trans. Can. Inst. Min. Met.* 49, 426—435 (1946).
7. Месторождения урана в Соединенных Штатах. Геология атомных сырьевых материалов. (Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.) Госгеолтехиздат, 1956, стр. 220—237.
8. D. F. Kidd and M. H. Nauck, *Bull. Geol. Soc. of Amer.* 46, 879—960 (1935).
9. A. H. Lang, *Econ. Geol. Ser. № 16* (1952).
10. B. E. Мак-Келви, Д. Л. Эверхарт, Р. М. Гаррелс. Геология атомных сырье-

- вых материалов. (Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.) Госгеолтехиздат, 1956, стр. 25—52.
11. В. Линдгрэн, Минеральные месторождения, т. 1, ОНТИ НКТП СССР (1934).
 12. G. W. Bain, *Econ. Geol.* 31, № 5 (1936).
 13. C. J. Sullivan and R. S. Matheson, *Econ. Geol.* 47, 751—758 (1952).
 14. V. E. McKelvey and J. M. Nelson, *Econ. Geol.* 45, 35—53 (1950).
 15. A. Rosenzweig, J. W. Gruner and L. Gardner, *Econ. Geol.* 49, 351—361 (1954).
 16. Д. А. Д ж о б и н. Геология атомных сырьевых материалов. (Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.) Госгеолтехиздат, 1956, стр. 432—441.
 17. L. Miller, *Econ. Geol.* 50, 156—169 (1955).
 18. J. A. Masters, *Econ. Geol.* 50, 111—126 (1955).
 19. J. W. Isachsen, J. W. Mitcham, H. B. Wood, *Econ. Geol.* 50, 127—134 (1955).
 20. R. J. Wright, *Econ. Geol.* 50, 127—134 (1955).
 21. C. F. Davidson, *Mining Mag.* 88, 73—85 (1953).
 22. R. J. Traill, *Can. Mining J.* 75, 63—68 (1954).
 23. R. P. Fischer, *Econ. Geol.* 32, 906—951 (1937).
 24. H. Faul (edit.), *Nuclear Geology*, N.Y. (1954).
 25. F. F. Koeberlin, *Econ. Geol.* 33, 458—461 (1938).
 26. J. W. Gruner, *Mines Mag.* 44, 53—56 (1954).
 27. J. D. Vine, Uranium-bearing coal in the U. S. Доклад № 55 на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, 1955 г.
 28. N. M. Denson and J. R. Gill, Uranium-bearing lignite and its relation to volcanic tuffs in Eastern Montana and Dakotas. Доклад № 57 на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, 1955 г.
 29. G. W. Moore, *Econ. Geol.* 49, 652—658 (1954).
 30. J. A. Breger, M. Deul and S. Rubinstein, *Econ. Geol.* 50, 206—226 (1955).