Б.Л.Рыбалов Б.И.Омельяненко

ИСТОЧНИКИ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА ЭНДОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

«НАУКА»

2004

553
Р-93

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,
ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

Б.Л.Рыбалов Б.И.Омельяненко

ИСТОЧНИКИ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА ЭНДОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук
Ф.И. ВОЛЬФСОН

ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА
Шифр
Инв. № 47314

МОСКВА "НАУКА"

1989

УДК 553.495

Источники рудного вещества эндогенных урановых месторождений / Б. Л. Рыбалов, Б. И. Омельяненко.— М.: Наука, 1988 г.— 275 с.— ISBN 5-02-002644-1

В книге рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с источником рудного вещества урановых месторождений эндогенного происхождения. Охарактеризована роль различных геологических процессов в накоплении, миграции и концентрации урана, вплоть до образования месторождений. На основе анализа материалов по геологии урановых месторождений, петрохимии, пространственных и временных соотношений оруденения с метаморфизмом, магматизмом и минерализацией других металлов, с учетом последних экспериментальных данных излагаются представления о главных типах источников рудного вещества: коровом магматическом и коровом фильтрационном (дальней мобилизации). Табл. 4. Ил. 23. Библиогр. 147 назв.

Рецензенты

В. А. Невский, И. С. Модников

Редактор издательства

Т. А. Касаткина

Р $\frac{1804020000-098}{042(02)-89}$ 342-89, кн. 2

© Издательство «Наука», 1989

ISBN 5-02-002644-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопрос об источниках рудного вещества эндогенных месторождений относится к числу фундаментальных в области теории рудообразования.

На Всесоюзном совещании, посвященном источникам рудного вещества эндогенных месторождений, которое было проведено в 1974 г. в г. Москве, подчеркивалось, что проблема источников рудообразующих веществ является одной из главных в современной теории рудообразования. Исследования по этой проблеме в целом и по отдельным ее аспектам развиваются в разных направлениях, причем в настоящее время всеобщее признание получили идеи о нескольких типах или группах источников вещества руд, об эволюции их относительно роли в процессах рудообразования в ходе геологической истории земной коры. В этих исследованиях наряду с известными традиционными методами — геологическими, петрографическими, радиогеохимическими — используются новые, такие, как изотопно-геохимические, осколковой радиографии, изучение газово-жидких включений и др. Большое значение приобретают результаты экспериментальных исследований.

Вместе с тем приходится признать, что, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке проблемы, совокупность имеющихся данных позволяет выдвигать альтернативные решения. Это связано с тем, что результаты исследований не дают возможности однозначно охарактеризовать все последовательные ступени геохимической истории рудного элемента. В первую очередь это касается выяснения роли магматических и внемагматических источников рудного вещества для эндогенных месторождений разных генетических групп, роли коровых и подкоровых процессов. Все еще недостаточно разработаны критерии и методы (особенно геохимические, изотопные и др.) выявления и оценки источников рудного вещества.

Все сказанное в полной мере относится к эндогенным урановым месторождениям, изучение которых началось значительно позже всех других месторождений.

Проблема источников рудного вещества урановых месторождений различных генетических групп относится к числу наиболее сложных в урановой геологии. Решение этой проблемы неразрывно связано с выяснением не только условий формирования промышленных концентраций урановых руд, но и многих сложных вопросов их генезиса, в конечном счете — главных причин их возникновения. В то же время она является весьма важной и необходимой как для совершенствования общей теории

уранового рудообразования, так и для разработки или уточнения критериев прогнозирования уранового оруденения в известных рудных провинциях и районах, а также для оценки потенциальной ураноносности территорий новых регионов.

Научные исследования, направленные на решение конкретных вопросов проблемы источников рудного вещества, в первую очередь урана, при успешном развитии общетеоретических положений, позволяют значительно расширить и углубить существующие знания и представления об источниках урана и сопутствующих рудных элементов в рудообразующих растворах, об их путях, условиях и способах миграции и т. п. В связи с этим актуальность исследований в этом направлении вполне очевидна, и их постановка вызвана необходимостью получить новые дополнительные данные для развития и углубления существующих представлений об источниках и особенностях миграции рудного вещества при формировании основных групп и типов эндогенных урановых месторождений.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время нет недостатка в гипотезах и точках зрения по поводу источника ураноносных рудообразующих растворов. Однако сейчас вызывают интерес не столько сами представления, сколько аргументы, базирующиеся на анализе известных и особенно новых фактических данных. Особенно острая необходимость назрела в сопоставлении имеющейся совокупности геологических, петрологических, геохимических и экспериментальных данных, объективной оценки их представительности, проведении специальных исследований, направленных на согласование данных, находящихся в противоречии.

Несомненно, что наибольший объем данных в этом отношении накоплен по геологии урановых месторождений. В последнее время благодаря широкому использованию метода осколковой радиографии удалось детально охарактеризовать поведение урана в разнообразных геологических процессах, таких, как гранитизация, кристаллизация магматических расплавов, метаморфизм, выветривание и т. д. В результате при разработке конкретных механизмов формирования рудоносных растворов появилась возможность опереться на реально наблюдаемые детали распределения урана, являющиеся своеобразными «фотографиями» различных этапов его геохимической истории. Такого рода данные в отношении всех других рудных элементов в настоящее время отсутствуют. Все это создает при разработке указанной проблемы заманчивые перспективы на примере урана всесторонне проанализировать вопрос об источниках рудного вещества гидротермальных месторождений и в результате создать обобщенную модель формирования ураноносных рудообразующих растворов. В этой связи значительное внимание авторами уделено данным о месте уранового оруденения в геологической истории рудоносных провинций, его соотношению с магматизмом и другими рудными месторождениями, поведению урана на всех стадиях магматического и послемагматического процессов, результатам экспериментального изучения фракционирования урана в системе расплав — твердая фаза — флюид, данным по растворимости окислов урана в водных растворах при высоких P—T параметрах и т. д.

Одна из основных задач этих комплексных исследований состояла

в том, чтобы на основе детального и всестороннего анализа накопленного фактического материала, современных представлений и результатов проведенных экспериментальных работ углубить по возможности современные знания по источникам рудного вещества при формировании главных групп эндогенных месторождений урана в процессе развития земной коры. Вместе с тем анализ и систематизация имеющихся материалов должны показать общее состояние проблемы, а в результате критического рассмотрения с учетом новых данных существовавших представлений предложить возможные варианты источников рудного вещества (реальные природные геохимические модели) и наметить дальнейшие пути исследования в этой сложной проблеме.

Решению всех указанных задач и посвящена предполагаемая книга.

Следует особо подчеркнуть, что авторы книги рассматривают проблему источников рудного вещества эндогенных урановых месторождений как составную часть более общей проблемы возникновения урановорудных провинций и районов, в которых развиты месторождения металла разных типов и генетических особенностей.

Как известно, уран, относящийся к числу наиболее подвижных элементов, участвует во многих геологических процессах и мигрирует в широком диапазоне как эндогенных, так и экзогенных условий на разных этапах развития рудных провинций. Поэтому в природе существуют различные геохимические механизмы (модели) его миграции, связанные с тем или иным геологическим явлением. Однако далеко не каждый из этих механизмов приводит к созданию рудообразующих растворов, способных сформировать урановые месторождения, даже при наличии благоприятных обстановок.

Анализ пространственного размещения гидротермальных урановых месторождений в разных геологических условиях и связи их с проявлением различных тектоно-магматических процессов в пределах урановорудных провинций, в которых они сконцентрированы, показывают, что их положение в тектонических структурах земной коры вполне закономерно, а появление в общей истории развития не случайно и обязано единой цепи взаимосвязанных эндогенных (глубинных) процессов.

Принципиальной концепцией, на основе которой проблема источников рудного вещества должна решаться и которая может объединить (объяснить или сблизить) многие точки зрения, являются общие или близкие представления авторов о главных причинах возникновения урановорудных провинций [32, 46, 87]. Согласно этим представлениям образование урановых провинций и месторождений происходило в крупных тектонических блоках континентальной земной коры с хорошо развитым «гранито-метаморфическим» слоем, испытавшим длительное специфическое направленное развитие. Такие блоки, ограниченные и рассеченные глубинными разломами, находились под продолжительным унаследованным воздействием подкоровых газово-тепловых потоков (флюидов), которые вызывали на ранних стадиях проявление в сиалическом слое процессов гранитизации, гранитоидного магматизма, кремний-калиевого метасоматоза, отличающихся геохимической урановой специализацией. Все эти процессы, предшествовавшие рудообразованию, сопровождались длительным накоплением в земной коре радиоактивных элементов, в том

числе урана. Такой ураноносный субстрат (магматические гранитоидные очаги или гранитизированные породы) мог служить основным источником урана. Дальнейшее развитие постгранитизационных или постмагматических процессов приводило на последних стадиях к формированию ураноносных гидротермальных растворов. Однако способы их образования и механизм извлечения металла могли быть несколько разными. Появление таких растворов было связано либо с отделением «остаточных» флюидов из закристаллизовавшихся магматических очагов, либо с воздействием на них новых порций подкоровых (мантийных) газово-тепловых потоков.

Необходимо особо подчеркнуть, что проявление многостадийной гидротермальной деятельности в орогенный этап развития рудных провинций приводило к формированию ураноносных рудообразующих растворов только в таких участках континентальной земной коры, в которых достаточно полно, длительно и унаследованно проявились (сформировались) предшествующие рудоподготовительные процессы, протекавшие под воздействием мантийных флюидопотоков и приводившие через ультраметаморфизм (гранитизацию) и палингенный магматизм к накоплению радиоактивных элементов в миграционноспособной форме. Продуктивность проявления рудообразующих гидротермальных процессов и их потенциальная ураноносность определяются интенсивностью, продолжительностью появления и агрессивностью (составом) подкоровых флюидопотоков, проникающих по проницаемым зонам глубинных разломов через участки гранито-метаморфического слоя земной коры, обогащенные «подвижной» (легко извлекаемой) формой урана (магматические очаги, гранитизированные и гранитоидные породы).

Отсюда вытекает, по мнению авторов, важный вывод, что главными и весьма близкими по смыслу являлись внутрикоровые магматические и фильтрационные (глубинной мобилизации) или комбинированные (фильтрационно-магматические) типы источников рудного вещества. Другие типы источников (фильтрационные ближней мобилизации, метаморфогенные, подкоровые, полигенные), отражающие соответствующие геохимические модели, являются частными вариантами или второстепенными и поэтому не имели существенного значения в создании ураноносных рудообразующих растворов.

В связи с этим отмеченные два типа главных источников рассмотрены наиболее подробно, причем обоснование магматических источников разработано весьма детально, фильтрационных источников дальней (глубинной) мобилизации — более схематично. Остальные типы источников как альтернативные рассмотрены в общих чертах.

Несомненно, настоящая работа не могла бы быть выполнена без тесного сотрудничества со многими специалистами, разрабатывающими различные аспекты проблемы, без значительного прогресса в области геологии и геохимии урана, который достигнут общими усилиями научных и производственных геологических организаций.

В основу работы положены материалы многолетних исследований авторов и обширные литературные данные по многим вопросам в этой области геологии. В то же время создание книги оказалось возможным благодаря многолетним и целенаправленным исследованиям большого

научного коллектива, которые проводились по данной проблеме под руководством авторов. В разработке разных аспектов этой проблемы плодотворно занимались: по петрологии — О. П. Елисеева, П. С. Козлова, Л. И. Симонова; по геологии — В. И. Величкин, Б. П. Власов, А. Е. Толкунов, Б. М. Сельцов, В. Б. Мещерякова, В. Н. Левин и др.; по радиогеохимии — В. В. Викторов, Т. К. Викентьева; по изотопным исследованиям геохронологии — И. В. Чернышев, В. Г. Голубев и др.; по экспериментальным исследованиям — А. Ф. Редькин, С. В. Юдинцев. В содержании книги в соответствующих разделах нашли отражение многие результаты этих исследований.

Необходимо подчеркнуть, что в книге развиваются представления авторов, которые основаны на идеях Д. С. Коржинского, А. Г. Бетехтина, С. С. Смирнова, Ф. И. Вольфсона, Н. П. Лаверова и других ученых, содержащиеся во многих опубликованных работах.

К сожалению, многие важные вопросы источников рудного вещества урановых месторождений некоторых типов не получили должного освещения, что объясняется прежде всего недостаточной их аргументацией или слабой изученностью.

В процессе подготовки рукописи к печати авторы получили ценные советы и замечания при обсуждении отдельных аспектов с Ф. И. Вольфсоном, И. С. Модниковым, С. Ф. Винокуровым и другими исследователями генезиса рудных и урановых месторождений.

Авторы выражают искреннюю благодарность за оказанную большую помощь всем отмеченным выше специалистам.

Глава I

ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА

Генетические и формационные типы урановых месторождений

Накопленный к настоящему времени геологический материал убедительно свидетельствует о значительном разнообразии формационных типов урановых месторождений. Они локализуются в различных геологических условиях, отличаются по тектонической позиции и возрасту, структурным особенностям и минеральному составу руд, связям с определенными типами месторождений других рудных элементов. Единственным признаком, объединяющим месторождения урана, является их связь с процессами, протекавшими в орогенных условиях формирования зрелой земной коры континентального типа, или ее распада. В областях с корой океанического типа промышленных урановых месторождений не установлено. Отмечено также, что наиболее крупные урановые месторождения были сформированы в определенные металлогенические эпохи.

Общепринятой систематики урановых месторождений пока не разработано. Предлагаемые классификации основаны либо на генетической (А. Г. Бетехтин, Ф. И. Вольфсон, Н. П. Лаверов, Я. Д. Готман, И. Н. Зубрев и др.), либо на формационной (А. Б. Каждан, М. В. Шумилин) основе. В систематиках Н. П. Лаверова, А. Б. Каждана, И. Н. Зубрева и др. в качестве важного классификационного признака выступает положение месторождений в геотектонических элементах земной коры, сформированных на разных этапах ее развития. Н. П. Лаверов [87], развивая идеи А. Г. Бетехтина, объединяет все месторождения урана в четыре основные серии: эндогенную, экзогенную, метаморфогенную и полигенную.

Месторождения эндогенной серии подразделяются им на три группы по признаку их связи с комплексами магматических пород, различающихся по составу и происхождению (связанные со щелочно-ультраосновными, щелочными и кислыми — гранитоидным магматизмом). Внутри каждой группы намечается несколько классов (позднемагматические, пегматитовые, магматогенные гидротермальные и др.), различия между которыми определяются геологическими и физико-химическими условиями рудообразования. В классах выделяются основные типы месторождений, отличающиеся главным образом минеральным и вещественным составом руд, структурно-морфологическими особенностями рудных тел, условиями их размещения. Условия размещения и формирования разнотипных урановых месторождений эндогенной серии детально разработаны в работах Ф. И. Вольфсона, Н. П. Лаверова [27, 28, 32, 119] и других советских и зарубежных геологов.

Среди месторождений экзогенной серии установлены две группы: седиментационно-диагенетические (сингенетические) и инфильтрационные (эпигенетические), образованные поверхностными и подземными водами. По условиям формирования каждая группа месторождений подразделяется на два-три класса, внутри которых выделяется до девяти основных типов месторождений, отличающихся минеральным и вещественным составом руд, условиями их залегания и морфологией рудных тел.

Метаморфогенная серия включает две группы месторождений: метаморфизованные и ультраметаморфические. При этом в последнюю группу входят многообразные месторождения в щелочных (калиевых и натриевых) метасоматитах, локализованных в зонах глубинных разломов. Согласно Я. Н. Белевцеву и др. [8, 9], оруденение этих месторождений сформировалось в результате осаждения металла из восходящих ураноносных растворов, поднимавшихся из зон ультраметаморфизма на более высокие уровни в зоны рудообразования. Эти месторождения являются гидротермальными и весьма близки эндогенным магматогенным месторождениям.

Полигенная серия включает как собственно урановые месторождения, так и месторождения комплексных урансодержащих руд (с никелем, кобальтом, мышьяком, медью, золотом, серебром, ванадием и др.). Обычно они относятся к особому типу сложных, полигенных, месторождений в зонах несогласий. Вопросы генезиса их остаются во многом неясными и дискуссионными. Образование этих месторождений многие исследователи связывают с несколькими процессами последовательной концентрации урана: сингенетическим накоплением металла в углеродистых отложениях, их метаморфизмом и перераспределением, более поздней гидротермальной деятельностью, как сопровождавшейся поздним гранитоидным магматизмом, так и без него, и, наконец, накоплением богатых концентраций урана и сопутствующих элементов в зонах вторичного обогащения. На этих месторождениях промышленные скопления урановых руд образуются за счет гипергенных процессов, однако первичное оруденение также является гидротермальным. Без наличия последнего даже на контрастно ураноносных породах в зоне гипергенеза промышленное оруденение не известно.

Н. П. Лаверов [61] считает, что положение месторождений в зонах региональных поверхностей несогласия, характерный терригенный состав перекрывающих платформенных отложений, отчетливо выраженный контроль разрывами и карстогенными структурами, специфический состав руд и наличие разновозрастных генераций урановых минералов — все это указывает на их полигенное происхождение.

В самостоятельную группу выделяются месторождения, образованные при пространственном совмещении в пределах одной рудолокализующей структуры различных процессов минералообразования. Ведущая роль здесь принадлежит гидротермальным образованиям, наложенным на более ранние седиментационно-диагенетические концентрации.

Наряду с этим среди различных гидротермальных урановых месторождений эндогенной серии и близких к ним гидротермальных образований полигенной и метаморфогенной серий можно выделить две большие группы: а) месторождения, связанные с орогенным кислым (гранитоидным),

реже щелочным магматизмом как интрузивным, так и вулканическим; б) месторождения, не обнаруживающие такой связи. К ним относятся либо статиформные телетермальные (амагматические) месторождения, либо месторождения во времени и пространстве, близкие к проявлениям основного магматизма.

По-видимому, они имеют разные типы источников урана и других сопутствующих элементов.

Для эндогенных урановых месторождений характерно большое разнообразие типов. Выдержанность формационных особенностей месторождений не только в пределах одних урановорудных провинций и районов, но и в пределах металлогенических поясов, несмотря на формирование их в разных геологических условиях, свидетельствует о том, что они вряд ли могли быть связаны с локальными причинами. Скорее всего, эти особенности обусловлены спецификой глубинных (эндогенных) петрогенетических, геохимических и рудогенерирующих процессов, определяющих в целом общие металлогенические черты и ураноносность рудных провинций (их металлогеническую специализацию, формационный тип месторождений). Тем более для урановорудных провинций характерна отчетливая пространственная приуроченность к определенным глубинным структурам земной коры континентального типа, в пределах которых длительно, неоднократно и унаследованно проявились различные эндогенные процессы. Отсюда возникает необходимость обратиться за объяснением источника рудного вещества месторождений к глубинным причинам (факторам) и истории развития этих участков земной коры.

Следует особо подчеркнуть, что формирование оруденения эндогенных урановых месторождений любого типа происходило только в орогенные этапы развития и тесно связано с проявлением глубинных тектоно-магматических процессов, которые вызывали изменение земной коры — ее общей мощности и внутреннего строения.

Возникновение ранних эндогенных высокотемпературных торий-урановых месторождений провинций древних (докембрийских) щитов и платформ и гидротермальных урановых месторождений провинций фанерозойских складчатых областей совпадает с эпохами завершения процессов гранитизации, т. е. в эпохи создания сиалического («гранито-метаморфического») слоя континентальной земной коры. Образование урановых месторождений провинций среднепротерозойской и мезозойско-кайнозойских активизированных областей приходится на эпохи интенсивной тектоно-магматической активизации или распада континентальной земной коры, т. е. ее «базификации».

Отмеченные закономерности (особенности) провинций свидетельствуют о связи с этими процессами развития коры главных типов источников месторождений эндогенного уранового оруденения.

Обзор современных представлений о генезисе эндогенных месторождений урана и их источниках

Поиски и изучение месторождений урана были начаты значительно позднее, чем большинства месторождений других полезных ископаемых. Естественно, что вопросы генезиса урановых месторождений и их источника рассматривались в первую очередь с позиций уже существующих генетических концепций. В значительной степени этому способствовало то, что, несмотря на разнообразие геологических условий формирования урановых месторождений их размещения и соотношения с магматизмом, не было отмечено каких-либо фактов, которые указывали бы на принципиальное отличие их от месторождений других полезных ископаемых. Нередко они образуют комплексные урановорудные провинции и районы. Показателем общности условий накопления этих элементов является часто встречающаяся тесная ассоциация урана с сульфидами молибдена, свинца, цинка, меди, а также с флюоритом и золотом. Можно поэтому заключить, что проблема источников урана не отделима от общей проблемы источников рудных веществ эндогенных месторождений других металлов. Вместе с тем едва ли можно назвать какой-либо другой элемент, как уран, для месторождений которого был бы характерен столь широкий диапазон геологических условий образования, минералогических и геохимических особенностей. В ряде случаев особенно трудно обосновать связь с магматизмом. Все это привело к тому, что в настоящее время высказываются различные, нередко взаимоисключающие представления об источниках рудообразующих растворов, механизме их формирования, соотношении и связи с магматизмом.

Предлагая обзор современных представлений об источниках рудного вещества эндогенных месторождений урана, авторы попытались по возможности полнее отразить состояние проблемы, проанализировать главнейшие ее аспекты, наметив возможные пути дальнейшего решения.

В рудных провинциях Центральной и Западной Европы уже давно были известны гидротермальные урановые месторождения жильного типа. Постоянная приуроченность этих и других рудных месторождений к интрузивным массивам позднегерцинских гранитоидов и близкое время (по геологическим данным) их образования многими изучавшими такие объекты исследователями (К. Кайлем, Ф. Шумахером, Г. Шнейдерхёном, В. Х. Эммонсом, О. В. Эльснером, К. Питчем, А. Ватцнауэром и др.) объяснялись генетической связью, причем обычно считалось, что эти месторождения связаны непосредственно с интрузивами. Критически разбирая подобные ортодоксальные взгляды А. Г. Бетехтин еще в конце 1940-х — начале 1950-х годов обосновал представления о парагенетической связи гранитоидов и гидротермального уранового оруденения месторождений, т. е. о единстве их происхождения из гипотетического глубинного магматического очага.

Уже на первых этапах изучения эндогенных урановых месторождений были установлены их пространственная приуроченность к областям широкого проявления гранитоидного (редко щелочного) магматизма, а также четкие признаки, указывающие на формирование руд под воздействием

восходящих нагретых растворов. Было отмечено, что формирование месторождений происходило после завершения магматизма на наиболее поздних стадиях послемагматического процесса, а сами месторождения располагаются в пределах, вблизи и на значительном удалении от магматических тел. Все это привело к выводу об отсутствии непосредственной связи месторождений с конкретными магматическими телами. Аналогичные соотношения были уже хорошо известны для месторождений других полезных ископаемых.

Данные по пространственно-временным соотношениям магматических пород и урановых руд вполне согласовывались с представлениями С. С. Смирнова, высказанными еще в 1947 г. [110] о том, что растворы, породившие месторождения, нельзя считать непосредственными продуктами конкретных магматических тел. По его мнению, формирование основных порций растворов происходило в глубинных корневых частях рудоносного магматического комплекса. Мысль об отсутствии связи гидротермальных рудных месторождений с конкретными магматическими телами неоднократно подчеркивалась также Ю. А. Билибиным [14], по мнению которого, гидротермальные месторождения и изверженные породы являются продуктами единых магматических очагов. Такой тип связи магматических пород и руд принято относить к парагенетическому (косвенному или братскому). Данная точка зрения в отношении гидротермальных месторождений, в том числе и урановых, развивалась многими отечественными геологами — Д. И. Щербаковым, А. Г. Бетехтиным, Ф. И. Вольфсоном, В. И. Смирновым и др.

Открытие в областях развития континентального палеовулканизма месторождений молибден-урановой формации в еще большей степени подтвердило представления о связи оруденения с магматизмом. Было установлено, что самые поздние вулкано-интрузивные образования и гидротермальные урановые руды весьма тесно между собой связаны не только в пространстве, но и структурно, а также во времени, что, по-видимому, могло быть обусловлено единством источника магматических расплавов и рудоносных растворов. Однако истинные причины связи этих месторождений с вулканическими комплексами до конца не были выяснены и поэтому оставались во многом дискуссионными.

Некоторые исследователи (Котляр, 1965 г. и др.) пытались связывать образование различного оруденения, в том числе и уранового, непосредственно с вулканическими процессами. При этом выделялись так называемые вулканогенные месторождения, к которым относились не только эксгаляционные, но и месторождения, сформированные из гидротермальных растворов в условиях постоянного или периодического сообщения магматического очага с дневной поверхностью.

В то же время непосредственно изучавшие эти месторождения исследователи Ф. И. Вольфсон, Л. И. Лукин, Е. П. Сонюшкин, Е. Д. Карпова и др. на основании большого фактического материала пришли к выводам, что они были сформированы гораздо позднее — после внедрения даек, из постмагматических гидротермальных растворов.

А. И. Семенов еще в 1959 г. отмечал [107], что основные промышленные типы гидротермальных урановых месторождений связаны обычно с магматическими породами поздних этапов развития подвижных поясов

земной коры. Однако оруденение всегда является более поздним и располагается в зонах дробления, пересекающих эти породы. Следовательно, урановые месторождения главнейших промышленных типов связаны с магматическими породами лишь парагенетически. Исходя их общей последовательности магматических процессов и состава продуктов магматизма, автор высказал предположение, что поступление ураноносных гидротермальных растворов происходило в период, когда магматический очаг находился в области взаимоперехода от «сиалической» к «базальтовой» оболочке земной коры.

В 1961 г., опираясь на имеющуюся к тому времени весьма значительную совокупность данных о пространственно-временных соотношениях урановых месторождений с магматизмом, Ф. И. Вольфсон с соавторами [21] предприняли попытку обосновать вывод о том, что источником ураноносных гидротермальных растворов являлись глубинные очаги гранитной магмы в наиболее поздние стадии их развития. Таким образом, родство урановых месторождений с изверженными породами подразумевало наличие единого источника их образования. Эта точка зрения является наиболее широко распространенной.

Впервые идея о переносе урана горячими водными растворами в условиях низкого парциального давления кислорода была высказана А. Г. Бетехтиным в 1959 г. Рудоносные растворы, по его мнению, представляют собой магматогенные флюиды, отделяющиеся из остывающего магматического очага в конечные стадии кристаллизации гранитоидного расплава. Они обогащены галоидными и другими соединениями рудных, в том числе и радиоактивных, элементов. Этот флюид, охлаждаясь по мере продвижения в верхние части коры, переходил в гидротермальный рудообразующий раствор. Основными формами переноса урана являются UCl_4 и UF_4 [13]. Представление о связи урана с гранитными магмами вполне согласуется с соображением о том, что уран наряду с другими литофильными элементами относится в основном к «внутрикоровым» химическим элементам.

В дальнейшем в ходе обсуждения и дискуссий по указанной проблеме наметилась тенденция к смягчению ортодоксальности изложенной точки зрения. Многие исследователи, не отрицая важной роли магматических процессов в формировании рудоносных растворов, допускают, что рудное вещество частично поступает во флюид из кристаллизующихся магматических расплавов, а частично мобилизуется на путях циркуляции гидротермальных растворов из уже закристаллизовавшихся очагов и глубинных магматических и метаморфических пород.

Главными аспектами, в которых развиваются и аргументируются представления о магматогенном источнике рудоносных растворов, являются: 1) пространственно-временные соотношения месторождений с магматизмом; 2) геохимические особенности руд и наиболее близких к ним по возрасту магматических образований; 3) содержание радиоактивных элементов в последовательных магматических образованиях соответствующего тектоно-магматического цикла; 4) поведение урана при становлении магматических комплексов наиболее близких по возрасту к оруденению; 5) специфические петрохимические и другие особенности магматизма, свойственные ураноносным провинциям; 6) термобарогеохими-

ческие особенности процессов уранового рудообразования; 7) минеральный состав урановых руд, сходство и различия с рудами месторождений других металлов.

Опираясь в основном на геологические данные, указанная концепция не была, однако, аргументирована физико-химическими данными. Являясь основой самых общих построений, геологические данные не могли обеспечить разработку механизмов формирования и эволюции ураноносных растворов. Одним из узловых вопросов в данной проблеме является обоснование возможности переноса урана магматогенными растворами.

Данные по химии урана свидетельствовали о плохой растворимости урана в восстановительных условиях, которые естественно предполагать для глубинных магматических очагов. Не случайно поэтому, что представления А. Г. Бетехтина о переносе урана в виде UCl_4 и UF_4 подверглись жестокой критике со стороны В. Л. Барсукова и Г. Б. Наумова [4] и до последнего времени не пользовались популярностью. В этой работе подчеркивалось, что четырехвалентный уран чрезвычайно легко гидролизуется и выпадает в осадок согласно уравнению $U^{+4}+4OH^{-}=UO_2+2H_2O$. Указывалось также, что перенос урана в четырехвалентной форме если и возможен, то только в сильно кислых растворах, которые нереальны, исходя из наблюдаемых природных парагенезисов.

В своем ответе на критику А. Г. Бетехтин не смог опровергнуть доводов оппонентов по существу, подчеркнув лишь, что, исходя из реального геологического положения гидротермальных месторождений, можно допустить лишь четырехвалентную форму переноса [2]. Характерно, что при обсуждении проблемы вопрос о том, что растворимость соединений четырехвалентного урана при высоких температурах может существенно отличаться от таковой при ее низких значениях, вообще не затрагивался.

Большое влияние на развитие генетических концепций оказала идея о переносе урана гидротермальными растворами в шестивалентной форме в виде уранил-карбонатных комплексов. Эта идея всесторонне разрабатывалась Г. Б. Наумовым, подкреплялась экспериментальными и геохимическими данными и в виде физико-химической модели была изложена в отдельной книге [73]. На основе изучения газово-жидких включений в минералах урановых месторождений была показана высокая карбонатность, низкая сернистость и близнейтральный характер рудообразующих растворов. Преобладающей в таких растворах, согласно термохимическим расчетам, должна быть уранил-карбонатная форма. Вопрос об источнике урана, по мнению Г. Б. Наумова, неотделим от вопроса об источнике углекислоты. Точка зрения о карбонатной форме переноса урана решительно противоречила представлениям о магматогенной природе рудообразующих растворов. При генетических построениях неизбежно приходилось учитывать, что перенос в карбонатной форме реален лишь при температурах ниже 300° С, и только в окислительной обстановке. Отсюда следовало, что высокотемпературный флюид, отделяющийся из кристаллизующейся магмы, не мог быть ураноносным. Особенно категорично в поддержку точки зрения о карбонатной форме переноса высказывался А. И. Тугаринов. Изверженные породы, по его мнению, являются «могилой» рудного урана и не способны генерировать рудную залежь за счет содержащегося в ней металла [110, 111].

Принятие карбонатной формы переноса как единственно возможной приводило к выводу о том, что рудообразующие растворы формировались в условиях низких температур (200÷100° С), высоких значений фугитивности кислорода, в присутствии повышенных концентраций углекислоты и относительно высоких значений pH растворов, благоприятствующих устойчивости карбонат-иона. Эти представления в основном базировались на данных термобарогеохимических исследований, термохимических расчетов, результатах изучения минералогического состава урановых руд. Естественным следствием идеи о карбонатной форме переноса явился вывод, что источником урана в растворах являются не магматические расплавы, а вмещающие породы. Особенно настойчиво эта точка зрения развивалась в отношении тех месторождений, вблизи которых развиты породы с повышенными концентрациями урана.

Данные представления встречают целый ряд трудностей. Во-первых, возможность переноса урана магматогенными растворами убедительно доказывается результатами изучения его поведения в высокотемпературных постмагматических процессах. Отсутствует закономерная связь оруденения с сопряженными ореолами выщелачивания урана. Рудные тела, как правило, окружены измененными околорудными породами, которые содержат повышенные концентрации урана по сравнению с вмещающими породами [84—86]. Известны урановые месторождения, формирующиеся при относительно высоких температурах (более 300° С).

Таким образом, были приняты весьма спорные допущения о том, что источником урана могут быть породы с кларковыми концентрациями и зоны его выщелачивания пространственно разобщены с оруденением и недоступны для наблюдения.

Идее о карбонатной форме переноса в значительной мере противоречат многочисленные данные о восходящем движении рудообразующих растворов. Они свидетельствуют о том, что на уровнях зарождения растворы характеризовались более высокими температурами, чем на уровне рудообразования. Если учесть, что бо́льшая часть урановых минералов отлагалась при температуре порядка 200°С [50], приходится допускать, что его выщелачивание растворами из пород происходило при более высоких температурах. Так как температура восходящих растворов неизбежно понижается, то по мере подъема растворов должна возрастать тенденция к выщелачиванию урана, а не к его отложению. Отсюда очевидно, сколь серьезные трудности возникают при построении моделей рудообразования на основе представления о карбонатной форме переноса. Значительно легче справиться с этой задачей, если предполагать нисходящее или хотя бы горизонтальное движение растворов.

Попытка обосновать горизонтальную направленность в движении рудообразующих растворов на одном из жильных урановых месторождений, предпринятая Г. Б. Наумовым с соавторами [71], встретила решительную критику специалистов, детально изучивших закономерности размещения гидротермальной минерализации на данном месторождении и в районе [19]. Следует, однако, подчеркнуть, что признаки восходящего движения растворов при формировании большинства гидротермальных месторождений столь многочисленны и однозначны, что с этим неизбежно следует считаться при разработке генетических моделей. Да и сам факт

переноса урана растворами при температуре выше 300° С при формировании альбититовых месторождений или месторождений, связанных с высокотемпературными калиевыми метасоматитами не вызывает сомнений.

Во многих случаях идее о карбонатной форме переноса противоречат наблюдаемые в природе признаки эволюции растворов. Известно, что в общем случае гидротермальное минералообразование происходит на фоне понижения температуры и повышения щелочности. Если изменение указанных параметров понижает растворимость того или иного рудного элемента, то рудоотложение может явиться следствием естественной эволюции гидротермального процесса. Для большинства рудных элементов именно падение температуры и (или) понижение кислотности растворов рассматривается в качестве главнейших факторов рудоотложения. Если исходить из карбонатной формы переноса, то снижение температуры и повышение щелочности не могут служить факторами рудоотложения, так как они повышают устойчивость карбонатных комплексов. Это противоречие удается обойти лишь в тех случаях, когда рудовмещающие породы обогащены восстановителями. В большинстве случаев, однако, вмещающие породы даже не отличаются повышенной восстановительной емкостью. Нетрудно заметить, что представление о карбонатной форме, давая возможность объяснить перенос урана низкотемпературными гидротермальными растворами, породило целый ряд трудностей при интерпретации с этих позиций реально наблюдаемых геологических соотношений. Следует подчеркнуть, что природа самих рудоносных растворов при разработке идеи о карбонатной форме переноса не рассматривалась.

В одной из последних работ Г. Б. Наумов с соавторами [74] развивает точку зрения на формирование водноуглекислых флюидов в результате отторжения его при интенсивном метаморфизме вмещающих пород. Предполагается, что флюид, образовавшийся при температуре порядка 500° С и давлении 2 кбар, продолжительное время находился в порах и микротрещинах и мог поступать в зоны разгрузки только в момент трещинообразования. На ранних стадиях процесса, по мнению этих авторов, создавались условия для формирования редкометальных жил, позже — полиметаллических, и только при температурах около 200° С, когда уран приобретал высокую подвижность, в карбонатных растворах — настурановых. Таким образом, по существу, предпринимается попытка обосновать внемагматический источник всей эндогенной минерализации.

Частное значение идеи о рудогенерирующей роли контактового метаморфизма видно из относительно редких случаев приуроченности оруденения к зоне контактового ороговикования. Известно, что металлогеническая специализация рудоносных провинций во многом определяется типом магматизма, а не составом вмещающих интрузивы пород. Хотя состав рудовмещающих пород и оказывал заметное влияние на характер околорудного изменения и минеральный состав руд, однако тип оруденения от этого никак не зависит. Анализируя закономерности положения оруденения в урановорудных провинциях, нетрудно убедиться, что однотипные рудные тела располагаются в пределах, вблизи и на значительном удалении от магматических тел. Связать их с контактовым метаморфизмом или другими локальными явлениями не представляется возможным.

По-видимому, в наибольшей степени с идеей о карбонатной форме переноса согласуются представления о внутрикоровом внемагматическом источнике гидротермальных растворов. Такие представления в последние годы активно пропагандируются Е. В. Плющевым [82]. Согласно его гипотезе, каждый обособленный гидротермальный процесс обусловлен либо внедрением плутонов в обводненные породы верхних слоев литосферы, либо становлением осадочно-вулканических депрессий с захоронением в их недрах различных вод и обогащенного магматическими эманациями вулканического материала, либо тектоническими движениями, вскрывающими нижние термальные уровни подземной гидросферы. Соответственно выделяются плутоногенные, вулканогенные и тектоногенные гидротермальные процессы. Предполагается, что металл выщелачивается из осадочных и магматических пород, специализированных на тот или иной рудный элемент, и отлагается в зонах повышенной проницаемости. По мнению Е. В. Плющева, сообщества пород, затронутые региональными метасоматическими процессами, характеризуют последовательные ступени деятельности гидротермальных растворов. К процессам, сопровождающимся выщелачиванием урана, этот автор относит пропилитизацию. Несомненно новым в развиваемых автором представлениях является попытка увязать вопрос об источнике металла с реально наблюдаемыми и поддающимися картированию метасоматически преобразованными породами.

Наиболее слабым звеном указанной концепции является бездоказательность предполагаемых автором гидродинамических схем. По его представлениям, растворы движутся от периферии к центру и вверх, обеспечивая таким образом рудообразование металлом, вынесенным с периферии. К сожалению, доказательств по этому поводу никаких не приводится.

Необходимо отметить также, что в природе имеется значительное количество примеров, когда рудные тела окружены лишь относительно локальными ореолами околорудного метасоматоза, непосредственно сменяющимися неизмененными породами. Таким образом, отсутствуют зоны регионально проявленных метасоматических изменений, из которых металл мог бы быть выщелочен. Отмеченная концепция предполагает синхронность формирования зон регионального метасоматоза, собственно околорудных метасоматитов и руд, что часто не согласуется с природными наблюдениями.

Приходится констатировать, что развиваемая Е. В. Плющевым концепция пока не получила сколько-нибудь широкого признания.

Все другие представления об источниках рудоносных растворов развивались применительно к какому-либо определенному типу урановых месторождений.

Наиболее широкий круг месторождений охватывается гипотезой метаморфогенного источника рудоносных растворов. Эта гипотеза, предложенная для урановых месторождений В. С. Домаревым, М. Е. Бесовой, Р. В. Гецевой [22, 23], много лет разрабатывается Я. Н. Белевцевым, В. Б. Ковалем, Н. Н. Гречишниковым, Б. М. Горошниковым, Ф. И. Жуковым [8, 9, 25], а также другими исследователями, изучающими месторождения, локализованные в метаморфических толщах, главным образом в провинциях древних щитов и в меньшей степени — палеозойских

БИБЛИОТЕКА
Инв. №

складчатых областей. Основанием для этой гипотезы послужили пространственная связь урановых месторождений и целых районов с определенными комплексами метаморфических пород, обогащенных ураном, а также геохимическая общность руд и вмещающих толщ. Наиболее всесторонне данная гипотеза разрабатывалась по отношению к уран-альбititовым месторождениям. По мнению авторов гипотезы, широкое развитие альбititов на кристаллических щитах, приуроченность их к протяженным и складчатым структурам, развитым среди различных по составу и условиям образования пород, а также независимость уран-альбитовых залежей от гранитов интрузивных массивов не позволяют связать источники рудных растворов с магматогенными процессами.

Предполагается, что эти месторождения сформировались в результате регионального метаморфизма и ультраметаморфизма (гранитизации) урансодержащих осадочно-вулканогенных толщ за счет извлечения, перераспределения и концентрации урана и других рудогенных элементов термальными растворами.

Я. Н. Белевцев, В. Б. Коваль и другие [8, 25] предполагают, что мобилизация урана из пород происходила в условиях регионального динамотермального преобразования на прогрессивной стадии в результате селективного растворения и перекристаллизации урансодержащих и урановых минералов. По мнению Н. П. Ермолаева [83], при метаморфизме на этой стадии происходило «вскрытие» пород в отношении ряда рассеянных в них микроэлементов, в том числе урана, т. е. перевод их в форму, способную к геохимической миграции при более поздних (в том числе гидротермальных) процессах на регрессивной стадии.

Главной причиной указанных явлений являются тепловые потоки из подкоровых глубин. Как следует из работ указанных авторов, источником водных флюидов являются: а) не связанная (капиллярная и гигроскопическая) и связанная (конституционная и кристаллизационная вода, находящаяся в осадочных и вулканических породах, которая выделяется при метаморфизме последних; б) растворы, выделяющиеся из кристаллизующихся гранитоидных расплавов, образованных в процессе ультраметаморфизма; в) инфильтрационные или реликтовые воды подземной гидросферы; г) потоки ювенильных растворов, поднимающиеся из мантии в подвижные зоны земной коры. Указанные типы водных флюидов характеризовались различной минерализацией, и их смешение в зонах циркуляции приводило к формированию растворов сложного состава. На путях движения растворов происходило их дополнительное обогащение различными элементами.

Следует заметить, что растворы, выделяющиеся из кристаллизующихся гранитоидных расплавов, есть не что иное как растворы магматогенные. Авторы признают и высокие начальные температуры растворов. Ведущей, по их мнению, является карбонатная форма переноса. В качестве физико-химической основы генетических построений авторы приводят данные экспериментов по концентрации урана в карбонатных растворах. К сожалению, в работе не указаны кислородные буферы, при которых проводились эксперименты. Судя по полученным цифрам растворимости ($2 \cdot 10^{-4}$% при 400° С), опыты проведены при высоком парциальном давлении кислорода. Представляется очевидным, что попытка

использовать идею о карбонатной форме переноса в области температур 300—500° С мало убедительна. В этой области температур в восстановительных условиях преобладают другие формы, и в соответствующих разделах книги этот вывод будет аргументирован. Что касается общей идеи о метаморфогенном генезисе некоторых (постгранитизационных) ураноносных рудообразующих растворов, то в своей основе она является модификацией магматогенной концепции. Действительно, и та и другая признают роль гранитизации в формировании гранитоидных расплавов, формирование рудоносных растворов на регрессивной стадии, т. е. после кристаллизации магматических расплавов, участие постмагматических растворов в рудообразовании. Однако если магматогенная концепция предусматривает формирование рудоносных растворов главным образом как результат их отделения от кристаллизующихся магм, то акцент в метаморфогенной концепции делается на растворы, отделяющиеся при метаморфизме, и на рудный компонент, извлекаемый этими растворами из вмещающих пород.

С позиций метаморфогенной концепции трудно, по нашему мнению, объяснить, почему метаморфизм и ультраметаморфизм не сопровождаются образованием ураносных альбитов повсеместно. Весьма сложно также объяснить с этих позиций и временной разрыв между метаморфизмом и образованием месторождений. Возникнув при метаморфизме и ультраметаморфизме, растворы должны были находиться в микропорах пород многие десятки миллионов лет. Положительной чертой концепции является то, что она объясняет однотипность месторождений, удаленных друг от друга на десятки и сотни километров.

В. И. Смирнов, В. И. Казанский, Н. П. Лаверов [44, 80], вслед за Я. Н. Белевцевым и др. [8, 9], среди урановых месторождений метаморфической серии выделяют ураноносные метаморфогенные альбититы (железо-урановые и собственно урановые, иногда редкоземельные и апатитсодержащие), тесно связанные с ультраметаморфическими комплексами и сформированные постметаморфическими гидротермальными растворами.

Разновидностью гипотезы внемагматического источника рудоносных растворов являются представления советских гидрогеологов (А. М. Овчинникова, А. И. Германова и др.), а также ряда канадских, французских и других зарубежных геологов. По отношению к урановому рудообразованию, по-существу, возрождается латераль-секреционная гипотеза. Ураноносные растворы рассматриваются как гидрогеологические потоки, подчиняющиеся в своем движении напорным градиентам приповерхностных депрессионных структур и приобретающих свойства термальных растворов за счет теплового воздействия местных геотермических аномалий. Источником металла, по мнению указанных исследователей, могли являться также различные ураноносные породы (граниты, вулканиты, черные сланцы, конгломераты и т. п.), через которые просачивались минерализованные подземные воды.

Указанная точка зрения использована В. Г. Кушевым (1972 г.) по отношению к месторождениям альбититовой формации. По его мнению, образование урановых руд связано с циркуляцией в зонах разломов метеорных вод, частично смешивающихся с незначительным количеством

ювенильных растворов и приобретавших гидротермальный характер. К сожалению, сколько-нибудь серьезной попытки обосновать данную точку зрения автором предпринято не было. Формирование из метеорных вод растворов, привносящих огромные количества натрия, глинозема и целиком превращающих породы первичного гранитного состава в альбитит, вряд ли возможно.

Критически рассматривая гипотезу фильтрационных внемагматических источников рудного вещества в чистом виде, В. И. Смирнов (1976 г.) отмечал, что, хотя какая-то часть рудного вещества может заимствоваться из пород на путях движения и подъема рудообразующих гидротермальных растворов, эта гипотеза не дает ответа на целый ряд геологических вопросов.

Попытка использовать указанную гипотезу для интерпретации генезиса конкретного месторождения предпринята В. Л. Барсуковым с соавторами [112]. Согласно представлениям авторов, ураноносные растворы формировались в результате поступления инфильтрационных кислородных вод, выщелачивающих уран на путях своего движения. Такие воды поступали из краевых частей депрессий, погружались на глубину до 2 км, нагревались до температуры 200° С, смешивались с ювенильными растворами, насыщались вулканическими газами и разгружались в зонах крутопадающих разрывных нарушений, где и отлагали свой полезный груз. Уран, по мнению авторов, переносился в основном в виде уранил-сульфатных комплексов. Причиной рудоотложения являлось повышение щелочности растворов и падение температуры. Отличительной особенностью данной точки зрения является то, что уран выщелачивается из пород кислородными водами, которые, окисляя сульфиды, обогащаются сульфат-ионом. Такой механизм выщелачивания является вполне реальным. Логичными представляются также предполагаемые причины рудоотложения, связанные с понижением кислотности растворов при их взаимодействии с породами и снижением температуры в связи с изменением термического градиента. Явным недостатком концепции является то, что она приемлема лишь для месторождений, геологическое строение которых указывает на существование во время их образования напорных гидродинамических систем. Однако однотипные месторождения известны в геологических обстановках, где напорные гидродинамические системы отсутствовали. Очевидно, что генетическая модель должна быть приемлема для всех однотипных месторождений, чему описанная модель явно не удовлетворяет. Думается, что попытка разработки генетических концепций на основе одного отдельно взятого месторождения малоперспективна.

Вывод о заимствовании урана из вмещающих пород и его последующем переотложении был сделан И. С. Модниковым, с соавторами [75] по отношению к урановому месторождению, залегающему в зоне разлома среди гранитоидов фундамента под вулканической депрессией. Исходные растворы, по мнению автора, имели эндогенную природу.

В целом, несмотря на ограниченность конкретных данных, свидетельствующих о наличии сопряженных зон выщелачивания урана и рудных концентраций, нет оснований отрицать возможность извлечения урана и других компонентов из вмещающих и подстилающих пород. Такой

механизм особенно вероятен при наличии на путях движения растворов больших объемов ураноносных пород. Однако по отношению к большей части эндогенных урановых месторождений идея о мобилизации урана из вмещающих пород и последующем его переотложении в виде рудных тел представляется мало убедительной.

В отношении месторождений альбититовой формации В. А. Крупенников [30], а также Л. Я. Шмураева [109] пришли к выводу, что их особенности наиболее удовлетворительно могут быть объяснены с позиций мантийного происхождения ураноносных щелочных флюидов, возникавших в связи с процессами дегазации и петрохимической дифференциации глубинных оболочек Земли. В. А. Крупенников указывает, что месторождения альбититовой формации имеют возраст 1,7—1,8 млрд лет и образованы в эпоху планетарной среднепротерозойской тектоно-магматической активизации вслед за становлением двух магматических комплексов этой эпохи: габбро-анортозит-рапакиви-гранитного и щелочного. В качестве основных посылок для указанной концепции автор выдвигает следующие: 1) огромная протяженность ореолов ураноносных натриевых метасоматитов; 2) исключительно выдержанный, как бы изначально заданный характер геохимической специализации натриевых метасоматитов, независимый от фаций метаморфизма, возраста и состава различных вмещающих структурно-формационных комплексов докембрийских пород, а также типа, строения и мощности земной коры; 3) постоянная приуроченность к зонам глубоко проникающих разломов подкорового заложения; 4) существенно восстановленный характер альбитизирующих растворов, содержащих в заметных количествах водород и углеводороды; 5) глубинный источник углерода и серы, подтвержденный данными изотопно-геохимических исследований альбититов; 6) отсутствие у альбитизирующих флюидов физико-химической эволюции (кислотно-щелочной дифференциации), свойственной постмагматическим растворам.

К сожалению, только три первых пункта можно принять полностью. Существенно восстановленный характер альбитизирующих растворов весьма сомнителен. Новообразование и устойчивость в процессе альбитизации гематита свидетельствуют о том, что фугитивность кислорода в процессе альбитизации была не ниже уровня, соответствующего магнетит-гематитовому. Публикуемые в литературе данные о составе газово-жидких включений явно не согласованы термодинамически и не могут быть использованы для суждения об окислительно-восстановительных условиях.

Что касается изотопного состава легких элементов (S, C, O, H), то в настоящее время вряд ли у специалистов есть сомнение в том, что он определяется не столько видом источника элементов, сколько окислительно-восстановительными и кристаллизационными процессами, протекавшими в ходе транспортировки вещества и его рудоотложения. Неясно также, почему отсутствие физико-химической эволюции выдвигается как аргумент в пользу мантийного источника растворов? Известно, что кислотно-щелочная дифференциация растворов проявлена при процессах кислотного выщелачивания (грейзены, вторичные кварциты, березиты и др.).

Что касается процессов щелочного метасоматоза, то в этом случае стадия повышающейся щелочности проявлена более угнетенно. При образовании уран-альбитовых месторождений альбитизация по времени сменяется прожилково-метасоматической кальцит-биотит-гематитовой ассоциацией, которая характеризует условия более высокой основности растворов. Можно показать, что реакция равнообъемного замещения альбита кальцитом должна сопровождаться подкислением растворов. Если же анализировать идею мантийного источника рудообразующих растворов по существу, то основная трудность в ее обосновании заключается в малой вероятности проникновения флюидов непосредственно из мантии в земную кору. Этот вопрос неоднократно рассматривался И. Д. Рябчиковым [100, 93] и др. Он подчеркивал, что мантийные флюиды играли важную роль в перераспределении рудных компонентов в подкоровых зонах. В то же время проникновение этих растворов в верхние горизонты земной коры и непосредственное участие их в формировании гидротермальных месторождений вряд ли имеет существенное значение, так как самые верхние части мантии, где устойчив амфибол, служат эффективной «ловушкой» для водной фазы. В условиях интенсивного потока флюидов при параметрах мантии должно происходить плавление пород, а магматический расплав, в свою очередь, является активным растворителем водного флюида.

Только на стадии раскристаллизации расплавов, либо внедрившихся в земную кору, либо сформированных в верхних горизонтах мантии, следует ожидать формирование гидротермальных рудоносных растворов.

Во многих публикациях, касающихся урановых месторождений, исследователи приходят к выводу о полигенной природе рудных концентраций. По этому поводу необходимо заметить, что детальные исследования практически всегда позволяют зафиксировать признаки участия в формировании месторождений генетически различных процессов. К сожалению, сама по себе фиксация этих явлений не решает проблему источника и генезиса месторождений. Неизбежно возникает вопрос об относительной роли различных процессов и выделении среди них главного, обеспечивающего первичные концентрации. Наглядным примером полигенной природы могут служить месторождения «типа несогласия». Вместе с тем вопрос о том, какой же процесс является ведущим в их формировании, остается дискуссионным.

Приведеный выше обзор данных об источнике гидротермальных рудообразующих растворов показывает, что в целом они согласуются с современными представлениями об источниках рудного вещества. Первая их систематика была предложена В. И. Смирновым в 1969 г., а позднее в 1975 г. намечены особенности эволюции источников в истории развития Земли.

Вопросы источников рудного вещества рассматривались также в работах В. Л. Барсукова, Я. Н. Белевцева, Ф. И. Вольфсона, В. И. Казанского, В. И. Коваленко, Н. П. Лаверова, Л. Н. Овчинникова, В. Н. Рехарского, И. Д. Рябчикова, Ф. В. Чухрова и др. В настоящее время можно говорить о следующих группах и типах источников.

I. *Коровые или внутрикоровые источники.* 1) Магматические, генетически связанные с развитием первичных очагов гранитоидных магм или

вторичных очагов щелочных магм; 2) метаморфогенные, связанные с экстрагированием рудного вещества из вмещающих или других пород гранито-метаморфического слоя земной коры в процессе развития метаморфизма; 3) внемагматические — фильтрационные, связанные с мобилизацией рудного вещества из пород, которые либо располагаются на глубине под месторождениями (дальняя мобилизация) или из пород, непосредственно вмещающих рудные тела (местная или ближняя мобилизация). В качестве агентов выщелачивания и переноса металла могли служить растворы эндогенного происхождения, минерализованные пластовые и вадозные воды; 4) полигенные источники.

II. *Мантийные источники.* Мантийное происхождение имеют: толеитовые магмы, с дифференциацией которых связаны медно-никелевые, хромитовые, титано-магнетитовые и некоторые медноколчеданные месторождения; алмазоносные кимберлиты; щелочные магмы, с которыми связаны редкометальные карбонатиты и месторождения апатита. Постмагматические растворы, связанные с кристаллизацией щелочных магм, ответственны за формирование тантало-ниобиевой, циркониевой, редкоземельной, урано-ториевой минерализации.

Таким образом, формирование рудных месторождений, непосредственно связанных с мантийным источником, обусловлено поступлением магматических расплавов из мантии в земную кору. Как уже отмечалось, в последнее время высказана точка зрения о подкоровом источнике урана в эндогенном рудообразовании [30, 109]. Подобный механизм возможен лишь при допущении, что растворы отделяются из магматических расплавов, образованных в верхней части мантии, на стадии их раскристаллизации. Такие растворы, являясь мантийными, в то же время представляют растворы постмагматические. Любой другой механизм поступления рудоносных мантийных флюидов в земную кору (минуя стадию формирования магматических расплавов в подкоровой зоне) в свете современных данных физико-химической петрологии представляется маловероятным.

III. *Смешанные корово-мантийные источники.* Некоторые исследователи предполагают влияние подкоровых процессов на формирование высокотемпературных хлоридно-натриевых рассолов, содержащих повышенные концентрации железа, марганца и других тяжелых металлов.

Важными факторами поступления в земную кору и перераспределения в ней многих элементов являются гранитизирующие (сквозьмагматические, «трансмагматические, интерателлурические») растворы мантийного происхождения. Однако данных о непосредственной связи месторождений с такими растворами пока не известно.

Завершая обзор представлений об источнике гидротермальных рудообразующих растворов, необходимо отметить, что каждое из них имеет свои преимущества и уязвимые места. Наиболее слабо разработанными остаются механизмы формирования ураноносных растворов. При аргументации различных генетических представлений, как правило, не учитывается ряд важных звеньев геохимической истории урана.

Представляется неоправданной категоричность, с которой отдельными исследователями отбрасываются традиционные генетические представления о парагенетической связи гидротермальных месторождений с магма-

тизмом. Несомненно кардинальным является вопрос о возможности переноса урана растворами при повышенных температурах и низкой фугитивности кислорода. Важные следствия в отношении источника рудообразующих растворов вытекают из данных изучения истории развития урановорудных провинций, соотношения уранового рудообразования с магматизмом, геохимической истории урана в различных геологических процессах, минералогии и геохимии месторождений, экспериментов по изучению поведения урана в системе кристаллизующийся расплав-магматогенный флюид и т. д. В последующих разделах книги анализу указанных вопросов уделено самое пристальное внимание.

Глава II

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ УРАНА В ПРОЦЕССАХ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЛИТОСФЕРЕ

В геохимической истории урана в пределах литосферы глобальное значение имеют два типа процессов, имеющих разную природу и проходящих в различных геологических условиях.

Первый процесс — эндогенный, является естественным следствием необратимой дифференциации вещества Земли и связан с явлениями гранитизации, ответственной за накопление огромных масс урана в гранитном слое земной коры.

Второй процесс — экзогенный, выражающийся в разрушении кристаллических горных пород с образованием пород осадочного чехла и кор выветривания.

В каждом из указанных процессов имеются свои варианты условий проявления — ответвления, ведущие к перераспределению урана, изменению форм его нахождения, концентрации, рассеянию и деконцентрации. Хотя эндогенная и экзогенная ветви процессов в ряде случаев тесно переплетены и их приходится учитывать при генетических построениях, представляется вполне правомерным разделять эндогенную и экзогенную составляющие геохимической истории элемента. Авторами предпринята попытка рассмотреть эндогенную составляющую геохимической истории урана в свете проблемы источника рудообразующих растворов.

Среди существующих природных геохимических моделей наиболее детально разработано поведение урана в процессах гранитизации и магматического гранитообразования. Более кратко и схематично приведены некоторые данные и представления о поведении урана при экзогенных и метаморфических процессах, а также в процессах мантийного петрогенезиса.

Уран в экзогенных процессах

Как известно, уран — сравнительно широко распространенный в верхней части литосферы и весьма подвижный элемент переменной валентности. Геохимия этого металла в экзогенных условиях определяется его химическими свойствами и внешними параметрами миграции и концентрации. В горных породах и рудах, почвах и водах верхней части земной коры уран находится в различных соединениях преимущественно в четырех- или шестивалентной формах. В экзогенных условиях четырехвалентный уран присутствует в труднорастворимых минералах (в том числе в рудах), образованных либо при недостатке кислорода, либо при наличии сильных восстановителей. Многие соединения урана, особенно шестивалентного, обладают большой растворимостью, в связи с чем он легко мигрирует в водной среде в приповерхностной обстановке и образует концентрации вплоть до промышленных месторождений. Шестивалентный уран, обладающий свойствами слабого основания, в природной обстановке обычно быстро гидролизуется и образует весьма подвижное комплексное соединение двухвалентного катиона — уранила $(UO_2)^{+2}$, играющего особую роль в миграции и концентрации этого элемента в экзогенных процессах. Наиболее распространенными формами миграции урана в этих условиях являются уранил-карбонатные, уранил-гуматные, уранил-фосфатные, в меньшей степени — гидроксил-уранильные и уранил-сульфатные комплексы [25].

Одним из важнейших физико-химических факторов миграции и осаждения урана в экзогенных условиях служили окислительно-восстановительные особенности окружающей среды. При этом выделяются окислительная и восстановительная глеевая (бескислородная) и сероводородная (сероводородно-сульфидная) обстановки. Сменяя друг друга в пространстве и во времени, они являлись одной из главных причин образования окислительно-восстановительной зональности в природных условиях. Все это отчетливо видно на примерах поведения урана в разных обстановках при процессах седиментогенеза (литогенеза) и последующих преобразований рудовмещающих пород [25].

Особенности миграции урана в экзогенных условиях принципиально отличаются от таковых в эндогенных условиях не только более низкими температурами водной среды, но главным образом широкими вариациями окислительно-восстановительного потенциала Eh, в том числе его высокими значениями. Такие особенности миграции могут быть обусловлены целым рядом причин, таких, как: а) влиянием кислорода атмосферы, поступающего вместе с подземными инфильтрационными или поверхностными водами; б) наличием в осадочных породах и водах органического вещества; в) поступлением с глубины по зонам разломов эпигенетических газообразных восстановителей (углеводородов и др.), связанных с нефтегазоносными залежами или вообще эндогенной природы; г) влиянием климатических условий и др. Именно поэтому в экзогенных условиях свойства данного элемента переменной валентности проявляются в наибольшей степени. В связи с тем, что растворимость соединений урана во многом зависит от Eh, в таких условиях всегда реально могли сосуществовать возможности, с одной стороны, для выноса металла из пород или руд,

и с другой — для переноса его водными растворами и последующего осаждения.

В экзогенных условиях благодаря широким вариациям Eh могли создаваться реальные обстановки для извлечения урана из вмещающих пород кислородсодержащими водами, его миграции на значительные расстояния и накопления на восстановительных барьерах с образованием рудных концентраций вплоть до промышленных масштабов. Следовательно, источником урана в водах могли служить вмещающие породы и включенные в них минералы верхних слоев земной коры, а также, частично, глубоко погруженные водоносные горизонты осадочных и туфогенных толщ. Источником металла экзогенных месторождений являлись непосредственно сами воды.

Источником металла в рудообразующих растворах, сформировавших экзогенные урановые месторождения, могли также служить различные ураноносные образования:

1) кристаллические горные породы, из которых металл извлекался в процессе их механического или химического разрушения (образование кор выветривания, россыпей, песчаников, формирование осадочного чехла);

2) породы осадочного чехла, отдающие металл в процессе их взаимодействия с кислородсодержащими пластовыми инфильтрационными водами;

3) ранее сформированные рудные тела и зоны урановой минерализации различного генезиса, в процессе их гипергенного преобразования и разрушения под воздействием кислородных вод;

4) сами подземные инфильтрационные воды с достаточным содержанием урана, источник которого остается неясным и находится за пределами наблюдений.

Осаждение урана из минерализованных вод в экзогенных условиях в зависимости от различной обстановки могло приводить к созданию двух основных групп ураноносных концентраций, имеющих нередко значение промышленных месторождений. Среди них Н. П. Лаверов (1984, 1986 г.) выделяет:

1) осадочные или сингенетические (седиментационно-диагенетические), образованные поверхностными (речными, озерными или морскими) водами: а) россыпные (уран- и торийсодержащие); б) осадочные (озерно-болотные, речные и морские) — ураноносные торфяники и бурые угли, «черные» сланцы, фосфориты, включая фосфатные рыбные остатки и брекчии в глинах и т. п.;

2) эпигенетические (инфильтрационные), образованные подземными (грунтовыми, пластовыми и трещинными) водами: а) грунтово-инфильтрационные в руслах временных потоков (ураноносные калькреты и гипскреты); б) пластово-инфильтрационные в артезианских бассейнах (урановые месторождения «роллового» типа в песчаниках и угленосных отложениях; в) трещинно-инфильтрационные в зонах разломов.

По мнению В. И. Данчева и др. [25], накопление урана в осадках в определенных условиях стадии литогенеза рудовмещающих пород приводило к образованию высоких концентраций, вплоть до промышленных месторождений.

На стадии седиментогенеза при транспортировке и осаждении обломочного материала возникали прибрежно-морские и аллювиальные, а также элювиальные и делювиально-пролювиальные россыпи урансодержащих минералов. Кроме того, в процессе миграции урана с поверхностными и грунтовыми водами существенную роль играли минеральные взвеси, органические и минеральные коллоиды, при этом часть металла собиралась из природных вод на обломочных частицах еще до их осаждения. Процесс сорбции урана усиливался при взаимодействии коллоидной части осадка с иловыми водами. В осадке образовывались и уранорганические комплексы с продуктами разложения органического вещества (гуминовыми и фульвовыми кислотами). В результате необменных реакций, протекавших между осадками, иловыми и природными водами бассейнов и при наличии восстановительной обстановки в толщах пород, могли возникать собственно диагенетические концентрации урана, значительно превосходящие кларковые содержания [25].

Гораздо большую контрастность, как считают эти авторы, приобретают экзодиагенетические концентрации урана, сформировавшиеся в континентальных осадках различных фаций (аллювиально-старичных, топяных болот, отстойных зон делювиально-пролювиальных отложений). В таких условиях иловые воды могли взаимодействовать не только с природными водами континентальных водоемов (озер, болот, рек), но и с поверхностными и грунтовыми водами, дренировавшими осадок и приносившими новые порции урана и других рудных элементов. Диагенетическим процессам принадлежала, по их мнению, ведущая роль в образовании многих экзогенных (экзодиагенетических) месторождений урана в морских и особенно в континентальных отложениях. На ранних стадиях катагенеза наложенные эпигенетические процессы приводили к перераспределению рудных элементов (в том числе урана), наследуя при этом геохимические черты, заложенные еще в диагенетический этап. На эти образованные ранее диагенетические концентрации урана за счет перераспределения накладывались более поздние эпигенетические, в результате чего возникали «полистадийные» (полигенные) месторождения [25].

Однако полученные результаты детальных комплексных исследований, проведенных многими исследователями на урановых месторождениях различных типов, залегающих в осадочном чехле, позволяют сделать выводы о том, что промышленное урановое оруденение по целому ряду признаков является отчетливо наложенным по отношению к любым рудовмещающим породам и было сформировано более поздними эпигенетическими процессами, которые сопровождались привносом извне урана, а также многих сопутствующих рудных и других элементов.

Как показано в работах А. И. Перельмана, Е. М. Шмариовича, Е. А. Головина, А. К. Лисицина, С. Г. Батулина, И. А. Кондратьевой, Г. В. Комаровой и др. [31, 36, 127], миграция урана и сопутствующих элементов (V, Mo, Se, Re и др.) в кислородных грунтовых, подземных пластовых и трещинных водах среди проницаемых первоначально безрудных осадочных пород (песчаников, карбонатных, угленосных и др.) приводила к осаждению их на различных геохимических барьерах и формированию оруденения экзогенных эпигенетических (гидрогенных)

месторождений. Однако вопросы условий образования, происхождения и источника рудного вещества этих месторождений выходят за рамки настоящей работы и здесь не рассматриваются.

На образование высоких концентраций урана в экзогенных условиях особое значение оказывали процессы восстановления шестивалентного металла, который, обладая высокими миграционными особенностями в широком интервале pH, мог вести себя либо как анион, либо как катион. Огромную роль в накоплении урана играли также сорбционные процессы на соответствующих геохимических барьерах. Осаждение урана связано с его сорбцией разнообразными органическими и минеральными коллоидными соединениями, причем установлено, что данный процесс протекал в разной геохимической обстановке — даже при низких содержаниях урана, различной насыщенности вод солями, разных окислительно-восстановительных условиях. Концентрация урана в осадках в результате сорбционных процессов проявляется на ранних стадиях диагенеза, когда при активном взаимодействии осадка с водами образуются первичные урансодержащие минералы — глауконит, фосфориты, гидроксиды железа, аллюминия, титана. Среди наиболее активных природных сорбентов урана отмечаются торф и угли (лигниты). Уранил-карбонатные комплексы в условиях кислой среды осадков, обогащенных различными органическими веществами, разрушаются, металл вступает в реакцию с гуминовыми кислотами и образует ураноорганические соединения. Повышение концентрации урана в осадках и породах является благоприятной предпосылкой для дальнейшего уранового минералообразования, которое протекало под воздействием органического вещества, продуктов его разложения и минеральных образований, в состав которых входят элементы переменной валентности. При этом легко подвижные формы шестивалентного урана переходили в малоподвижные соединения четырехвалентного элемента [25].

Известно, что в водах океанов и открытых морей содержания урана очень малы и составляют $3 \cdot 10^{-6}$ г/л, или $3 \cdot 10^{-7}$%, т. е. в общем на три порядка ниже кларка этого элемента в литосфере ($2{,}5 \cdot 10^{-4}$%). Это свидетельствует о том, что уран, поступавший в морские бассейны в основном в результате разрушения кристаллических пород континентов, не накапливался в воде, а переходил в осадок. Такие концентрации урана в морской воде, находившегося в виде уранил-карбонатного комплекса $[UO_2(CO_3)_3]^{-4}$, весьма далеки от насыщения, поэтому металл не мог непосредственно выпадать в осадок. Единственным процессом осаждения урана с разложением этого комплекса являлась сорбция его минеральными и органическими коллоидами, при этом степень накопления элемента во многом зависела от климатических условий и времени.

В. И. Данчев [25] отмечал, что в обстановке аридного климата в прибрежно-морских областях (в осолоняющихся заливах и лагунах морских бассейнов) при отсутствии органического вещества, т. е. при высокой щелочности вод (pH=8—9) и положительных значениях Eh, не создавалось благоприятных обстановок для сорбции урана. Однако в областях с семиаридным климатом, т. е. в регионах с отчетливо выраженной климатической зональностью прилегающей суши, в прибрежные

участки морских бассейнов речными и другими сточными водами вместе с разнообразным обломочным и коллоидным материалом поступали и остатки бурно развивающейся на континенте растительности. В таких опресненных заливах и лагунах создавались более благоприятные условия для накопления урана. В областях с гумидным климатом, т. е. обилием органического вещества при интенсивном речном стоке, в опресняющих участках бассейнов снижались значения pH воды до 7 и ниже, а Eh — вплоть до отрицательных. Подобные условия весьма благоприятны для сорбции урана частицами осадков, что обеспечивало его осаждение, сопровождавшееся разрушением уранил-карбонатных комплексов и восстановлением шестивалентного урана до четырехвалентного.

Известно, что в речной воде средние содержания урана обычно составляют $(3—4)\cdot10^{-6}$ г/л, а в осадках застойных речных вод (стариц и заболоченных пойм) его концентрации достигают уже $3\cdot10^{-3}\%$, причем основная часть металла $(1—2)\cdot10^{-2}\%$ — сосредоточена в гниющих органических остатках.

В черных углеродсодержащих илах некоторых заливов, например, фиордов Норвегии, уран накапливается также до $(5—6)\cdot10^{-3}\%$. Источником его здесь, по данным К. М. Штрума считаются расположенные поблизости на суше массивы гранитоидов. Изучение закономерностей распределения урана в осадках внутренних и шельфовых морей, а также океанов позволили А. В. Коченову, Г. Н. Батурину и др. [6] выявить общую тенденцию возрастания его средних содержаний от океанических илов $(1{,}6\cdot10^{-4}\%)$ к илам внутренних бассейнов (до $4{,}2—6{,}4\cdot10^{-4}\%$). В то же время во внутриконтинентальных морях (Аральском, Каспийском, Черном) содержание урана увеличивается от песчаных фаций илов к глинистым и от прибрежных частей к их центральным более глубоководным. Это может объясняться тем, что халистатические области характеризуются относительной малой подвижностью вод в общих круговоротах течений и соответственно меньшей скоростью накопления обломочных частиц, лучшей сохранностью в них органического вещества. Так, по данным Г. Н. Батурина [6], в халистатических зонах Черного моря содержание урана в илах достигает $6\cdot10^{-3}\%$ (на бескарбонатное вещество осадка), при этом подсчитано, что ежегодно здесь осаждается до 60—80 т этого элемента. Содержание урана и других элементов в карбонатных, сапропелевых и некоторых глинистых илах составляет $1\cdot10^{-3}\%$, в обычных глинистых илах — $1\cdot10^{-4}\%$.

С. Г. Неручев [82], рассматривая закономерности накопления и распределения органического вещества и урана в осадках в зависимости от их различных фациальных условий и изменения интенсивности этих процессов в геологической истории, приходит к выводам, что наиболее значительные концентрации металла падают на определенные периоды развития планеты, что основными источниками поступления урана в бассейны седиментации являлись речные и подземные стоки континентальной суши. Гораздо меньшее значение имели другие (атмосферные), а также вулканические источники.

Н. М. Страховым и другими исследователями показано непосредственное влияние мантийных процессов, в том числе гидротермальных и эксга-

ляционных, на рудоносное осадконакопление в зонах некоторых глобальных разломов, ограничивающих рифтовые долины океанов, Красного моря и др. Современные океанические илы вдоль таких зон обогащены Fe, Mn, Cr, V, Pt, Co, Ni, Cu, Pb, Zn и другими металлами.

По данным Г. Н. Батурина, во многих районах мира установлено поступление урана в воды океана из глубинных источников с продуктами вулканизма, гидротермальными растворами и газами. Содержания урана в гидротермах современных вулканических областей на суше обычно весьма низки и варьируют в пределах $(0{,}0004—0{,}81)\cdot10^{-7}\%$. В то же время установлена возможность переноса урана и тория в газовой фазе вулканических выделений. По данным Л. Л. Леоновой и др., в хлоридных и сульфатных возгонах концентрация урана составляет $(0{,}03—0{,}07)\cdot10^{-4}\%$, во фторидных возгонах — $0{,}23\cdot10^{-4}\%$.

Повышенные концентрации урана $(6—31)\cdot10^{-4}\%$ установлены в гидротермальных металлоносных осадках Красного моря. Судя по изотопному составу, источником урана здесь являлась морская вода или продукты подводной гидротермальной деятельности. По данным Г. Н. Батурина, локальное обогащение осадков ураном до $11{,}7\cdot10^{-4}\%$ наблюдается в ряде пунктов проявления гидротермальной деятельности в пределах рифтовых зон Тихого и Индийского океанов. О глубинном источнике урана, помимо приуроченности к районам гидротермальной деятельности, свидетельствует также его изотопный состав.

В отношении содержаний урана, молибдена, органического углерода, карбонатов и многих других компонентов в современных морских осадках (песчанистых, алевролитовых, глинистых и глинисто-известковистых илах) устанавливается та же закономерная связь с органическим веществом, причем обогащение илов ураном происходит на стадии раннего диагенеза. Все это свидетельствует о том, что уран обнаруживает наибольшее сродство с органическим углеродом. По Г. Н. Батурину, коэффициент корреляции $U/C_{орг}$ для осадков Черного моря составляет более 0,8.

Наиболее ярко такие закономерности проявляются в ураноносных углеродсодержащих толщах черносланцевых формаций, которые представляют собой литифицированные и в разной степени метаморфизованные морские отложения типа битуминозных тонкоотмученных терригенных и хемогенных (преимущественно кремнистых) илов. Обычно они характеризуются повышенными сингенетическими концентрациями фосфора, урана, ванадия, молибдена, меди и других элементов [22, 23, 29].

Накопление ураноносных отложений этого типа охватывает интервал времени поздний протерозой—палеозой и происходило в мелководных шельфовых частях морских бассейнов. Образование подобных пород, по мнению М. Н. Альтгаузена, В. Н. Холодова, А. И. Перельмана, связано с определенными эпохами геологического развития земной коры и обусловлено общей эволюцией органического мира, связано также с разными этапами развития геохимических ландшафтов Земли и изменений гипергенных условий миграции элементов.

Области, благоприятные для накопления морских ураноносных осадков, располагались как в пределах древних платформ, так и фанерозойских носинклинально-складчатых поясов.

В разрезе осадочных толщ чехла платформенного типа (Восточно-

Европейская, Северо-Американская и другие платформы) горизонты урансодержащих «черных» сланцев — диктионемовые, «квасцовые» углисто-глинистые сланцы палеозоя — имеют подчиненное значение, их мощность колеблется в широких пределах и достигает 10—12 м. Средние содержания урана в них варьируют от $(5—6)\cdot10^{-3}$ до $(1—2)\cdot10^{-2}$%. Считается, что такие широко распространенные черносланцевые породы имеют первичную (сингенетическую) ураноносность и образуют весьма крупные месторождения убогих урановых руд [29, 73]. Среди них встречаются маломощные прослои и линзы, резко обогащенные углеродистым веществом (кольм) с высокими концентрациями урана, которые скорее всего обязаны эпигенетическому происхождению.

В фанерозойских геосинклинально-складчатых областях, в определенных структурно-формационных зонах — прогибах (синклинориях) — ураноносная черносланцевая формация зеленосланцевой фации метаморфизма представлена углеродистыми кремнистыми породами (фтанитами, лидитами), углеродисто-филлитовыми глинистыми сланцами, углеродисто-фосфатными породами. В зонах, претерпевших более высокую степень метаморфизма, аналогами этих пород являются черные графитсодержащие кристаллические сланцы, а в некоторых областях — метасоматические углеродсодержащие микрокварциты. Они различаются по литологическому и минеральному составу, текстурным и структурным особенностям, соотношениям породообразующих минералов, геохимической специализации, а также нередко и происхождением кремнистых пород.

Ураноносные «черные» сланцы этих областей, по данным М. М. Адышева [1968 г.], С. Г. Анкиновича [1968 г.], В. В. Шабалина, Н. А. Созинова и др. [29], характерны в основном для прогибов миогеосинклинального типа. Разрезы палеозойских толщ сложены глинистыми и филлитовыми (хлорит-серицитовыми) сланцами, а также карбонатными, реже вулканогенными породами основного состава (или силлами диабазов), местами с пропластками или конкрециями фосфоритов, сульфидов железа, которые образуют пачки переслаивания, мощностью от десятков до первых сотен метров. По латерали при переходе в прибрежную зону они обычно сменяются алевролитовыми и песчаными фациями, а по мере удаления от береговой линии — карбонатными и фосфатными отложениями, а также иногда вулканогенными породами [29, 38]. Одной из специфических особенностей ураносодержащих «черных» сланцев является повышенное содержание (7% и более) в них сильно преобразованного (карбонизированного) органического вещества типа антраксолита, нередко в ассоциации с фосфатами.

Накопление углеродистых и углеродсодержащих терригенно-органогенных (глинисто-кремнистых и карбонатных) осадков подобных толщ, судя по последним данным Э. Хеллема (1983 г.), происходило в древних эпиконтинентальных морях, весьма протяженных и далеко (на сотни и тысячи километров) распространяющихся во внутренние части континентов. Такие специфические, не имеющие полных современных аналогов, морские бассейны охватывали обширные пространства на территории разных тектонических структур континентальной земной коры и характеризовались мелководными условиями с очень слабым наклоном в сторону океана. Развитые здесь отложения являются субплатформенными или субгео-

синклинальными выдержанными по латерали литолого-фациальными особенностями разреза. Отдельные маломощные горизонты или пачки почти без фациальных изменений прослеживаются на большие расстояния. Наиболее характерным литологическим типом эпиконтинентальных морей является маломощная толща «черных» сланцев — тонкослоистых битуминозных пород с повышенными и высокими (от нескольких % до 10—15%) содержаниями органического вещества в основном типа бесструктурного керогена с примесью небольшого количества остатков различных организмов.

В целом древние эпиконтинентальные моря, по мнению этого автора, отличались высокой биологической продуктивностью, причем возникшие здесь своеобразные гидрологические условия способствовали быстрому росту планктона и других организмов, иногда накоплению больших объемов карбонатов. Среди развитых здесь осадков биогенные явно преобладали, причем биомасса обычно составляла главную часть таких илов, которые были представлены радиоляриями, водорослями, граптолитами и др., а также включали сульфиды железа, фосфаты при подчиненном значении хемогенных и органогенных карбонатов. Битуминозные осадки накапливались ниже уровня воздействия волноприбойных и приливных явлений, в плохо аэрируемой (бескислородной или нередко сероводородной) обстановке. Поступление терригенного материала было ограничено. Все это свидетельствует об образовании таких пород в спокойной тектонической обстановке. Наличие небольших неровностей морского дна (отдельных депрессий) создавало местную ограниченную циркуляцию природных морских вод. Застойные явления возникали в результате высокой органической продуктивности, ровных устойчивых климатических условий и крайне слабого наклона морского дна в сторону океана.

Закономерности распределения сингенетичного урана и сопутствующих рудных элементов в «черных» сланцах показывают, что большая часть их находится в рассеянном состоянии в минералогически невыраженной форме и сосредоточена в основном в породообразующем углеродистом веществе. Наличие сингенетичных урановых минералов в черных сланцах не установлено. По мнению В. А. Вахромеева, это позволяет предполагать, что уран либо входит в органические соединения, либо связан с органическим или глинистым материалом. Источником урана в них, по-видимому, служила морская вода, содержание элемента в которой, по В. Е. Маккелвею и И. Н. Нельсону, составляет $(0{,}15—1{,}8)\cdot10^{-7}$ г/л. По мнению ряда исследователей, накопление урана в битуминозных породах происходило в форме органических соединений. Иногда в породах присутствует незначительное количество дисперсных выделений настурана, скорее всего имеют эпигенетическое происхождение.

Одной из геохимических особенностей черносланцевых толщ, по мнению Б. Б. Голубева [73], является определенное упорядоченное распределение сингенетичного урана и органических остатков в общем фациальном ряду осадочных пород. Средние содержания урана и углерода закономерно увеличиваются от песчаников и алевролитов к глинистым и филлитовидным «черным» сланцам, достигая наибольших значений в углеродистых образованиях и затем резко уменьшаются в кремнистых породах и еще контрастнее в известняках.

Устанавливается также прямая корреляционная зависимость между содержаниями урана и органического вещества. Концентрации урана в «черных» сланцах разных типов и районов весьма различны и варьируют нередко в зависимости от содержаний органического углерода до $(1-2)\cdot 10^{-3}\%$, иногда более, особенно в разностях, обогащенных фосфором. В черносланцевых породах высокие содержания урана весьма локальны и скорее всего обязаны перераспределению или привносу в связи с разными эпигенетическими процессами.

Наряду с ураном черные сланцы обычно обогащены многими рудными и нерудными элементами, среди которых в первую очередь отмечаются V, Mo, Cu, Ni, Co, Ba, Sr, Pb, Zn, Se, TR и др.

Почти во всех разновидностях черных сланцев, особенно в углеродисто-фосфатных породах, обычно сравнительно незначительная часть урана (10—30%) и в меньшей степени других рудных элементов находится в «подвижной» (легко извлекаемой) форме. Доля «подвижного» урана заметно возрастает в измененных породах.

Ураноносные «черные» сланцы, в которых сосредоточены значительные запасы урана, представляют собой крупные месторождения с весьма низкими непромышленными содержаниями рудного вещества. В то же время гетерогенные по строению, литологическому составу и физико-механическим свойствам черносланцевые толщи при соответствующей геолого-структурной обстановке являются весьма благоприятной вмещающей средой для локализации промышленного оруденения урановых месторождений разных типов — стратиформных, жильных и др. Проведенные детальные геолого-структурные и другие исследования на подобных месторождениях, а также в рудных районах и провинциях показали, что во всех случаях оруденение промышленных месторождений, залегающих в подобных рудовмещающих породах, является эпигенетическим (наложенным) и практически везде проявляются признаки привноса большей части урана рудоносными растворами, независимо от их происхождения.

Полученные данные по поведению урана и многих сопутствующих элементов в гипергенных условиях, и в частности по появлению повышенных содержаний этого металла в подземных водах, циркулирующих в толще сульфидоносных черных сланцев, свидетельствуют о том, что при наличии в них достаточно высокой доли «подвижной» формы какая-то легко растворимая часть урана вполне могла мигрировать.

В то же время эти и радиогеохимические данные позволяют сделать вполне однозначные выводы о том, что развитие экзогенных процессов (кор выветривания, линейных и пластовых зон окисления и т. п.) на таких ураноносных породах (черных сланцах, песчаниках или гранитоидах и вулканитах и др.) вызывало лишь частичное локальное перераспределение металла в их пределах, перевод в «подвижную» форму, но не приводило к созданию промышленных концентраций. Однако в рудных районах при проявлении различных эпигенетических (гидротермальных и гипергенных) процессов, при благоприятных структурных условиях и в определенные этапы развития такой «мобилизованный» уран мог участвовать при создании рудообразующих растворов или в некотором повышении их ураноносности.

Гипергенные процессы, проявленные на ранее сформированных ура-

2 Заказ № 2123

новых месторождениях разных типов, в зависимости от геологических и физико-химических условий приводили либо к выносу урана и разрушению рудных залежей, либо к созданию зон вторичного обогащения руд на различных структурных и геохимических барьерах.

Подводя итог рассмотрению некоторых вопросов поведения урана в экзогенных процессах, можно сделать следующие выводы.

1. В экзогенных условиях процессы миграции урана, происходившие в водной среде при низких температурах и широком диапазоне изменения окислительно-восстановительного потенциала приводили к осаждению его на различных геохимических барьерах и образованию соответствующих сингенетичных и эпигенетических концентраций. Однако степень ураноносности этих образований весьма различна.

2. В процессе седиментогенеза (и литогенеза вообще) в морских и пресноводных (озерных, речных, дельтовых) бассейнах в благоприятных условиях осаждения урана преимущественно в результате сорбции на органическом веществе и образовании трудно растворимых фосфатных и других соединений формировались ураноносные породы с повышенными и высокими фоновыми концентрациями (углеродистые сланцы, фосфориты и т. п.). Среди подобных пород особое значение имеют углеродистые кремнисто-глинистые сланцы, образовавшиеся в специфической обстановке внутриконтинентальных (внутриплатформенных) морей. Отложения характеризуются высокими содержаниями органического вещества, фосфора, сульфидов железа, а также урана и многих сопутствующих элементов.

3. Ураноносные черные сланцы при достаточно высокой доле «подвижной» формы урана и благоприятных условиях их залегания, при проявлении эпигенетических (гидротермальных и гипергенных) процессов в орогенные этапы развития районов могли служить дополнительным источником металла в создании рудоносных растворов, сформировавших месторождения различных типов.

4. Промышленные экзогенные месторождения зон пластового окисления, залегающие в осадочном чехле, образовывались в благоприятных структурных и геохимических обстановках в результате проявления более поздних эпигенетических процессов орогенных этапов, сопровождаемых в основном привносом металла извне восходящими растворами или подземными инфильтрационными водами и частичным его перераспределением.

Уран в процессах метаморфизма

Как отмечают Н. Л. Добрецов, В. В. Ревердатто, В. С. Соболев [1980 г.] и др., процессы метаморфизма, происходившие в земной коре в результате изменений физико-химических условий (в основном под влиянием повышения температуры и давления), приводили к преобразованию горных пород без существенного изменения их химического состава и расплавления. При этом возрастание температуры и давления могло быть обусловлено различными причинами: либо погружением пород на значительную глубину и тем самым повышением значения геотермического градиента, либо внедрением больших масс магматических рас-

плавов, либо восходящими термальными флюидами (газово-тепловыми потоками). Процессы метаморфизма протекали при участии водных или газово-водных растворов, содержащих в них растворенные в различной степени летучие компоненты (CO_2, S, SO_4, N, Cl, F и др.). Такие растворы могли выделяться непосредственно из горных пород (особенно осадочных) при их обезвоживании и декарбонатизации или поступать извне, т. е. подниматься из подкоровых оболочек в процессе дегазации мантии. В последнем случае, при достижении определенных условий, процессы метаморфизма или ультраметаморфизма перерастали или сменялись процессами расплавления пород, т. е. гранитоидного магмообразования.

В связи с отмеченными особенностями проявления процессов регионального метаморфизма выделяется два типа: 1) изохимический метаморфизм, протекавший без участия «гранитизирующих» флюидов, только под воздействием тепла и давления; 2) аллохимический ультраметаморфизм, проходивший под воздействием и при участии «гранитизирующих» подкоровых растворов.

Минеральные и дислокационные преобразования горных пород первого типа были связаны преимущественно с тепловыми потоками и давлением (т. е. обусловлены $P - T$ параметрами), поэтому они происходили без существенного изменения химического состава пород. Предполагается, что в земную кору проникали снизу, из мантии, только лишь тепловые потоки, по-видимому, содержащие некоторое количество летучих газов (азота, возможно углекислоты и некоторых других). Вода если и присутствовала в мантийных флюидах, то, очевидно, задерживалась в зоне устойчивости амфиболов и в расплавах магматических очагов. Процессы метаморфизма этого типа развивались зонально от ядер или центров (купольный метаморфизм) к периферии, т. е. от амфиболитовой и гранулитовой фаций до зеленосланцевой и пренит-пумпеллититовой фаций по нарастанию $P - T$ параметров, поэтому такие преобразования обычно относят к наиболее ранней, прогрессивной, стадии. Общее понижение $P - T$ условий в следующую, более позднюю, стадию приводило к образованию наложенных низкотемпературных ассоциаций (регрессивная стадия, или диафторез).

Второй тип метаморфизма в отличие от первого сопровождался поступлением в определенные участки земной коры трансмагматических «гранитизирующих» флюидов, протекал с привносом или (и) выносом многих компонентов, т. е. существенным изменением первичного не только минерального, но и химического состава пород. Эти процессы вызывали гранитизацию и мигматизацию пород, проявление кремнещелочного, в том числе калиевого метасоматоза и т. п. Поэтому продуктами его проявления были гранито-гнейсовые купола с определенной зональностью (от ядра к периферии и снизу вверх): гранитоиды магматические—мигматиты—кварц-полевошпатовые метасоматиты—метаморфические породы (гнейсы и т. п.).

Под воздействием высокотемпературных флюидов метаморфические породы начинали плавиться, хотя температура магматического замещения, отвечающая, как правило, условиям амфиболитовой фации, была ниже температуры гранулитовой фации. Поскольку процессы ультрамета-

морфизма (гранитизации) обычно развивались позже прогрессивного метаморфизма гранулитовой фации и при более низких $P—T$ параметрах, то их также некоторые исследователи относят к регрессивной стадии.

В геосинклинальных поясах и их срединных массивах региональный метаморфизм данного тектоно-магматического цикла развития проявлялся практически синхронно со складкообразованием, т. е. одновременно с формированием складчатых структур и был связан с процессами горообразования (инверсионная, складчатая и раннеорогенная стадии). Метаморфизм охватывал значительные участки земной коры, в которых он протекал сравнительно равномерно, при относительной выдержанности термодинамических условий в определенных интервалах (зонах). Наиболее интенсивно метаморфизм проявлялся только в таких участках (блоках) складчатых областей, которые отличались значительно повышенными тепловыми потоками. Метаморфические реакции определялись главным образом тепловым режимом, поскольку повышение температуры вызывало более высокую химическую активность поровых растворов. Меньшее значение оказывало изменение давления, которое обусловливало деформацию пород и создавало условия для фильтрации и диффузии метаморфогенных растворов [25, 87].

Для регионального метаморфизма первого типа характерны следующие наиболее общие особенности его проявления:

равномерная в пределах одной фации перекристаллизация пород;

преимущественно изохимический тип преобразований, т. е. практически без привноса и выноса вещества, в результате чего отсутствуют или слабо развиты метасоматические образования;

дегидратация и десилификация пород, т. е. уменьшение содержаний воды и кремнекислоты с переходом от низких к более высоким фациям метаморфизма.

Предполагается, что высвободившиеся из пород при метаморфизме вода и углекислота приводили к образованию метаморфогенных растворов, которые способствовали не только перекристаллизации пород, но и перераспределению подвижных петрогенных, некоторых рудных и радиоактивных элементов. В период последних стадий пластических деформаций, совпадающих во времени с развитием регионального метаморфизма, в горных породах возникали зоны складчато-разрывных дислокаций, вдоль которых под воздействием перепада давлений могли двигаться метаморфогенные растворы [8, 9, 25].

Однако следует иметь в виду, что при метаморфизме горных пород происходила лишь локальная диффузия вещества и практически не было интенсивных фильтрационных процессов. Кроме того, растворы находились в равновесии с вмещающими породами и были рассредоточены по всей толще.

В учении о метаморфических фациях, выделенных впервые П. Эскола (1920 г.) и впоследствии развиваемых Н. А. Елисеевым, Н. Г. Судовиковым, Х. Г. Винклером, А. Миясиро и многими другими петрологами, считается, что метаморфические фации — это сообщества пород, сформированных в области определенных значений давления и температуры.

Такие области ограничены несколькими, наиболее важными реакциями, которые прослеживаются в наиболее распространенных в природе составах пород. При этом фации примерно соответствуют границам *P—T* условий образования естественных ассоциаций метаморфических комплексов. Н. Л. Добрецовым, В. В. Ревердатто, В. С. Соболевым (1970 г.) и др. выделяются четыре группы фаций метаморфизма горных пород земной коры и верхней мантии, которые отличаются в основном по давлению, возрастающему от низких до высоких и сверхвысоких значений.

Как известно, в истории развития Земли метаморфизм проявлялся многократно и весьма неодинаково. Породы нижнего архея обычно подвергнуты неравномерно высокотемпературным региональным преобразованиям (вплоть до гранулитовой фации) без следов очень высоких давлений, превышающих давление литостатической нагрузки. Образования верхнего архея-протерозоя были метаморфизованы в условиях сверхвысоких давлений, но весьма неравномерных и в различной степени — от гранулитовой фации до почти не метаморфизованных. Породы верхнего докембрия и палеозоя регионально метаморфизованы только в пределах отдельных поясов, связанных со складчатостью и глубинными разломами. Считается, что фации умеренных давлений, которым отвечают наиболее распространенные на щитах и древних платформах регионально преобразованные породы, имеют наибольшее значение для метаморфогенного рудообразования [25].

На завершающих стадиях формирования складчатых областей и развития регионального метаморфизма горных пород данного тектономагматического цикла в фундаменте некоторых геосинклинально-складчатых поясов более локально проявились процессы ультраметаморфизма. Обычно они развивались в метаморфических породах амфиболитовой или начала гранулитовой фаций, в участках высоких геотермических аномалий, связанных с поступлением из подкоровых оболочек повышенного количества тепла и флюидов. Эти процессы в физико-химическом отношении протекали в условиях как «закрытой», так и «открытой» систем и сопровождались привносом или выносом многих компонентов [25, 90].

Для ультраметаморфических комплексов характерно тесное сочетание метаморфических пород (гнейсов, кристаллических сланцев и др.) и гранитоидов (мигматитов, гранито-гнейсов, различных гранитов, пегматитов) среди образований докембрийского фундамента. Появление гранитоидов и широкое развитие гнейсово-мигматитовых и гранито-гнейсовых комплексов в результате перекристаллизации первичного материала пород, проявление последующего высокотемпературного щелочного (K-Na) метасоматоза и образование кислой магмы являются явными признаками ультраметаморфических преобразований метаморфических пород. В последнее время к ультраметаморфизму относят сложный процесс перекристаллизации, магматического и метасоматического преобразования метаморфических (первично-осадочно-вулканогенных) пород и частичного их переплавления. Процессы ультраметаморфизма с разной интенсивностью проявились в пределах древних щитов и фундамента многих срединных массивов складчатых и активизированных областей, при этом наиболее широко они протекали в породах архея и нижнего протерозоя.

По мнению некоторых исследователей, с процессами ультраметаморфизма связано рудообразование, в том числе урановое. Так, Я. Н. Белевцев (1972, 1980 гг.) предполагает, что «остаточные растворы», в основе которых находились «метаморфические флюиды», при благоприятных условиях могли обогащаться рудными компонентами и приобретать значение рудных растворов.

Как установлено многими исследователями (Ермолаев, 1983 г., Крылов, 1972 г., Белевцев, 1978 г., Кочкин, 1963 г., Жуков, Жукова 1972 г., Адамс, 1958 г. и др.), в процессе регионального метаморфизма осадочно-вулканогенных и осадочных (терригенных) толщ верхних («осадочного» и «гранито-метаморфического») слоев земной коры происходило существенное перераспределение радиоактивных элементов. В закономерностях их распределения среди метаморфических комплексов в широком диапазоне от пренит-пумпеллиитовой (цеолитовой) или зеленосланцевой до гранулитовой фаций при изохимических процессах прогрессивной стадии регионального метаморфизма (т. е. «закрытой» системе) обнаруживается общая тенденция уменьшения их содержаний по мере возрастания степени преобразования горных пород.

Экспериментальными исследованиями Я. Н. Белевцева с сотрудниками [25] установлен вынос рудных и нерудных элементов из эпигенетически регионально измененных песчаников, алевролитов и аргиллитов при воздействии на них кислых, нейтральных и щелочных растворов ($T=300$ °С, $P=300$ кгс/см^2). В кислой среде отмечается вынос многих элементов, в том числе урана (до 50—75%).

Изохимичность процессов регионального метаморфизма пород нарушается с развитием ультраметаморфизма. При мигматизации и гранитизации пород, по мнению К. Х. Менерта, Д. С. Коржинского и др., природная система становится «открытой» и в метаморфические толщи вместе со сквозьмагматическими растворами могли поступать легкие и летучие петрогенные компоненты.

Учитывая большую распространенность гранитизированных и мигматизированных пород, соизмеримую по масштабам с развитием интрузивных пород, и повышенную их радиоактивность (вдвое выше, чем у кристаллических сланцев и парагнейсов), Д. М. Шоу (1968 г.), А. В. Ронов и А. А. Мигдисова (1970 г.) дают приближенную оценку привноса урана и тория в гранито-гнейсах и мигматитах. Н. П. Ермолаев (1966, 1971, 1983 г.) предполагает, что не менее половины урана верхних оболочек континентальной земной коры в своей геохимической истории проходило через процессы регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Это обстоятельство, по его мнению, заслуживает особого внимания, поскольку не менее половины наиболее значительных урановых месторождений разных типов в различных провинциях мира так или иначе связано с метаморфическими комплексами пород.

Рассматривая некоторые аспекты геохимии радиоактивных элементов при метаморфических процессах горных пород на основании обобщения собранного фактического материала, этот исследователь пришел к выводу, что нарастание степени регионального и локального метаморфизма горных пород на прогрессивной стадии сопровождалось потерей в них рассеянных (фоновых) содержаний урана, а затем и тория.

Судя по многочисленным литературным данным по распределению этих элементов в разновозрастных метаморфизованных осадочных и осадочно-вулканогенных толщах различных блоков континентальной земной коры, происходит общее снижение уровня радиоактивности парапород с глубиной по мере увеличения степени их преобразования. Возрастание содержаний урана в верхних частях земной коры вполне можно объяснить направленной миграцией его из нижних оболочек в процессе метаморфизма, т. е. из обстановки с высокими термодинамическими (P—T) параметрами в менее напряженные условия [38, 94].

На основании исследования распределения концентраций урана и тория в метаморфических комплексах горных пород отдельных районов древних щитов и складчатых областей Н. П. Ермолаевым (1966, 1971, 1983 г.) намечена эмпирическая связь между изменением радиогеохимических фонов и минеральным составом пород, обусловленным различной степенью их региональных преобразований. При этом установлено, что нарастание прогрессивного как регионального, так и локального дислокационного метаморфизма сопровождалось потерей горными породами рассеянного в них урана, а в определенных условиях — и тория.

Анализ основных минеральных ассоциаций и рассмотрение протекавших реакций при прогрессивном метаморфизме позволили этому автору показать, что освобождающиеся при таких превращениях вода и углекислота создавали благоприятную среду для миграции урана. Подобные реакции в породах сопровождались потерей в них радиоактивных элементов. Средние содержания урана в метаморфических толщах снижаются на 25—30% до 40% относительно неметаморфизованных или слабо метаморфизованных, при этом изменение средних значений плотностей пород в результате преобразований обычно не превышает 2—4%. Все это, по-видимому, свидетельствует о выносе радиоактивных микропримесей. Одновременно происходит как бы выравнивание частных (рядовых) значений концентраций относительно средних и уменьшение их дисперсии. Подобные метаморфические преобразования в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций и тенденция перераспределения радиоактивных элементов, судя по результатам исследований Н. П. Ермолаева, (1983 г.), Я. Н. Белевцева (1979 г.), К. С. Хайдера и Дж. А. С. Адамса (1965 г.), отмечаются во многих районах Алданского, Балтийского, Украинского и других щитов.

В процессе развития прогрессивного регионального метаморфизма главные центры его проявления в условиях амфиболитовой и начала гранулитовой фаций находились в гнейсовых куполах, в пределах которых наблюдается вынос урана как вверх, так и к периферии в зоны с более низкими параметрами температуры и давления. В результате в краевых частях крупных куполов или их группы, которые нередко ограничены зонами межблоковых разломов, совпадающими с резкими перепадами температуры и давления, по-видимому, должно происходить накопление металла.

Аналогичная закономерность снижения средних концентраций урана, отчасти органического вещества — битумов, а при глубоких ступенях также и тория, независимо от состава осадочных (терригенных и терригенно-карбонатных) отложений и уменьшения дисперсий концен-

траций отмечается при развитии локального динамо-термального метаморфизма в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фаций.

Как установлено исследованиями Н. П. Ермолаева, Г. Б. Наумова, Н. Г. Соколовой (1986 г.) и др., в условиях прогрессивного контактового метаморфизма вокруг гранитоидов происходил вынос углекислоты, воды, органического вещества и урана. Однако в непосредственной близости от интрузивов гранитоидов в их экзоконтакте, очевидно, в результате проявления более поздних гидротермальных процессов или эманационной дифференциации при кристаллизации гранитоидов, устанавливается местное возрастание верхнего уровня концентраций урана, что проявляется в увеличении дисперсии содержаний или в локальном повышении фона металла.

На основании изложенного Н. П. Ермолаев [90] приходит к выводу, что процессы прогрессивного метаморфизма горных пород, независимо от масштабов их проявления, приводили к перераспределению (рассеянию) урана, а на глубоких ступенях преобразований — также и к рассеянию тория. Одновременно происходило выравнивание рядовых значений концентраций относительно средних величин. Последовательная смена главного механизма освобождения радиоактивной примеси в горных породах, начиная от процессов поверхностных (катагенеза, эпигенеза) до процессов перекристаллизации и растворения минерала-носителя, отражает обстановки перераспределения урана и тория из условий напряженных по P—T параметрам в условия менее напряженные. В результате в земной коре возникала общая радиогеохимическая зональность, наблюдаемая в разных масштабах (блоках, куполах и т. п.). В процессе метаморфизма, по мнению этого автора, мигрировало огромное количество радиоактивных элементов. Например, при переходе от амфиболитовой к гранулитовой фации из 1 км^3 сланцев и гнейсов отторгалось в среднем 1200—1500 т урана и до 20000 т тория.

Однако имеющиеся в нашем распоряжении радиогеохимические данные по терригенным породам, метаморфизованным в фациях регионального метаморфизма от зеленосланцевой до амфиболитовой и развитых на территории рудной провинции палеозойской складчатой области Центральной Европы, показывают, что содержания урана и тория как в сланцевых, так и гнейсовых толщах примерно одинаковые и составляют $(2—4)\cdot10^{-4}\%$ для первого металла и $(15—20)\cdot10^{-4}\%$ для второго. Это свидетельствует о том, что заметного уменьшения содержаний, т. е. выноса урана и тория из пород по мере возрастания степени метаморфизма, в отмеченных пределах не устанавливается. Возможно, происходило лишь локальное его перераспределение внутри пластов или горизонтов пород.

Существенное уменьшение содержания урана до $(0,5—1,5)\cdot10^{-4}\%$ и тория — до $(1—7)\cdot10^{-4}\%$ отмечается лишь в породах гранулитовой фации метаморфизма. Однако в этих случаях нет полной уверенности, что сравниваются одни и те же типы исходных и преобразованных пород, а не разные литологические комплексы, поскольку первичный их состав и сингенетичные концентрации урана в них остаются неизвестными. Не исключено, что гранулиты могли быть развиты по основным вулканитам.

Кроме того, по-видимому, удаление воды и углекислоты из пород при

метаморфизме не обязательно приводило к выносу урана. Имеются разности пород, например, ураноносные углеродистые сланцы с некоторой долей сорбированной весьма «подвижной» формы металла, который мог легко удаляться даже метаморфогенными растворами. Однако этого не наблюдается. В то же время, если уран входил в труднорастворимые соединения (урансодержащие акцессорные и уранбитумные минералы), то выноса его практически не происходило. Нет также полной уверенности в том, что наблюдаемые в микроскоплениях, так называемых «звездах» концентрации урана (на *f*-радиографиях) не являются наложенными, т. е. эпигенетическими аномалиями.

Роль процессов ультраметаморфизма (на регрессивной стадии) в отношении радиоактивных элементов различна. Согласно представлениям Д. С. Коржинского, в стадию проявления ультраметаморфизма, когда система преобразования пород становится «открытой» и в нее начинают поступать водные флюиды, а также щелочи, кремнезем и др., уменьшение температуры может предопределить изменение коэффициента активности веществ и соответственно повысить активность летучих и легких петрогенных компонентов. При ультраметаморфизме основные тенденции поведения радиоактивных элементов меняются на противоположные — возникают гранитизированные комплексы и расплавы повышенной радиоактивности. При этом в продуктах заключительных стадий гранитизации вариации концентраций радиоактивных элементов достигают наибольших значений по сравнению с продуктами начальных стадий этого процесса.

Н. П. Ермолаев (1983 г.) выделяет два термодинамических уровня проявления ультраметаморфизма, отвечающих различным физико-химическим условиям и геотектоническим режимам развития земной коры: 1) условия на границе амфиболитовой и гранулитовой фации, т. е. ниже геотермического уровня плавления гранитоидов, когда преобладали процессы селективного или полного плавления горных пород (мигматизации, анатексиса, палингенеза в фундаменте щитов); 2) условия эпидот-амфиболитовой фации и низкой ступени амфиболитовой фации, где преобладала метасоматическая гранитизация, а селективное плавление гранитизированных пород происходило в зонах (участках) снижения общей нагрузки (во время роста купольных структур) в инверсионно-складчатый этап развития подвижных поясов земной коры. Этот тип процесса преобразования («ультраметаморфизм воздымания», по В. А. Руднику) проявился в пределах многих срединных массивов складчатых областей.

Если ранняя (региональная) стадия ультраметаморфизма сопровождалась перераспределением радиоактивных элементов (некоторым возрастанием или убыванием их средних концентраций), то в позднюю (локальную) стадию в процессе высокотемературного щелочного метасоматоза происходил существенный привнос радиоактивных элементов. При этом как средние концентрации, так и их дисперсии возрастают на порядок и выше.

В соответствии с этой главной тенденцией происходила смена минералов — концентраторов урана. На ранней стадии ультраметаморфизма уран концентрировался в новообразованных акцессорных минералах, а также в адсорбированной форме на гидроалюмосиликатах, гидроокис-

лах железа, титана и марганца, на органическом веществе. На заключительной стадии в пределах тектонически ослабленных зон возникали окислы урана, уранотитанаты.

Сопоставление распределения концентраций радиоактивных элементов, проведенное Н. П. Ермолаевым (1966, 1971, 1983 гг.), Я. Н. Белевцевым (1979 г.), Г. В. Жуковым и А. М. Жуковой (1972 г.) в докембрийских ультраметаморфических комплексах многих древних щитов (Алданского, Балтийского, Украинского), показало, что на ранних стадиях развития процессов (образования плагиомигматитов, плагиогранитов и т. п.) обычно все еще продолжалась тенденция снижения (т. е. выноса) урана и тория. Однако в следующие более поздние стадии гранитизации с широким проявлением калиевых гранитных выплавок (микроклиновых мигматитов и гранито-гнейсов) эта тенденция сменялась на противоположную и сопровождалась увеличением их радиоактивности. По мере возрастания процессов ультраметаморфизма, вплоть до реоморфизма гранито-гнейсовых комплексов и широкого палингенеза, происходила мобилизация рассеянных урана и тория и образование расплавов повышенной радиоактивности. Подобные закономерности поведения урана и тория при ультраметаморфизме «воздымания» устанавливаются, по данным Н. П. Ермолаева, В. И. Величкина и др. [39], в некоторых геоантиклинальных блоках срединных массивов палеозойских складчатых областей, например, в Рудных горах в краевой части Чешского массива.

Ультраметаморфизм проявился в купольных структурах фундамента многих других складчатых областей, формирование которых происходило в несколько стадий. В результате эти сооружения, как в разрезе, так и в плане имеют зональное строение: на глубине в гранито-гнейсовых куполах проявились разновозрастные процессы гранитизации в условиях амфиболитовой фации. Над ними образовывались складки облекания, возникала пологая сланцеватость раздавливания уже в обстановке зеленосланцевой фации. На ранних стадиях гранитизации среди щелочей преобладал натрий и образовывались плагиограниты с низкими (кларковыми и ниже) содержаниями урана. В более поздние стадии возрастала подвижность калия, по периферии куполов сформировались калиевые граниты с повышенными концентрациями урана, которые возникли в результате его привноса или перераспределения.

Изучение процессов регрессивного метаморфизма в углеродистых сланцах, проведенное Н. П. Ермолаевым, показало, то вблизи зон продольных (субсогласных) тектонических нарушений происходило перераспределение кремнистого и органического материала, сопровождаемое также фракционированием урана. Общая направленность перераспределения органического вещества по мере перехода от неизменных сланцев к зонам нарушений подчеркивается мобилизацией и концентрацией в отдельных участках рудной примеси, в том числе урана [38, 90].

Аналогичная тенденция поведения радиоактивных элементов (возрастание средних значений и увеличение дисперсий концентраций) отмечается этим автором для регрессивной стадии регионального и контактового метаморфизма. Начиная с раннего диафтореза и вплоть до начальных стадий локального преобразования пород, в тектонических зонах, перераспределение урана при этих процессах отчетливо зависело

от изменения температуры, давления и концентрации тех или иных компонентов.

Таким образом, при формировании гранито-гнейсовых комплексов на разных стадиях происходила смена физико-химических условий «закрытой» системы на «открытую» и смена натриевых (плагиогранитных) на калиевые (микроклиновые) образования, которые сопровождались накоплением радиоактивных элементов в результате перераспределения или поступления урана, тория, калия извне. Во всех случаях от начальных стадий ультраметаморфизма к поздним стадиям возрастает неравномерность концентрации радиоактивных примесей. Продукты позднего ультраметаморфизма обоих термодинамических уровней континентальной земной коры образуют участки (блоки) горных пород, обогащенных ураном и торием [90].

Учитывая две отмеченные выше противоположные тенденции поведения урана на прогрессивной и регрессивной стадиях метаморфизма, полученную в районе радиогеохимическую характеристику по метаморфическим комплексам, по мнению Н. П. Ермолаева (1983 г.), можно использовать при рассмотрении как вопроса источников урана, так и прогнозирования оруденения месторождений различных типов. Анализ вариаций концентраций урана и метаморфических фаций позволяет выделить зоны не только термодинамических градиентов, но и зон активного перераспределения этого радиоэлемента при последующем метасоматозе и гидротермальной деятельности. В результате длительного проявления полиметаморфизма прогрессивной и регрессивной стадий в континентальной коре возникали участки, резко дифференцированные по содержанию радиоактивных элементов, т. е. блоки, обедненные и обогащенные ураном, торием, калием.

Анализируя возможный механизм перераспределения и мобилизации рассеянных в горных породах радиоактивных элементов при прогрессивном метаморфизме и перехода урана в геохимическую миграцию, Н. П. Ермолаев попытался выяснить некоторые закономерности его поведения при таких процессах. На основании полученных данных радиогеохимических и петрографических исследований он пришел к выводу, что в результате возрастания внешних параметров метаморфизма горных пород (давления и температуры) и изменения интенсивности удаления из них летучих компонентов (воды, углекислоты и др.) последовательно менялся главный механизм отторжения и перераспределения микропримеси урана как из породы в целом, так и из отдельных минералов: от десорбции к самоочистке от примеси радиоактивных элементов кристаллического субстрата при метаморфической перекристаллизации и, наконец, к растворению и замещению минералов-носителей. Освобождение урана из минералов и переход его в миграционноспособную форму сначала происходили при поверхностных явлениях. Весьма эффективным механизмом отделения рудной примеси из осадков являются процессы десорбции в отделяющуюся (или фильтрующуюся) при метаморфизме водную или водно-углекислую фазу. Как известно, количество адсорбированной примеси в осадочных отложениях зависит от размеров их общей (внешней и внутренней) поверхности. По данным И. Е. Старика и Л. Б. Колядина (1957 г), уран хорошо адсорбируется не только на поверхности глинистых

частиц, но и на поверхности природных и искусственных стекол (в интервале pH = 5—8), гидроокислов металлов (при более низких значениях pH).

В процессе преобразования глинистых пород в филлиты и слюдистые сланцы (т. е. при переходе каолинита в гидрослюды и затем — в серицит—мусковит) сконцентрированный на поверхности глинистых частиц уран частично переходил в окружающий внутрипоровый раствор. Возрастание степени региональных преобразований осадков на прогрессивной стадии — от диагенеза и катагенеза илов до метаморфизма пород гранулитовой фации — сопровождалось интенсивным выделением из них летучих компонентов, в первую очередь воды как жидкой пленочной, так и химически связанной. Количество адсорбированной (гигроскопичной) воды в горных породах, особенно неметаморфизованных осадков, заметно возрастает по мере увеличения поверхности адсорбентов и достигало наибольших значений в литофильных коллоидах (силикатных осадках, органических соединениях, гидроокислах металлов). Химически связанная вода освобождалась при всех качественных превращениях минералов на разных этапах преобразования пород вплоть до ультраметаморфизма. Наибольшим количеством выделяемой гигроскопичной воды из пород и соответственно широким проявлением десорбции микропримесей характеризуются в основном изобарические процессы, например, контактовый метаморфизм прогрессивной стадии.

Эффективность десорбции существенно возрастала по мере увеличения концентрации бикарбонатов (углекислоты) в растворе. Особенно интенсивное выделение углекислоты происходило в условиях контактового метаморфизма при образовании скарноидов и скарнов по карбонатсодержащим породам, а также при разложении органического вещества в углеродсодержащих сланцах. Микропримеси радиоактивных элементов, химически связанных с веществом перекристаллизующихся минералов-носителей, освобождались лишь при растворении (замещении) породообразующих минералов. Самоочисткой перекристаллизующихся веществ от примесей, по-видимому, объясняется зависимость растворимости частиц от их размеров, а также избыточной энергией на границе раздела фаз (по типу механизма «перекристаллизации Оствальда»). Этим процессам (особенно с ростом температуры) могли способствовать (или препятствовать) второстепенные механизмы перераспределения микропримесей, а именно перекристаллизация минералов-носителей с возникновением новых структурных группировок, изменение коэффициента перераспределения радиоактивной примеси в системе «кристаллическое вещество (породообразующий минерал)—пленочный раствор» и др. [90].

По мнению Н. П. Ермолаева, возможен также принципиально иной механизм освобождения примесей в процессе перекристаллизации пород, предложенный Н. А. Рудневым и другими на примере процессов старения осадков с образованием новых структурных связей. Этот механизм, видимо, пригоден для объяснения извлечения урана при метаморфизме фосфоритов, углеродистого органического вещества, гидроокислов железа, титана и др.

Таким образом, в результате перераспределения рудной примеси в процессе прогрессивного метаморфизма горных пород, при возрастании температуры и давления или одного из этих параметров, в благоприятных

для миграции условиях происходило закономерное отторжение урана, приводившее не только к снижению средних содержаний, но и к уменьшению дисперсии его концентраций. Однако главный результат прогрессивного метаморфизма заключается не столько в выносе урана, сколько в освобождении радиоактивной микропримеси из объемов минеральных зерен, переход ее в интерстиции, в поровое пространство породы. Региональные метаморфические процессы на этой стадии способствовали переводу рассеянных радиоактивных элементов в форму, способную к дальнейшей миграции. В этом заключается, по мнению отмеченного автора, важная рудоподготовительная роль прогрессивного метаморфизма, в результате проявления процессов которого происходило не только «вскрытие» исходной горной породы в отношении заключенного в ней урана, но и перевод последнего в форму, легко мобилизуемую в водных, водно-углекислых или органических системах. На основании проявления процессов дегидратации и декарбонатизации пород при метаморфизме, создавших благоприятную для транспортировки урана среду, можно оценить значение того или иного механизма его перераспределения.

При нарастании температуры и давления в процессе метаморфизма из пород, по данным А. А. Смыслова (1968, 1974 г.), мигрировал не только уран, но и торий, запаздывание отделения которого отображается в закономерном снижении Th/U отношения от фации к фации. Уран, активно участвующий в процессах адсорбции—десорбции, имел преимущественно шестивалентную форму и был представлен соединениями уранил-ионов, которые концентрировались в основном на поверхности минеральных зерен, в его механических дефектах, микротрещинах и порах. Отторжение и миграция четырехвалентного урана, близкого по кристаллохимическим свойствам четырехвалентному торию, вполне вероятна в условиях более высоких ступеней метаморфизма. Следовательно, намечается эволюция процессов прогрессивного метаморфизма, сопровождаемых качественным изменением валентного состояния отторгаемого урана: от шестивалентного на низких ступенях до четырехвалентного, перераспределенного вместе с торием в условиях более высоких температур и давления [90].

По расчетам Н. П. Ермолаева (1978, 1983 г.г.), при контактовом метаморфизме из песчано-сланцевых толщ, находящихся в экзоконтактах интрузивов гранитоидов, могло освобождаться 2—3,5 тыс. т урана из каждого кубического километра пород, причем количество его заметно возрастает при преобразовании углеродсодержащих пород. Изучение с помощью метода осколковой радиографии форм нахождения урана, перераспределенного на прогресссивной стадии контактового метаморфизма, позволило выявить существенное различие в характере так называемых «фоновых» и «надфоновых» (сгустки, «звезды», «ежи» и т. п.) его концентраций. По мнению автора, уран, вынесенный ранее из внутренней экзоконтактовой зоны, был мобилизован и перераспределен в виде различных микропрожилков, стяжений и т. п. Исследования дальнейшей судьбы перераспределенных форм и масштабов участия этих концентраций при развитии более поздних стадий регрессивного метаморфизма или гидротермального метасоматоза, а также экзогенных процессов показали активное участие именно этой формы («надфонового») ура-

на во всех постметаморфических проявлениях. Одновременно с некоторым снижением валовых содержаний урана в породах уменьшается в основном количество его подвижной формы («звезд»). В менее напряженных термодинамических условиях (зоны внешних экзоконтактов по сравнению с внутренними) происходило образование «надфоновых» концентраций урана, фиксируемых в форме, которая могла легко вовлекаться в геохимическую миграцию в последующие геологические эпохи.

Накопление урана и тория в продуктах завершающих стадий ультраметаморфизма (в пегматитах, калиевых мигматитах, высокотемпературных калишпатовых метасоматитах и др.), по-видимому, свидетельствует об экстрагирующей роли высокотемпературных кремнещелочных (щелочно-силикатовых) растворов или расплавов-выплавок в отношении этих радиоактивных элементов. Появление акцессорного уранинита в некоторых калиевых гранито-гнейсах и пегматитах, очевидно, связано с привносом урана гранитизирующими флюидами. Однако далеко не каждая гранитизация и калишпатизация сопровождалась привносом урана, да и механизм извлечения и перераспределения его во многом еще остается не выясненным.

Некоторые аспекты возможного механизма перераспределения урана при процессах регрессивной стадии метаморфизма рассмотрены Н. П. Ермолаевым (1983 г.), согласно представлениям которого, по мере развития таких преобразований горных пород происходила смена форм фиксации металла в различных минералах-концентраторах. В начале этой стадии уран концентрировался преимущественно в новообразованных акцессорных урансодержащих минералах, а также в адсорбированной форме — в слюдах и гидрослюдах, в органическом фосфатном и углеродистом веществе, в гидроокислах железа, титана и др. В конце этой стадии метаморфизма, в пределах структурно ослабленных тектонических зон, по его мнению, уже могли образовываться собственно урановые минералы (урано-титаниты, окислы урана — уранинит, настуран и др.). Следует отметить, что указанный автор рассматривает регрессивную стадию не только регионального, но и контактового метаморфизма как «открытую» систему, которая отличается поступлением целого ряда петрогенных и летучих компонентов. Поэтому в аспекте геохимии радиоактивных элементов она представляет собой как бы переходное звено от процессов метаморфизма к гидротермально-метасоматическим процессам. Для поведения урана на регрессивной стадии метаморфизма с участием водных растворов весьма характерно возрастание доли его выщелачиваемой формы по мере увеличения валовых содержаний этого элемента в породах, что, по-видимому, свидетельствует о наличии в них значительной части адсорбированного металла. При этом уран мигрировал на этой стадии в водно-углекислых или водно-органических растворах.

Изменение физико-химических условий вызывало удаление из растворов углекислоты, процессы адсорбции приводили к накоплению перераспределенных концентраций урана в виде урансодержащих и собственно урановых минералов. В результате образовывались титанаты урана в участках разложения титановых и титансодержащих породообразующих минералов (биотита, амфиболов), высокорадиоактивные антраксолиты в зонах тектонических дислокаций среди углеродисто-кремнистых

сланцев за счет экстрагированного из них металла. В этом, как считает Н. П. Ермолаев [90], заключается рудоподготовительная роль ранней стадии регрессивного метаморфизма, перераставшего, по его мнению, позднее на постметаморфическом этапе в локальных участках в гидротермальный процесс уранового рудообразования.

В отношении приведенных основных выводов и представлений необходимо отметить, что далеко не со всеми из них можно согласиться.

Предложенная геохимическая модель мобилизации и миграции урана на разных стадиях метаморфизма, очевидно, имеет место в природе и выводы о его рудоподготовительной роли вполне справедливы. Однако представление о перерастании регрессивного метаморфизма в гидротермальное урановое рудообразование вряд ли можно считать правильным.

Анализ закономерностей размещения урановых месторождений разных типов, локализованных в метаморфических толщах, а также анализ возрастных соотношений уранового оруденения и продуктов метаморфизма во многих рудных провинциях и районах показывает, что между проявлениями этих процессов устанавливается значительный временной разрыв, а связь с метаморфическими комплексами является только пространственной. Тем более, что в пределах таких провинций нередко развиты полиметаморфические комплексы, с одной стороны, полихронные и полигенные месторождения — с другой. Кроме того, при таком подходе необходимо учитывать фактор времени (принадлежность к разным тектоническим этапам и разная продолжительность проявления процессов), а также разницу в интенсивности, составе и концентрации метаморфогенных и гидротермальных растворов.

Таким образом, с позиций возникновения геохимически мобильной формы урана, по мнению некоторых исследователей, выясняется рудоподготовительная роль метаморфизма и намечается вероятный источник рудного вещества для месторождений, залегающих в метаморфических толщах.

На основании вышеизложенного можно сделать некоторые выводы.

1. Проявление процессов регионального метаморфизма и полиметаморфизма горных пород, слагающих как древний фундамент, так и складчатое основание урановорудных провинций и районов, отображает наиболее ранние этапы воздействия подкоровых газово-тепловых потоков на данные участки (блоки) земной коры. С этими процессами связаны не только минеральные преобразования различных пород, но и миграция многих, в том числе радиоактивных, элементов.

2. По мере увеличения степени метаморфизма на прогрессивной стадии возрастало удаление из пород летучих и подвижных элементов, в том числе урана. При метаморфизме наиболее низкотемпературных фаций (зеленосланцевой и ниже) в породах в основном происходило перераспределение урана с изменением формы его нахождения и увеличением относительной роли легко выщелачиваемого («подвижного») металла. Метаморфизм высокотемпературных фаций (гранулитовой и выше) сопровождался выносом из пород воды, углекислоты, галоидов и других летучих и подвижных компонентов, в том числе урана.

3. Метаморфизм регрессивной стадии происходил на фоне возраста-

ния роли воды и других компонентов в составе флюидно-тепловых потоков. С ним связаны явления кремнещелочного метасоматоза и гранитизации в условиях амфиболитовой фации, сопровождавшиеся накоплением щелочей, кремния, многих рудных и рассеянных элементов, в том числе урана, тория. Процессы диафтореза, осуществлявшиеся в условиях зеленосланцевой фации, способствовали перераспределению и переводу значительной части урана в более «подвижную» форму.

4. Метаморфизм горных пород не приводил к формированию ураноносных рудообразующих растворов.

Уран в мантийном петрогенезе

К настоящему времени накоплен обширный материал о составе и строении верхней мантии. Основным источником информации являются ксенолиты глубинных пород в кимберлитовых и щелочно-базальтоидных трубках взрыва, а также магматические производные мантийных пород (толеиты, лерцолиты, гарцбургиты и другие ультраосновные и основные породы). Однако имеющиеся факты не дают однозначного решения вопроса о реальном соотношении различных пород в верхней мантии и даже о среднем составе верхнего слоя (от поверхности Мохоровичича до волновода Гутенберга). Тем не менее все исследователи единодушны в том, что состав верхней мантии соответствует породам повышенной основности с очень низким содержанием щелочей: Na_2O — 0,5%, K_2O — 0,2% и урана — <1 г/т [112]. Однако в целом этот факт отнюдь не свидетельствует о невозможности привноса урана в земную кору из мантии на различных этапах развития Земли. По мере старения Земли состав верхнего слоя мантии постепенно менялся в результате дегазации. При этом из мантии выносилось огромное количество газов, щелочей, кремния, урана и других элементов. Наиболее значительным следствием этого процесса явилось формирование «гранитного» слоя земной коры. Слой мантии, претерпевший необратимую дифференциацию, принято называть «истощенной» мантией. По мере дегазации граница слоя истощенной мантии опускалась все ниже. Для объяснения относительных содержаний в земной коре урана, калия, рубидия и некоторых других элементов приходится признать, что не менее 30—50% мантии должно быть необратимо дифференцировано [20, 94]. По расчетам А. Б. Ронова и А. А. Ярошевского, а также Ю. М. Шейнмана и Г. Н. Баженовой [96, 125], для того чтобы обеспечить то содержание щелочей в коре, которое находится в ней сейчас, натрий должен быть извлечен из слоя верхней мантии около 200 км, а калий — из слоя мощностью не менее 700—900 км. Еще большую глубину охватывает тот объем вещества Земли, из которого могло выделиться необходимое количество исходного материала для образования гидросферы [126].

Считается, что одной из причин дифференциации вещества верхней мантии было его селективное плавление с отделением базальтовой магмы и дегазации мантии. Ниже какого-то определенного для каждого региона уровня вновь следует ожидать повышения этих компонентов [64, 66]. Этот вывод подтверждается и на основе изучения пород мантии с различных глубин. Так, в шпинелевых перидотитах и оливинитах с глубин

15—40 км содержание в породах натрия и калия менее 0,2%, а в алмазсодержащих эклогитах с глубин 110—130 км содержание калия достигает 0,44%, а натрия — 1,05% [112]. К сказанному, однако, следует относиться лишь как к весьма возможному варианту. В действительности исследованные в настоящее время образцы не дают полного представления о составе и строении верхней мантии, и к решению этой задачи петрология только лишь приступает. На данный момент выводы исследователей по этому вопросу крайне разноречивы. Л. В. Дмитриев с соавторами (1972 г.) на основе сопоставления более 500 химических составов мантийных пород показали, что среди них правомерно выделять 4 типа — дуниты, гарцбургиты, гарцбургит-лерцолиты и лерцолиты. Доминирующее значение на верхних уровнях мантии принадлежит гарцбургитам и гарцбургит-лерцолитам. Роль дунитов, лерцолитов и некоторых других типов пород, например эклогитов, значительно меньше.

По вопросу о составе недифференцированного субстрата верхней мантии существуют различные мнения. Одни исследователи (Лутц, 1975 г.) рассматривают все указанные типы пород как остаточные продукты, из которых в той или иной степени выплавлена базальтовая магма. Другие исследователи (Рингвуд, 1972 г.) в качестве исходного субстрата мантии принимают лерцолиты (пиролиты), из которых после частичного плавления при разных давлениях могут быть получены все типы базальтов.

До тех пор, пока речь идет о составе мантийных пород в отношении главнейших породообразующих элементов, их разнообразие получает достаточно убедительное объяснение с позиций селективного плавления исходного мантийного субстрата. Однако содержание ряда второстепенных элементов в некоторых мантийных породах, таких, как калий, титан, рубидий, цезий, не может быть объяснено ни частичным плавлением исходного субстрата, ни простой фракционной дифференциацией или кристаллизационной отсадкой. Такие элементы получили название некогерентных. Основной особенностью некогерентных элементов является то, что их распределение не коррелируется с изменением главных петрогенных элементов. В отдельных разновидностях магматических пород, особенно генетически связанных с большими глубинами, таких, как щелочные базальты и кимберлиты, содержание отдельных некогерентных элементов превышает в сотни раз таковое в перидотитах (табл. 1). Уран относится к числу типичных некогерентных элементов. А. П. Акимов с соавторами [2] указывают, что как бы не изменялась глубина выплавления первичной магмы, не удается при любом типе плавления получить концентрации урана, адекватные концентрациям, которые характерны для пород щелочно-ультраосновной, щелочно-базальтоидной и базальтоидной континентальной серий. Содержания радиоактивных элементов даже для базальтов океанического типа не укладываются в любую схему дифференциации. Приходится поэтому признать, что существуют какие-то дополнительные причины, кроме плавления и кристаллизации, которые вызывают явное увеличение его концентрации в магматических расплавах. Для их объяснения исследователям приходится обращаться к гипотетическим ювенильным растворам. Обращая внимание на широкие вариации в содержании радиоактивных элементов и калия в мантийных породах, А. П. Акимов с соавторами [2] приходят к выводу

Таблица 1

Средние содержания U, Th и K в магматических породах мантийного происхождения (по А. П. Акимов и др., 1974)

Формация, тип породы	Число определений	U	Th	K, %
		$n \cdot 10^{-4}$%		
Ксенолиты ультрабазитов из диатрем				
Шпинелевые лерцолиты	8	0,15	0,90	0,05
Пироповые перидотиты	10	0,15	1,50	0,15
Омфацитовые эклогиты	4	0,08	0,70	0,10
Пироп-хромдиопсидовые эклогиты	5	0,02	1,50	0,15
Ультрабазиты интрузивные				
Перидотиты гарцбургитовой формации	4	0,05	0,50	0,05
Перидотиты дунит-пироксенит-габбровой формации	2	1,30	0,45	0,08
Щелочно-ультраосновные серии				
Меймечиты	2	0,68	1,70	0,05
Кимберлиты базальтоидные и их эруптивные брекчии	30	1,20	4,00	0,40
Кимберлиты слюдяные и их брекчии	18	4,00	12,00	0,80
Ингилиты	3	6,00	18,00	0,30
Пикритовые порфириты	3	10,00	25,00	1,00
Щелочно-базальтоидные серии				
Эруптивные брекчии натриевых щелочных базальтов	5	12,00	7,20	0,05
Фергусит-порфиры	3	45,00	72,00	1,00
Габброиды интрузивные				
Габбро-гарцбургитовой формации	1	0,39	0,57	0,10
Габбро-дунит-пироксенит-габбровой формации	2	0,30	0,30	0,16
Базальтовые серии				
Толеиты океанические	3	0,09	0,17	0,15
Толеиты островной дуги	5	0,15	0,18	0,21
Высокоглиноземистые базальты островной дуги	7	0,20	0,77	0,48
Щелочно-оливиновые базальты островной дуги	5	0,50	3,90	0,90
Базальты орогенной области	14	1,20	6,80	1,83
Базальты древнего кристаллического щита	10	1,00	5,10	1,38
Континентальные толеиты	52	0,85	1,60	0,64

о том, что если в мантии имеются скопления радиактивных элементов, поступающих со сверхглубоких горизонтов, то они не образуют слоя и должны быть секущими, концентрирующимися по узким каналам ослабленных зон.

А. В. Уханов с соавторами [121] показали, что высокое содержание радиоактивных элементов в кимберлитах не может быть целиком отнесено за счет наложенных процессов, а связано в первую очередь с особенностями самих кимберлитовых расплавов. Неизбежно возникает вопрос:

каким же образом среди обедненных радиоактивными элементами пород мантии могли возникнуть магматические расплавы с содержанием этих элементов в 10—100 раз выше, чем в мантийных перидотитах?

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть вопрос о мантийных флюидах и связанном с ними массопереносе. Дегазация недр Земли в огромной степени определяет ее эволюцию. Земная кора, современный океан и гидросфера в целом являются продуктом дегазации Земли. С мантийными флюидами связываются такие глобальные процессы, как магмообразование и ультраметаморфизм, а в ряде случаев и рудообразование. Идея о существовании глубинных флюидов была выдвинута еще в 1910 г. П. Термье. С восходящим движением таких флюидов этот автор связывал метаморфизм и гранитизацию. В современном виде гипотеза о мантийных флюидах («трансмагматических растворах») была предложена Д. С. Коржинским в 1952 г. и в настоящее время разделяется большинством советских петрологов. В последнее время накоплены конкретные данные, подтверждающие ее. Установлены флюидные включения в минералах шпинелевых лерцолитов, карбонатитов, доказана устойчивость в мантийных породах минералов, содержащих воду (флогопит, амфибол), углекислоту (карбонаты), фосфор (апатит), выявлены метасоматические явления, происходящие в мантии [113, 34 и др.]. Содержание летучих компонентов в мантии весьма неравномерное, на что указывает присутствие прожилков водосодержащих минералов. В стеклах толеитовых базальтов содержание воды составляет 0,034%, что примерно характеризует ее концентрацию в мантийных породах [144, 98]. Содержание углекислоты оценивается величиной в десять раз более низкой. Состав газов во включении в алмазе характеризуется следующими соотношениями компонентов (в об. %): H_2 — 20,1; H_2O — 42,3; CO_2 — 14,4; CO — 9,6; CH_4 — 5,0; N_2 — 6,7 [64].

Многие особенности состава глубинных пород могут быть понятны лишь при условии допущения участия в их формировании флюидов. Так, путем частичного плавления примитивных мантийных лерцолитов невозможно получить высококалиевые магмы, расплавы с повышенным содержанием титана, высокие концентрации многих некогерентных элементов в кимберлитах, щелочных базальтоидах, карбонатитах и т. д. Несомненно, в целом содержание летучих компонентов в мантии относительно невелико. Как справедливо подчеркивает И. Д. Рябчиков [98], породы, в генезисе которых процессы мантийного метасоматоза играли важную роль, составляют небольшую долю на фоне продуктов толеитовых, представленных практически сухими расплавами. Однако эти последние формировались из вещества мантии, уже истощенного в отношении летучих и некогерентных элементов.

Несомненная связь щелочных базальтоидов, кимберлитов, карбонатитов с глубинными разломами указывает на то, что интенсивные потоки мантийных флюидов, ответственных за образование соответствующих магм, проявлялись в относительно локальных участках. На основе анализа совокупности данных по глубинным включениям из щелочных базальтоидов и кимберлитов Л. В. Соловьева с соавторами [114] пришли к выводу, что в мантии до формирования расплавных очагов осуществляются мощные процессы метасоматоза. На генерацию щелочно-базальтовых

магм за счет метасоматически переработанных перидотитов указывали М. Бест с соавторами [132]. Образование магмы сопровождается накоплением в ней летучих и некогерентных элементов. Важным доказательством обогащенности глубоких зон мантии летучими элементами являются карбонатиты. С ними связаны огромные по масштабам процессы метасоматических преобразований как внутри карбонатитовых комплексов, так и в особенности во вмещающих их породах. Эти метасоматические процессы обычно несоизмеримы по масштабам с магматическими образованиями и, несомненно, выходят за рамки обычного контактового воздействия интрузивов на вмещающие породы [62]. Имеются и другие доказательства участия флюидов в мантийном петрогенезисе. На 27-м геологическом конгрессе А. Шнейдер с соавторами [141] продемонстрировали фотографии шлифов шпинелевых лерцолитов и гарцбургитов под электронным микроскопом, на которых видно, что в минералах мантийных пород имеется тончайшая микропаутина каналов, по которым имело место просачивание флюидов. В пределах этих каналов образуется стекло, содержащее выделение клинопироксена, оливина, шпинели, флогопита, апатита, карбоната, щелочного полевого шпата и др. В составе стекла присутствует (в %): $SiO_2 > 60$; Al_2O_3 — 10—20, $(Ca+Mg+FeO)$ — 38, Na_2O — 5, K_2O — 5. Микрозондовый анализ показал резкое увеличение ряда элементов вблизи таких каналов. В частности, содержание натрия возрастает в 15 раз по сравнению с минералом-хозяином. Авторы пришли к выводу, что метасоматоз и магмообразование — неразрывный процесс. Таким образом, как и при гранитизации, образованию расплавов в мантии предшествует метасоматическое преобразование пород. Авторы приводят доказательства того, что описанные явления происходили до захвата ксенолитов.

Еще в 1970 г. В. В. Велинский высказывал идею о том, что магматические очаги в коре и в мантии образуются под воздействием газовых потоков, возникающих в результате дегазации вещества мантии в процессе эволюции Земли. Интенсивность таких процессов резко возрастает в тектонически активных зонах. Думается, что с учетом участия флюидов может найти удовлетворительное объяснение и разнообразие мантийных пород, и широкие вариации концентраций калия, а также ряда других малых элементов в базальтовых магмах, и локальность участков мантии, обогащенных радиоактивными элементами, и многие другие явления.

Результаты термодинамического анализа показали, что парциальное давление кислорода в мантийном флюиде соответствует кварц-фаялит-магнетитовому буферу [98]. Суммарные растворимости силикатных компонентов во флюиде достигают 50 мас.%, причем самые высокие концентрации во флюидах, взаимодействующих с мантийными минералами, характерны для кремнезема, а также для алюмосиликатов и силикатов щелочей. Свойства и состав растворов сильно зависят от глубинности. С глубиной щелочность флюидов должна возрастать, а это будет приводить к подвижности Ti, Nb, Ta, Zr и других компонентов, обладающих амфотерными свойствами. Рост щелочности должен сопровождаться флогопитизацией граната, что может привести к полному исчезновению этого минерала [100]. Явно повышенные концентрации радиоактивных элементов в мантийных породах, подвергшихся флогопитизации, свиде-

тельствуют об их привносе мантийными флюидами. Очень высокие концентрации урана в щелочных базальтоидах, кимберлитах, в десятки и сотни раз превышающих таковые в примитивной мантии, позволяют предполагать, что привнос урана осуществлялся как на стадии, предшествовавшей плавлению, так и в процессе последующего растворения флюидов в магматическом расплаве. Основной составляющей мантийных флюидов ниже уровня устойчивости амфиболов является вода. Газы, захваченные кристаллами алмазов, содержат наряду с водой заметные количества закиси и двуокиси углерода, водорода, метана и других углеводородов и даже более сложные молекулы типа спиртов и т. д. [135].

Используя данные по плавлению перидотитов в присутствии водного флюида, а также результаты изучения растворимости мантийных минералов в воде при давлениях 10—30 кбар, И. Д. Рябчиков [102] показал, что вдоль «кимберлитовых» геотермобар должен быть устойчив концентрированный водно-силикатный флюид, промежуточный по своим характеристикам между существенно водным и силикатным расплавом. Конкретный состав мантийных флюидов весьма гипотетичен. Основываясь на экспериментальных данных, И. Д. Рябчиков и А. Л. Беттчер [103] показали, что водная фаза, сосуществующая при 30 кбар и 1100° С с типичным флогопитсодержащим мантийным парагенезисом, содержит (в %): SiO_2 — более 25, K_2O — 10, Al_2O_2 — 11. Водные флюиды при мантийных параметрах обладают высокой растворяющей способностью не только в отношении петрогенных окислов, но и ряда малых, в том числе рудных, элементов. Это обеспечивает наряду с прочими факторами наличие в мантийных флюидах определенных количеств фторидов и хлоридов, образующих устойчивые ассоциации с рудными металлами. Флюидный массоперенос может играть существенную роль в перераспределении рудных металлов в пределах верхней мантии и быть определяющим фактором, контролирующим металлогенические характеристики первичных магм [99].

Данные о возможной концентрации урана в трансмагматических флюидах отсутствуют. Учитывая накопление урана в процессе мантийного метасоматоза и особенно гранитизации, можно предполагать, что она была не слишком высокой.

Учитывая экспериментальные данные, полученные по растворимости уранинита в магматогенных флюидах при температурах 500—900° С, а также фторофильные свойства четырехвалентного урана, есть основание допускать существование гидроксо- и оксогаллоидных комплексов. Это тем более вероятно, что с ростом температуры роль гидроксохлоридных, гидроксофторидных и гидроксокомплексов рудных металлов повышается [122].

* * *

Завершая анализ вопроса о поведении урана в мантийном петрогенезе, следует подчеркнуть следующее.

1. Несмотря на очень низкое содержание урана в мантийном субстрате в целом ($n \cdot 10^{-6} - n \cdot 10^{-7}$%), в природе реально осуществляется вынос этого элемента из мантии в земную кору, а также перераспределение

в самой мантии. Указанные явления являются естественным следствием процесса необратимой дифференциации Земли.

2. Уран относится к числу так называемых некогерентных (несовместимых) элементов. Содержание таких элементов в отдельных типах мантийных пород (щелочные базальтоиды, кимберлиты) в десятки и сотни раз превышает таковое в веществе мантии в целом. Оно не может быть объяснено ни частичным плавлением исходного субстрата, ни фракционной дифференциацией или кристаллизационной отсадкой. Единственным механизмом, который может обеспечить наблюдаемое содержание некогерентных элементов в отдельных типах мантийных пород, является их привнос в участки магмообразования мантийными флюидами.

3. В основе механизма дифференциации вещества мантии (кроме селективного плавления) лежит способность мантийных флюидов растворять в себе различные элементы в пропорциях, резко отличающихся от их количественных соотношений в мантийном субстрате. С этим связано значительное истощение мантии в отношении щелочей, многих рудных, рассеянных, а также радиоактивных элементов.

4. Образование обогащенных ураном магматических расплавов происходит под воздействием мантийных флюидов. Накопление урана осуществляется как в процессе метасоматического преобразования пород субстрата, так и в продолжение всего периода существования магматического расплава.

5. Поступление урана из мантии в земную кору осуществляется как в результате внедрения магматических расплавов, так и путем его привноса гранитизирующими трансмагматическими флюидами.

Уран в процессах гранитообразования

Гранитизация — основной механизм длительного накопления урана в земной коре. Массообмен между веществом мантии и коры происходил как в результате поступления в земную кору магматических расплавов, так и в результате воздействия на породы коры и подстилающие ее верхние горизонты мантии восходящих глубинных флюидов. Оба этих процесса сопровождались истощением мантии в отношении радиоактивных элементов и их накоплением в земной коре. Если примитивная мантия лерцолитового состава характеризуется содержанием урана около $0{,}02 \cdot 10^{-4}\%$, то в ее легкоплавкой базальтовой составляющей оно возрастает до $0{,}5 \times 10^{-4}\%$, а в тугоплавком остатке дунитового состава опускается до $0{,}003 \cdot 10^{-4}\%$. Учитывая огромные объемы базальтоидов, следует признать, что с указанным процессом связана значительная доля урана, содержащегося в земной коре. Вместе с тем концентрация урана в базальтоидах слишком низка, что не позволяет рассматривать эти породы в качестве источника рудных концентраций.

Значительно более обогащены ураном такие экзотические глубинные породы, как щелочные базальтоиды, кимберлиты, карбонатиты. Хотя в общем объеме земной коры они составляют ничтожную долю и собственно вносят весьма скромный вклад в общую массу радиоактивных элементов в земной коре, именно с этими экзотическими породами связаны многочисленные проявления урановой минерализации.

Воздействие восходящих глубинных потоков на породы земной коры и верхние горизонты мантии вызывает грандиозные по масштабам явления дебазификации, метаморфизма и гранитизации. Если учесть, что главным концентратором урана в земной коре являются кислые магматические породы, а также продукты их разрушения и метаморфизма, то следует признать, что именно с процессами гранитизации связана та основная часть урана, которая с помощью тех или иных механизмов концентрирования предопределяет возможность формирования промышленных руд.

Под гранитизацией авторы, вслед за Д. С. Коржинским [50], понимают процесс образования гранитного расплава за счет любых по составу горных пород, находящихся в твердом состоянии. Если исходные породы по своему составу близки к гранитам, то в результате повышения температуры и (или) уменьшения давления может произойти их анатектическое плавление с образованием гранитного расплава. Содержание урана в анатектических гранитах, образующихся без участия трансмагматических флюидов, относительно низкое и не превышает таковое в исходных породах [41, 9, 111].

Значительно более распространена в природе гранитизация, происходящая под воздействием трансмагматических флюидов, которые вначале приводят к кремнещелочному метасоматозу, приближая исходные породы к составу гранитов, а затем и их плавлению. Прохождение флюидов через магматические тела вызывает не только метасоматоз вмещающих пород, но и изменение состава самой магмы (метамагматическую дебазификацию) как в отношении петрогенных, так и рассеянных и рудных элементов. В ряде фундаментальных исследований Д. С. Коржинским и другими советскими петрологами было показано, что явления магматического замещения, наблюдаемые в гранито-гнейсовых комплексах, не могут быть объяснены без участия глубинных флюидов. Именно под их воздействием осуществляется региональный метаморфизм, бластез, фельдшпатизация, мигматизация и, наконец, полное расплавление. Трансмагматические флюиды ответственны за привнос, вынос и перераспределение огромной массы элементов, обеспечивая в конечном счете формирование гранитного слоя земной коры.

Поведение урана при гранитизации изучалось многими исследователями. Несмотря на большое разнообразие обстановок, выводы исследователей оказались сходными. Содержание урана в продуктах гранитизации во всех случаях оказалось выше, чем в исходных породах [9, 41, 68, 74, 83, 111, 116]. Важно подчеркнуть, что ни в одном из описанных в литературе случаев не отмечалось обеднения продуктов гранитизации по сравнению с субстратом. Поэтому привнос урана трансмагматическими флюидами при гранитизации можно считать фактом вполне доказанным.

Подходя к продуктам гранитизации дифференцированно, следует признать, что в общем случае гранитизация обычно осуществляется в два этапа. С первым этапом связаны плагиомигматиты (граниты), со вторым микроклин-мигматиты [71]. Подобная закономерность отмечена А. Д. Ножкиным и О. М. Туркиной (1982, 1984 гг.) для Енисейского кряжа, И. Е. Кузнецовым, С. Е. Матвеевой (1983 г.), а также Б. Н. Львовым и Н. И. Петровой (1963 г.) для Урала, Б. В. Петровым и В. А. Мак-

рыгиной (1975 г.) для Патомского нагорья и др. Не исключено, что возрастание относительной роли калия (а с ним и урана), по сравнению с натрием в трансмагматических флюидах отражает изменения глубины генерации гранитизирующих растворов. Данное предположение согласуется с выводом И. Д. Рябчикова [100] о том, что в мантии должны существовать две пространственно-изолированные зоны — менее глубинная, отвечающая давлениям 15—20 кбар, обогащенная натрием, и более глубинная, отвечающая давлениям 70—100 кбар, обогащенная калием. По данным А. Д. Ножкина и С. С. Матвеевой (1975), метасоматическая гранитизация первого этапа приводит к повышению концентрации урана в 1,5—2 раза, а гранитизация второго этапа — в 3—6 раз. Эти данные свидетельствуют о том, что трансмагматические флюиды неоднородны и эволюционируют как по соотношению K/Na, так и по содержанию радиоактивных элементов.

Следует отметить, что идея об участии в гранитообразовании мантийных флюидов встречает определенные трудности в свете данных физико-химической петрологии. Согласно этим данным, верхние горизонты мантии, подстилающие континентальную кору, характеризуются устойчивостью амфибола и флогопита. Поэтому при поступлении флюида в эти горизонты водная фаза должна интенсивно расходоваться на образование указанных водосодержащих минералов, в связи с этим верхние горизонты мантии должны служить эффективной «ловушкой» для водной фазы [70, 5, 98].

В таком случае выше границы Мохо должны подниматься лишь наиболее инертные компоненты — благородные газы, азот, углекислота. Согласно расчетам И. Д. Рябчикова [101], подтверждаемым данными по изучению состава мантийных флюидов, должна иметь место следующая направленность в изменении состава флюида с глубиной: существенно углекислый флюид + силикатные минералы → углекислый флюид + карбонатсодержащий лерцолит → существенно водный флюид + лерцолит с элементарным углеродом (сначала графит, затем алмаз) → флюид с преобладанием метана + алмазсодержащий лерцолит.

Очевидно, что просачивание водных флюидов в земную кору на широком фронте крайне маловероятно. Мало обоснованным также является представление о связи потоков мантийных флюидов с глубинными разломами, характеризующимися особо высокой проницаемостью. Наличие такого потока должно было бы вызвать расплавление пород с образованием магматических расплавов, обладающих способностью к растворению водных флюидов.

Таким образом, поступлению водных флюидов из мантии в земную кору в условиях замедленной фильтрации должна препятствовать амфиболизация пород, а в условиях интенсивной фильтрации — образование магматического расплава. Возникает естественный вопрос об источнике гранитизирующих растворов. Решение этого вопроса, очевидно, возможно лишь с учетом наиболее общих закономерностей развития магматизма.

Установлено, что переход к орогенной стадии развития подвижных складчатых поясов сопряжен с повышением флюидного давления. Это повышение происходит на фоне общего падения температуры. В результате мигматизация (гранитизация) может накладываться на производные гра-

нулитовой фации метаморфизма и представлять явление регрессивного характера [71]. Именно усиление роли воды во флюидах является причиной ультраметаморфизма и гранитизации. Представляется возможным предложить следующую схему, позволяющую увязать указанные факты.

Интенсивное восходящее движение мантийных флюидов возникает вследствие формирования глубинных разломов в предорогенную стадию развития. Поступая в высокие горизонты мантии, эти потоки вызывают ее частичное плавление с образованием базальтоидных магматических очагов, активно растворяющих водный флюид. В результате в земную кору проникают лишь углекислота и инертные газы, лишенные водной фазы. Таким образом, создаются условия для изохимического метаморфизма, который не оказывает существенного влияния на состав земной коры. Проявление базальтоидного магматизма является характерной особенностью раннего этапа.

Орогенный этап характеризуется затуханием флюидно-тепловых потоков в мантии. С этим связана кристаллизация магматических базальтоидных очагов, сопровождающаяся отделением растворенных в них водных флюидов. Таким образом, базальтоидные магматические очаги на стадии их кристаллизации можно рассматривать в качестве источников трансмагматических флюидов, ответственных за дебазификацию пород, метаморфизм и гранитизацию. Как справедливо указывают А. А. Маракушев и Н. И. Безмен [71], метаморфизм орогенной стадии, сопряженный с развитием корового магматизма, является главным процессом формирования земной коры континентального типа.

Важно подчеркнуть, что, хотя гранитизирующие растворы поступают из мантии и в этой связи могут быть названы мантийными, они в то же время являются постмагматическими, так как их отделение связано с кристаллизующимися магмами основного состава. Соответственно состав и свойства растворов задаются в первую очередь условиями их равновесия с базальтоидными расплавами и производными кристаллизационной дифференциации последних.

Главными факторами, определяющими эволюцию свойств растворов, является понижение температуры и давления.

Одним из кардинальных вопросов петрологии является выявление причин, обусловливающих способность трансмагматических флюидов производить дебазификацию. Действительно, как объяснить то, что, находясь в равновесии с породами повышенной основности, трансмагматические флюиды приобретают способность производить дебазификацию менее основных пород земной коры? Вслед за Д. С. Коржинским большинство исследователей объясняют это явление повышением кислотности растворов по мере их охлаждения, конденсации и уплотнения. Этот вывод базируется на следующей физико-химической закономерности. Если при нагревании многокомпонентного раствора происходит его вскипание, то концентрация летучих кислот в газообразной фазе будет выше, чем в жидкой, тогда как их активности при равновесии между фазами будут равны. Следовательно, коэффициенты активности летучих кислот в жидкости будут выше. При обратном переходе летучих кислот из пара в жидкость их активность должна возрастать. Этот эффект должен

иметь место не только при конденсации пара, но и при надкритическом переходе из газообразного состояния в жидкообразное. Таким образом, предположение о том, что причиной повышения кислотности флюидов является падение их температуры, представляется вполне правомерным. Оно подтверждается результатами работы Дж. Франтца и Р. Поппа [134], показавших, что с понижением температуры происходит рост константы диссоциации HCl в закритических растворах.

Экспериментальные исследования в этом направлении, проведенные при $T=750—900°$ C, $P_{общ}=1$ кбар в присутствии 3н раствора HCl, показали, что солянокислый флюид производит дебазификацию расплава при всех температурах, однако интенсивность дебазификации существенно возрастает при понижении температуры [106]. Показательно, что в опытах при 4 кбар и 1100° C растворимость щелочей преобладает над растворимостью щелочноземельных окислов, чем, вероятно, и объясняются аномально высокие содержания щелочей в глубинных флюидах. С понижением температуры тот же флюид выщелачивает из расплава фемические компоненты и отлагает кремнекислоту, т. е. приобретает способность к дебазификации.

Начальные ступени дебазификации выражаются в серии метасоматических реакций, приближающих состав пород к граниту. При этом происходит обеднение флюида щелочами и кремнием и обогащение фемическими компонентами. Однако в отношении летучих компонентов состав флюидов практически не меняется.

Появление магматического расплава резко изменяет характер системы. Принципиальное значение при анализе этой системы имеет механизм перемещения флюидов через магму и массообмен между сосуществующими флюидами и магмой.

Теоретические расчеты показывают, что проникновение флюидов в магматическую камеру неизбежно вызовет образование в магме флюидной фазы в виде капель [129]. К. В. Бэрнем [16] показал, что при вязкости магмы 10^6 П, радиусе пузырька водной фазы 0,1 см и плотность водной фазы 0,5 г/см^3 скорость перемещения пузырька составит 125 см/год. Изучение физических свойств расплавов с помощью расчетного аппарата химической технологии показывает, что размеры капель не должны превышать 6 мм [129]. Приведенные соображения касаются единичных капель, которые не оказывают друг на друга заметного влияния. При меньших расстояниях между пузырями возбуждаемые ими волны гармонически складываются, а сами они сближаются друг с другом. В этом случае возникает одна длинная гравитационная волна, несущая «клубок» из многих пузырей. Скорость всплывания при этом увеличивается в несколько раз [65]. Следует однако учесть, что существование флюидных пузырьков возможно при условии полного насыщения расплава флюидами.

Растворимость воды в магматических расплавах в настоящее время всесторонне изучена. Для глубин 10—20 км в кислых расплавах она определяется величиной 6÷9% [146]. До момента насыщения весь флюид вместе с содержащимися в нем элементами будет растворяться в магматическом расплаве. При этом расплав может обогащаться даже теми

компонентами, которые распределяются существенно в пользу флюида [129].

После появления капель должен иметь место массообмен между флюидной фазой и магматическим расплавом. Большое влияние на массообмен будет оказывать перемещение капель [45]. Благодаря постоянному обновлению поверхности и конвекции внутри капель обмен компонентами между флюидной фазой и расплавом возрастает на 2—3 порядка по сравнению с обменом в случае неподвижной капли. Можно поэтому утверждать, что состав капли не может существенно отклоняться от равновесия с расплавом. М. Б. Эпельбаум с соавторами [129] показали, что для гранитного расплава при 800° С и $P_{H_2O}=1$ кбар равновесие в отношении щелочей устанавливается при перемещении капли всего на 50 см. Расчеты показывают, что из-за активного растворения при движении капли и конвективных потоков расплав быстро насыщается летучими компонентами в соответствии с их парциальными давлениями. Попадание же флюида в расплав, насыщенный летучими компонентами, вообще исключает какие-либо другие формы существования и перемещения раствора, кроме капель. Благодаря восходящему движению капли и взаимодействию ее с расплавом неизбежно должны возникнуть две противоположно направленные тенденции.

Понижение температуры должно способствовать нарастанию кислотных свойств флюида и соответственно повышению его способности к дебазификации. С другой стороны, массообмен с расплавом должен подавлять нарастание кислотности флюида. Очевидно, что образованию равновесного магматического расплава, отвечающего лейкогранитам, должно способствовать пониженное содержание фемических компонентов в гранитизируемых породах и большой объем трансмагматических флюидов, просочившихся через магматический расплав.

Наряду с обогащением флюида фемическими компонентами и обеднением щелочами и кремнием будет происходить массообмен в отношении летучих и рудных компонентов. Так, фракционирование фтора будет резко сдвинуто в сторону расплава, а хлор в основном сохранится в составе водной фазы. Уран как типично фторофильный элемент должен накапливаться в магматическом расплаве. Это же относится к большинству рудных элементов. При этом металлогеническая специализация магматических расплавов должна в основном определяться специализацией трансмагматических флюидов. По крайней мере трудно объяснить с других позиций огромные размеры металлогенических провинций, специализированных на определенные элементы.

Учитывая огромные размеры магматических очагов и длительность их существования, ведущим механизмом следует признать массообмен, происходящий между гомогенным расплавом, уже насыщенным в отношении флюида, и флюидной фазой. В связи с тем, что разделение урана осуществляется в пользу расплава, он должен переходить из флюидной фазы в расплав, рассеиваясь в огромном объеме магматического очага.

Метамагматизм как ведущий фактор накопления урана в магматических очагах. Образование магматического расплава, как правило, не является конечной ступенью процессов гранитизации. Многие осо-

бенности эволюции составов магматических расплавов, их флюидонасыщенность, металлогеническая и геохимическая специализация и т. д. во много определяются процессами их взаимодействия с трансмагматическими флюидами. Эти процессы вошли в петрологическую литературу под названием метамагматических. Размеры и длительность существования магматических очагов, а следовательно, и масштабы проявления гранитоидного магматизма в той или иной провинции в основном определяются интенсивностью и длительностью взаимодействия трансмагматических растворов.

Идея о метамагматических явлениях была высказана Д. С. Коржинским (1973, 1978 гг.). Основным результатом взаимодействия трансмагматических флюидов с расплавами является раскислением последних (метамагматическая дебазификация). Понижение основности пород от более древних к более молодым отражает направленное изменение состава расплава в магматических очагах в сторону его раскисления. Обосновывая метасоматизм, Д. С. Коржинский подчеркивает, что если бы в природе имело место обычное анатектическое плавление, то на первых стадиях расплавлялись бы наиболее легкоплавкие кислые породы.

Соответственно комагматические серии характеризовались бы повышением основности пород от более древних к более молодым, а не наоборот, как это наблюдается в природе. Особенно убедительно метамагматическая дебазификация доказывается в случаях ее незавершенности. При этом в гранитах наблюдаются пятнистые участки гранодиоритового и диоритового состава с расплывчатыми контурами и постепенными переходами. Такого рода явления четко проявлены в гранитоидах Балтийского щита. Д. С. Коржинский указывает, что трудно как-либо иначе объяснить мощные процессы дебазификации при гранитизации, когда основные породы первоначально замещаются магмой гранитоидов повышенной основности (диориты, гранодиориты и прочие), а затем происходит замещение этих основных разностей обычными гранитами. Неравномерность текстур и состава переходных разностей хорошо соответствует представлению о неравномерной «промывке» магмы потоками флюидов.

Параллельно с понижением основности пород в ряду комагматических серий от более древних к более молодым достаточно четко зафиксирована тенденция к накоплению многих элементов. Накопление в первую очередь проявляется в отношении так называемых фторофильных элементов, распределение которых в системе расплав—флюид сдвинуто в пользу расплава. Уран является характерным представителем фторофильных элементов. Закономерное накопление урана в ряду комагматических серий от более древних к более молодым к настоящему времени отмечено многими исследователями [27 и др.]. Вместе с ураном в процессе «промывки» магматического очага трансмагматическим флюидом в магме происходит накопление щелочей, многих редких, рассеянных и летучих элементов. До тех пор, пока магматический расплав недосыщен в отношении флюидной фазы, трансмагматический флюид вместе с содержащимися в нем компонентами должен целиком раствориться в магматическом расплаве. Однако собственно метамагматическая дебазификация, приводящая к очищению расплава от чуждых кислым магмам элементов, возможна лишь при насыщении расплава в отношении летучих. В отно-

шении фторофильных элементов, в том числе урана, магматический расплав будет выступать в качестве «фильтра-накопителя». Эти элементы, рассеиваясь в огромных объемах магматического очага, в большей мере определяют геохимические особенности гранитного слоя земной коры. Концентрация урана в конечном магматическом расплаве будет зависеть от его содержания в породах субстрата, количества, привнесенного на стадии кремнещелочного метасоматоза, концентрации его в трансмагматическом флюиде, объема флюида, просочившегося через магму.

Изучение конкретных рудоносных провинций позволяет прийти к выводу, что металлогеническая специализация магматических очагов в основном задается трансмагматическими флюидами. Признавая различную металлогеническую специализацию магматических расплавов, мы неизбежно должны признавать и различную металлогеническую специализацию трансмагматических флюидов. Как справедливо указывает И. Д. Рябчиков [99], флюидный массоперенос в пределах верхней мантии может быть определяющим фактором, контролирующим металлогенические характеристики первичных магм.

Формирование магматических очагов представляется весьма сложным, длительным и, возможно, прерывистым процессом. В одних и тех же тектонических блоках гранитизация может возникать неоднократно в связи с различными тектоно-магматическими циклами, причем каждый из предшествующих циклов как бы подготавливает все более ураноносную и легкоплавкую среду для последующего. Наиболее ярко выражены эти явления в пределах гранито-гнейсовых куполов, по-существу представляющих прикровленные части гранитоидных магматических очагов. Яркое описание таких куполов имеется в работах О. М. Розена, В. И. Серых [88] и Ф. А. Летникова [58].

* * *

Завершая анализ поведения урана при процессах гранитообразования, следует подчеркнуть следующее.

1. Основным механизмом накопления урана в континентальной коре является гранитизация. Гранитизирующие флюиды ответственны за привнос, вынос и перераспределение огромной массы элементов, обеспечивая в конечном счете формирование «гранитного» слоя земной коры. Содержание урана в продуктах гранитизации всегда выше, чем в породах субстрата. Именно с процессами гранитизации связана та основная часть урана в земной коре которая с помощью тех или иных механизмов концентрирования предопределяет возможность формирования промышленных руд.

2. Предорогенный этап развития складчатых областей характеризуется интенсивным восходящим движением мантийных флюидов, способствующих образованию очагов базальтоидных расплавов в верхних горизонтах мантии. Фильтрация флюидов через эти расплавы приводит к растворению в них воды и других фторофильных элементов (в том числе и урана). В результате в земную кору поступают лишь инертные компоненты (азот, углекислота и др.), способствующие протеканию изохимического прогрессивного метаморфизма. Орогенный этап развития характери-

зуется прекращением или существенным понижением интенсивности потока мантийных флюидов, что способствует раскристаллизации базальтоидных очагов. Это вызывает отделение существенно водных флюидов, которые, поступая в земную кору, способствуют развитию процессов кремнещелочного метасоматоза, гранитизации и в конечном счете приводят к формированию коровых очагов гранитоидных расплавов. В дальнейшем, взаимодействуя с расплавом, гранитизирующие растворы вызывают их раскисление (метамагматическую дебазификацию), которое сопровождается непрерывным накоплением в магматических очагах рудных и рассеянных компонентов, в том числе и урана.

Глава III

КРИТЕРИИ СВЯЗИ ЭНДОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ВНУТРИКОРОВЫМ МАГМАТИЗМОМ

Гидротермальные месторождения урана, их положение в тектонических структурах и связь с магматическими комплексами

Коровый магматический источник предполагается практически для всех эндогенных урановых месторождений, развитых в разных типах рудных провинций и связанных так или иначе с проявлениями кислого и субщелочного магматизма внутрикорового происхождения. Как известно, во многих урановорудных провинциях широко развиты разновозрастные интрузивы гранитоидов или вулканогенные образования — липариты (риолиты), обязанные своим происхождением палингенным выплавкам в недрах гранито-метаморфического слоя земной коры.

Н. П. Лаверов [87] в выделяемой им эндогенной серии урановых месторождений различает три группы, к одной (третьей) из которых отнесены месторождения, связанные с гранитоидным магматизмом. К этой группе, согласно указанному автору, принадлежат урановые месторождения пяти различных генетических классов, включающих в общей сложности 12 геологических (минеральных и структурных) типов: позднемагматические (ураноносные метасоматические аляскитовые граниты), пегматитовые (ураноносные редкоземельные и редкометальные пегматиты), магматогенные альбититовые (ураноносные апатитовые и редкоземельно-торий-урановые в альбититах), магматогенные скарновые (ураноносные ортитовые и магнетитовые скарны), магматогенные гидротермальные (титан-урановые, пятиметальные, апатит-урановые, молибден-урановые и собственно урановые жильные и штокверковые). Оруденение этих месторождений формировалось в различные металлогенические эпохи, от протерозойских до кайнозойских, однако среди них преобладают фанерозойские месторождения.

Особо выделяется группа протерозойских месторождений ураноносных альбититов (железо-урановых, титан-урановых и собственно урановых), пространственно связанных с ультраметаморфическими комплексами и от-

носимых многими авторами к метаморфогенной серии. Как уже отмечалось, вопросы генезиса и источника урана этих месторождений являются дискуссионными. Наряду с другими, по-видимому, не исключен внутрикоровый фильтрационно-магматический или «ультраметаморфический» (гранитизационный) источник.

Развитые в разных рудных провинциях урановые месторождения отмеченных выше серий, классов и типов в различной степени связаны с кислым (гранитоидным) магматизмом, проявленным как в интрузивной, так и в вулканической фациях. Поэтому и достоверность обоснования представлений о магматическом источнике для каждого генетического класса и типа месторождения далеко не одинакова.

Позднемагматические, пегматитовые и высокотемпературные метасоматические месторождения урана первых четырех классов эндогенной серии обнаруживают весьма тесную, в ряде случаев, возможно, генетическую связь с магматизмом, для них магматический тип источника не вызывает особых сомнений и возражений. Эти месторождения по своему относительному возрасту и происхождению занимают промежуточное положение между поздними продуктами магматизма и постмагматической гидротермальной деятельности, что имеет весьма важное генетическое значение для понимания типа источника следующего пятого класса. Однако происхождение и источник оруденения урановых месторождений гидротермального класса, несмотря на определенную пространственно-временную связь с магматизмом, являются далеко не столь очевидными и во многом остаются неясными.

Магматогенные месторождения урана разных генетических классов, групп и типов, развитых в различных рудных провинциях планеты, в целом выстраиваются как бы в единый непрерывный ряд проявлений урановой минерализации от позднемагматических и пегматитовых до гидротермальных низкотемпературных, хотя они принадлежат к разным эпохам. Это показывает, что в природных условиях существует урановая минерализация практически всех классов и групп, но масштабы оруденения варьируют от крупных промышленных до мелких месторождений и рудопроявлений. Однако на территории одной урановорудной провинции практически нигде не известны месторождения сразу всех классов и типов. Как правило, в пределах провинций и районов развиты эндогенные урановые месторождения одного-двух классов, даже нескольких типов, но обычно они относятся к разновозрастным металлогеническим эпохам, т. е. формировались в различные тектоно-магматические циклы и этапы.

Все отмеченное свидетельствует не только о присутствии урана, но и о принципиальной возможности его миграции в достаточных количествах на всех стадиях развития как позднемагматической, так и постмагматической деятельности. В то же время из этого можно заключить, что конкретные магматические очаги генерировали ураноносные флюиды не на всем временном интервале их эволюции, а лишь на определенных этапах или стадиях развития.

Среди последовательно сменяющих друг друга во времени и по температуре образования рудных ассоциаций обнаруживаются многие черты сходства между собой и постепенные переходы по минералого-геохи-

мическим особенностям, набору основных рудных и нерудных минералов, их парагенезисам.

1. В классе позднемагматических месторождений известны ураноносные пегматоидные граниты (аляскиты) и мигматиты, которые содержат уранинит, бетафит (пирохлор), браннерит, а также циркон, апатит, сфен, молибденит и другие сульфиды в ассоциации с микроклином и другими минералами.

2. В классе пегматитовых месторождений выделяются ураноносные пегматиты гранитного и граносиенитового состава (слюдяные, танталониобиевые и титано-тантало-ниобиевые, бериллиевые, литиевые, кальцит-флюорит-апатитовые с магнетитом и гематитом и другие). В них отмечается уранинит, тантало-ниобаты, пирохлор, а также циркон, малакон, монацит, ураноторит, апатит, ортит, магнетит, гематит, ассоциирующие с калиевым полевым шпатом, бериллом, флюоритом, кальцитом и другими.

Ураноносные пегматиты сиенитового и нефелин-сиенитового состава (пирохлоровые, циркониевые и др.) содержат пирохлор, титано-тантало-ниобаты, циркон, малакон, циртолит, а также апатит, сфен вместе со щелочными полевыми шпатами, нефелином, щелочными амфиболами и пироксеном, биотитом и другими.

3. В классе скарновых месторождений выделяются ураноносные гранатовые скарны, в которых вместе с андрадитом-альмандином, диопсидом и другими минералами развиты ортит, уранинит, а также апатит, редкоземельные минералы, молибденит и другие сульфиды. Известны также ураноносные амфибол-диопсидовые скарны (актинолит-тремолит, диопсид, биотит и др.) с уранинитом, магнетитом, сфеном. Кроме того, торий-урановая минерализация выявлена в магнетитовых скарнах.

4. В классе грейзеновых проявлений известны ураноносные грейзены (слюдяные, кварц-топазовые грейзены, кварц-вольфрамит-касситеритовые жилы и др.), в которых отмечаются уранинит (± настуран?), а также молибденит и другие сульфиды с флюоритом, кварцем и другими минералами.

Однако нет полной уверенности, что в месторождениях последних двух классов урановая минерализация не является наложенной.

5. В классе гидротермальных месторождений выделяется ряд ураноносных рудных формаций, среди наиболеее высокотемпературных постмагматических образований — торий-урановой с редкими землями формации в калиевых метасоматитах, наряду с микроклином, биотитом, кварцем и другими отмечаются уранинит (с торием), монацит апатит, циркон, а также ксенотим, молибденит и другие сульфиды.

Титан-урановая (давидитовая) рудная формация содержит давидит, магнетит, гематит, ильменит, рутил, сульфиды, а также микроклин, биотит, кварц и др.

В ураноносной золото-молибденовой формации отмечаются уранинит, ортит, монацит, молибденит, золотосодержащий арсенопирит и другие сульфиды, а также роговая обманка, биотит, апатит, кварц и др.

Средне- низкотемпературные (постгранитизационные) образования представлены урановой и железо-урановой рудными формациями в натриевых (карбонатно-натриевых) метасоматитах, которые наряду с альбитом, щелочными амфиболами, биотитом, хлоритом, карбонатами и

кварцем содержат урановые титанаты (браннерит), настуран, уранинит, давидит, коффинит, циркон (малакон), апатит, магнетит, гематит, ильменит, сульфиды. Сюда же, по-видимому, следует относить образования торий-урановой формации.

Низкотемпературные постмагматические образования, принадлежащие к медно-урановой, золото-урановой, молибден-урановой, собственно урановой, пятиэлементной формациям в березитах и гидрослюдизитах, содержат настуран, коффинит, титанаты урана, сульфиды (молибденит и др.), арсениды кобальта и никеля, гематит, карбонаты, флюорит, кварц, барит и др.

Собственно урановая формация в альбититах-эйситах (альбит, анкерит, хлорит) включает урансодержащий апатит, циртолит, коффинит, молибденит, настуран, окислы титана и другие минералы.

Связь средне-низкотемпературных и низкотемпературных урановых месторождений с магматизмом уже весьма дискуссионна.

Исходя из всего изложенного выше, можно наметить три линии связи уранового оруденения с магматизмом и соответственно три группы месторождений: 1 — месторождения, генетически связанные с магматизмом; 2 — месторождения, парагентически связанные с магматизмом, и 3 — месторождения, связанные с магматизмом только пространственно. Месторождения первой группы — позднемагматические, пегматитовые, скарновые, грейзеновые, а также высокотемпературные постмагматические развиты сравнительно локально и весьма тесно связаны с магматическими образованиями. Месторождения второй и третьей групп — преимущественно гидротермальные низкотемпературные, распространены в провинциях более широко и иногда обнаруживают пространственно-временную или структурную связь с кислым магматизмом или вообще не обнаруживают такой связи. Однако не исключена возможность, что развитие первой линии связи рудоформирующих процессов с магматическими очагами отмеченными образованиями, по-видимому, и заканчивается, практически непосредственно не перерастая в низкотемпературные гидротермальные процессы второй линии. Проявление подобных более поздних рудообразующих процессов происходило уже в несколько иной тектонической обстановке, при других условиях флюидного режима и их источника.

В связи с этим, как считают некоторые исследователи (И. В. Мельников, К. Г. Королев и др.), намечаются две основные группы магматогенных урановых месторождений и соответственно два уровня условий переноса урана постмагматическими растворами — высокотемпературный (400—350°), сопровождаемый образованием калиевого полевого шпата, уранинита и др., и низкотемпературный (около 200°), приводивший к образованию сульфидов, карбонатов, настурана и др. С этими выводами согласуются представления И. В. Мельникова (1978, 1982 г.) об уменьшении от ранних стадий к поздним активности или интенсивности выделения галоидов (Cl, F) и возрастании роли углекислоты. Урановорудная стадия по сравнению с другими характеризуется наименьшими содержаниями хлора, фтора и наибольшей карбонатностью. При этом менялся не только состав ураноносных растворов от галоидных до карбонатных, но и происходила инверсия форм переноса урана. Формирование рудоносных

растворов началось еще на магматической стадии при отделении летучих компонентов из магматических очагов и продолжалось на постмагматических стадиях. Переход от галоидной формы переноса урана в карбонатную осуществлялся в интервале температур от 400 до 200°С.

В проблеме магматического источника урана гидротермальных месторождений и ее отдельных аспектов — эволюции магматических очагов и их способности генерировать ураноносные рудообразующие флюиды (растворы) — существует ряд неясных и нерешенных вопросов, среди которых следует отметить следующие.

Что представляли собой внутрикоровые магматические очаги гранитного состава? Была ли единая крупная камера расплава, насыщенного газами или был ряд более мелких камер в гранитизированном субстрате? Неясны также причины, механизм и условия отделения магмы, механизм инъекции ее в верхние слои коры.

Что представляли собой «остаточные» расплавы и флюиды магматических очагов гранитного состава после проявления интрузивной или вулканической деятельности? Достаточное ли количество в магматических очагах растворенных летучих компонентов и какого они состава, особенно после проявления магматизма, чтобы обеспечить мощные восходящие потоки флюидов (растворов) от самых ранних до наиболее поздних стадий развития очагов? В каком состоянии они находились ко времени постмагматической деятельности — иссякли или закристаллизовались полностью или частично?

Аналогичные вопросы относятся и к особенностям развития подкоровых магматических очагов основного состава.

Каково происхождение послегранитных и послевулканических дайковых серий регионального распространения и какова их связь с внутрикоровыми или подкоровыми очагами ранних (доорогенных) и поздних этапов развития?

Каково происхождение основных компонентов флюидных потоков при постмагматической деятельности, особенно на последних стадиях — углекислоты, воды, галоидов, серы, кремния и других, неясно, выделялись ли они из внутрикоровых магматических очагов или были связаны с поступлениями из очагов подкоровых оболочек?

Вообще проблема связи гидротермального уранового оруденения эндогенных месторождений с магматизмом является одной из наиболее сложных и дискуссионных проблем урановой геологии. Несмотря на усиленное изучение этих вопросов, вплоть до настоящего времени сосуществуют альтернативные, нередко взаимно противоположные точки зрения о различном отношении оруденения с магматическими образованиями. Наряду с представлениями о тесном генетическом или парагенетическом родстве между эндогенным оруденением определенного типа и интрузивными или вулканогенными комплексами пород высказываются мнения вообще об отсутствии какой-либо связи. Краткий обзор этих представлений приведен в гл. 1.

Установлено, что проявления магматизма в пределах урановорудных провинций, «заложенных» в разные эпохи и находящихся в различных геотектонических условиях, несмотря на определенное сходство, существенно различаются между собой. Результаты многих исследова-

телей, занимающихся вопросами тектоники и магматизма, свидетельствуют о том, что существует вполне закономерная связь магматических процессов с тектоническими движениями (и сооружениями) земной коры и более глубинных (подкоровых) оболочек планеты. Поэтому вопросы связи уранового оруденения тесно переплетаются с вопросами положения месторождений в определенных тектонических структурах.

По поводу форм связи гидротермального уранового оруденения с магматизмом также существуют различные представления. Судя по мнению сторонников разных точек зрения, влияние процессов магматизма и его продуктов на формирование гидротермальных рудообразующих растворов и самих урановых месторождений может выражаться по-разному, и поэтому формы связи могут быть весьма разнообразными.

Как уже отмечалось в гл. I, II, главное значение процессов магматизма выражается в генерации магматогенных (постмагматических) гидротермальных растворов и создании (накоплении) магматического источника рудного вещества (урана). Процессы магматизма могли также оказывать влияние на формирование урановых месторождений путем проявления постмагматической гидротермальной деятельности, сопровождаемой метасоматозом и мобилизацией рудных компонентов из вмещающих пород, а также путем создания необходимых благоприятных условий для их переноса. Проявления магматизма разного типа могли играть тепловую (энергетическую) роль и являться движущей силой (в результате конвекции) рудообразующих растворов в возникших гидротермальных системах. Магматические образования (интрузивы гранитоидов и габброидов, вулканические сооружения, субвулканические тела, силлы, дайки и т. д.) могли иметь сугубо структурное значение, создавая дренажные системы для циркуляции рудообразующих растворов и благоприятную среду для рудоотложения на структурных и геохимических барьерах. Наконец, сами магматические породы (гранитоиды, кислые вулканиты и др.), особенно с повышенными концентрациями урана и подвижной его формы, могли служить непосредственным источником металла в рудообразующих растворах.

Тем не менее выявленные эмпирические закономерности размещения эндогенных урановых месторождений и пространственно-временные соотношения оруденения определенной металлогенической эпохи с поздним магматизмом данного тектоно-магматического цикла позволяют сделать некоторые выводы генетического значения и наметить наиболее приемлемый вариант в отношении формы их связи.

Представления о характере связи уранового оруденения таких месторождений с магматизмом складываются на основании общих закономерностей их размещения в тектонических структурах континентальной земной коры и особенностях их развития, т. е. на основании комплекса факторов (критериев) и признаков, среди которых наиболее важными являются: пространственная приуроченность, общность структурного контроля тектоническими сооружениями, временная близость их образования, общее геохимическое и радиогеохимическое родство, связь урановых формаций с другими рудными формациями, пути и направления движения рудоносных растворов и др.

Пространственная приуроченность урановых месторождений к маг-

матическим образованиям гранитоидного состава (интрузивными и вулканическими), т. е. территориальное совпадение их размещения проявляется в разных масштабах и формах, начиная от магматических (интрузивных и вулканических) поясов и ареалов их развития и кончая конкретными интрузивными, субвулканическими и дайковыми телами, вулканическими постройками орогенных этапов развития.

Несмотря на все многообразие пространственных соотношений урановых месторождений и полей и массивов извержений пород, образованных на позднем (орогенном) этапе формирования урановорудных провинций, эти месторождения можно объединить в три основные группы, которые характеризуются своими особенностями пространственных (и структурных) связей с магматическими образованиями, т. е. отличаются по степени этой связи [32].

К первой группе относятся урановые месторождения и рудные поля, располагающиеся в пределах поздних вулканических аппаратов, куполов, покровов или близких к ним по возрасту субвулканических интрузивов кислых пород. Интрузивы являются близповерхностными субвулканическими образованиями и сформировались на глубинах, близких к глубинам формирования рудных тел гидротермального уранового оруденения. По геологическим данным и результатам определения изотопного возраста (K-Ar и U-Pb методами), они наиболее близки по времени формирования к урановому оруденению.

Ко второй группе принадлежат месторождения, располагающиеся в гипабиссальных интрузивных массивах гранитоидов или в зонах их эндо- и экзоконтактов. По сравнению с магматическими породами и месторождениями первой группы они формировались на бо́льших глубинах и оруденение оторвано по времени образования несколько большим интервалом (периодом).

Третью группу составляют месторождения и рудные поля, на площади которых на дневной поверхности отсутствуют выходы крупных тел поздних интрузивов и близких к ним по возрасту вулканических аппаратов. Однако здесь, так же как и в первых двух группах, развиты молодые дайки различного (кислого и основного) состава, в том числе диабазов и лампрофиров.

Вместе с тем встречаются месторождения и рудные поля, в пределах которых пространственная связь уранового оруденения с интрузивами и вулканическими постройками практически отсутствует или проявлена весьма слабо (телетермальные месторождения).

Временная близость образования уранового оруденения и проявления магматизма выражается также в разных масштабах, начиная с принадлежности их к общим (единым) тектоно-магматическим циклам и металлогенетическим эпохам и орогенным этапам развития и кончая близостью стадий и фаз. Эти особенности подтверждаются не только геологическими, но и геохронологическими данными возраста магматических пород и возраста руд, а также сопровождающих их метасоматитов.

Геохимическое вообще и особенно радиогеохимическое родство заключается в повышенных концентрациях в магматических породах радиоактивных элементов, в том числе урана, а также многих сопутствующих

элементов (Mo, F, TR и др.), содержащихся в рудах. Эти особенности характеризуют геохимическую специализацию магматизма.

Выяснение возрастных соотношений уранового оруденения с рудами и метасоматитами других металлов и месторождений, развитыми в рудных районах, позволяет определить положение уранового оруденения в рудно-формационных или рудно-метасоматических рядах, и тем самым наметить цепочку событий и форму связи с магматизмом. На многих месторождениях и в рудных районах урановое оруденение занимает вполне определенное (обычно одно из последних) место в общем многостадийном ряду постмагматических минеральных образований. При этом нередко обнаруживает сходство или постепенные переходы по минералого-геохимическим ассоциациям руд и околорудным метасоматитам, а также по температурным интервалам формирования, изотопному составу некоторых минералов и другим признакам с минеральными комплексами предшествующих стадий.

Выяснение путей циркуляции рудообразующих растворов позволяет восстановить характер и направление общего их движения к местам разгрузки.

Магматогенные гидротермальные месторождения, среди которых наиболее распространенными являются собственно урановые, молибден-урановые и титан-урановые, имеющие важное промышленное значение, широко развиты в рудных провинциях разного возраста и обнаруживают различный характер связи с поздними орогенными магматическими образованиями. Наиболее часто урановое оруденение месторождений связано с ураноносными гранитоидами или их вулканическими аналогами: с гранодиорит-гранитной, гранит-лейкогранитной, субщелочной гранитной или липаритовой (риолитовой) или трахилипаритовой, андезит-липаритовой формациями, а также контрастной базальт-липаритовой ассоциацией. Рудные провинции и районы, в которых эти месторождения являются одним из ведущих (главных) типов, известны практически во всех больших (глобальных) геосинклинально-складчатых поясах — Средиземноморском, Урало-Монгольском, Тихоокеанском, Тасманском, а также в наложенных на них орогенных и дейтеророгенных вулканических поясах.

В соответствии с геохимической специализацией этих поясов проявлены основные металлогенические особенности рудных провинций. В Средиземноморском поясе в урановорудных провинциях развиты главным образом собственно урановые месторождения (малосульфидные с карбонатами) жильного типа, связанные с интрузивами орогенных гранитоидов; в Урало-Монгольском поясе преобладают молибден-урановые (с сульфидами), приуроченные к сооружениям континентального палеовулканизма. Здесь также встречаются фосфорно-урановые и собственно урановые месторождения прожилково-вкрапленных руд, которые не обнаруживают особенно тесной (видимой) связи с магматизмом. Внутри подвижных поясов месторождения развиты либо в пределах гранитоидных ареалов (поясов), либо на площади континентально-вулканических поясов орогенного типа.

Однако ураноносность этих областей интенсивного проявления кис-

лого магматизма (ареалов, поясов, полей развития) далеко не повсеместна. Месторождения сосредоточены только в определенных участках континентальной земной коры, в пределах которых они накладываются на выступы древнего фундамента — срединные массивы и крупные устойчивые геоантиклинальные поднятия (тектонические блоки), совпадающие со сложными тектоническими узлами сочленения и пересечения разноориентированных глубинных разломов, среди которых обязательно развиты сквозные разломы. Эти крупные блоки континентальной коры характеризуются значительными геохимическими аномалиями. В пределах урановорудных провинций и районов размещение месторождений определяется приуроченностью к интрузивам орогенных гранитоидов или вулканическими сооружениями липаритовой формации в благоприятных тектонических и структурных условиях. Большинство урановых месторождений, причем наиболее значительных, располагается в зонах глубинных разломов — межблоковых и трансблоковых (сквозных), особенно в долгоживущих узлах их сочленения.

На примерах наиболее детально изученных урановорудных провинций, находящиеся в Средиземноморском и Урало-Монгольском геосинклинально-складчатых поясах и «зарожденных» («заложенных» и сформированных) в разные геологические и металлогенические эпохи фанерозойских циклов развития, установлено, что они характеризуются многими общими чертами состава и строения континентальной земной коры и древнего докембрийского фундамента, проявления эндогенных процессов — предшествующего полиметаморфизма и ультраметоморфизма (гранитизации), разновозрастного магматизма и постмагматической гидротермальной деятельности, включая околорудный метасоматоз. Проявления магматизма, в особенности орогенного гранитоидного, представляют собой составную часть в общем ряду последовательно развивавшихся эндогенных процессов единого тектоно-магматического цикла.

Рудные провинции разных эпох «зарождения» и расположенные в пределах различных геосинклинально-складчатых поясов характеризуются многими общими закономерностями направленного развития тектоно-магматических процессов, в том числе магматизма. Однако урановорудные провинции различаются между собой не только по возрасту, но и по интенсивности проявления этих процессов, степени ураноносности, размерам и типам месторождений, которые обусловлены многими геологическими факторами и в первую очередь особенностями и масштабами проявления корового кислого магматизма и его общей геохимической и радиогеохимической специализацией. В то же время они заметно отличаются по этим факторам от неураноносных рудных провинций и районов.

Анализ проявления магматических процессов и закономерностей распределения их радиоактивности, проведенный в пределах конкретных провинций, показал, что они характеризуются многими общими и вполне определенными особенностями развития, состава и геохимической специализации. Такие особенности магматизма в сочетании с другими геологическими факторами служат одним из основных индикаторов проявления эндогенного уранового оруденения, критерием ураноносности провинций в целом и их отдельных районов.

Как уже отмечалось, для урановорудных провинций, расположенных в пределах подвижных складчатых и дейтероорогенных (вторично орогенных) поясов, весьма характерна приуроченность к крупным выступам древнего докембрийского фундамента — срединным массивам или геоантиклинальным поднятиям. Эти специфические участки континентальной земной коры на протяжении многих циклов и периодов развития испытывали длительную и устойчивую тенденцию к воздыманию за счет происходивших в «гранито-метаморфическом» слое процессов гранитизации и гранитообразования под воздействием подкоровых газово-тепловых потоков, приводивших к его разрастанию (увеличению мощности) и разуплотнению. Различно консолидированный и гетерогенный (блоковый) по составу и строению древний фундамент сложен докембрийскими (протерозойскими) и нижнепалеозойскими метаморфическими толщами, разнотипными и разновозрастными гранитоидами, а местами перекрыты вулканогенными и осадочно-вулканогенными отложениями. На этих территориях широко и в больших объемах проявлены многочисленные интрузивные массивы гранитоидов, кислые или контрастные (кислые и основные) по составу эффузивы континентальных вулканических поясов орогенных (эпигеосинклинального или эпиплатформенного) этапов развития.

Многие рудные провинции обычно являются полицикличными по своему развитию. В истории их формирования от раннего докембрия до кайнозоя выделяется от 2—3 до 5—7 крупных тектоно-магматических циклов. В наиболее ранние циклы, охватывающие значительные отрезки времени, был сформирован дорифейский или допалеозойский фундамент, а в остальные циклы (ранне- и средне-позднепалеозойские, мезозойские, ранне- и позднекайнозойские) происходила частичная или полная тектоническая, метаморфическая или магматическая переработка его. В каждый новый цикл переработке подвергались участки фундамента, что приводило к резко неоднородному блоковому строению территорий провинции [87].

Крупные тектонические блоки континентальной земной коры — срединные массивы или их части (частные массивы), к которым приурочены урановорудные провинции, обычно подразделяются на структурно-формационные зоны (области), а также менее крупные тектонические блоки (рудные районы) — геоантиклинальные поднятия и разделяющие их прогибы. Эти блоки различаются не только по геологическому строению и истории развития, но и по глубинному строению коры, особенностям проявления и геохимической специализации магматизма, а также процессов рудообразования, в том числе уранового.

Как правило, развитые на территории урановорудных провинций орогенные гранитоиды и кислые вулканиты отличаются повышенными и высокими содержаниями урана, тория и калия, а также многих сопутствующих элементов.

Провинции обычно характеризуются проявлением одной основной металлогенической эпохи, связанной с определенным (главным) тектоно-магматическим циклом. В то же время для некоторых провинций установлено развитие полихронного уранового оруденения. В их пределах выявляются две или три эпохи рудообразования, причем далеко не каж-

дая из них связана с проявлением магматизма. Наиболее типичными полихронными провинциями являются урановые провинции и районы складчатых областей Европы.

Одной из наиболее важных и специфических закономерностей рудных провинций Северного, герцинского, сегмента складчатого пояса Европы является постоянная и повсеместная приуроченность ураноносных районов и месторождений к ареалам развития орогенного гранитоидного магматизма. В пределах рудных районов такая связь с герцинскими гранитоидами устанавливается для большинства и наиболее значительных гидротермальных урановых месторождений одной рудной формации, но иногда различного минерального состава. Главной отличительной особенностью таких месторождений является размещение их как в самих гранитоидах, преимущественно в их эндоконтактовой части, так и в основном в экзоконтактовых зонах интрузивных массивов, как правило, в пределах ореолов контактового метаморфизма вмещающих пород. В развитых здесь кислых вулканогенных образованиях верхнего палеозоя известны лишь небольшие месторождения и рудопроявления.

В областях развития континентального вулканизма подвижных поясов Азии самые поздние вулкано-интрузивные образования и гидротермальное урановое оруденение тесно связаны между собой не только в пространстве, но и во времени, что, по мнению многих изучавших их исследователей, обусловлено единством глубинного (внутрикорового) источника магматических расплавов и постмагматических рудоносных растворов.

По поводу магматического типа источника рудного вещества и возможного механизма его извлечения из очагов для магматогенных гидротермальных месторождений урана высказываются различные предположения. Эти вопросы являются наиболее сложными для изучения и, несмотря на их длительную разработку, еще полностью не разрешены, тем не менее они требуют особого рассмотрения.

Обоснование представлений о коровом магматическом источнике урана в рудообразующих растворах, сформировавших магматогенные гидротермальные месторождения, целесообразно рассмотреть по нескольким факторам (критериям).

Сравнительный анализ пространственных и временных соотношений уранового оруденения не только с магматизмом, близким по возрасту к оруденению и его геохимической специализации, но и анализ всей истории развития определенных участков континентальной земной коры, форм связи с региональными структурами, места уранового оруденения в общем ряду других рудных образований дает возможность наиболее полно и всесторонне охарактеризовать реальность существующих представлений об источниках рудного вещества.

В то же время рассмотрение в комплексе этих геологических, геохимических, минералогических (металлогенических), изотопно-геохимических, геохронологических, петрологических факторов позволит более правильно выбрать природный вариант источника урана для определенного типа месторождений. Среди них наиболее важными являются историко-геологические данные и соответствующие критерии.

Пространственно-временные соотношения гидротермального уранового оруденения с магматизмом

Во многих урановорудных провинциях и районах разных, но преимущественно фанерозойских циклов формирования известны разнотипные гидротермальные месторождения урана, которые обнаруживают пространственно-временную связь с кислым магматизмом поздних орогенных этапов развития, проявленных в любых формах.

Несмотря на существенные различия в тектонических условиях формирования и принадлежности к разным металлогеническим эпохам, разницу в характере проявления и петрохимических особенностях магматизма, устанавливаются общие («сквозные») и вполне определенные закономерности развития эндогенных процессов, в том числе гранитообразования. Во многих провинциях установлено, что магматизм гранитоидного состава, проявленный как в интрузивной, так и в вулканической формах, имеет, как правило, внутрикоровое происхождение.

Среди разновозрастных и разнотипных гранитоидов выделяются три генетические группы, отличающиеся не только по петрохимическим особенностям, но и по происхождению и условиям формирования: 1) анатектические автохтонные (метасоматические); 2) интрузивные продукты дифференциации магмы среднего или гибридного состава, иногда повышенной щелочности; 3) палингенные аллохтонные (интрузивные).

Автохтонные гранитоиды анатектического происхождения (по К.-Х. Менерту), образованные за счет магматического замещения (первичного расплавления) терригенных толщ на месте под влиянием в основном только тепловых потоков, без привноса летучих компонентов, рудных и радиоактивных элементов. Как правило, они представлены гранодиоритами или плагиогранитами, идентичными по химическому составу вмещающим породам. Обычно гранитоиды не дифференцированы по фазам и слагают крупные наиболее ранние (доскладчатые) батолиты или батолитоподобные массивы фундамента, которые сформировались в абиссальных условиях и имеют постепенные (метасоматические) контакты с вмещающими породами. Судя по наблюдениям в районах с разным, в том числе значительным, эрозионным срезом, они нередко переходят с глубиной в гранитизированные породы и мигматиты, пегматиты и т. п. Такие гранитоиды характеризуются обычно низкими, близкими к кларковым концентрациями радиоактивных элементов, соответствующими таковым в окружающих породах.

Интрузивные гранитоиды второй группы образуют единые вариационные ряды от габбро или диоритов (сиенито-диоритов) до нормальных гранитов и аляскитовых гранитов, возникших в результате кристаллизационной дифференциации и, возможно, гибридизма андезитовой магмы (иногда повышенной щелочности) корового происхождения. Обычно они слагают крупные соскладчатые интрузивные массивы (плутоны), дифференцированные по составу и фазам. В некоторых рудных провинциях развиты вулканогенные образования среднего—кислого состава, которые являются продуктами дифференциации аналогичной магмы. По радиогеохимическим особенностям магматические породы этой группы

дая из них связана с проявлением магматизма. Наиболее типичными полихронными провинциями являются урановые провинции и районы складчатых областей Европы.

Одной из наиболее важных и специфических закономерностей рудных провинций Северного, герцинского, сегмента складчатого пояса Европы является постоянная и повсеместная приуроченность ураноносных районов и месторождений к ареалам развития орогенного гранитоидного магматизма. В пределах рудных районов такая связь с герцинскими гранитоидами устанавливается для большинства и наиболее значительных гидротермальных урановых месторождений одной рудной формации, но иногда различного минерального состава. Главной отличительной особенностью таких месторождений является размещение их как в самих гранитоидах, преимущественно в их эндоконтактовой части, так и в основном в экзоконтактовых зонах интрузивных массивов, как правило, в пределах ореолов контактового метаморфизма вмещающих пород. В развитых здесь кислых вулканогенных образованиях верхнего палеозоя известны лишь небольшие месторождения и рудопроявления.

В областях развития континентального вулканизма подвижных поясов Азии самые поздние вулкано-интрузивные образования и гидротермальное урановое оруденение тесно связаны между собой не только в пространстве, но и во времени, что, по мнению многих изучавших их исследователей, обусловлено единством глубинного (внутрикорового) источника магматических расплавов и постмагматических рудоносных растворов.

По поводу магматического типа источника рудного вещества и возможного механизма его извлечения из очагов для магматогенных гидротермальных месторождений урана высказываются различные предположения. Эти вопросы являются наиболее сложными для изучения и, несмотря на их длительную разработку, еще полностью не разрешены, тем не менее они требуют особого рассмотрения.

Обоснование представлений о коровом магматическом источнике урана в рудообразующих растворах, сформировавших магматогенные гидротермальные месторождения, целесообразно рассмотреть по нескольким факторам (критериям).

Сравнительный анализ пространственных и временных соотношений уранового оруденения не только с магматизмом, близким по возрасту к оруденению и его геохимической специализации, но и анализ всей истории развития определенных участков континентальной земной коры, форм связи с региональными структурами, места уранового оруденения в общем ряду других рудных образований дает возможность наиболее полно и всесторонне охарактеризовать реальность существующих представлений об источниках рудного вещества.

В то же время рассмотрение в комплексе этих геологических, геохимических, минералогических (металлогенических), изотопно-геохимических, геохронологических, петрологических факторов позволит более правильно выбрать природный вариант источника урана для определенного типа месторождений. Среди них наиболее важными являются историко-геологические данные и соответствующие критерии.

Пространственно-временные соотношения гидротермального уранового оруденения с магматизмом

Во многих урановорудных провинциях и районах разных, но преимущественно фанерозойских циклов формирования известны разнотипные гидротермальные месторождения урана, которые обнаруживают пространственно-временную связь с кислым магматизмом поздних орогенных этапов развития, проявленных в любых формах.

Несмотря на существенные различия в тектонических условиях формирования и принадлежности к разным металлогеническим эпохам, разницу в характере проявления и петрохимических особенностях магматизма, устанавливаются общие («сквозные») и вполне определенные закономерности развития эндогенных процессов, в том числе гранитообразования. Во многих провинциях установлено, что магматизм гранитоидного состава, проявленный как в интрузивной, так и в вулканической формах, имеет, как правило, внутрикоровое происхождение.

Среди разновозрастных и разнотипных гранитоидов выделяются три генетические группы, отличающиеся не только по петрохимическим особенностям, но и по происхождению и условиям формирования: 1) анатектические автохтонные (метасоматические); 2) интрузивные продукты дифференциации магмы среднего или гибридного состава, иногда повышенной щелочности; 3) палингенные аллохтонные (интрузивные).

Автохтонные гранитоиды анатектического происхождения (по К.-Х. Менерту), образованные за счет магматического замещения (первичного расплавления) терригенных толщ на месте под влиянием в основном только тепловых потоков, без привноса летучих компонентов, рудных и радиоактивных элементов. Как правило, они представлены гранодиоритами или плагиогранитами, идентичными по химическому составу вмещающим породам. Обычно гранитоиды не дифференцированы по фазам и слагают крупные наиболее ранние (доскладчатые) батолиты или батолитоподобные массивы фундамента, которые сформировались в абиссальных условиях и имеют постепенные (метасоматические) контакты с вмещающими породами. Судя по наблюдениям в районах с разным, в том числе значительным, эрозионным срезом, они нередко переходят с глубиной в гранитизированные породы и мигматиты, пегматиты и т. п. Такие гранитоиды характеризуются обычно низкими, близкими к кларковым концентрациями радиоактивных элементов, соответствующими таковым в окружающих породах.

Интрузивные гранитоиды второй группы образуют единые вариационные ряды от габбро или диоритов (сиенито-диоритов) до нормальных гранитов и аляскитовых гранитов, возникших в результате кристаллизационной дифференциации и, возможно, гибридизма андезитовой магмы (иногда повышенной щелочности) корового происхождения. Обычно они слагают крупные соскладчатые интрузивные массивы (плутоны), дифференцированные по составу и фазам. В некоторых рудных провинциях развиты вулканогенные образования среднего—кислого состава, которые являются продуктами дифференциации аналогичной магмы. По радиогеохимическим особенностям магматические породы этой группы

характеризуются широкими вариациями содержаний радиоактивных элементов от близких к кларковым до повышенных и высоких.

Наиболее важными для уранового оруденения являются *производные палингенной гранитной магмы корового происхождения*, которая возникла в результате аллохимического переплавления — палингенеза гранитизированного субстрата в недрах «гранито-метаморфического» слоя коры под воздействием подкоровых газово-тепловых потоков (флюидов), сопровождаемых привносом летучих, редких и радиоактивных элементов, и затем внедрялась в более верхние слои земной коры. Интрузивные (аллохтонные) гранитоиды и различные вулканогенные породы образуют наиболее поздние вулкано-интрузивные комплексы орогенного этапа развития. Они слагают различные по морфологии (секущие приразломные и межформационные) обычно многофазные интрузивы, сформированные в гипабиссальных и субвулканических условиях. Нередко многие из них являются комагматами вулканогенных толщ кислого и субщелочного состава. По петрохимическим особенностям гранитоиды и вулканиты весьма близки между собой и относятся к гранодиорит-гранитной, нормальной (щелочноземельной) гранитной и гранит-лейкогранитной, а также липаритовой (риолитовой) формациям. Гранитоиды характеризуются пересыщенностью кремнезема и глинозема (для плюмазитовых разностей), повышенными содержаниями щелочей (K, Na) и редких щелочей (Li, Rb, Cs), причем $K > Na$.

Лейкограниты отличаются особенно повышенными содержаниями летучих компонентов (B, F, Cl, H_2O, CO_2). Л. И. Симоновой (1982, 1988 гг.) выделяются гранитоидные магмы — «сухие» (безводные) и флюидонасыщенные (водные), в которых присутствие воды достигает более 5%. В газово-жидких включениях породообразующих минералов палингенных гранитов, по данным некоторых авторов, отмечается наряду с другими наличие углекислоты, что свидетельствует о присутствии ее в подкоровых трансмагматических флюидах, вызвавших магмообразование.

Магматические образования как интрузивных, так и вулканических фаций палингенного происхождения, особенно наиболее поздних комплексов и фаз, характеризуются обычно редкометальной и урановой специализацией и являются потенциально рудоносными. Высокая радиогеохимическая специализация в основном обусловлена составом акцессорных минералов разного происхождения и наложенной минерализацией.

По минералого-геохимическим особенностям акцессорные минералы гранитов, липаритов и пегматитов обнаруживают сходство, что отображает позднемагматические и постмагматические процессы накопления многих, в том числе радиоактивных элементов в «остаточных расплавах—флюидах».

В геохимически специализированных ураноносных и редкометальных гранитах разновозрастных, особенно поздних, комплексов весьма характерно присутствие акцессорных уранинита, ураноторита, циртолита, фергюсонита, монацита, ортита, ксенотима, а также колумбита и др. Акцессорные минералы — топаз, апатит, турмалин, флюорит, касситерит и другие имеют как магматическое, так и в основном более позднее постмагматическое (пневматолитовое, грейзеновое) происхождение. Наряду с этим известны редкометальные микроклин-альбитовые, ли-

тиевые, бериллиевые, фосфатные и тантало-ниобиевые гранитные пегматиты чистой и гибридной линии (второй и третьей группы А. Е. Ферсмана), в которых отмечаются турмалин, апатит, монацит, циркон, топаз, флюорит, касситерит, вольфрамит, молибденит, минералы бериллия, лития, урана и тория, а также иногда тантало-ниобаты, редкоземельные фосфаты и др.

Содержания урана и других радиоактивных элементов, многих рудных и летучих компонентов в кислых магматических расплавах корового происхождения обусловлено не только ураноносностью субстрата, из которых они образовались, но и привносом их с потоками подкоровых флюидов [18].

В Средиземноморском и Урало-Монгольском полицикличных геосинклинально-складчатых поясах урановые месторождения рудных провинций и районов, «зарожденных» в палеозое, распределены весьма неравномерно и приурочены в основном к таким выступам (блокам) древнего кристаллического фундамента в крупных тектонических узлах, в которых интенсивно проявились процессы предшествующей гранитизации и более позднего палингенного гранитоидного магматизма или кислого вулканизма, сопровождаемого накоплением радиоактивных элементов.

Урановые месторождения, связанные с гранитоидным магматизмом

В Средиземноморском поясе в этих провинциях развиты главным образом собственно урановые месторождения жильного типа, ассоциирующие с интрузивным магматизмом.

В Северном герцинском сегменте пояса размещаются главные урановорудные провинции — Центрально-Европейская, приуроченная к Чешскому массиву, и Западно-Европейская, совпадающая с Центрально-Французским и Армориканским массивами [32, 87]. Отмеченные массивы образуют крупный Франко-Чешский срединный массив, являющийся фрагментом древней дорифейской платформы, в фундаменте которой проявились разновозрастные (в том числе герцинские) процессы гранитообразования. Большая часть массива, представленная Молданубской и Саксо-Тюрингской зонами, соответствует крупному полицикличному гранитному или гранито-метаморфическому поясу (ареалу) Европы (рис. 1).

В центральном — герцинско-альпийском сегменте Средиземноморского пояса, в пределах Иберийского, Паннонского, Македонского и других массивов также известны урановорудные районы с месторождениями, образованными в орогенные этапы как герцинского, так и альпийского тектоно-магматических циклов.

Среди магматогенных гидротермальных месторождений урана особо выделяются собственно урановые, реже комплексные месторождения жильного и штокверкового и иногда прожилково-вкрапленного (метасоматического) типов, сформированные в завершающие стадии орогенного этапа герцинского тектоно-магматического цикла развития палезойских складчатых областей. Эти месторождения широко развиты в рудных

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

провинциях Центральной и Западной Европы в различных частях Франко-Чешского срединного массива (рис. 2). Многие урановые месторождения являются полихронными, однако наиболее раннее урановое оруденение имеет позднепалеозойский возраст [32, 35, 87, 120].

Месторождения сосредоточены в районах, совпадающих с крупными тектоническими блоками — устойчивыми геоантиклинальными поднятиями, которые в предшествующие эпохи испытывали многократные процессы гранитизации и разновозрастного гранитообразования, приводящие к накоплению радиоактивных элементов. Эти участки континентальной земной коры по сравнению с окружающими блоками характеризуются увеличенной мощностью «гранито-метаморфического» слоя (рис. 3). Здесь же широко развиты поздние орогенные граниты, наиболее близкие по времени образования к урановому оруденению [87].

В то же время такие ураноносные провинции и районы приурочены к крупным тектоническим узлам сочленения межблоковых и сквозных (трансблоковых) глубинных разломов, которые являются составными частями глобальных поперечных субмеридиональных и северо-западных подвижных поясов, в том числе рифтогенного типа, проникающих в подкоровые оболочки. Вдоль таких поясов в разных тектонических сооружениях и структурных этажах располагаются многие разновозрастные и разнотипные урановые месторождения (рис. 4), устанавливаются различные проявления глубинных подкоровых процессов щелочного и щелочно-основного магматизма и т. п.

В пределах рудных провинций и районов урановые месторождения обнаруживают весьма тесную пространственную и структурную связь, временную близость и геохимическое родство с проявлениями позднего орогенного гранитоидного магматизма (абсолютный возраст 340—320 и 310—285 млн лет). Оруденение месторождений локализовано в зонах контактового метаморфизма крупных интрузивов этих гранитоидов, в том числе наиболее близких к ним по времени образования, или в них самих (рис. 5, 6).

Гидротермальные рудообразующие процессы, обусловившие возникновение промышленных скоплений урановых руд в провинциях и районах Франко-Чешского срединного массива, проявились после завершения позднепалеозойского (раннепермского) магматизма в основном в позднегерцинскую, а также повторно в более поздние металлогенические эпохи. Первые изестные в настоящее время наиболее ранние эндогенные

Рис. 1. Тектоническая схема герцинид Средней Европы (на основе Международной тектонической карты Европы 1964 г. с добавлениями авторов)

1 — древняя дорифейская платформа; *2* — выступы раннедокембрийского кристаллического фундамента срединного массива; *3* — выступы рифейско-палеозойского складчатого основания в срединном массиве; *4* — каледонские геосинклинально-складчатые комплексы обрамления: *а* — на дневной поверхности, *б* — погребенные; *5* — герцинские геосинклинально-складчатые комплексы обрамления: *а* — на дневной поверхности, *б* — погребенные; *6* — позднепалеозойские гранитоиды; *7* — позднепалеозойские эффузивы; *8* — позднепалеозойские молассы; *9* — верхнепермско-мезозойско-кайнозойский платформенный чехол; *10* — кайнозойские отложения передовых прогибов и рифтовых впадин; *11* — разломы установленные и предполагаемые; *12* — рифтовые системы (грабены)

Рис. 2. Тектоническая схема блокового строения ураноносного Чешского массива

1 — метаморфические комплексы докембрийского фундамента, интенсивно и многократно гранитизированного, в том числе в герцинскую эпоху: *а* — выступы на поверхности, *б* — погребенные под чехлом; *2* — слабометаморфизованные геосинклинальные комплексы рифея и субгеосинклинальные комплексы палеозоя; *3* — кайнозойские отложения передового прогиба альпийской складчатой области; *4* — платформенные отложения верхней перми, мезозоя и кайнозоя; *5* — тектоническая граница массива (*а*) и отдельных блоков (*б*); *6* — трансблоковые разломы (*а*) и грабены рифтовых систем (*б*)

Рис. 3. Схематический сейсмогеологический разрез земной коры ураноносного Чешского массива герциниид Центральной Европы (по Б. Беранеку, А. Дудеку, Х. Кюте и др.)

1 — «осадочный» слой; *2* — «гранитный» слой; *3* — поздние герцинские граниты; *4* — «базальтовый» слой; *5* — верхняя мантия; *6* — границы раздела в земной коре; *7* — граница раздела земной коры и верхней мантии (поверхность Мохоровичича); *8* — крутопадающие глубинные разломы

Рис. 4. Схема размещения урановых месторождений в подвижных тектонических поясах Европы и Африки (составлена Б. Л. Рыбаловым по А. А. Богданову, 1964 г., Е. Е. Милановскому, 1976 г., В. Е. Хаину, 1971, 1977 гг., П. М. Татаринову, 1970 г. и др.)

1 — трансконтинентальные глубинные разломы, разделяющие мегаблоки, установленные и предполагаемые; *2* — региональные глубинные разломы; *3* — авлакогеновые и рифтовые системы; месторождения: *4* — урана и торий-урана; *5* — золота; *6* — олова и вольфрама; *7* — свинца, цинка, серебра; *8* — меди; *9* — кобальта, никеля; *10* — сурьмы, ртути; *11* — флюорита; *12* — ниобия, тантала (тория)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Рис. 5. Схема расположения полей ураноносных жил относительно массивов поздних герцинских гранитов Рудных гор (по Ж. Жеффруа и Ж. А. Сарсия, 1958 г.)

1 — регионально метаморфизованные породы палеозоя и докембрия; *2* — контактово-метаморфизованные породы; *3* — породы основного состава; *4* — позднегерцинские граниты; *5* — постпалеозойские покровные отложения; *6* — третичные вулканогенные формации; *7* — месторождения олова и вольфрама; *8* — поля развития ураноносных жил

месторождения урана сформировались на границе ранней и поздней перми.

В эпохи позднекиммерийской и альпийской активизации под воздействием возобновившейся гидротермальной деятельности на этих месторождениях происходило в основном переотложение ранее сформированного оруденения и некоторый привнос металла. Одновременно в других геологических условиях формировались стратиформные урановые месторождения, как в складчатом основании, так и в молассовом и платформенном чехлах, по-видимому, с привносом урана. В результате в этих провинциях получило широкое развитие полихронное урановое оруденение [87].

Однако главное промышленное значение имеют магматогенные гидротермальные собственно урановые и комплексные жильные и штокверковые месторождения, в меньшей степени — метасоматические или прожилково-вкрапленные руды, которые сформировались в заключительную стадию герцинской металлогенической эпохи. Эти месторождения тесно, по-видимому, парагенетически связаны с позднеорогенными гранитами и локализуются в их экзо- и эндоконтактовых зонах, обнаруживая с ними

Рис. 6. Схема тектонического строения и размещения урановых месторождений Центрально-Французского массива (по М. Шевевуа, Ж. Равье, Р. Бруссу и И. Рубо)

1 — арверский (молданубский) метаморфический комплекс раннего докембрия (гнейсы, гранулиты, слюдяные сланцы, лептиниты, амфиболиты, анатектические гранитоиды и др.); *2* — рутено-лимузенский метаморфический (осадочно-вулканогенный) комплекс верхнего протерозоя—нижнего палеозоя; *3* — севенский метаморфизованный осадочно-вулканогенный комплекс кембрия, ордовика, силура (?); *4* — слабометаморфизованные осадочные отложения девона—нижнего карбона; *5* — угленосная моласса верхнего карбона; *6* — красноцветная моласса нижней перми; *7* — герцинские граниты; *8* — третичные базальтоиды; *9* — крупные разломы; *10* — рифтогенные грабены; месторождения урана: *11* — жильные; *12* — стратиформные в осадочном чехле

весьма тесную пространственную и структурную связь, временную близость и геохимическое родство.

Размещение интрузивов гранитоидов и приуроченных к ним урановых месторождений обычно контролируется общими тектоническими элементами — крупными геоантиклинальными тектоническими блоками и едиными подвижными зонами глубинных разломов, которые неоднократно подновлялись в течение длительного времени, в том числе в период проявления процессов магматизма и различного постмагматического рудообразования.

Месторождения представлены сериями сближенных ветвящихся ураноносных рудных жил, которые сформированы путем заполнения открытых полостей трещин, возникших в основном в надинтрузивных зонах (в контактово-метаморфизованных ореолах) в узлах сочленения разноориентированных глубинных разломов. Как правило, на месторождениях, локализованных в экзоконтактовых зонах, рудоносные жилы не выходят за пределы ореолов контактового метаморфизма, мощность которого достигает 1 км и более [32, 120].

Урановорудные жилы сложены настураном (абс. возраст 280—270 млн лет) и коффинитом, ассоциирующими преимущественно с кальцитом, кварцем, флюоритом, а также иногда с арсенидами кобальта и никеля, баритом и др. На некоторых месторождениях проявлены более поздние, по-видимому, в основном переотложенные ассоциации настурана второй генерации (абс. возраст 150 и 120—100 млн лет) с Ca-Mg-Fe карбонатами, флюоритом, кварцем и гематитом, а также арсенидами или селенидами (формации Mg-U и Bi-Co-Ni-Ag). На отдельных месторождениях встречаются молодые настурановые руды третьей генерации (возраст ~20 млн лет) обычно с кварцем, флюоритом, сульфидами [32, 35, 87].

Менее распространены урановые месторождения с прожилково-вкрапленными и метасоматическими настуран-коффинитовыми рудами, иногда с титанатами урана, апатитом, которые ассоциируют с альбитовыми (кварц-хлорит-альбитовыми) метасоматитами и являются, скорее всего, фациальной разновидностью первых [120]. Месторождения обычно локализуются среди метаморфических пород древнего фундамента и прорывающих их раннегерцинских гранитоидов в зонах межблоковых и трансблоковых глубинных разломов.

Масштабность рудных полей и месторождений определяется целым рядом геологических факторов, среди которых наиболее важными и главными являются тектоническая позиция в рудоносных структурах, специфика их развития и особенности проявления магматизма (возраст, объем, геохимическая специализация, условия внедрения). Концентрация металла в рудах обусловлена составом и концентрацией (содержаниями урана) рудных растворов, их объемом, путями и скоростью движения потоков по рудоподводящим структурам, а также условиями отложения рудного вещества. Пространственное распределение оруденения в пределах месторождений и рудных жил, размеры и морфология последних, скопления в рудные столбы определяются влиянием структурного или структурно-литологического контроля [32].

В зависимости от геологических условий локализации и глубины

залегания гранитоидов жильные месторождения различаются по строению и масштабности. Но главной и наиболее общей их структурно-морфологической особенностью является развитие сложной ветвящейся трещинно-жильной системы, ориентированной в основном поперек простирания поверхности контактов интрузивов гранитоидов и складчато-разрывных сооружений.

В экзоконтактовых зонах интрузивов ураноносных гранитов широко развиты разрывные нарушения (трещины скалывания и отрыва), многие из которых обычно оперяют зоны крупных разломов [32]. В эпоху рудообразования в соответствии с общим структурным планом и в связи с тектонической обстановкой снятия напряжений в отдельных местах (т. е. обстановкой относительного или локального растяжения) за счет сдвигов по крупным северо-западным разломам в условиях слабого сжатия вблизи гранитоидов вдоль этих разрывов происходили малоамплитудные сбросовые и сдвигово-сбросовые перемещения. Поэтому они были наиболее приоткрытыми и проницаемыми для ураноносных рудных растворов. В пределах рудоносных жил урановорудные скопления в форме линз, гнезд и т. п. образуют в совокупности локальные рудные «узлы» и столбы, размещение которых определяется структурными особенностями системы рудовмещающих разрывов. Вместе с более широко развитой жильной (нерудной) минерализацией и сопровождающими метасоматическими изменениями вмещающих пород они отображают пути движения гидротермальных растворов преимущественно восходящего характера [19]. Вертикальный размах оруденения достигает значительных размеров.

Урановые месторождения, связанные с континентальным вулканизмом

В пределах полицикличного Урало-Монгольского геосинклинально-складчатого пояса развиты урановорудные провинции, заложенные («зарожденные» и сформированные) в палеозое, а в участках наложения более поздних дейтероорогенных поясов — в позднем мезозое [87]. В палеозойских провинциях наиболее раннее промышленное оруденение было сформировано либо в каледонскую, либо в герцинскую металлогенические эпохи. Особо выделяются провинции, сформированные на конечных стадиях интенсивной позднемезозойской тектоно-магматической активизации.

Среди отмеченных провинций выделяются рудные районы, в которых сосредоточены месторождения молибден-урановой рудной формации, пространственно и во времени связанные с континентальным орогенным вулканизмом [28, 46, 48] Вопросы геологии, условий образования месторождений, минералогии руд и петрографии метасоматитов, связи с магматизмом детально изучены и подробно рассмотрены во многих опубликованных работах Ф. И. Вольфсона, Е. П. Сонюшкина, А. Б. Каждана, Н. П. Лаверова, Л. В. Хорошилова, Б. Л. Рыбалова, Б. М. Сельцова, Б. П. Власова, А. Е. Толкунова, Л. П. Ищуковой, Г. А. Шаткова, И. В. Мельникова, Б. И. Омельяненко, В. А. Головина, В. А. Барсукова, М. Я. Дары, И. С. Модникова и др. [28, 32, 48, 87].

Месторождения молибден-урановой формации широко развиты в рудных провинциях и районах, приуроченных к срединным массивам каледонских и герцинских складчатых областей, а также областей мезозойской и кайнозойской тектоно-магматической активизации, на которые наложены орогенные вулканические пояса. На их территории в орогенные этапы развития широко и интенсивно проявилась интрузивная и вулканическая деятельность [87].

В одних провинциях и районах эти месторождения являются главным или единственным промышленным типом; в других — наряду с ними развиты также собственно урановые, фосфорно-урановые (апатит-урановые) нередко с молибденом месторождения. В этих регионах самые поздние вулкано-интрузивные образования и гидротермальное урановое оруденение месторождений тесно связаны между собой не только в пространстве, но и во времени. По мнению многих изучавших их исследователей, эта особенность может быть обусловлена единством глубинного (внутрикорового) источника магматических расплавов и рудоносных растворов [27, 32].

Рассматривая эволюцию уранового рудообразования в общей геологической истории Земли, Н. П. Лаверов [46] показал,что молибден-урановые месторождения, связанные с континентальным вулканизмом, формировались только в течение фанерозойских металлогенических эпох. В пространственном размещении этих месторождений и рудных полей в пределах рудных провинций и районов каледонских, герцинских, киммерийских и альпийских складчатых и активизированных областей, в которых интенсивно проявлен орогенный кислый магматизм, устанавливается вполне отчетливая закономерность. Их тектоническая позиция и основные черты геологического строения определяются зонами крупных региональных разломов различных типов (особенно узлами их сочленения) и особенностями проявления магматизма — вулканического, вулкано-плутонического и интрузивного.

Урановые месторождения, связанные с вулканическими и вулкано-интрузивными образованиями липаритовой формации или контрастной по составу липарит-базальтовой ассоциацией, включают: а) месторождения прожилково-вкрапленных руд, приуроченных к корневым частям кислых субвулканических интрузивов; б) штокверковые месторождения в субвулканических интрузивах кислого и субщелочного состава; в) трещинно-жильные месторождения, локализованные в эффузивно-пирокластических толщах и их жерловых фациях (некках, штоках, трубках и т. п.) кислого или контрастного (кислого—основного) состава. Выделяется два основных типа месторождений: 1) в слоистых толщах вулканических и вулкано-тектонических депрессий (кальдерах проседания); 2) в массивных породах вулканических жерловых фаций и субвулканических интрузивов вулкано-купольных структур [32].

Урановое оруденение в пределах месторождений локализуется в различных типах наиболее проницаемых пород (трещиноватых, пористых), тяготея в основном к их контактам. При этом структурные особенности штокверковых рудных тел обусловлены морфологией и условиями залегания рудовмещающих субвулканических интрузивов и жерловых фаций. Существует также группа месторождений, которые

располагаются вблизи вулканических депрессий или под ними в породах складчатого основания или в доорогенных гранитоидах. Лишь в отдельных случаях наблюдается непосредственное прослеживание оруденения на глубину из вулканических образований орогенного структурного яруса в фундамент.

Характерно, что практически на всех месторождениях устанавливается по-разному проявленный, но обычно отчетливый контроль уранового оруденения зонами глубинных разломов и контактовыми зонами интрузивных и жерловых образований, уходящих на большую глубину.

Как показано многими исследователями в разных районах [28, 32, 58, 59], такие глубокопроникающие разломы и их тектоническая активность в орогенный этап развития провинций обусловили интенсивное проявление магматизма, формирование вулкано-тектонических депрессий и вулкано-купольных сооружений. Многие из этих разломов служили магмовыводящими каналами. В то же время они являлись рудоконтролирующими структурами, предопределяя размещение урановых месторождений.

Установленная тесная пространственная связь интрузивных, экструзивных и дайковых тел, метасоматических образований и уранового оруденения, одинаковый структурный контроль и близкая глубина формирования указывают на общие пути проникновения магматических расплавов и постмагматических гидротермальных растворов. Такие совпадения являются не случайными и могут свидетельствовать о единстве эндогенного источника магматизма и рудообразующих растворов.

Урановорудные провинции каледонских складчатых областей располагаются в срединных массивах, которые имеют блоковое строение и по периферии подверглись интенсивной переработке в основном в раннепалеозойский, а также, частично — позднепалеозойский тектономагматический циклы [87]. В пределах провинций различаются урановорудные районы с интенсивным проявлением либо интрузивного гранитоидного магматизма, либо наземного кислого—среднего вулканизма. Промышленные урановые месторождения относятся к гидротермальным магматогенным, время формирования которых близко ко времени внедрения самых поздних интрузивных образований (с проявлением самого позднего магматизма). Пространственно они совпадают с ареалами развития крупных разновозрастных многофазных интрузивов гранитоидов, в том числе самых молодых плюмазитовых лейкократовых гранитов или реже — кислых вулканитов. Некоторые из рудных районов тяготеют к участкам проявления континентального орогенного вулканизма.

Ураноносные палеовулканические структуры приурочены к отдельным интервалам (звеньям) протяженного внутриконтинентального вулканического пояса, сформированного в орогенный этап (S_2—D_{1-2}). Урановорудные районы и узлы внутри этих интервалов пояса располагаются в краевых частях поднятий и вулканических депрессий, урановые месторождения тяготеют к зонам межблоковых разломов, особенно к участкам сочленения их с трансблоковыми (сквозными) разломами. Месторождения урана, а также молибдена, полиметаллов (Pb, Zn, Ag), флюорита и др. тяготеют к ареалам развития вулкано-плутонических комплексов кислых и субщелочных пород [87].

Среди эндогенных гидротермальных месторождений урана, развитых в каледонских провинциях, выделяются два типа. Молибден-урановые в березитах и собственно урановые или фосфорно-урановые (апатит-настурановые), а также переходные разновидности фосфорно-урановые с молибденом в альбититах (эйситах—хлорит-анкерит-альбитовых метасоматитах). Руды сложены настураном, коффинитом, урансодержащим фтор-апатитом, циртолитом, а также молибденитом. Возрастные соотношения этих типов месторождений окончательно не выяснены, по-видимому, они близки по времени образования, т. е. сформировались в один этап. На некоторых месторождениях установлено, что настурановые или настуран-молибденитовые прожилки, сопровождаемые серицитизацией (или гидрослюдизацией) вмещающих пород, являются более молодыми и накладываются на ураноносные альбититы и их рудные ассоциации [32].

В рассматриваемых урановорудных провинциях эндогенные урановые месторождения отмеченных двух типов формировались в несколько различных геологических обстановках, но при общем тектоническом режиме единого орогенного этапа. Наиболее значительные урановые месторождения характерны для таких районов провинций, в которых проявлен интрузивный гранитоидный магматизм, в то время как в палеовулканических областях преобладают средние и мелкие месторождения. Во всех районах большая часть месторождений тяготеет к зонам долгоживущих глубинных межблоковых разломов [87].

Эндогенные гидротермальные молибден-урановые месторождения прожилково-вкрапленных руд, развитых в палеовулканических областях, пространственно связаны как с ранними, так и с наиболее поздними магматическими образованиями, которые нередко близки к ним по возрасту. Урановое оруденение локализуется не только в эффузивах, их жерловых фациях и субвулканических образованиях, но и в породах фундамента [32].

Собственно урановые, фосфорно-урановые с молибденом и фосфорно-(апатит) урановые месторождения, развитые в других районах, располагаются обычно в краевых частях жестких поднятий или в пределах внутренних прогибов, претерпевших инверсию. Эти месторождения не обнаруживают такой тесной пространственной связи с магматизмом, их положение, по результатам исследований Л. В. Хорошилова, контролируется узлами пересечения глубинных разломов, которые нередко определяют размещение магматических пород (даек и т. п.) [30]. В то же время их распространение территориально совпадает с ареалами развития разновозрастных гранитоидов, а многие рудные поля пространственно тяготеют к интрузивам позднеорогенных лейкократовых гранитов.

Урановорудные провинции погребенных срединных массивов герцинских складчатых областей представляют собой крупный фрагмент докембрийской платформы, перекрытой орогенными отложениями вулканогенно-осадочных формаций верхнего палеозоя [87]. В раннем палеозое территории провинций представляли собой геоантиклинальные поднятия, которые в орогенный этап каледонского цикла развития в конце силура — начале девона были перекрыты континентальными и прибрежно-

Рис. 7. Схема строения ураноносного рудного района в орогенном вулканическом поясе герцинской складчатой области (по А. Е. Толкунову, 1986 г.)

1 — границы орогенного свода, сложенного преимущественно раннеорогенными вулканогенно-осадочными отложениями и интрузивами гранитоидов; *2* — ядро свода — дорогенные образования; *3* — главные продольные и поперечные разломы; *4* — позднеорогенные вулкано-тектонические структуры; *5—7* — месторождения: *5* — урановые; *6* — флюоритовые (*а*) и полиметаллические (*б*); *7* — золотые (*а*) и медно-молибденовые (*б*)

морскими осадочно-вулканогенными отложениями, а затем прорваны каледонскими гипабиссальными гранитоидами и монцонитоидами.

В позднем палеозое, в орогенный этап герцинского цикла (C_3—P) проявились весьма интенсивные тектоно-магматические процессы, характеризовавшиеся многократным чередованием вулканической и интрузивной деятельности. По данным Н. П. Лаверова, А. Е. Толкунова и др. [87], выделяется два крупных вулкано-плутонических комплекса. Ранний из них представлен мощной толщей вулканитов среднего и кислого состава, которые прорваны гранитоидами (абсолютный возраст 340—320 млн лет). Поздний комплекс сложен вулканогенными образованиями (абсолютный возраст 300—270 млн лет) преимущественно кислого, субщелочного и среднего, в меньшей степени основного состава, а также красноцветными осадочными отложениями. Среди них широко распространены экструзивные и субвулканические интрузивные тела, а также дайкообразные залежи кислых и субщелочных порфировых пород. Этот магматизм завершился внедрением серии кислых, субщелочных и основных даек регионального распространения, образующих протяженные пояса или более локальные пучки. Формирование дайковой серии предшествовало процессам уранового рудообразования.

Для урановорудных районов герцинских складчатых областей, на которые накладываются континентальные орогенные вулканические пояса (рис. 7), весьма характерны молибден-урановые место-

Рис. 8. Положение молибден-уранового месторождения в вулканической депрессии (план и разрез) (по Н. П. Лаверову, 1972 г.)

1 — дайки гранит-порфиров, диабазов и лампрофиров; *2* — субвулканические тела кислых пород; *3* — игнимбриты, туфы липаритов, агломераты и туфогенные песчаники; *4* — купол фельзитов; *5* — пирокластическая толща; *6* — купол кварцевых порфиров; *7* — игнимбритовая толща; *8* — андезиты, дациты и их туфы, туфогенные песчаники и алев-

рождения жильного или штокверкового типа [27, 28, 119]. Прожилково-вкрапленное оруденение представлено настуран-сульфидной ассоциацией, которая обычно локализована в березитах или аргиллизитах, иногда сопровождается альбитизацией вмещающих пород. Месторождения расположены в краевых частях срединных массивов, имеющих здесь блоковое строение и перекрытых в депрессиях мощными вулканогенными толщами орогенного структурного яруса. Рудные поля и месторождения приурочены к вулкано-тектоническим депрессиям (впадинам) нередко кальдерного типа или к вулкано-купольным сооружениям. Большая часть основных месторождений локализуется в краевых кольцевых разломах, обрамляющих эти депрессии, среди кислых и субщелочных порфировых пород субвулканических интрузивов, некков и других экструзивных образований. Обычно они приурочены к участкам пересечения их крутопадающими линейными разрывами. В покровных фациях вулканитов, слагающих депрессии, урановое оруденение приурочено к наиболее проницаемым эффузивным породам (туфам, игнимбритам, пористым и трещиноватым лавам и т. п.), зонам небольших сближенных разрывных нарушений и трещин, развивавшихся вблизи сквозных разломов или над крупными перекрытыми разломами фундамента (рис. 8).

Магматогенные гидротермальные месторождения урана известны в рудных провинциях позднемезозойского заложения, расположенных в мезозойско-кайнозойских складчатых областях Средиземноморского и Тихоокеанского геосинклинально-складчатых поясов, а также в некоторых дейтероорогенных вулканических поясах [87]. Месторождения сосредоточены в участках срединных массивов, которые подвергались тектоно-магматической активизации, сопровождаемой образованием сводово-глыбовых структур и проявлением континентального вулканизма. Магматическая деятельность в их пределах проявилась весьма интенсивно и многократно, начиная с раннего докембрия и кончая поздним мезозоем. Процессы гранитизации и гранитообразования преимущественно калиевого ряда продолжались как в ранние домезозойские периоды, так и во время активизации.

В ранние — докембрийские этапы в пределах древнего фундамента, над которым впоследствии в тектонических узлах формировались ураноносные вулкано-тектонические структуры, широко проявилось образование полицикличных гранито-гнейсовых куполов (гранито-гнейсы, мигматиты, граниты).

В палеозойские тектоно-магматические циклы образовались на поднятиях интрузивные массивы каледонских и герцинских многофазных гранитоидов, дифференцированных от гранодиоритов и монцонитов до аляскитовых гранитов и граносиенитов, а в прогибах — вулканогенные толщи среднего и кислого состава.

В позднем мезозое в постплатформенный орогенный этап интенсивно

ролиты; *9* — лавоагломераты андезито-дацитов и андезито-базальтов; *10* — гранитоиды основания; *11* — метаморфические сланцы; *12* — линейные сквозные разломы; *13* — дуговые разломы кальдеры обрушения; *14* — урановые месторождения; *15* — рудные тела (жильные системы, линейные штокверки и пологие пластообразные залежи)

развивались тектонические и магматические процессы как в интрузивной, так и в вулканической формах. Магматизм характеризуется контрастным основным и кислым составом с повышенным содержанием щелочей (субщелочные андезито-базальты и трахилипариты), происхождение которых связано с очагами, расположенными на разных глубинах. В раннюю стадию (160—150 млн лет назад) магматические процессы начались с формирования интрузивов гранитоидов (в центральных частях сводовых поднятий) и вулканитов основного и среднего состава (по их периферии в рифтогенных впадинах). В среднюю стадию (150—140 млн лет) образовались покровы вулканогенных толщ преимущественно игнимбритов субщелочного — кислого состава (трахилипаритов) с подчиненным значением андезито-базальтов и базальтов в верхней части. В позднюю стадию (125—110 млн лет) сформировались силлы и покровы базальтоидов в соседних угленосных впадинах [32, 87].

Главные урановые месторождения, развитые в рудных районах провинций, относятся к гидротермальному магматогенному типу. Они были сформированы в позднем мезозое (абсолютный возраст 140—135 млн лет) в конце второй стадии орогенеза после проявления магматических процессов. По минеральному составу руд среди них выделяется два типа месторождений: молибден-урановые и мышьяково-урановые, сложенные настураном, иногда титанатами урана в ассоциации с молибденом и другими сульфидами, с флюоритом и др. Месторождения локализованы в разнообразных вулкано-тектонических структурах: эрозионно-тектонических впадинах, кальдерах проседания и вулканических куполах, а также иногда в расположенных поблизости угленосных впадинах. Урановое оруденение этих месторождений, локализованное в различных геологических условиях, в зависимости от вмещающих пород, образует сложные штокверковые или пластообразные залежи. Общим для них является многоярусный характер размещения рудных залежей. Большое значение при этом оказывали особенности строения рудоконтролирующих крутопадающих разломов, а также положение крупных пологих (субпослойных) нарушений. На некоторых месторождениях оруденение сконцентрировано в жильных зонах, развитых вдоль крутопадающих разломов фундамента [28, 87].

Как видно на примерах многих разновозрастных урановорудных провинций, гидротермальные урановые месторождения обнаруживают тесную пространственную и структурную связь с образованиями кислого и субщелочного магматизма орогенного этапа развития, проявленного как в интрузивной, так и в вулканической формах. Контролируются одними и теми же структурами — глубинными разломами.

Наряду с этим в пределах урановорудных провинций, как правило, устанавливается возрастная близость проявлений процессов уранового рудообразования и поздней магматической (вулкано-интрузивной) деятельности орогенного этапа развития. При этом во всех известных рудных провинциях и районах урановое оруденение развитых здесь месторождений оказывается моложе самых поздних вулканических, субвулканических и гипабиссальных интрузивных образований и обычно отделено от них этапом внедрения серии даек разного состава регионального распространения. Такое более молодое возрастное положе-

ние уранового оруденения по отношению к магматическим комплексам подтверждается также отчетливыми секущими взаимоотношениями с другими рудными и жильными образованиями более ранних этапов и стадий минерализации рудных формаций и ассоциаций. В то же время урановое оруденение, сформированное в свою самостоятельную стадию, по геологическому возрасту и целому ряду других признаков принадлежит к тому же тектоно-магматическому циклу, орогенной стадии развития, металлогенической эпохе и гидротермальному этапу постмагматической деятельности.

Близкое время образования гидротермального уранового оруденения и наиболее поздних магматических пород (вулканитов, гранитоидов, даек диабазов) единого тектоно-магматического цикла отчетливо доказывается многочисленными результатами геохронологических исследований в различных рудных провинциях и районах Н. П. Лаверова, Ф. И. Вольфсона, Б. М. Сельцова, А. Е. Толкунова, Б. П. Власова, Б. Л. Рыбалова, В. И. Величкина, И. Б. Иванова, В. Н. Голубева, И. В. Чернышова, И. С. Модникова и др. [18, 28, 32, 82]. При этом разница во времени образования оруденения и магматических пород (по K-Ar и изохронному U-Pb методам), судя по результатам этих авторов, обычно не превышает размеров ошибок определений этими методами и варьирует от 6—12 до 25—30 млн лет [60].

В каледонских урановорудных провинциях, по данным И. В. Чернышова, В. Н. Голубева и др. [41, 87], абсолютный возраст поздних интрузивов гранитоидов составляет 420—405 млн лет, а возраст уранового оруденения —415 млн лет. В герцинских ураноносных районах вулканических областей Урало-Монгольского пояса изотопный возраст самых поздних кислых эффузивов и субвулканических интрузивов и возраст уранового оруденения молибден-урановой формации, которое по геологическим данным, является явно более молодым, измеряется одними и теми же цифрами 280—270 ($\pm$10) млн лет [87].

В герцинских урановорудных провинциях Европы возраст (K-Ar) поздних гранитов —310—285 ($\pm$10) млн лет, возраст раннего уранового оруденения жильных месторождений —270 ($\pm$10) млн лет.

В урановорудных провинциях мезозойских дейтероорогенных поясов, где вулканический магматизм и молибден-урановое оруденение связаны с процессами постплатформенной тектоно-магматической активизации этих областей, возрастные параметры поздних кислых вулканитов и уранового оруденения довольно близки и составляют соответственно 150—140 млн лет и 140—135 млн лет ($\pm$10 млн лет) [87].

Аналогичные геохронологические данные, указывающие на тесную временную близость проявления кислого магматизма и уранового оруденения, имеются по рудным районам активизированных областей альпийских подвижных поясов. Например, в урановой провинции срединного массива Колорадо Тихоокеанского пояса в рудном районе секущего Порфирового пояса на молибден-урановом месторождении Мерисвелл и др., по данным П. Ф. Керра, Дж. Д. Расмиссена (1963 г.), возраст поздних кварцевых монцонитов, гранитов и вмещающих риолитов составляет 23—19 млн лет, а возраст жил и уранового оруденения, которое накладывается на самые поздние вулканогенные образования и рассека-

ющие их дайки лампрофиров, 19—18 млн лет. Аналогичные соотношения и данные абсолютного возраста отмечаются по многим урановорудным районам Средиземноморского пояса. Здесь возраст позднего магматизма и оруденения составляет соответственно 25—20 и 20—16 млн лет [87].

Связь урановых месторождений с дайковыми сериями

Как известно, многие гидротермальные рудные поля и месторождения разных типов обнаруживают тесную пространственную и структурную связь с участками (ареалами, полями, поясами, пучками) развития даек различного, нередко пестрого (основного, среднего, кислого и щелочного) состава, которые обычно оказываются самыми поздними и наиболее близкими по времени образования к урановому оруденению. Выяснение состава, относительного возраста, условий формирования дайковых серий и взаимоотношений с разновозрастными гидротермальными минеральными образованиями приобретает особое значение в понимании истории развития наиболее позднего магматизма и различного, в том числе уранового, рудообразования, хотя эти вопросы не всегда имеют прямое отношение к проблеме источников рудного вещества эндогенных месторождений урана.

Весьма важную роль малых интрузий и даек в проявлении процессов эндогенного рудообразования неоднократно подчеркивали многие исследователи. По мнению Ф. К. Шипулина (1968 г.), дайки лампрофиров и других пород выделяются в самостоятельную формацию «малых интрузий», которые начинают новый этап развития магматизма и оруденения.

Известно, что среди многочисленных разновозрастных и сложных по составу дайковых комплексов, широко развитых в пределах рудных районов и полей, обычно намечается несколько этапов или стадий их формирования. Среди них, по В. С. Коптеву-Дворникову, выделяются образования двух различных этапов, причем связанные с каждым интрузивным комплексом серии даек первого и второго этапов завершают его проявление. Дайки первого этапа («нерасщепленные») — аплиты, пегматиты — обычно тесно пространственно и во времени связаны с массивами гранитоидов, не выходят за их пределы, образуют взаимопереходы между собой и с гранитоидами. Дайки второго этапа («расщепленные») — диоритовые порфириты, гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры, кварцевые порфиры, а также лампрофиры, сиенит-порфиры и др.) — имеют как локальное (внутри или вблизи интрузивов гранитоидов), так и региональное распространение (протяженные пояса, удаленные от массивов).

Первые из них тесно пространственно, во времени, петрохимически и, по-видимому, генетически связаны с интрузивными массивами гранитоидов разновозрастных комплексов, являясь производными единых внутрикоровых магматических очагов. Кроме того, среди них существует группа даек, которые являются корневыми частями вулканогенных образований и аналогами (комагматами) вулканитов.

Вторые обычно представляют собой дайки регионального распространения, происхождение которых, по мнению многих исследователей

(Ефремова, 1983 г.; и др.), обусловлено деятельностью других более глубинных (подкоровых) магматических очагов.

Такие дайки обычно широко развиты в урановорудных провинциях разных эпох «заложения» в различных геосинклинально-складчатых поясах. Они характерны для рудных районов, в которых проявлены редкометальные, золотые и золото-серебряные, полиметаллические, флюоритовые, урановые и другие месторождения. Орогенный этап, отличающийся специфическим эндогенным режимом развития, проявлением тектоно-магматических процессов и закономерными блоковыми движениями по глубинным разломам, охватывает обычно значительный интервал времени от 50 до 70 млн лет и является многостадийным. В проявлении орогенного магматизма наблюдается закономерная эволюция в его составе, глубине происхождения магм, пространственной проявленности по блокам и зонам, изменении интенсивности и форм проявления, флюидонасыщенности магматических расплавов.

С проявлением тектоно-магматических процессов на ранних стадиях орогенного этапа развития было связано в основном образование в верхней части земной коры близизометричных сооружений — купольных, локальных сводовых и кольцевых структур и блоков разных типов и масштабов, соответствующих формированию внутрикоровых магматических очагов. Коровым магматизмом кислого-субщелочного состава завершается образование уран-ториевых и урановых сингенетичных гранитных пегматитов (шлиров и т. п.), в отдельных провинциях проявление ураноносных скарнов, иногда в некоторых районах — грейзенов, несущих урановую минерализацию. Такие урановые концентрации, скорее всего, имеют магматический источник. После проявления этих стадий в рудных районах, как правило, наблюдается значительный перерыв в ураноносности постмагматической гидротермальной деятельности. В рудных формациях золотых, медно-молибденовых, редкометальных, полиметаллических, флюоритовых и других заметные концентрации урана практически отсутствуют. Урановое оруденение появляется в ощутимых масштабах, нередко промышленных, лишь только на самых поздних стадиях, после внедрения даек лампрофиров и др.

Дайки регионального распространения «пестрого» (основного, щелочного, среднего) состава обычно широко развиты во многих рудных районах, в которых сосредоточены средне- и низкотемпературные гидротермальные месторождения — не только золоторудные, полиметаллические, флюоритовые, но и урановые. Дайки регионального распространения образуют протяженные (от десятков до сотен километров) линейные пояса, рассекающие, как и сквозные разломы, различные тектонические блоки, вулкано-тектонические и интрузивные сооружения. Их внедрение отображает существенное изменение в эндогенном режиме развития — существенную перестройку после становления жильных орогенных магматических комплексов (интрузивных и вулканогенных). Это является признаком того, что внутрикоровые палингенные магматические очаги в основном уже иссякли и начали вновь действовать подкоровые магматические очаги основного и субщелочного состава. При их внедрении подновлялись и оказались приоткрытыми системы разрывных структур, имеющих связь с подкоровыми оболочками. Это выразилось не только

в инъекциях магматических расплавов основного, основного—щелочного и щелочного, иногда кислого состава, но и в интенсивном проявлении карбонатной, кварцевой, флюоритной и другой сопровождающей жильной минерализации. Такие дайки лампрофиров (керсантитов, спессартитов, минette, кузелитов и др.) широко развиты на урановых месторождениях герцинских провинций Средиземноморского пояса, каледонских и герцинских провинций Урало-Монгольского пояса. Здесь нередко они являются важным рудоконтролирующим структурным фактором, к их контактам или участкам пересечения рудоносными зонами обычно приурочено урановое оруденение.

В пределах урановорудных провинций разных тектонической позиции и возраста намечается вполне определенная закономерность в эволюции магматических процессов, их глубинности и происхождения. Во многих срединных массивах, имеющих мозаично-блоковое или зонально-блоковое строение коры и представляющих собой близизометричные ядра или фрагменты (крупные блоки) ранней консолидации, устанавливается зонально-кольцевое и линейное развитие магматизма разного состава. При этом можно соответственно наметить две линии или направления развития магматизма корового (кислого—среднего) и подкорового (основного—среднего—щелочного), что отображает чередование (цикличность) во времени и закономерную миграцию магматических очагов в пространстве (как в плане латеральном, так и по вертикали, в разрезе). В своем развитии подкоровые магматические очаги основного состава предшествуют (но в других блоках) возникновению коровых очагов кислого состава. Первые имеют более широкое распространение по латерали и захватывают верхнюю часть мантии под различными блоками, вторые — более локальные, развивались в земной коре по геоантиклинальным блокам и иногда образовывали своеобразные апофизы в соседние прогибы. В ряде рудных провинций и районов развитие орогенного магматизма завершается (или нарушается) внедрением расплавов подкоровых очагов (даек, эффузивов). Отсюда следует, что последние действовали более продолжительно, создавая на определенных этапах магматические источники флюидов одновременно двух очагов. В подкоровых очагах концентрировался набор летучих и подвижных компонентов — в первую очередь CO_2, CO, CH_4, Na или K, а также F и др.; в коровых очагах — H_2O, галоиды, калий и др.

Приведенные геологические и геохронологические данные по урановорудным провинциям разных типов, независимо от их тектонической позиции и времени заложения, свидетельствуют о близком возрасте проявления поздней магматической деятельности и процессов гидротермального уранового рудообразования, о принадлежности тех и других к завершающим стадиям одних и тех же орогенных этапов.

В то же время во многих рудных провинциях и районах разных подвижных поясов установлено, что после завершения позднего кислого магматизма, проявленного как в интрузивной, так и вулканической форме, но до образования уранового оруденения месторождений разных типов, происходила существенная структурная перестройка, сопровождаемая нередко возобновлением магматической деятельности другого, более глубинного (прежде всего подкорового), происхождения. В этот

этап развития внедрилась целая серия даек «пестрого» состава (лампрофиров, сиенитов, диабазовых или диоритовых порфиритов, а также гранофиров, фельзитов, сферолит-порфиров и т. п.) регионального распространения [27, 28, 32]. В отдельных районах после образования оруденения в соседних депрессиях произошло извержение основных вулканитов. В некоторых районах герцинских провинций примерно в эти же интервалы времени, по данным А. Е. Толкунова и одного из авторов [87], между проявлениями магматизма (континентального вулканизма или гранитоидной интрузивной деятельности) и процессов уранового рудообразования происходили значительные горизонтальные перемещения по крупным трансблоковым (сквозным) глубинным разломам регионального значения. Все это свидетельствует о том, что внутрикоровые магматические очаги завершили свое развитие.

Таким образом, рассмотрение вопросов возрастного соотношения уранового оруденения и наиболее поздних магматических комплексов кислого состава показывает, что гидротермальное урановое рудообразование происходило весьма близко, но далеко не одновременно с проявлением магматических процессов постгеосинклинального или постплатформенного орогенных этапов развития. Ураноносная гидротермальная деятельность имела место после завершения вулканических и интрузивных процессов данного тектоно-магматического цикла и этапа и была оторвана во времени различными геологическими событиями, что не позволяет связывать урановое рудообразование непосредственно с развитием внутрикоровых магматических очагов [28], а предполагать лишь парагенетическую связь.

Радиогеохимическая специализация магматических пород

Результаты многолетних детальных исследований радиоактивности горных пород, проведенные А. А. Смысловым, В. К. Титовым, Н. П. Ермолаевым и др., показали, что особенности распределения радиоактивных элементов могут служить индикаторами различных геологических явлений. Представительные данные по геохимическому фону урана и тория всех разновидностей пород, развитых в пределах урановорудных провинций и районов, по мнению В. В. Викторова (1976, 1978 г.), могут использоваться не только для металлогенического анализа территорий изучаемых регионов и прогнозной их оценки, но и для выяснения истории поведения этих элементов в разных геологических процессах и возможного источника рудного вещества урановых месторождений. Особо важное значение приобретают детальные исследования по распределению радиоактивных элементов в магматических породах различного состава, возраста и происхождения. Данные, полученные в результате этих исследований, дают дополнительную информацию, помогающую решить многие проблемные вопросы урановой геологии — в металлогеническом направлении, возрастной корреляции разобщенных в пространстве магматических образований, источников рудного вещества магматогенных урановых месторождений, возможности мобилизации урана из магматических пород и т. п.

Как известно, в процессе развития разного по возрасту и составу магматизма и формирования соответствующих магматических комплексов наблюдается закономерное увеличение фоновых концентраций радиоактивных элементов от древних образований к более молодым, от основных к кислым разностям.

Основными причинами, обусловившими такое распределение сингенетичных (первично-конституциональных) концентраций урана и тория, являлись в первую очередь процессы дифференциации и кристаллизации магматических расплавов в ходе развития магматизма. Кроме того, следует учитывать, что геохимическая урановая специализация магматических комплексов, развитых в провинциях, отображает ураноносность магматических очагов древних метаморфических толщ тех уровней глубин континентальной земной коры, из которых под воздействием газово-тепловых потоков происходило выплавление магмы определенного состава. Геохимическая специализация этих магматических комплексов наряду с другими факторами и признаками характеризует ураноносность рудных провинций в целом или ее отдельных частей и дает возможность отличать уранорудные провинции от неураноносных рудных провинций и регионов, а в их пределах — выделять уранорудные районы — тектонические блоки, депрессии и т. п.

При исследованиях, направленных на выяснение источника рудного вещества гидротермальных урановых месторождений, в частности установление участков (зон) с признаками миграции, перераспределения урана в магматических породах, в первую очередь можно судить по отклонению величины торий-уранового отношения от нормальных значений, которые обычно могут колебаться от 2—2,5 до 4,5—5,0. Изменение величины торий-уранового отношения в интервалах этих значений может быть обусловлено разной урановой и ториевой специализацией магматических очагов, отдельных тектонических блоков и вулкано-тектонических депрессий.

Для магматических образований (интрузивных и вулканических), с которыми в пространстве и во времени связано урановое оруденение, обычно устанавливается вполне определенное геохимическое родство. Интрузивы поздних гранитоидов и кислые вулканиты в урановорудных провинциях и районах, как правило, характеризуются повышенной радиоактивностью и отчетливо выраженной урановой специализацией. Они отличаются также повышенными концентрациями тория, калия и целого ряда сопутствующих элементов, таких, как Sn, W, Mo, Be, Li, Rb, Cs, F, B и др. Эти геохимические особенности магматических пород орогенного этапа развития отмечаются для регионов урановорудных провинций независимо от возраста их «зарождения» (формирования) — каледонских, герцинских, мезозойских, кайнозойских, а также тектонического положения и геологического строения.

В целом уранорудные провинции отличаются от неураноносных рудных провинций и регионов не только повышенными концентрациями, но и неравномерным (дифференцированным) распределением радиоактивных элементов, и прежде всего урана, в кислых магматических (особенно вулканогенных) породах [87, 111]. В пределах таких провинций выделяются отдельные урановорудные районы (тектонические блоки,

вулкано-тектонические депрессии), в которых сосредоточены наиболее значительные урановые месторождения и для которых весьма характерно широкое развитие самых поздних (наиболее близких по возрасту к оруденению) кислых интрузивных и эффузивных пород, отличающихся повышенными и высокими сингенетичными содержаниями урана.

Так, в каледонских провинциях в пределах ураноносных вулкано-тектонических депрессий содержания урана в некоторых разностях кислых эффузивов орогенного яруса, по данным В. В. Викторова, В. Н. Левина, В. Б. Мещеряковой и др. [87], варьируют от 5 до $10 \cdot 10^{-4}$%, а в пределах соседних поднятий в самых поздних лейкократовых гранитах, которые завершают интрузивную деятельность и отделены от оруденения дайками регионального распространения, эти содержания достигают $(10 \div 12) \cdot 10^{-4}$%.

В гранитах, кроме того, устанавливаются повышенные концентрации молибдена и других элементов, а также флюорита. В ореолах контактового метаморфизма вокруг предрудных гранитов, по данным И. С. Модникова и др. [75], отмечаются повышенные содержания U, Th, Pb, Mo, Be, Sn, Au, Bi и др.

В урановорудных районах герцинских провинций областей континентального вулканизма бо́льшая часть месторождений сосредоточена в пределах вулкано-тектонических депрессий и вулканических куполов, где они связаны с полями развития самых молодых вулканитов и субвулканических итрузивов кислого и субщелочного состава, которые характеризуются высокими концентрациями урана. В некоторых липаритах средние содержания этого элемента, по данным В. В. Викторова, А. Е. Толкунова и др. (1986 г.), достигают $(10—12) \cdot 10^{-4}$%, в лейкократовых и аляскитовых гранитах — $(15—18) \cdot 10^{-4}$%.

Аналогичные закономерности устанавливаются в провинциях ураноносных срединных массивов герцинских складчатых областей Европы, на площади которых широко развиты гранитоиды, характеризующиеся повышенными концентрациями радиоактивных элементов. Одной из особенностей рассматриваемых урановорудных провинций, существенно отличающей их от прилегающих неураноносных геосинклинальных систем обрамления срединного массива, а также от других неурановых рудных провинций и регионов, является отчетливая урановая специализация определенных тектонических блоков (рудных районов), в которых сосредоточены разновозрастные магматические образования, особенно интрузивы орогенных гипабиссальных гранитов с повышенными геохимическим фоном урана и других радиоактивных элементов. Такие блоки выделяются, например, в Чешском массиве, где они являются наиболее рудоносными и ураноносными, в их пределах сосредоточена большая часть гидротермальных урановых месторождений, сформированных в герцинскую и преобразованных в более молодые эпохи.

Средние содержания урана в таких гранитах, развитых в рудных районах (тектонических блоках), варьируют от 7—8 до $(10—15) \cdot 10^{-4}$%. В гранитах Центрально-Французского массива концентрации урана достигают $20 \cdot 10^{-4}$%. В орогенных гранитоидах рудных районов отмечаются также повышенные концентрации Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Cs, B, F и др.

В урановорудных провинциях мезозойских дейтероорогенных областей (поясов), по данным Г. А. Шаткова, Б. М. Сельцова, П. С. Козловой и др. [90, 123, 124], повышенные и высокие концентрации урана, от 5—7 до (9—10)·10^{-4}%), характерны для всех, особенно кислых вулканогенных пород наложенных рудоносных депрессий, в пределах которых развиты гидротермальные урановые месторождения. Наиболее высокие содержания урана, достигающие 25·10^{-4}% и более, здесь установлены в некоторых кислых вулканических стеклах (перлитах, обсидианах). Кроме урана, в кислых вулканитах этими авторами отмечаются повышенные количества Mo, Pb, Be, Zr, Nb, Rb, Cs, F, Cl, La, Y и др.

Как уже отмечалось, для магматических образований орогенного этапа развития нередко характерны также повышенные и высокие концентрации тория, которые варьируют в широких пределах и могут достигать (30—40)·10^{-4}%, даже 70·10^{-4}% и более. Концентрации тория в гранитоидах и кислых вулканитах в провинциях разных эпох зарождения существенно меняются не только в зависимости от их возраста, но и от тектонического и пространственного положения. В некоторых рудных районах ураноносного Чешского массива торионосные гранитоиды и липариты развиты в определенных частях блоков, преимущественно по их обрамлению, возможно отображая своеобразную зональность развития магматических очагов.

Торий-урановое отношение в магматических породах рудных районов, по данным А. А. Смыслова (1974 г.), как правило, не превышает 3,5, однако в урановорудных провинциях оно обычно варьирует в широких пределах, уменьшаясь до 2—2,5 и менее.

В пределах исследованных урановорудных провинций одна из характерных геохимических закономерностей накопления радиоактивных элементов к концу проявления магматических процессов устанавливается почти для всех развитых здесь комплексов наиболее типичных гранитоидов и вулканитов. Например, в рудных районах Чешского массива в интрузивах герцинских гранитов обычно наблюдается увеличение содержания урана, от 7—8 до (15—17)·10^{-4}%, и тория, от 20—27 до 35—40·10^{-4}%, от пород ранних фаз к поздним. В то же время в некоторых молодых гранитах разновозрастных герцинских комплексов намечается другая — противоположная тенденция поведения радиоактивных элементов в процессе кристаллизационной дифференциации палингенных магматических расплавов. Для молодых лейкократовых (двуслюдяных) гранитов, по данным А. Н. Болотникова (1975 г.), Л. И. Симоновой (1986 г.) и др., установлено уменьшение содержания этих радиоэлементов (урана от 10 до 7·10^{-4}%, тория от 12 до 6·10^{-4}%). Аналогичная закономерность выявлена рядом исследователей (Л. Л. Леонтьева, Н. И. Удальцова, 1974 г.; Л. В. Дмитриев, 1962 г. и др.) при изучении гранитоидов в совершенно других районах. В связи с этим напрашивается вывод о том, что в ходе развития магматических процессов далеко не всегда проявляется однозначная тенденция накопления радиоактивных элементов в конечных дифференциатах и что их распределение в зависимости от геологических и физико-химических условий может протекать по-разному. Снижение кон-

центраций урана и тория в образованиях поздних фаз молодых гранитов, по-видимому, может быть связано с их выносом при эманационной дифференциации магматических расплавов радиоактивных элементов, т. е. миграции этих элементов в связи с летучими компонентами, возможно, и является косвенным признаком обогащения ураном разных фаз так называемых остаточных расплавов в магматических очагах. Отсюда следует, что не всегда содержания урана в самых молодых дериватах ураноносных гранитоидов, с которыми связаны месторождения, могут служить прямым доказательством геохимической связи эндогенного уранового оруденения с магматизмом.

Одним из показателей, который основан на характерных геохимических особенностях ураноносных магматических пород, развитых в пределах урановорудных провинций, является также содержание так называемого «подвижного урана» (или его «подвижной» формы), т. е. металла, относительно легко извлекаемого из пород содовыми растворами. Эти содержания варьируют в широком диапазоне от 10 до 50%, причем для большинства гранитоидов и вулканитов они не выходят за пределы 10—20%. Наиболее высокие и устойчивые содержания его (30—50%) присущи гидротермально или гипергенно измененным породам, а также разностям с высокими значениями концентраций общего урана. Однако формы нахождения и генезиса подвижного урана далеко не всегда установлены, не всегда также выяснена зависимость концентрации урана от степени изменения гранитоидов или вулканитов. Происхождение подвижного урана в этих породах может быть связано с различными наложенными процессами.

Как показало детальное изучение кислых магматических пород с различной структурой (от стекол до гранитов), в процессе их раскристаллизации происходило удаление некоторой, иногда значительной доли наиболее подвижного урана, в то время как основная (трудно извлекаемая) часть остается в породе [90].

С наложением любых эпигенетических (гидротермальных или гипергенных) процессов, даже в незначительной степени затрагивающих породы и приводящих к некоторым их изменениям, связаны привнос, вынос или перераспределение металла, что, естественно, вызывает дополнительное осложнение его распределения.

Как известно, относительную долю нахождения различных форм урана в породах в ряде случаев удается определить не только с помощью химических анализов, но и методом осколковой радиографии.

Исследованиями установлено, что содержания «подвижного» металла связаны с наличием его легко выщелачиваемых форм (собственно урановых минералов или сорбированных форм урана). Уран многих акцессорных урансодержащих минералов и изоморфных примесей, как правило, почти не извлекается содовым раствором.

Как известно, ураноносность магматических пород связана в основном с акцессорными минералами, а также с более поздними наложенными образованиями. Среди акцессорных выделяются минералы как магматического, так и постмагматического происхождения. Далеко не всегда акцессорные минералы магматического генезиса (циркон, апатит) содер-

жат уран в достаточно больших количествах, но трудно извлекаемой форме. В то же время среди них присутствуют урановые и урансодержащие минералы.

Происхождение «подвижной» формы урана в позднеорогенных лейкократовых гранитах некоторых рудных районов палеозойских складчатых областей, по данным Л. И. Симоновой (1982, 1988 гг.), обязано по крайней мере двум процессам: 1) вторичной биотитизации этих гранитов, которая могла проявиться на ранней стадии их становления в результате восходящего продвижения фронта «остаточных флюидов» и образования в слюдах тонкой вкрапленности урановых и урансодержащих акцессорных минералов (апатита, фосфатов редких земель, фергюсонита, уранинита и др.), а также повышенных концентраций многих элементов — P, F, TR (Y, La), U, Pb, Li и др.; 2) перераспределению сингенетичного урана за счет наложенных процессов преимущественно кислотного выщелачивания (грейзенизации, березитизации и т. п.), а также альбитизации.

В результате циркуляции восходящих высокотемпературных флюидов на ранних стадиях и более поздних гидротермальных растворов возникали широкие ореолы рассеяния «подвижного» урана, которые могли служить источником рудного вещества для извлечения постмагматическими или гипергенными растворами и образования соответствующих месторождений.

В гранитоидах наблюдается разная корреляционная зависимость урана и тория. Для высокоториеносных гранитов обычно отмечается прямая корреляция между содержаниями тория и урана, для низкоториеносных гранитов нередка обратная тенденция, т. е. возрастание содержания урана при одновременном некотором снижении концентрации тория.

В пределах провинций на общем слабо дифференцированном и близком к кларковым по содержанию радиоэлементов геохимическом фоне выделяются рудоносные тектонические блоки (рудные районы), в которых большая часть кислых магматических пород разных типов и возраста отличается повышенными и контрастно высокими содержаниями урана и тория, низкими значениями торий-уранового отношения.

Отчетливо выделяющиеся по радиогеохимической специализации позднеорогенные палингенные граниты рудоносных блоков и особенно их отдельных частей характеризуются повышенными и высокими средними содержаниями урана (от 7 до $13 \cdot 10^{-4}$%, в среднем — $(9—10) \cdot 10^{-4}$%), значительно варьирующими (от 4 до $40 \cdot 10^{-4}$%) в среднем $(10—30) \cdot 10^{-4}$%) концентрациями тория, в основном низкими (менее 4—4,8, обычно 2—2,5, иногда до 1—1,5) торий-урановыми отношениями и в целом относительно высоким процентом (30—50%) «подвижной» формы урана. Здесь же, как правило, развиты наиболее значительные урановые месторождения.

Наибольший интерес в этих районах представляют участки проявления высокоураноносных, но с относительно низкими содержаниями тория орогенных герцинских гранитов, вблизи которых в тектонических узлах сосредоточены гидротермальные урановые месторождения, что позволяет высказывать соображения о тесной пространственно-временной (параге-

нетической) связи уранового оруденения с геохимически специализированным кислым магматизмом. В то же время в районах развития высокоторионосных кислых магматических образований признаков проявления промышленного уранового оруденения не установлено.

Радиогеохимическая специализация магматических пород кислого состава различного возраста, пространственно сближенных и характеризующихся общим или сходным геологическим положением в пределах одних и тех же тектонических блоков и тектономагматических узлов, свидетельствует об их геохимической унаследованности. Граниты и липариты здесь, очевидно, имеют общее происхождение из близких магматических очагов, т. е. выплавление из одних и тех же частей «гранито-метаморфического» слоя коры под воздействием единых газово-тепловых потоков, но в разные стадии.

В пределах некоторых урановорудных провинций вулканических поясов устанавливается весьма важная закономерность, которая имеет отношение к проблеме источника рудного вещества в постмагматических гидротермальных растворах, сформировавших молибден-урановое оруденение. По данным А. Г. Шаткова [123, 124], Б. М. Сельцова, А. Е. Толкунова [87, 90] и др., эти месторождения развиты только в тех вулкано-тектонических депрессиях, которые характеризуются наиболее высокими содержаниями урана в кислых и других вулканических субвулканических породах. В безрудных депрессиях, сложенных аналогичными по составу и возрасту вулканогенными породами, содержание урана обычно близко к кларковым или незначительно превышает их.

В некоторых урановорудных провинциях разных типов, по мнению В. В. Викторова, намечается тенденция, которая выражается в прямой корреляционной зависимости между содержаниями урана в поздних кислых магматических образованиях и объемами их проявления, с одной стороны, и масштабами промышленных урановых месторождений, развитых среди них,— с другой, конечно, при наличии других благоприятных факторов. Так, для рудных районов (депрессий) с наиболее значительными месторождениями первично-конституциональные (сингенетичные) концентрации урана в поздних магматитах весьма контрастны и достигают $(10—18) \cdot 10^{-4}\%$ и более, а для районов с мелкими месторождениями составляют обычно $(6—7) \cdot 10^{-4}\%$. Очевидно, объемы развития комплексов магматических пород, завершающих данный рудогенерирующий тектоно-магматический цикл, и содержание в них урана отображают масштабы магматических очагов и их специализацию на металл. В то же время такие особенности распределения радиоактивных элементов в вулканогенных породах свидетельствуют о том, что магматические очаги, питавшие вулканические аппараты в разных депрессиях (т. е. в разных тектонических условиях), были пространственно разобщены и различались по содержанию урана в магмах.

Принципиально такие же закономерности распределения радиоактивных элементов в магматических образованиях в зависимости от их тектонической позиции и общей ураноносности комплекса всех пород наблюдаются в урановорудных провинциях складчатых областей Европы. Здесь только в рудных районах — тектонических блоках геоантиклинальных поднятий, в которых развиты гидротермальные урановые месторож-

дения, орогенные граниты характеризуются контрастно высокой урановой специализацией.

Еще одной важной особенностью в распределении радиоактивных элементов в магматических образованиях, развитых на территориях урановорудных провинций, является зависимость содержаний урана в вулканогенных породах от степени их раскристаллизации. По данным Г. А. Шаткова, Л. Н. Шатковой, Е. Н. Гущина, Б. М. Сельцова, П. С. Козловой и др. [90, 123, 124], в отдельных урановорудных районах установлено, что содержание урана в некоторых стеклах кислого состава в два и более раз выше, чем в липаритах с афировой или микрофельзитовой структурой и может достигать 25—30·10^{-4}% и более. Аналогичная тенденция зафиксирована и для многих других рудных и редких элементов, а также для фтора, хлора и т. п. Этими исследователями показано, что уран равномерно распределен в вулканических стеклах, прочно связан с их структурой. Поэтому они пришли к выводу, что скорее всего большая часть его является сингенетичным (магматогенным) и, по-видимому, отображает концентрацию этого элемента в расплавах магматических очагов.

Отмеченные выше авторы предполагают, что более низкие содержания урана и других элементов в раскристаллизованных разностях эффузивов связаны с выносом их в процессе девитрификации и дегазации вулканогенных пород. Однако эта закономерность наблюдается далеко не во всех вулканитах и их стекловатых разностях, а также не во всех рудных районах.

Как считают некоторые исследователи, содержания урана в магматических породах не отображают в полной мере концентраций этого элемента в магматических расплавах. Поэтому при сопоставлении этих пород по содержаниям металла нельзя результаты радиогеохимических исследований полностью переносить на расплавы. Такой подход, по мнению Б. И. Омельяненко, правомочен лишь при сравнении между собой свежих (неизмененных) вулканических стекол. Долю вынесенного урана восстановить практически невозможно, что создает некоторую неопределенность при генетических построениях, основанных на сопоставлениях магматических образований по фоновым концентрациям металла.

В какой-то степени (ориентировочно) в этом отношении может помочь привлечение статистических данных по представительным выборкам содержаний всех радиоактивных элементов, детально расчлененных на группы пород с более или менее устойчивым торий-урановым отношением.

Таким образом, урановорудные провинции и заключенные в них месторождения характеризуются следующими наиболее важными особенностями: 1) приуроченностью к специфическим участкам континентальной земной коры (крупным тектоническим блокам в определенных структурных узлах, очаговым структурам, орогенным сводовым поднятиям), в пределах которых длительно, унаследованно и интенсивно развивались эндогенные процессы (метаморфические, ультраметаморфические, магматические и метасоматические), приведшие к созданию мощного и хорошо проработанного сиалического («гранито-метаморфического») слоя и накоплению в нем радиоактивных элементов задолго до проявления первого рудогенерирующего тектоно-магматического цикла; 2) ин-

тенсивным проявлением разновозрастного как раннего (доорогенного), так и (особенно) позднего — орогенного — магматизма кислого (гранитоидного) состава калиевого ряда, имеющего в основном внутрикоровое палингенное происхождение. Достаточно крупные по размерам магматические очаги возникали в недрах мощного, сравнительно однородного «гранито-метаморфического» слоя коры, который был сформирован в результате многократных предшествовавших процессов гранитизации; 3) широким развитием гранитизации и такого магматизма, которые происходили в результате проявления интенсивных непрекращающихся (непрерывно-прерывистых) газово-тепловых потоков — сквозьмагматических флюидов, имеющих в своем составе преимущественно галоиды (бор, фтор, хлор). Они проявились как в доорогенные (при ультраметаморфизме), так и в орогенные этапы развития во время собственно магматической и постмагматической деятельности; 4) общим длительным и постепенным накоплением радиоактивных элементов в различных комплексах пород, «гранито-метаморфического» слоя данного участка земной коры в результате привноса или перераспределения их при проявлении разновозрастных процессов ультраметаморфизма (гранитизации) и гранитообразования (гранитного магматизма); 5) на фоне дифференцированного распределения радиоактивных элементов в различных комплексах кислых магматических пород, развитых на территории урановорудных провинций и районов в зависимости от их возрастного и пространственного (тектонического) положения проявлением двух тенденций: с одной стороны, увеличением содержаний этих элементов от ранних образований комплексов и фаз к поздним, а с другой — возрастанием их концентраций в пределах ураноносных тектонических блоков (районов, зон) или вулкано-тектонических сооружений (депрессий, куполов и т. п.). В результате разновозрастные магматические образования и разные тектонические блоки отличаются по радиогеохимической специализации; 6) в пределах рудных районов (тектонических блоков, вулканических депрессий) и узлов тесной пространственной связью, временной близостью и геохимическим родством уранового оруденения главных типов месторождений с поздним (орогенным или активизационным) магматизмом кислого (гранитоидного) состава калиевого ряда.

В пределах рудных провинций устанавливаются общие закономерности развития и особенности эволюции магматических процессов.

1. Длительное и многократное проявление магматизма близкого состава (его полицикличность, многоэтапность, многофазность).

2. Унаследованное проявление разновозрастных метаморфизма и магматизма. Приуроченность их продуктов к определенным участкам (блокам) континентальной земной коры. Пространственное совпадение в рамках провинций (срединных массивов или их частей) и районов (тектонических блоков), поясов, ареалов, гранито-гнейсовых куполов разновозрастного метаморфизма и крупных плутонов гранитоидного магматизма. Устойчивый тектонический режим воздымания на разных этапах развития (геоантиклинальные поднятия, орогенные своды) сопутствовал процессам гранитоидного магматизма. Последовательность проявления дифференцированного магматизма, устойчивая длительность и интен-

сивность, прерывисто-непрерывный характер проявления, кольцевая (концентрическая) или полукольцевая зональность вокруг определенного центра (ядра) — все это признаки унаследованного и длительного проявления эндогенных (подкоровых) газово-тепловых потоков (флюидов).

3. Масштабное и интенсивное проявление магматизма орогенного этапа. Большие объемы (крупные размеры плутонов гранитоидов, депрессий — полей вулканитов), специфические условия и характер его проявления (гипабиссальные и субвулканические интрузивные и вулканические фации).

4. Преобладание среди поздних орогенных магматических образований кислых и субщелочных или контрастных (кислых и основных) по составу разностей. Ранние магматические породы дифференцированы по составу (кристаллизационная, ассимиляционная и другая дифференциация). По петрохимическим особенностям для магматических пород калиевого ряда характерно возрастание (от древних к молодым) содержаний кремнезема, глинозема, калия (лейкограниты) с высокими или повышенными содержаниями B, F и др.

5. Интенсивный флюидный режим, сопровождавший процессы магматизма, характеризовался повышенными содержаниями щелочей (K, Na), редких щелочей (Rb, Cs, Li), галоидов (B, F, Cl), кремния, а также углекислоты, воды и др.

6. Поздние орогенные гранитоиды — граниты и лейкограниты и их вулканические аналоги имеют внутрикоровый палингенный (или аллохимический анатектический) генезис; ранние гранитоиды — анатектическое (в основном изохимическое) происхождение, иногда с наложенным метасоматозом (?). Базальтоиды образовались из подкоровых магматических очагов под блоками континентальной коры.

7. Отчетливая радиогеохимическая и общая геохимическая специализация орогенных магматических комплексов.

Наиболее общие закономерности развития магматизма урановорудных провинций характеризуются следующими особенностями.

1. Общая направленность эволюции магматизма, проявленного в пределах ураноносных срединных массивов, которая выражается: а) в закономерной последовательной смене (по комплексам) состава магматизма во времени в зависимости от тектонических условий проявления. Основной (диабазовый) магматизм, проявленный на ранних стадиях в прогибах, сменялся сначала в инверсионный этап (на поднятиях и в подвижных межблоковых тектонических зонах) средним до кислого, иногда субщелочным (диориты и андезиты, тоналиты-гранодиориты, сиенито-диориты, монцониты и т. п.), который сопровождался обычно региональным метаморфизмом, а затем уже — в орогенный этап (на поднятиях и в сводах) — кислым-субщелочным (гранодиориты—граниты, лейкограниты, граносиениты и т. п.) или контрастным (кислым—основным), иногда поздним основным магматизмом или дайками диабазов, лампрофиров и т. п.; б) в постепенном изменении состава магматизма внутри комплексов (возрастание кремнекислотности, глиноземистости, калиевой щелочности от ранних образований к поздним) в результате эволюции внутри очагов под влиянием кристаллизационной дифференциации.

2. Зональность в развитии магматизма: а) общая миграция разновозрастного магматизма основного и кислого (гранитоидного) состава по латерали, в пределах срединных массивов или их отдельных частей; б) зональное развитие магматизма по отношению к крупным положительным структурам (поднятиям).

3. Последовательная миграция магматических очагов как в плане, так и по вертикали в пределах срединных массивов и отдельных тектонических блоков (проявление зональности магматизма в зависимости от разных тектонических условий): а) в инверсионный период на ранних стадиях в соседних прогибах действовали подкоровые (мантийные) очаги; б) в инверсионный этап, на поздних стадиях — в пределах поднятий или в их краевых частях (в зонах межблоковых разломов) действовали очаги в нижнем «базальтовом» слое или на границе с «гранитным» слоем коры; в) в орогенный этап в пределах поднятий и сводов — очаги в верхнем «гранитном» слое коры.

Все отмеченные особенности последовательного развития магматизма разного возраста и состава обнаруживают взаимосвязанность этих процессов, которые обусловлены общими причинами происхождения.

Рудно-формационные ряды, минералого-геохимические ассоциации руд и сопровождающие их метасоматиты

Как отмечает Ф. И. Вольфсон (1978 г.), при решении сложных генетических вопросов гидротермальных урановых месторождений, выявлении источника рудного вещества особое значение приобретает выявление места (времени) уранового оруденения в общем процессе формирования эндогенных рудных месторождений. Подавляющее большинство урановорудных провинций срединных массивов фанерозойских складчатых и активизированных областей является комплексным и по металлогеническому облику относится обычно к сиалическому типу, в котором преобладают месторождения литофильных элементов. Практически во всех ураноносных рудных провинциях оруденение урановых месторождений сопровождается концентрацией руд цветных, редких и других металлов (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, Sn, W, Mo и др.), а также флюорита, барита, железомагнезиальных карбонатов и других неметаллических полезных ископаемых. Однако вопросы генетических связей уранового оруденения с минерализацией этих металлов решаются далеко не всегда однозначно.

Вопросы пространственно-временных соотношений уранового оруденения с месторождениями других рудных элементов неоднократно рассматривались Ф. И. Вольфсоном, А. И. Семеновым, Е. Д. Карповой, Н. П. Лаверовым, В. И. Величкиным, А. Е. Толкуновым, И. С. Модниковым, П. А. Строной, Л. В. Хорошиловым, А. Г. Шендеровой и др.

Многими исследователями установлено, что развитое в провинциях урановое оруденение гидротермальных месторождений главных типов образует тесные пространственные или временные геохимические ассоциации с эндогенными месторождениями других рудных элементов, создавая единые генетические или формационные ряды. В целом урановые и ассоциирующие с ними месторождения определяют общий металлогени-

ческий облик провинций. Нередко в размещении месторождений на их территории (в плане и разрезе) обнаруживаются вполне определенная металлогеническая зональность и металлогеническая специализация разных тектонических блоков, отражающие различные особенности их развития.

В ураноносных рудных провинциях урановому оруденению обычно предшествует редкометальное (W, Sn, Mo), иногда золотое, медное или медно-молибденовое и постоянно — полиметаллическое (Pb-Zn-Ag ± ± Sb, As), флюоритовое рудообразование определенной металлогенической эпохи единого тектоно-магматического цикла. В результате устанавливаются закономерно повторяющиеся единые рудно-формационные ряды, которые отображают многостадийный непрерывно-прерывистый процесс и в которых урановорудные формации (собственно урановые, молибден-урановые и другие) занимают вполне определенное место. Урановорудные формации по минеральному составу, термобарометрическим и геохимическим особенностям, околорудным метасоматитам обнаруживают отчетливую связь со многими предшествующими рудными формациями [87].

Ураноносные рудные формации занимают, как правило, одно из последних мест (или временной интервал) в общем формационном ряду данной металлогенической эпохи, завершая единый прерывистый многостадийный постмагматический процесс гидротермальной деятельности. Такое закономерное положение уранового оруденения в рядах последовательно сменяющих друг друга во времени рудных формаций может служить еще одним из важных признаков или критериев связи процессов рудообразования, в том числе уранового, с магматизмом.

Руды урановых месторождений обычно содержат переменные количества сульфидов и сопровождаются предрудными метасоматитами кислотного (березиты, гидрослюдизиты) и щелочного (альбититы) рядов. В рудах, локализованных среди березитов, уран нередко ассоциирует с молибденом, а также цинком, свинцом, мышьяком, иногда селеном и др. В альбититах урановые руды содержат цирконий, фосфор, ванадий, редкие земли, иногда титан, молибден и др.

Анализ различных материалов по соотношению уранового и другого оруденения ураноносных провинций фанерозойских складчатых и активизированных областей позволил В. И. Величкину [18] сделать ряд важных выводов по металлогеническому облику этих территорий в зависимости от петрологических особенностей и геохимической специализации проявленного здесь орогенного магматизма, сформулировать значение рудно-формационных рядов.

Во всех урановых провинциях палеозойских складчатых и активизированных областей урановое оруденение закономерно ассоциирует с различными эндогенными месторождениями. Для провинций с интенсивным проявлением многофазных гипабиссальных гранитов орогенного этапа характерно проявление скарнов (иногда рудных), широкое развитие месторождений олова и вольфрама, связанных с грейзенами, свинца—цинка—серебра, сурьмы и флюорита, сопряженных с березитами. Эти месторождения предшествуют собственно урановому оруденению и обычно относятся вместе с ним к единому рудному ряду (гидротермальному этапу).

В провинциях с интенсивным проявлением инверсионного гранитоидного интрузивного и орогенного вулкано-интрузивного магматизма среднего—кислого и кислого состава в пределах единого постмагматического рудного ряда урановому оруденению обязательно предшествуют свинцово-цинковые с серебром и флюоритовые месторождения. В этих областях распространены также медно-молибденовые с золотом и серебром, золотые с сульфидами и скарновые свинцово-цинковые, магнетитовые и молибден-вольфрамовые или скарново-магнетитовые, образованные и предшествующие (доурановые) гидротермальные этапы и связанные с ранними магматическими комплексами. Иногда проявлены также более поздние свинцово-цинково-серебряные, флюоритовые, баритовые и другие месторождения.

В пределах провинций мезозойских активизированных областей складчатых поясов молибден-урановое оруденение ассоциирует (но пространственно нередко разобщено в разных соседних тектонических блоках) с более ранней свинцово-цинковой и совмещено с более поздней флюоритовой минерализацией. Эти месторождения сформировались в вулканических депрессиях (кальдерах), сложенных контрастными базальтово-липаритовыми вулканическими сериями — производными магматических очагов разной глубинности. Мышьяково-урановому оруденению, сосредоточенному в эрозионно-тектонических впадинах со слабым развитием мезозойских вулканитов, предшествуют многостадийные золотые и молибденовые месторождения, которые связаны с более ранними гранитоидами орогенного этапа.

В провинциях альпийских подвижных поясов в орогенный этап развития или кайнозойской (неогеновой) тектоно-магматической активизации сформировались мелкие урановые месторождения, которые являются конечным членом рудных рядов, представленных крупными медными, медно-молибденовыми, медно-золотыми и свинцово-цинковыми с серебром месторождениями. Эти месторождения парагенетически связаны с вулкано-интрузивными и гипабиссальными комплексами преимущественно среднего состава, а урановые месторождения — с магматитами кислого состава [87].

Урановорудные провинции палеозойских складчатых областей, в которых урановые месторождения связаны с гранитоидными или с вулканогенными комплексами, характеризуются своим особым металлогеническим обликом.

В герцинских провинциях Европы, в которых урановые месторождения связаны с орогенным гранитоидным магматизмом, по представлениям Ю. М. Дымкова, В. И. Ивановой, Б. В. Бродина, Б. Л. Рыбалова, Б. И. Рыжова, В. И. Величкина, Л. Баумана и др., устанавливается типичный формационный ряд месторождений, сформированных в разновозрастные стадии орогенного этапа, т. е. в течение позднепалеозойской металлогенической эпохи: 1) железорудные и полиметаллические скарновые; 2) оловорудно-вольфрамовые грейзеновые; 3) золоторудные в березитах; 4) полиметаллические (Pb-Zn-Ag) и сурьмяные в березитах; 5) флюоритовые в березитах; 6) урановорудные в березитах-гидрослюдизитах [35, 87, 18].

Температура образования (гомогенизация в газово-жидких включени-

ях) в минералах и рудах разных стадий от высокотемпературных скарнов и грейзенов до низкотемпературных урановорудных жил закономерно постепенно уменьшается, по данным В. Б. Наумова, Б. И. Малышева (1971, 1977, 1984 гг.) и др., от 450—400° (скарны) и 360—280° (грейзены), через 310—200° (сульфидно-полиметаллические), 350—200° (флюоритовые) до 200—100° (урановорудные жилы). Для метасоматических образований и жил выполнения последующих стадий характерны флюорит, кварц, карбонаты), а также, фтор, хлор и др. Многие жильные минералы разновозрастных стадий имеют общие онтогенические особенности роста кристаллов. Руды золота, полиметаллов (Pb—Zn—Ag), сурьмы, флюорита, урана, т. е. разновозрастных рудных формаций, локализуются в близких околорудных метасоматитах — березитах и гидрослюдизитах.

Кроме того, в пределах рудных провинций, в отдельных зонах, проявлено более молодое урановое и другое оруденение рудных формаций, которые образованы в киммерийскую и альпийскую металлогенические эпохи и соответствующие этапы постплатформенного орогенеза. Нередко эти ассоциации развиваются в герцинских рудоносных структурах, накладываясь на руды и метасоматиты ранних формаций.

Металлогенический облик урановорудных провинций континентальных вулканических поясов палеозойской и мезозойской эпох развития характеризуется вполне определенным комплексом гидротермальных рудных, в том числе урановых, месторождений, которые, по данным Н. П. Лаверова (1978 г.) и других, образуют сложный формационный ряд: 1) медные (медно-порфировые), медно-молибденовые, иногда с золотом; 2) золоторудные; 3) грейзеновые оловянно-вольфрамовые; 4) полиметаллические (Pb-Zn) с серебром; 5) молибден-урановые и собственно урановые; 6) эпитермальные золото-серебряные; 7) редкометальные-бериллиевые (бертрандит-фенакитовые); 8) флюоритовые; 9) сурьмяно-ртутные. Далеко не все эти формации проявлены в каждой урановорудной провинции и имеют одинаковое значение, часть из них может принадлежать к разным эпохам (циклам) или этапам, например, послеурановые,— возможно, альпийские. Наиболее часто развиты и между собой связаны молибден-урановые и собственно урановые, флюоритовые и полиметаллические иногда с серебром и золотом.

В каледонских урановорудных провинциях выделяются рудные районы с различной металлогенической специализацией [87]. В одних районах, по мнению А. И. Семенова, Л. В. Хорошилова, Г. П. Полуаршинова, В. И. Величкина и др., наряду с молибден-урановыми и собственно урановыми развиты более ранние золоторудные и медно-порфировые месторождения, а также грейзеновые вольфрамовые и оловянные, среднетемпературные полиметаллические с серебром рудопроявления, сформированные в разные стадии орогенного этапа и имеющие разные формы связи с разновозрастным магматизмом.

Среди урановых месторождений намечается две группы: а) молибден-урановые и собственно урановые, локализованные в березитах. Руды представлены настураном в ассоциации с молибденитом (иоридизитом) и другими сульфидами; б) собственно урановые, молибден-урановые и фосфорно-урановые, связанные с карбонатно-альбитовыми метасомати-

тами (эйситами). Руды сложены в основном силикатами и титанатами урана, ураноносным фтор-апатитом с подчиненными количествами уранинита, настурана и других урановых минералов [32].

Судя по геологическим, минералогическим и геохронологическим данным, эти месторождения сформировались в одну или две урановорудные стадии, в сходных тектонических обстановках и близких температурных условиях, но обнаруживают разную связь с кислым орогенным магматизмом.

На урановых месторождениях, локализованных в березитах, по данным Л. Н. Колчина, А. В. Тимофеева (1970, 1978 г.), Т. Л. Крыловой и др., температура образования (гомогенизации) березитов составляет 350—250° С, кварц-сульфидной стадии — 250—200° С, настурановой стадии с сульфидами и карбонатами — 230—150° С и послерудной карбонатной стадии — 170—120° С.

На урановых месторождениях, локализованных в альбититах, по данным Б. И. Омельяненко, А. В. Тимофеева (1970 г.), Г. Д. Киселевой, Т. Л. Крыловой и др., температура образования (декрипитации) карбонат-альбитовых метасоматитов и укладывается примерно в тот же интервал 350—250° С, урановорудной стадии — 200—150° С и пострудной стадии 150—100° С.

Урановые месторождения, локализованные в околорудных метасоматитах кислотного выщелачивания с высокой подвижностью калия (березитах), по данным многих исследователей, характеризуются спектром рудных элементов-примесей (Be, Mo, As, Pb, Zn, Ag, Sb, S, F), свидетельствующих об их геохимическом родстве с месторождениями других отмеченных выше рудных формаций и поздними проявлениями кислого магматизма внутрикорового происхождения.

Урановые месторождения, связанные со щелочными метасоматитами (альбититами), не обнаруживают столь тесной пространственной связи с образованиями кислого магматизма. Для этих месторождений, по данным многих исследователей, характерны геохимические ассоциации урана в рудах не только с молибденом, бериллием, но и с фосфором, цирконием, титаном, ванадием, торием, стронцием, редкими землями, реже — танталом, ниобием и другими элементами. Эти геохимические особенности, а также связь со щелочным (карбонатно-натриевым) метасоматизмом свидетельствуют, по мнению некоторых авторов, о более глубинном (по-видимому, подкоровом) источнике многих, по крайней мере части, элементов.

В других рудных районах каледонских провинций, согласно результатам исследований А. Б. Каждана, Н. П. Лаверова, Н. А. Волкова, И. С. Модникова и др. [28], также установлен ряд месторождений: медно-порфировых и медно-молибденовых, золоторудных, полиметаллических, молибден-урановых и собственно урановых, флюоритовых, которые обнаруживают пространственно-временную связь не только с определенными комплексами вулкано-интрузивного магматизма, но и между собой. При этом золото-сульфидные и медно-порфировые месторождения, связанные с более ранним магматизмом среднего-кислого состава и обычно обособленные пространственно (в других тектонических блоках), отделены от последующего полиметаллического, молибден-уранового или соб-

ственно уранового и флюоритового оруденения этапом внедрения интрузивов и даек регионального распространения.

В некоторых рудных районах герцинских урановых провинций континентального вулканизма, по результатам исследований Ф. И. Вольфсона, Н. П. Лаверова, В. И. Левина, А. Е. Толкунова [87] и др., устанавливается последовательно сформированный рудный ряд месторождений: скарновых с магнетитом, сульфидами полиметаллов, молибденитом, шеелитом, медно-порфировых с золотом, золоторудных, медно-висмутовых и полиметаллических (Pb-Zn) с серебром и флюоритом, фюоритовых иногда с сульфидами полиметаллов, молибден-урановых и собственно урановых с сульфидами, баритовых и др. Температура образования руд, по данным И. В. Мельникова, Е. И. Котова [53] и др., медно-висмутовых и полиметаллических месторождений находится в интервалах 280—230°С, флюоритовых — 260—140° С, настурановых — 210—190°С. На всех урановых месторождениях обычно широко развиты сульфиды свинца, цинка, меди, серебра, мышьяка и др., а также флюорит. Гидротермальные урановые месторождения нередко образуют единые рудные узлы или поля с флюоритовыми, медно-висмутовыми и полиметаллическими (Pb, Zn, Ag) месторождениями, сформированными в один многостадийный этап постмагматического рудообразования (см. рис. 7).

В урановорудных провинциях мезозойского заложения гидротермальное урановое рудообразование, по мнению Ф. И. Вольфсона, Л. П. Ищуковой, Б. М. Сельцова, Г. А. Шаткова, А. Е. Толкунова, В. Е. Вишнякова и др., связано с интенсивными тектоно-магматическими процессами позднемезозойской эпохи постплатформенного орогенеза. Все разнообразное оруденение: оловянно-вольфрамовое, молибденовое, золоторудное, полиметаллическое, урановое, флюоритовое, было сформировано в результате единой, но многостадийной постмагматической гидротермальной деятельности. Однако некоторыми исследователями (П. А. Строной, 1977, 1981 гг. и др.) в пределах позднемезозойской металлогенической эпохи выделяются два или даже три разновозрастных этапа рудообразования со своим набором месторождений, связанных с проявлениями разновозрастного и разного по составу магматизма.

В некоторых рудных районах установлена тесная связь и вполне определенная последовательность формирования полиметаллического, уранового и флюоритового оруденения. В процессе гидротермальной деятельности образование флюорита происходило как в доурановую и урановую стадии формирования молибден-урановых месторождений, так и в более позднюю (пострудную — послеурановую) стадию, когда отложились основные (нередко в промышленных масштабах) скопления этого минерала.

Из изложенного выше видно, что в рудных районах урановых провинций, сформированных в эпоху позднемезозойской тектоно-магматической активизации, как и в других ураноносных провинциях, устанавливается тесная связь гидротермальных урановых месторождений с полиметаллическими оруденением и особенно флюоритовой минерализацией.

При решении сложных вопросов происхождения гидротермальных растворов и природы источника рудообразующих веществ многие исследователи обычно используют данные по изотопному составу тяжелых и легких элементов минералов руд, сопровождающих их метасоматических и жильных образований, а также вмещающих или подстилающих пород. В первую очередь это относится к изотопам, которые А. И. Тугаринов объединяет в три группы: стабильные (сера, кислород, азот, углерод, водород), радиогенные (стронций, свинец) и радиоактивные элементы (^{238}U и ^{234}U).

Как известно, на ранних стадиях этих исследований наиболее широко были использованы данные по изотопам серы сульфидов и сульфатов в рудах различных типов неурановых и урановых месторождений, особенно месторождений молибден-урановой формации, развитых в рудных провинциях и районах палеовулканических областей. На основании обобщений и анализа полученных результатов некоторые исследователи пришли к выводам, что основным источником серы в рудах этих месторождений служили первичные осадочные сульфаты из подстилающих карбонатно-терригенных толщ складчатого основания. Однако позднее, по мере получения новых результатов по изотопии этого элемента, появились данные, свидетельствующие об участии в рудообразующих растворах не только легкой (биогенной) серы, но и тяжелой — ювенильной (мантийной), близкой к метеоритной. В связи с противоречивыми выводами у многих исследователей возникло критическое и даже отрицательное отношение к этим методам.

Так, результаты проведенных Л. Н. Овчинниковым с сотрудниками (1968 г.) изотопно-геохимических исследований и статистической обработки огромного количества изотопных определений на неурановых (сульфидных) месторождениях разных генетических типов показали очень широкие вариации изотопного состава серы в рудах и сопутствующих минералах даже одних и тех же месторождений. В связи с этим появилось мнение, что решение вопроса о происхождении этого элемента в рудообразующих гидротермальных растворах весьма неоднозначно. В то же время этими авторами был сделан вывод о том, что изотопный состав серы в исходных рудообразующих растворах и в отлагающихся минералах в пределах допустимых колебаний зависит от многих факторов (температуры, pH, концентрации серы и кислорода и др.) и контролируется термодинамическими и физико-химическими условиями рудообразования.

По мнению В. И. Смирнова и др., большие колебания значений изотопов серы в составах сульфидов руд некоторых гидротермальных месторождений, связанных с гранитоидным магматизмом, можно объяснить его палингенным происхождением. Переплавление в магматических очагах и ассимиляция осадочных пород, залегающих в различных слоях континентальной земной коры и содержащих сингенетичную серу, могло также привести к попаданию ее более легких изотопов в постмагматические растворы.

Все сказанное выше показывает, что полученные многочисленные

данные по изотопному составу серы сами по себе далеко не всегда информативны или мало информативны для решения вопросов их происхождения в рудных растворах. В связи с этим интерпретация таких данных не является однозначной и бесспорной.

Как известно, изотопный состав легких элементов зависит от разных причин и может меняться по мере продвижения содержащих их растворов как в результате фракционирования на относительно легкие и тяжелые изотопы, так и в основном в зависимости от изменения температуры таких растворов. Поэтому отдельные определения изотопного состава этих элементов в минералах руд нельзя использовать для решения сложных генетических вопросов и на основании их делать определенные выводы. Однако в ряде случаев такие результаты все же можно рассматривать как дополнительные и в совокупности с данными других исследований их приходится учитывать при выяснении происхождения, например, сульфидов или сульфатов, карбонатов в рудах урановых месторождений.

При выявлении изменений в изотопном составе серы такие данные можно применять по возможности только для сравнительного анализа в разрезе одновозрастных минеральных ассоциаций (стадий) месторождения, т. е. проследить это изменение по мере продвижения восходящих рудоносных растворов снизу вверх. Так, например, Н. П. Лаверовым и В. И. Виноградовым (1980 г.) на молибден-урановом месторождении, залегающем в слоистых вулканогенных толщах, было установлено по крайней мере три вертикальных уровня с различным составом серы в сульфидах, в частности, в галените: внизу — с наиболее «тяжелой» и вверху — с более «легкой» серой.

Данные многих исследователей по изотопному составу углерода, кислорода, стронция в карбонатных жилах и метасоматитах ряда важных гидротермальных урановых месторождений, а также в кислых магматических породах (гранитах, вулканитах), с которыми они тесно пространственно ассоциируют, позволяют сделать вывод о том, что большая часть этих элементов имеет в основном глубинное (подкоровое) происхождение.

Изотопные исследования, проведенные А. И. Тугариновым, Л. В. Комлевым, Г. Е. Ордынцом, И. В. Чернышевым, В. Н. Голубевым и др. на различных месторождениях, развитых в районах разновозрастных урановорудных провинций складчатых и активизированных областей, показали, что изотопный состав свинца на многих полиметаллических и урановых месторождениях весьма близкий или полностью совпадает. Сравнительный анализ изотопного состава свинца галенита, клаусталита и других сульфидов, сульфосолей и селенидов этого элемента из урановых и неурановых полиметаллических месторождений дает основание сделать выводы о том, что наряду с широко распространенным обыкновенным «рудным» свинцом, имеющим возраст орогенного этапа развития палеозойских или мезозойских провинций, везде отчетливо фиксируется свинец с иным изотопным составом, указывающим на его более древнее происхождение. Поэтому было высказано мнение, что источником не только свинца, но и урана (по крайней мере их части) на полиметаллических и урановых месторождениях этих провинций могли служить ураноносные

породы докембрийского или нижнепалеозойского фундамента (граниты, гранито-гнейсы, гнейсы, кристаллические сланцы и т. п.).

Таким образом, рассмотрение положения (места) уранового оруденения в общем длительном (50—30 млн лет) непрерывно-прерывистом процессе постмагматической гидротермальной деятельности в пределах урановорудных провинций и районов разных эпох «заложения» и его пространственно-временных соотношений с развитыми на их территории другими рудными формациями показывает, что урановые и молибден-урановые месторождения вместе с полиметаллическими и флюоритовыми месторождениями являются наиболее поздними и низкотемпературными. Формирование этих месторождений завершает многоэтапный и многостадийный процесс рудообразования, происходивший на общем фоне затухающих тектонических движений и снижении температурных условий гидротермальной деятельности орогенного этапа развития. Нередко оно отделено внедрением даек диабазовых порфиритов и лампрофиров от более ранних образований. Характерной особенностью этих процессов является то, что во всех более ранних высоко- и среднетемпературных рудных формациях (скарнах, грейзенах, гидротермальных золоторудных, сульфидных — полиметаллических, флюоритовых и др.), как правило, отсутствуют существенные концентрации урановой минерализации. Исключение составляют лишь редкие находки уранинита или настурана в грейзенах, иногда давидита, ортита в скарнах и др.

Отмеченные особенности свидетельствуют о том, чо уран в заметных количествах появлялся в рудоносных растворах только в специфических условиях, на последних стадиях развития гидротермальной деятельности. Это, в свою очередь, может быть связано с разными причинами: либо с определенной направленностью эволюции магматических очагов (их «остаточных» расплавов) и постмагматических рудообразующих процессов (составом флюидов—растворов), либо с определенным развитием процессов дегазации мантии (или подкоровых магматических очагов) и возобновлением поступления подкоровых газово-тепловых потоков (флюидов) по зонам разломов.

Пути циркуляции рудообразующих растворов

Вопросы движения рудообразующих растворов в верхней части земной коры к участкам разгрузки (рудоотложения), где в благоприятных условиях происходило формирование гидротермальных месторождений урана, рассмотрены в работах Н. П. Лаверова, В. Л. Барсукова, А. И. Тугаринова, Г. Б. Наумова, Н. П. Ермолаева, Б. П. Власова, Б. Л. Рыбалова, В. Е. Вишнякова и др.

Выяснение путей, направления и причин движения гидротермальных растворов, возможного давления в процессе рудообразования имеет большее значение не только для понимания генезиса месторождений, т.е. доли участия глубинных (ювенильных) флюидов и приповерхностных инфильтрационных вод, но и косвенным образом — для выяснения источника рудных (в том числе урана) и других компонентов.

Гидротермальное урановое оруденение локализуется на путях циркуляции рудоносных растворов, контролируемых зонами повышенной про-

ницаемости. Пространственное положение минерализованных зон и метасоматических ореолов в основном определяется совокупностью тектонофизических факторов (дорудными тектоническими нарушениями, деформационными свойствами вмещающих пород и внутрирудным тектоническим режимом) движения эндогенных растворов и образования рудной и жильной минерализации.

Как установлено на многих урановых месторождениях по комплексу различных признаков (характеру пространственного распределения метасоматитов и оруденения, зональному распределению минеральных ассоциаций и т. п.), оруденение, локализованное в рудоносных структурах, в целом сформировалось из восходящих под большим давлением гидротермальных растворов. Однако причины их подъема, конкретные пути и скорости движения могли быть различными.

По мнению В. И. Смирнова со ссылкой на В. Линдгрена и др., наиболее убедительной и общепризнанной причиной восходящего движения растворов считается либо давление парообразной фазы, накапливающейся при раскристаллизации магмы и гидравлически связанной со «столбом» сконденсированого раствора, либо давление, создаваемое расширяющимися магматическими газами, значительно превышающим давление каркаса горных пород (Л. Н. Овчинников, 1968 г.), либо избыточное давление, обусловленное теплом магматических интрузивов (массивов) или поднимающимися вверх тепловыми потоками (А. И. Тугаринов и В. Б. Наумов, 1972 г.). Кроме того, по мнению некоторых исследователей (Е. Коновалов и др.), в порах и микротрещинах давление рудных растворов могло также осложняться ультразвуковыми капиллярными эффектами, которые обычно возникают при тектоно-вулканических процессах, могут создавать огромное давление и вызывать движение гидротермальных растворов в капиллярах с большой скоростью и на большие расстояния.

По мнению Л. Н. Овчинникова (1968 г.), поднимавшиеся вдоль зон крупных тектонических нарушений гидротермальные растворы обычно не образовывали изолированные струи, а создавали общий поток, который в близповерхностных условиях был тесно связан с окружающими инфильтрационными водами иного состава. Такие вадозные воды, по мнению Д. Уайта и др., могли проникать сверху вниз до глубин 2—5 км, создавая в пластово-трещинных коллекторах сложные (смешанные) гидродинамические системы. Согласно А. И. Тугаринову (1972), А. М. Овчинникову (1960 г.) и др., местное восходящее движение гидротермальных растворов в таких системах было обусловлено гидростатическим напором, возникавшим в артезианских палеобассейнах термальных вод, которые насыщали проницаемые породы депрессионных и синклинорных структур «осадочного» слоя земной коры на территории рудной провинции. Однако, по мнению многих исследователей, занимающихся изучением условий формирования оруденения эндогенных рудных месторождений, доминирующее значение здесь имели другие, глубинные, причины.

Закономерности распределения рудных районов по блокам в пределах урановорудных провинций, линейное и узловое размещение месторождений урана вдоль крутопадающих рудоконтролирующих глубинных разломов, а также общая направленность всей истории развития тек-

тоно-магматических и связанных с ними рудометасоматических процессов показывает, что все разновозрастное гидротермальное, в том числе урановое, оруденение сформировалось из восходящих потоков растворов. При этом движение растворов различного состава и в разные этапы (стадии) развития было преимущественно вертикальным и захватывало всю систему проницаемых зон межблоковых и трансблоковых разломов, приконтактовых зон интрузивов.

В то же время в приповерхностных условиях некоторых рудных районов на месторождениях, локализованных среди стратифицированных осадочных отложений синклинорных структур и вулканогенных толщ депрессионных сооружений, устанавливается нередко близкое к горизонтальному движение рудоносных растворов. При этом на общее направление циркуляции и на формирование состава растворов большое влияние оказывали потоки напорных инфильтрационных вод. артезианских бассейнов. Но в целом для таких месторождений можно говорить о комбинированном характере движения растворов, поскольку по отдельным крутопадающим разломам в нижней части разреза или в фундаменте таких структур обычно предполагается субвертикальный восходящий вектор.

Наиболее благоприятными местами (с приоткрытыми трещинами) интенсивной циркуляции восходящих потоков гидротермальных растворов служили участки снятия напряжений или локального растяжения на общем фоне полей напряжений, т. е. общей обстановки слабого сжатия, в которых находились месторождения в орогенный этап рудообразования.

На примерах многих месторождений, локализованных в разных разрывных структурах вблизи крутопадающих контактов интрузивных тел различного (как кислого, так и основного) состава, которые контролируются зонами глубинных разломов и распространяются на большую глубину, отчетливо видно, что главными проводящими системами для восходящих растворов могли служить такие контактовые зоны. В пределах многих крутопадающих рудоносных жил, сложенных карбонатами и настураном и ориентированных в разных направлениях вблизи крутопадающих контактов интрузивов гранитоидов и других пород, урановое оруденение сконцентрировано преимущественно в виде близвертикальных рудных столбов (струй, полос, линз, гнезд и т. п.).

В то же время на гидротермальных урановых месторождениях, расположенных над интрузивами гранитов, т. е. в надинтрузивных зонах среди различных по литологическому составу и условиям залегания ороговикованных пород, оруденение, подчиняясь структурному или структурно-литологическому контролю, образует в пределах таких рудоносных жил различно ориентированные, в том числе нередко пологие, залежи (ленты, линзи и т. п.). Склонение общих контуров рудных скоплений в пределах поперечных крутопадающих жил согласно либо с падением вмещающих пород или погружением шарниров складчатых сооружений, либо с падением контакта гранитов. Многие из наиболее крупных рудных жил (жильных зон) по падению или простиранию продолжаются в гранитоиды, причем их минеральный (кварц-карбонатный) состав не меняется, а вмещающие породы вблизи них метасома-

тически изменены. Однако оруденение вдоль этих ураноносных жил в граниты, как правило, не прослеживается. В то же время в гранитоидах в эндоконтактовых зонах или глубже известны самостоятельные урановые месторождения. Все это свидетельствует о том, что ураноносные гидротермальные растворы при своем восходящем движении проходили по проницаемым зонам (трещиноватости, пористости и пустот выщелачивания) сквозь залегающие под месторождениями гранитоиды, которые характеризуются пониженной плотностью и имеют повышенную проницаемость.

На урановых жильных месторождениях развитие рудных жил в сосредоточенных разрывах над интрузивами гранитоидов среди трещиноватых, но весьма плотных и малопроницаемых контактовых роговиков вполне можно объяснить резкой сменой геологических, гидродинамических и физико-химических условий движения растворов (не только по физико-механическим и химическим свойствам пород, но также и по степени насыщенности их инфильтрационными водами, их составу, динамике и т. п.), т. е. наличием физического и геохимического экрана (барьера).

Как известно, согласно данным, полученным А. А. Кадиком и Н. И. Хитаровым (1968 г.), магматические расплавы гранитного состава могли служить своеобразными «путепроводами» для эндогенных водных растворов, причем, по их расчетам, на глубинах более 6 км магма должна была поглощать из вмещающих пород водные растворы, а на меньших глубинах, наоборот, отторгать (отдавать) их.

Исходя из тектонической позиции месторождений, условий залегания оруденения и околорудных метасоматитов, а также учитывая изложенные выше представления, можно предполагать, что подводящими системами для восходящих рудоносных растворов на глубине являлись наиболее проницаемые интрузивы гранитоидов, особенно их контактовые зоны в узлах сочленения глубинных разломов разных порядков и направлений. При этом такие интрузивы, по-видимому, могли служить своеобразными собирателями — «путепроводами», как на ранних стадиях, т. е. в магматических расплавах, так и на более поздних стадиях — после их застывания (кристаллизации). В близповерхностных условиях резко возрастала роль разрывных нарушений. Здесь важное значение в распределении струй растворов наряду с контактами интрузивов и полосами трещиноватости в зонах эндо- и экзоконтактов гранитоидов имела вся система поперечных разрывов и послойных нарушений в контактовых ореолах, а также проницаемые пачки пород и нарушенные участки (замки) складок за их пределами. Образование рудных и жильных минералов в результате выпадения соответствующих компонентов из растворов происходило в наиболее приоткрытых трещинных структурах. В расположенных под месторождениями гранитах, как химически нейтральной (находящейся в равновесии) и физически изотропной среде, растворы оставляли следы в виде метасоматитов и практически безрудных кварц-карбонатных и кварц-флюоритовых жил.

На участках, где граниты находились под «панцирем» контактовых роговиков и к моменту рудообразования не были еще вскрыты эрозией, растворы циркулировали под давлением в «закрытых» структурах, руды

отлагались в надинтрузивной зоне, т. е. открытых трещинах среди пород контактового ореола. Во вскрытых эрозией или сильно тектонически нарушенных интрузивах гранитоидов, т. е. в «открытых» структурах, оруденение локализовалось среди самих гранитоидов.

На месторождениях, где рудоносные растворы двигались в подстилающих и вмещающих гнейсовых толщах и гранитизированных образованиях, вдоль продольных с простиранием пород и послойных нарушений, они отлагали свой груз в приоткрытых полостях, образуя субсогласные жилы и линзообразные тела, метасоматические залежи, сопровождаемые ореолами метасоматического измерения пород.

Урановые месторождения, которые приурочены к крупным крутопадающим тектоническим зонам глубокопроникающих разломов в складчатом основании или фундаменте вулкано-тектонических депрессий, локализуются в экзо- и эндоконтактах гипабиссальных и субвулканических интрузивов кислого, субщелочного и основного состава, экструзивных куполов, корневых частей кислых вулканитов (некков, штоков и т. п.), дайковых тел и др. Ореолы метасоматитов (березитов, гидрослюдизитов, альбититов и др.), рудные тела и зоны, прослеженные на глубину до 1000—2000 м и более, имеют обычно вертикальное или близкое к нему крутое залегание и такое же склонение, что свидетельствует о преобладающем восходящем движении сформировавших их растворов. Оптимальная глубина формирования месторождений разных типов, по геологическим данным, укладывается в интервалы примерно от 1000—1500 м до 2500—3500 м. Давление в растворах, судя по результатам измерений в газово-жидких включениях в кварце, карбонатах и других минералах рудных тел, полученных В. Б. Наумовым и Г. Б. Наумовым, составляло от 500 до 1200 атм, т. е. значительно превышало литостатистическое. Такое высокое давление, под которым находились гидротермальные растворы, скорее всего было обусловлено глубинными (эндогенными) причинами. Представление о восходящем движении рудоносных растворов вполне согласуется с установленной И. В. Мельниковым (1982, 1986 г.) и др. минералогической вертикальной зональностью на месторождениях молибден-урановой формации.

Восходящее движение ураноносных гидротермальных растворов было доказано Б. П. Власовым и др. [19] на жильных месторождениях, локализованных в трещинной системе в экзоконтактах гранитоидов. Причем скорость движения растворов в приоткрытых трещинах была весьма низкой и неравномерной, застойные явления сменялись в моменты тектонической активности локальным и резким продвижением, т. е. в целом движение их к дневной поверхности носило пульсационный характер. Учитывая весьма длительное время уранового рудообразования и концентрацию металла в растворах, варьирующую, по данным С. В. Юдинцева, от $n \cdot 10^{-2}$ до $n \cdot 10^{-3}$ г/л, можно предполагать инфильтрацию рудного вещества в процессе его отложения на геохимических или литолого-структурных барьерах.

По данным А. А. Пэка (1977, 1979 г.), в потоке гидротермальных восходящих растворов, находившихся под большим давлением, в приповерхностных ($\sim$1—3 км) условиях происходила последовательная смена интервалов (участков) локального растекания и стягивания их,

т. е. периодический фильтрационный обмен трещиновых и поровых растворов. При этом, естественно, какое-то количество элементов могло заимствоваться из вмещающих пород, однако их значение, судя по масштабам явления, по-видимому, было ничтожным.

Урановые и молибден-урановые месторождения залегают в слоистых осадочных или эффузивно-осадочных отложениях синклинальных и грабен-синклинальных структур или вулкано-тектонических депрессий, но их положение также обычно определяется крупными крутопадающими разломами. В то же время оруденение этих разнотипных месторождений в верхних частях контролируется нередко горизонтами проницаемых пород, обусловленных высокой пористостью или трещиноватостью.

В. Л. Барсуков, Н. П. Лаверов и др. [119] на примере детально и всесторонне изученного молибден-уранового месторождения, залегающего в слоистых вулканогенных толщах, показали, что рудообразующие растворы в приповерхностных условиях фильтровались в основном по согласной субгоризонтальной зоне послойных нарушений и дробленных пород в подошве рудовмещающей пачки липаритов, стягиваясь к системе крутопадающих нарушений и трещин, а затем просачиваясь вдоль последних снизу вверх к дневной поверхности. Эти исследователи рассматривают данную пологую зону дробления в качестве питающей структуры артезианского палеобассейна вулкано-тектонической депрессии. В фундаменте под месторождением не было установлено крутопадающих рудоподводящих каналов (разломов), по которым в вулканическую депрессию могли поступать эндогенные растворы. Поэтому авторы высказали предположение, что субгоризонтально циркулирующие растворы могли заимствовать многие компоненты, в том числе какую-то часть урана, из вмещающих пород.

В то же время известны урановые месторождения в вулканических депрессиях, в пределах которых урановое оруденение распространяется вдоль зон разломов в гранитоиды фундамента [32, 46, 47, 75[. Сопоставление данных по пространственному размещению околорудных метасоматитов, рудных тел, минералогической зональности, изменению давления в газово-жидких включениях и др. позволило В. Е. Вишнякову реконструировать палеогидродинамические условия, пути и направления циркуляции рудообразующих растворов. По его мнению, гидротермальные рудные растворы двигались снизу вверх по крупным разломам фундамента, проникая на ограниченной площади в слоистую эффузивно-осадочную толщу, сложно поднимаясь вверх и стягиваясь по системам крупных трещин, одновременно растекаясь в стороны вдоль экранов (пологих послойных срывов) по пластам высокопористых проницаемых пород. При этом возникал эффект «автосмешения» растворов, установленный Н. П. Лаверовым, А. А. Пэком и др. на подобных месторождениях. Восходящие рудообразующие растворы являлись напорными, их давление было значительно больше литостатической нагрузки вышележащих пород, превышая, по данным А. А. Никитина, 800—900 атм.

Результаты изучения других урановых месторождений, локализованных в породах фундамента вулканических депрессий, показывают, что поступление рудоносных растворов не связано с артезианскими водами,

а происходило снизу вверх по крупным долгоживущим разломам, нередко контролирующим положение корневых частей вулканитов.

Сходная картина наблюдается в пределах стратиформных месторождений, залегающих в складчатом основании среди черных сланцев. Геологические построения по реконструкции палеогидродинамики рудоносных растворов показали, что в их движении намечаются как вертикальные (восходящие), так и локальные субгоризонтальные векторы потоков. Все это подтверждает представления о комбинированном преимущественно восходящем характере движения рудообразующих растворов и глубинном их происхождении.

Петрологические критерии потенциально урановоносных магматических комплексов

Значительные трудности при изучении вопросов связи гидротермальных месторождений с магматизмом обусловлены тем, что месторождения и породившие их магматические очаги расположены на существенно различных вертикальных уровнях. Поэтому в конкретных провинциях доступными для изучения оказываются либо месторождения, либо магматические очаги. О процессах, происходящих в магматических очагах, исследователям приходится судить по магматическим образованиям, являющимся производными различных этапов их становления. В связи с этим возникает естественный вопрос о наличии или отсутствии взаимосвязи между особенностями магматических пород и рудоносностью магматических очагов. Если такая взаимосвязь существует, то эти особенности магматических образований могут быть использованы в качестве показателей потенциальной урановоносности магматических комплексов (очагов). Следует подчеркнуть, что под потенциальной рудоносностью магматических комплексов (очагов) понимается совокупность свойств магматических расплавов (состав, геохимическая и металлогеническая специализация, флюидонасыщенность), которые в благоприятных геологических условиях кристаллизации (скорость кристаллизации, тектонический режим, завершенность фракционирования в системе расплав—магматогенный флюид) определяет способность генерировать рудоносные растворы.

Когда речь идет о потенциальной рудоносности конкретных магматических тел, то имеется в виду, что петрохимические их особенности в значительной мере отражают состав магматических расплавов в очагах, ответственных за генерацию рудоносных растворов. Термин «потенциально» в данном случае подчеркивает отсутствие прямой генетической связи месторождений с конкретными магматическими телами и в то же время указывает на наличие парагенетической связи тех и других с рудоносным магматическим очагом.

Можно считать доказанным, что для большинства урановоносных провинций характерна интенсивная магматическая деятельность с широким развитием магматических образований различного состава и возраста. При этом самыми близкими по возрасту к оруденению являются наиболее поздние орогенные или активизированные комплексы, среди которых отчетливо преобладают гранитоиды или кислые вулканиты. Вместе с тем

далеко не во всех провинциях, характеризующихся отмеченными особенностями, встречены урановые месторождения. Некоторые из провинций достаточно хорошо изучены, и отсутствие в их пределах эндогенных урановых месторождений можно считать фактом вполне доказанным. Отсюда возникает задача по сопоставлению петрологических особенностей магматических образований, свойственных ураноносным и неураноносным провинциям. Исследования в этом направлении были проведены Л. И. Симоновой и Б. И. Омельяненко (1982, 1984, 1988 гг.). Представительные данные удалось собрать лишь в отношении позднеорогенных интрузивов гранитов, которые характерны для провинций подвижных поясов, срединных массивов и их обрамления. В результате были выделены следующие признаки, которые, по мнению авторов, могут рассматриваться как критерии потенциальной ураноносности магматических комплексов.

Принадлежность интрузивов в лейкогранитной формации

Граниты указанной формации привлекли внимание многих исследователей благодаря тесной ассоциации с ними месторождений олова, вольфрама, бериллия, титана и других металлов. Многие интрузивы были определены как редкометальные. Лейкограниты характеризуют завершенность процессов метамагматической дебазификации и кристаллизационной дифференциации магматических очагов. В связи с этим они формируются на конечных стадиях развития складчатых областей и зон тектоно-магматической активизации. Условия становления массивов характеризуют достаточную «жесткость» вмещающей среды, наличие общей тенденции регионов к воздыманию, что типично для позднепосторогенной стадии развития. Лейкограниты завершают образование сложных вулкано-плутонических серий с резким преобладанием гранитоидов и формируются в условиях гипабиссальной фации глубинности (1—3 км). Для них характерен четкий контроль зонами глубинных разломов и приуроченность к структурам центрального типа. Состав лейкогранитов определяется составом магмы в очагах, на что указывает отсутствие зависимости состава лейкогранитов от вмещающей среды. Лейкограниты часто обогащены, особенно в верхних частях массивов, летучими и редкими элементами, обеднены фемическими компонентами, а также барием и стронцием. Характерна высокая железистость лейкогранитов ($>70\%$). В отличие от массивов гранодиоритовой и гранитной формаций для лейкогранитов не отмечается корреляция количеств урана с содержаниями кремнезема и калия. В то же время лейкограниты отличаются более высоким средним содержанием урана $(5{,}6—7{,}5)\cdot10^{-4}\%$ по сравнению с $3{,}5\cdot10^{-4}$, свойственным для гранитов в целом. Для лейкогранитов также характерен более широкий диапазон изменения содержаний урана (от $2\cdot10^{-4}\%$ до $14\cdot10^{-4}\%$). Для лейкогранитов отмечена четкая тенденция к перемещению урана вместе с флюидом, как это было указано для сингенетичных пегматитов. В частности, его накопление устанавливается в апикальных и прикровлевых частях массивов. Нередко нарушается общая тенденция накопления урана в поздних дифференциатах, что невозможно объяснить какими-либо иными причинами, кроме как

повышенным выносом урана при раскристаллизации расплавов с флюидной фазой. Как отмечено многими исследователями, основная масса урана в гранитоидах сосредоточена в акцессорных минералах. В лейкогранитах резко возрастает доля урана, связанного с точечными источниками, сконцентрированными вдоль стыков зерен и в микротрещинках породообразующих минералов. Предполагается, что недиагностируемые точечные источники являются зародышами собственно урановых минералов. С акцессорными минералами в лейкогранитах связано всего 15—20% общей массы урана.

Все это подчеркивает тот факт, что значительная доля урана в лейкогранитах накапливается на позднемагматической и автометасоматической стадиях. Очевидно, повышенная мобильность урана, связанная с какими-то специфическими свойствами магматогенных флюидов, является одной из характерных особенностей лейкогранитных формаций.

Перечисленные выше особенности свойственны всей совокупности интрузивов лейкогранитной формации. Однако лейкограниты пользуются распространением как в ураноносных, так и в неураноносных провинциях. Следовательно, принадлежность к данной формации является необходимым, но недостаточным критерием потенциальной ураноносности.

Сопоставление лейкогранитов различных провинций показало наличие заметных отличий в их составе, текстурно-структурных особенностях, условиях становления, геохимической и металлогенической специализации. В связи с этим возникает задача по выявлению тех особенностей лейкогранитов, которые свойственны только ураноносным провинциям. Проведенные в этом направлении исследования в качестве наиболее важных позволяют выделить следующие признаки.

Высокий уровень геохимической специализации лейкогранитов на уран. По концентрации урана граниты лейкогранитной формации целесообразно разделить на три группы: I) $2 \cdot 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-4}$%; II) $5 \cdot 10^{-4}$%—$8 \cdot 10^{-4}$%; III) $8 \cdot 10^{-4}$%—$14 \cdot 10^{-4}$%. Массивы I группы либо вообще не рудоносны, либо иногда определяются как молибденоносные. С массивами II группы связаны месторождения бериллия, вольфрама, тантала. Массивы III группы характерны для ураноносных провинций, что позволяет рассматривать их как потенциально ураноносные. С ними иногда также связаны месторождения олова и вольфрама.

Следует отметить, что геохимическая специализация гранитов на уран может быть уверенно установлена лишь на основе опробования производных главных интрузивных фаз вне зон эндоконтакта.

Повышенная мобильность урана — участие его во флюидном массопереносе. На участие урана во флюидном массопереносе указывают: а) обогащенность ураном и фтором биотитизированных пород кровли; б) отсутствие накопления урана в последовательных магматических дифференциатах; в) накопление урана в автометасоматическую стадию; г) высокая дисперсия содержаний урана; д) образование дейтерического биотита, содержащего включения уранинита и других урансодержащих минералов; е) резко повышенное содержание легковыщелачиваемого урана (уран, выщелачиваемый содовым раствором при кипячении).

Низкие температуры и значительная продолжительность кристаллизации магматических расплавов. Определения температур кристаллизации проводились по диаграммам фазового соответствия Л. Л. Перчука, а также использовались представительные данные из литературных источников. Проведенные исследования показали четкую взаимосвязь между содержанием урана и температурой кристаллизации.

Лейкограниты I группы с низким содержанием урана кристаллизовались при температуре 950—1000° С. Для них характерна ассоциация неупорядоченного ортоклаза ($Орт_{40-60}$ $Аб_{60-40}$), кварца, низкоглиноземистого, низкожелезистого биотита, обогащенного магнием и титаном. Структура панидиоморфно-зернистая, иногда микропегматитовая.

Температура кристаллизации лейкогранитов II группы приближенно оценивается в 700—800° С. Для них характерна ассоциация олигоклаза № 15—20, микроклина, кварца, биотита умеренной железистости. Структура гипидиоморфно-зернистая, коррозионная.

Лейкограниты III группы кристаллизовались при температуре 600—700° С. Для них характерна ассоциация кислого олигоклаза с содержанием анортитовой молекулы менее 15%, микроклина, кварца и биотита высокой железистости. Часто к этой ассоциации добавляется мусковит. Многие признаки свидетельствуют о максимальной флюидонасыщенности расплавов. Следствием высокой флюидонасыщенности является продолжительность кристаллизации. Фракционный характер кристаллизации отражает распространенность коррозионных структур в лейкогранитах. Характерно сосуществование ассоциаций породообразующих и акцессорных минералов, образующихся в условиях более высоких и более низких температур. Отмечается заметное накопление урана в более поздних генерациях одноименных акцессорных минералов. Так, в одном из массивов лейкогранитов Л. И. Симоновой (1982, 1984 г.) были выделены три генерации цирконов: ранняя, представленная прозрачными кристаллами, более поздняя, представленная полупрозрачными буровато-кремовыми кристаллами, и наиболее поздняя, представленная мутным цирконом-циртолитом. Содержание урана в цирконах соответственно составляет $(3,5—5)\cdot10^{-2}$%, $(1—2)\cdot10^{-1}$% и 1,5%. Это указывает на резкое обогащение ураном остаточных порций кристаллизующихся расплавов.

Следствием пониженной температуры кристаллизации можно также считать признаки формирования поздних ассоциаций минералов в условиях кислотности среды. Это, в частности, проявляется в появлении высокоглиноземистых минеральных фаз, в которых алюминий играет роль катиона, тенденции к вхождению в минералы переменного состава элементов с более высоким значением средних потенциалов ионизации. Геохимические характеристики потенциально ураноносных лейкогранитов отражают высокую степень накопления кислотных компонентов флюида (Cl, F, P, B).

Выше были суммированы особенности гранитов, наиболее близких по возрасту к урановому оруденению. Вопрос о причинно-следственной связи указанных эмпирических закономерностей с рудогенерирующей способностью магматических очагов заслуживает специального рассмотрения.

Причины формирования лейкогранитных магм могут быть различными. В частности, они могут быть сформированы в результате магматического замещения кремнекислых пород, например, песчаников, кислых вулканитов и других, а также за счет кристаллизационной дифференциации гранитоидных расплавов. Наконец, лейкогранитные магмы могут возникать в результате длительного и интенсивного воздействия трансмагматических флюидов, способствующих завершенности процессов метамагматической дебазификации, насыщения магм флюидами и рудными компонентами. Именно такие расплавы являются, по нашему мнению, потенциально ураноносными. Как было показано на основе изучения вулканических стекол, в природе реально существуют расплавы с резко различным содержанием урана. Было высказано предположение, что, признавая наличие ураноносных расплавов, следует также признавать существование специализированных на уран (или другие рудные компоненты) трансмагматических флюидов. Правомочно заключить, что высокий уровень геохимической специализации лейкогранитов на уран является отражением специализации магматических очагов. Хотя в процессе кристаллизации лейкогранитов существенная часть урана несомненно выносится вместе с растворами, тем не менее специализация расплавов находит отражение в производных их раскристаллизации и является следствием высокой флюидонасыщенности расплавов. Последняя, в свою очередь, отражает масштаб и интенсивность протекания процессов взаимодействия трансмагматических флюидов с расплавами магматических очагов. Повышенная мобильность урана свидетельствует о том, что свойства магматогенных флюидов благоприятствовали его переносу. Таким образом, установленные эмпирические закономерности действительно характеризуют особенности магматических расплавов, свидетельствующие об их потенциальной ураноносности.

Таким образом, анализ закономерностей размещения гидротермальных эндогенных месторождений урана, особенностей проявления на территории рудных провинций магматических процессов и их пространственно-временных соотношений позволяет сделать следующие наиболее важные выводы.

1 В соответствии со специфической тектонической позицией урановорудные провинции и районы, независимо от времени их «зарождения» и положения в подвижных поясах, а в их пределах — отдельные рудные узлы, поля и месторождения приурочены к участкам фундамента (выступам, тектоническим блокам, гранито-гнейсовым куполам, зонам и т. п.), которые подвергались длительному воздействию подкоровых газово-тепловых потоков и характеризовались развитием процессов разновозрастного гранитообразования, сопровождавшегося постепенным накоплением радиоактивных (K, Th, U) элементов.

На ранних (доорогенных) этапах развития такое влияние мантийных флюидов вызывало проявление, нередко многократное, процессов аллохимического ультраметаморфизма «воздымания» (гранитизации калиевого ряда). Однако гидротермальное урановое оруденение оторвано от этих процессов весьма значительным интервалом времени и не может быть связано с ними. В то же время ураноносные гранитизированные

породы при достаточно высокой доле «подвижной» формы нахождения урана вполне могли служить одним из дополнительных источников металла в результате проявления более поздней гидротермальной деятельности.

На поздних (орогенных) этапах воздействие подкоровых газово-тепловых потоков приводило к образованию ураноносных магматических очагов в недрах «гранито-метаморфического» слоя земной коры и затем — развитию постмагматических гидротермальных процессов.

2. Развитие в пределах урановорудных провинций разновозрастного и разнотипного магматизма как основного (подкорового), так и кислого (корового), но в течение единого тектоно-магматического цикла обусловлено серией взаимосвязанных глубинных (мантийных) процессов.

3. В урановорудных провинциях преимущественно фанерозойских эпох «зарождения» развита большая группа гидротермальных месторождений урана разных типов, обнаруживающих пространственную и структурную приуроченность, временную близость образования, радиогеохимическое и геохимическое родство с интрузивными и вулканогенными комплексами орогенных этапов. На этом основании вполне можно предполагать, что между урановым оруденением таких месторождений и проявлением позднего магматизма кислого и субщелочного состава существует парагенетическая связь, т. е. связь с породившими их магматическими очагами внутрикорового палингенного происхождения, которые возникали под воздействием специализированных подкоровых газово-тепловых потоков. Источники урана в рудообразующих растворах, сформировавших подобные месторождения, принадлежат магматическому типу. Однако формы связи и механизм извлечения, а также происхождение рудоносных растворов могли быть различными. Растворы формировались либо из «остаточных» постмагматических флюидов, либо в результате фильтрации подкоровых флюидов.

4. Основной (базальтоидный) магматизм, который обычно широко проявлен в пределах урановорудных провинций и является прямым признаком длительной эволюции подкоровых магматических очагов, возникших гораздо раньше, дольше находившихся в расплавленном состоянии и нередко развивавшихся одновременно или позже внутрикоровых гранитоидных очагов, нельзя считать источником радиоактивных элементов, в том числе урана. В то же время подкоровые магматические очаги служили своеобразными концентраторами и источником огромной тепловой энергии, многих летучих и подвижных компонентов (углекислоты, галоидов, натрия и др.), которые, удаляясь, приводили к формированию в «гранито-гнейсовом» слое, в том числе в застывающих магматических очагах, постмагматических гидротермальных рудных растворов, добавляя к ним многие отмеченные компоненты, а также некоторое количество редких и рудных элементов.

Особое значение приобретает широко развитый в рудных районах дайковый комплекс регионального распространения основного, щелочного и лампрофирового состава, внедрение которых отображает структурную перестройку, завершение развития вышележащих внутрикоровых очагов и начало нового этапа постмагматической гидротермальной, в том числе ураноносной, деятельности.

5. В проявлении восходящих мантийных газово-тепловых потоков (с углекислотой, галоидами, щелочами и другими компонентами) огромная роль принадлежит мощным зонам рудоконтролирующих глубинных разломов (межблоковых, трансблоковых — сквозных или скрытых), которые, проникая на большую глубину в подкоровые оболочки и магматические очаги основного и щелочного состава, служили главными выводными каналами (флюидопроводниками). В зонах этих разломов и особенно узлах их сочленения располагаются наиболее значительные эндогенные месторождения урана.

Глава IV

ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОРОВОГО МАГМАТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

При рассмотрении поведения урана в мантийном петрогенезисе и в процессах гранитообразования (см. гл. II) показано, что основным механизмом длительного накопления урана в земной коре была гранитизация пород, а ведущим фактором накопления этого элемента в магматических очагах — процессы метамагматизма.

В гл. III приводились геологические критерии связи гидротермальных урановых месторождений с кислым магматизмом орогенной стадии развития.

В настоящей главе целесообразно рассмотреть петрологические особенности эволюции гранитоидных магматических очагов и физико-химические условия фракционирования урана в процессах их кристаллизации и накопления элемента в «остаточных расплавах».

Уран в магматических процессах

Концентрация урана в природных расплавах. Вывод о привносе урана в участок гранитообразования базируется на основе сопоставления концентрации урана в исходных породах и конечных производных гранитизации — гранитах. Однако содержание урана в гранитах отнюдь не отражает таковое в расплавах, из которого граниты кристаллизовались. В процессе раскристаллизации расплавов определенная доля урана могла быть вынесена вместе с растворами, отделившимися из кристаллизующейся магмы. На доказательстве того, что такой вынос реально происходит, авторы еще остановятся в соответствующих разделах. Здесь мы лишь подчеркнем, что содержание урана в расплавах должно быть более высоким, чем в продуктах их раскристаллизации. Следует согласиться с А. А. Смысловым [111] в том, что неправомерно оценивать содержание урана и других элементов в расплаве по результатам изучения полнокристаллических интрузивных пород.

Значительно более объективную информацию о содержании урана в кислых магматических расплавах дает изучение вулканических стекол. Благодаря быстрой закалке в стеклах связывается значительное ко-

Рис. 9. Гистограмма содержаний урана в природных стеклах кислого состава (использованы результаты 248 химических анализов, опубликованных в литературе, а также выполненных авторами)

личество компонентов, не свойственных полнокристаллическим породам, таких, как H_2O, Cl, CO_2, F и др. Следует, однако, подчеркнуть, что наиболее достоверные данные о содержании различных элементов в расплавах можно получить лишь при изучении свежих стекол, в которых отсутствуют даже незначительные признаки перекристаллизации. Это связано с тем, что стекла, представляющие собой продукт закалки гомогенного магматического расплава, являются метастабильными образованиями и с течением времени начинают самопроизвольно раскристаллизовываться с выделением энергии и значительной части летучих соединений, а также урана.

Установлено, что кислые вулканические стекла характеризуются в целом высоким содержанием урана. Так, в обсидианах Армении оно варьирует в пределах $(9 \div 18{,}5) \cdot 10^{-4}\%$. Отмечаются вулканические стекла с концентрациями урана $21 \cdot 10^{-4}\%$ [123] и даже $46 \cdot 10^{-4}\%$ [147]. Дж. Адамс (1956 г.) на основании статистических данных показал, что содержание урана в стеклах примерно в два раза выше, чем в порфировых аналогах. Данные о концентрации урана в кислых вулканических стеклах, имеющиеся в распоряжении авторов и заимствованные из литературы, представлены в виде гистограммы (рис. 9). Из нее видно, что концентрация урана в кислых стеклах варьирует в очень широких пределах: от $4 \cdot 10^{-4}\%$ до более чем $40 \cdot 10^{-4}\%$. Среднее значение из 248 анализов составляет $11{,}8 \cdot 10^{-4}\%$. Заметим, что, распространяя данные по концентрации урана в стеклах на магматические расплавы, можно ошибиться лишь в сторону занижения, так как некоторая доля урана могла быть потеряна при дегазации расплавов и девитрификации стекол.

Характер распределения урана в стеклах (рис. 10) ни в коей мере не позволяет связать какую-либо его часть с наложенными процессами и исключает возможность объяснения его высоких концентраций какими-либо неоднородностями в распределении этого элемента в самом расплаве. Отсюда можно сделать принципиальный вывод о том, что в природе реально существуют ураноносные и неураноносные магматические расплавы.

Рис. 10. Треки от осколков деления урана, характеризующие его распределение в кислом вулканическом стекле (лавсан) (Омельяненко и др., 1983 г.)

Характер распределения урана в стеклах позволяет утверждать, что в расплавах он находится в состоянии рассеяния (см. рис. 10). Очень широкие вариации концентраций урана в природных стеклах убедительно показывают, что по крайней мере в большинстве случаев магматические расплавы недосыщены в отношении урана. Однако вопрос о концентрации насыщения расплавов ураном остается открытым. Экспериментальное изучение этого вопроса было выполнено С. В. Юдинцевым и Б. И. Омельяненко. Для определения концентрации насыщения 10—20 мг порошка вулканического стекла вместе с равным количеством дистиллированной воды и несколькими кристаллами синтетического уранинита помещали в платиновые ампулы, которые затем герметизировали дуговой сваркой. Была изучена зависимость концентрации насыщения расплава ураном от T—P—f_{O_2} условий проведения опытов, а также от состава расплава.

Для оценки влияния фугитивности кислорода на концентрацию насыщения расплавов ураном при $T=750°$ С и $P=2$ кбар были проведены опыты, в которых летучесть кислорода задавалась следующими буферами: Co—CoO ($f_{O_2}=-17$), Ni—NiO ($f_{O_2}=-15$), Mn—Mn_3O_4 ($f_{O_2}=-12$), Fe_2O_3—Fe_3O_4 ($f_{O_2}=-10$). Длительность экспериментов устанавливалась на основании результатов кинетических опытов и составляла от 1 до 10 сут. Результаты экспериментов приведены в табл. 2. Концентрация урана в стеклах определялась на микроанализаторе «Camebax» и методом осколковой радиографии.

Приведенные данные показывают, что в изученном диапазоне ле-

Таблица 2

Концентрация насыщения расплава ураном

Исходные составы		Условия опытов				C_U, %
Твердая шихта	Раствор, моль/кг	T, °C	P, кбар	Буфер	τ, ч	
Аб (40%)—	H_2O	750	2	Co—CoO	24	0,03
Кпш (26%)—	H_2O	750	2	Ni—NiO	12—240	0,03
Кв (34%)	1M $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$	750	2	Ni—NiO	72	0,03
	0,3M HF	750	2	Ni—NiO	72	0,03
	0,5M HF	750	2	Ni—NiO	144	0,03
Природный гранит	0,1M HCl+0,9M $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$	750	2	Ni—NiO	120	0,03
	0,1M HF	750	2	Ni—NiO	120	0,03
Аб (40%)—	H_2O	750	2	MnO—Mn_3O_4	48	0,03
Кпш (26%)—	H_2O	750	2	Fe_3O_4—Fe_2O_3	48	0,04
2*Кв* (34%)	H_2O	750	4	Ni—NiO	48	0,03
	H_2O	900	2	Ni—NiO	24	0,06
	H_2O	900	4	Ni—NiO	24	0,06
	H_2O	1000	2	Ni—NiO	6	0,10

тучесть кислорода не оказывает влияния на значение концентрации насыщения. Не зависит она также от присутствия в расплаве галогенов и от давления. В то же время повышение температуры на 150° С приводит к двухкратному увеличению концентрации насыщения расплавов ураном. Данные эксперимента показывают, что концентрация насыщения ураном гранитных расплавов составляет сотые доли процента. Учитывая, что концентрация урана в магматических породах никогда не достигает указанных величин, можно уверенно заключить, что все природные расплавы всегда резко недосыщены в отношении урана. Это позволяет принять вывод А. И. Тугаринова [118] о том, что образование магматических расплавов должно приводить к рассеянию урана, но не его концентрации.

Как мы увидим далее, этот вывод неприемлем для кристаллизующихся расплавов. Проведенные опыты показали, что в пределах буферного действия Co—CoO до Fe_3O_4—Fe_2O_3 концентрация насыщения расплава ураном имеет постоянное значение и не зависит от изменения f_{O_2}, что указывает на преобладание одной из форм существования урана. С целью решения вопроса о форме нахождения урана в расплавах были изучены спектры поглощения урансодержащих стекол [131].

Валентность урана в водно-насыщенных расплавах. В качестве исходной шихты выбраны следующие составы (в мас. %): 1) SiO_2—78,3; Al_2O_3—12,6; Na_2O—4,7; K_2O—4,4; 2) SiO_2—79,2; Al_2O_3—10,1; Na_2O—4,5; K_2O—6,2.

Первый состав отвечает граниту без темноцветных и акцессорных компонентов: второй является упрощенным аналогом щелочного гранита. Уран вводили в виде гидрата трехокиси в количестве от 0,01 до 2,5% от веса шихты. Шихту тщательно перемешивали, а затем плавили в силлитовой печи при 1350° С в течение 2 ч. Полученные стекла растирали в порошок и вместе с небольшим количеством дистиллированной воды

Рис 11. Спектры поглощения искусственных стекол щелочно-гранитного (*а—д*) и гранитного (*е*) составов

Кислородный буфер и содержание урана в стекле:

а—Ni—NiO, Cu=0,01%; *б* — Co—CoO, Cu=0,35%; *в* — Ni—NiO, Cu=0,7%; *г* — Mn—Mn_3O_4, Cu=0,35%; *д* — Cu_2O—CuO, Cu=0,35%; *е* — Ni—NiO, Cu=0,03%

помещали в платиновые ампулы. Опыты проводили на гидротермальной установке высокого давления при $T=750°$ C, $P_{H_2O}=2$ кбар. Летучесть кислорода в опытах регулировали по двухампульной методике с использованием буферов Co—CoO, Ni—NiO, MnO—Mn_3O_4, Fe_3O_4—Fe_2O_3, Cu_2O—CuO. Длительность опытов составляла 6 сут. Этого времени, согласно данным кинетических опытов, достаточно для достижения равновесия между различными валентными состояниями урана в расплаве.

Опыты показали, что для надежного определения всех валентных форм урана требуется достаточно высокое его содержание в стеклах. Поэтому основная часть экспериментов проведена с щелочно-гранитным расплавом, который характеризуется более высокой растворимостью в отношении урана. Некоторые из полученных спектров приведены на рис. 11. Принципиальное их отличие от спектров поглощения безводных урансодержащих стекол заключается в наличии интенсивных полос поглощения с максимумами при 1420, 1920 и 2240 нм, что связано с наличием воды в стеклах. Содержание воды в наших стеклах определено на газовом анализаторе и составляет 5,5% для гранитного и 8,5% для щелочно-гранитного состава.

Кроме того, имеются пики, отвечающие валентным формам урана. Их высота зависит от содержания урана в стекле, а также от окислительно-восстановительных условий получения стекол. В работах Дж. Каласа, а также Г. Шрейбера и Дж. Балаца [133, 142] было показано,

что состав стекла слабо влияет на положение максимумов поглощения, связанных с разновалентным ураном. Это дает нам основание для использования литературных данных при интерпретации полученных спектров. На них четырехвалентному урану отвечает ряд пиков, самый интенсивный из которых расположен при 1780 нм. Для шестивалентного урана наиболее характерен пик 415 нм. Наличие отчетливо выраженного перегиба или небольшого пика (см. рис. 11) при 1360 нм позволяет предполагать присутствие в стеклах пятивалентного урана. На основании данных Г. Шрейбера и Д. Балаца [142] была сделана попытка оценить соотношение между различными валентными формами. Оказалось, что в восстановительных условиях (буферы Co—CoO, Ni—NiO) преобладает четырехвалентный уран. При увеличении летучести кислорода возрастает доля шестивалентного урана и, начиная с величины f_{O_2} близкой к буферу Fe_3O_4—Fe_2O_3, оно становится основным. Количество пятивалентного урана невелико.

Спектры поглощения стекол гранитного состава похожи на таковые для щелочно-гранитных стекол. Вместе с тем им присущи некоторые отличительные особенности. В этом случае максимумы поглощения несколько смещены в сторону больших длин волн. Сами полосы поглощения имеют слабую интенсивность, что объясняется низкой концентрацией насыщения гранитного расплава ураном. Спектр стекла гранитного состава, приготовленного в условиях буфера Fe_3O_4—Fe_2O_3, имеет слабый пик при 420 нм, что свидетельствует о присутствии в образце шестивалентного урана. Интенсивность этого пика существенно ниже, чем интенсивность поглощения с максимумом при 1800 нм, характеризующего четырехвалентный уран, что отличает его от спектра щелочно-гранитного стекла, полученного при том же значении f_{O_2}. Это позволяет утверждать, что даже при летучести кислорода, отвечающей магнетит-гематитовому буферу, в гранитном расплаве четырехвалентный уран преобладает над шестивалентным. Учитывая, что для подавляющей части расплавов гранитного состава летучесть кислорода характеризуется значениями, близкими к таковому для буфера Ni—NiO [104], можно утверждать, что уран в гранитных магмах находится преимущественно в четырехвалентной форме.

Уран в кристаллизующихся магматических расплавах

Изучение порфировых пород различного состава показало, что содержание урана во вкрапленниках в десятки раз ниже, чем в основной массе (рис. 12) [11, 55, 83 и др.]. При прочих равных условиях, чем выше относительное содержание порфировых выделений, тем более высокими концентрациями металла характеризуется основная масса. Распределение урана в основной массе порфировых пород зависит от степени ее раскристаллизации. В стекловатой основной массе оно равномерное. В более раскристаллизованных участках уран концентрируется в межзерновом пространстве. Здесь наряду с рассеянным ураном в значительном количестве присутствуют мельчайшие высококонцентрированные сгустки, которые принято называть точечными источниками. Предполагается, что точечные источники связаны с ультрамикроскопическими выделениями собственно урановых минералов (рис. 13).

Рис. 12. Распределение урана в дацитовом порфире (по Омельяненко и др., 1983 г.)
а — шлиф при 1-м николе, *б* — лавсан; увел. 35

Вдоль порфировых вкрапленников нередко отмечаются каймы повышенных по сравнению с фоном концентраций урана, подчеркивающие оттеснение урана к периферии порфировых выделений в процессе их роста.

Таким образом, уже на основе данных осколковой радиографии можно уверенно заключить, что кристаллизация приводит к обогащению ураном остаточного расплава. Низкая концентрация урана в породообразующих минералах отнюдь не свидетельствует о низкой его концентрации в расплаве. В этом отношении большой интерес представляют экспериментальные данные А. Н. Комарова, (1968 г.). Им был получен синтетический биотит, кристаллизовавшийся из расплава с содержанием урана в несколько процентов. При этом равномерно рассеянный уран во фтор-биотите составил всего $4 \cdot 10^{-5}\%$, или примерно одну десятимиллионную долю общего его количества. Практически весь уран выделился в кристаллах собственно урановых минералов.

Завершенный цикл фракционирования урана в системе расплав—твердая фаза—флюид отражается в содержании и распределении урана в полнокристаллических породах, формирующихся в условиях, наиболее близких к физико-химическому равновесию.

Особенности распределения урана в полнокристаллических породах к настоящему времени изучены достаточно детально.

В неизмененных породообразующих минералах уран находится в виде

Рис. 13. Точечные источники урана в порфировидном лейкократовом граните
а — шлиф при 1-м николе, *б* — лавсан; увел. 50

равномерного (атомного или молекулярного) рассеяния, причем его концентрация на 1,5—2 порядка ниже, чем в породе в целом. Основная доля урана (не менее 50%) в полнокристаллических породах связана с акцессорными минералами [3, 67, 27]. Главнейшими концентраторами урана являются циркон, апатит, монацит, сфен, титаномагнетит, и др. Возникает естественный вопрос: не вызывает ли массовое выделение акцессорных минералов уменьшения концентрации урана в остаточной магме?

Характер распределения урана в цирконах опровергает это положение. Установлено, что цирконы поздних генераций характеризуются значительно более высокими концентрациями урана по сравнению с более ранними [83]. В самих цирконах уран распределен весьма неравномерно, причем наиболее обычным является обогащение ураном периферических зон кристаллов. Аналогичное цирконам распределение характерно и для других акцессорных минералов. Данное явление логично связывать с постепенным накоплением урана в остаточном расплаве.

Поведение любого элемента в кристаллизующемся расплаве может быть описано с помощью комбинированного коэффициента распределения между образующимися минералами и расплавом. Для определения $K_{комб}$ необходимо знать индивидуальные коэффициенты распределения между каждым минералом и расплавом, а также пропорции, в которых минералы кристаллизуются из расплава.

В отношении урана такой расчет был выполнен Е. Христиансеном с соавторами (1983 г.) для кислого состава, при кристаллизации которого образуются (в %): санидин — 46, плагиоклаз — 20, кварц — 30, биотит — 3, окислы железа и титана — 1, а из ацессориев: ортит — 0,5 и циркон — 0,04. Значения индивидуальных коэффициентов были получены при

изучении распределения урана между вкрапленниками минералов и стеклами основной массы. Вычисленное значение $K_{комб}$ составило от 0,06 до 0,16.

Полученные значения могут отличаться от таковых для природных расплавов в связи с различием модельного и реального составов гранитоидов, особенно в отношении урансодержащих акцессорных минералов.

С. В. Юдинцевым и Б. И. Омельяненко был использован другой способ определения $K_{комб}$. Были суммированы литературные данные, отражающие накопление урана в основной массе порфировых пород гранитного состава в зависимости от количества минералов-вкрапленников (рис. 14). Линии соответствуют теоретическому накоплению урана при фракционной кристаллизации расплава для разных значений комбинированного коэффициента распределения. Как видно из рис. 14, изменение содержания урана в основной массе подавляющей части изученных пород описывается значениями $K_{комб}$, лежащими в интервале 0,1—0,5. Определенные таким образом величины $K_{комб}$ варьируют в более широких пределах по сравнению с приведенными выше данными. Это, по-видимому, связано с тем, что минеральный состав гранитоидов не постоянен и может отличаться от модельного состава, для которого проведен расчет. Основная часть урана гранитоидов приходится на акцессорные минералы. Поэтому можно предположить, что разброс значений $K_{комб}$ объясняется различным количеством урансодержащих акцессориев. Это предположение подтверждается сравнительным анализом накопления урана в основной массе порфировых пород кислого (рис. 14) и среднего—основного (рис. 15) состава. В последних акцессорные минералы с высоким содержанием урана отсутствуют и значения $K_{комб}$ для этих пород не превышает 0,1.

Содержание урана в кристаллизующемся расплаве зависит как от величины $K_{комб}$, так и от начальной концентрации урана в расплаве до кристаллизации.

Очевидно, что содержание урана в остаточном расплаве в процессе кристаллизации должно возрастать, причем в конечном счете оно может достигнуть концентрации насыщения. Дальнейшая кристаллизация должна привести к отложению самостоятельной урановой фазы — уранинита. Акцессорный уранинит встречается в некоторых гранитоидах, причем предполагается, что его формирование могло происходить на магматической стадии образования пород [143]. При изучении распространенности акцессорных минералов в гранитоидах шлиховым методом было установлено, что частота встречаемости уранинита в биотитовых и лейкократовых гранитах и аляскитах составляет 10—30% [69, 72]. Образование акцессорного уранинита в гранитах свидетельствует о том, что кристаллизующиеся природные расплавы способны достигать насыщения в отношении урана. Указанные значения относятся к гранитам, содержащим относительно крупные зерна уранинита. Вместе с тем для гранитов весьма характерны недиагностируемые ультрамикроскопические включения с очень высокой радиоактивностью [83, 10]. Если по крайней мере некоторые из этих включений являются зародышами уранинита, то реальная распространенность этого минерала в гранитах может оказаться еще более высокой.

Рис. 14. Отношение концентрации урана в основной массе порфировых пород кислого состава к общему его содержанию в породе (Юдинцев, Омельяненко, 1986 г.)

1 — липариты по Г. А. Шаткову и др.; *2* — игнимбриты по J. Dostal и др.; *3* — гранит-порфиры (по Б. И. Омельяненко и др.); *4* — липариты, дациты (по Л. Л. Леоновой и Н. И. Удальцовой); *5* — липариты, дациты (по Г. А. Шаткову и Л. Н. Шатковой); *6* — дациты (по J. Dostal и др.); *7* — липариты (по М. И. Розинову и Д. И. Колесникову); *8* — теоретические накопления при $U_{конб}=0{,}1$; *9* — то же при $K_{конб}=0{,}5$

Рис. 15. Отношение концентрации урана в основной массе порфировых пород среднего—основного состава к общему его содержанию в породе (Юдинцев, Омельяненко, 1986 г.)

1 — базальты (по J. Dostal и др.); *2* — базальты (по Л. Л. Леоновой и Н. И. Удальцовой); *3* — андезиты, базальты (по J. Dostal и др.); *4* — андезиты, базальты (по И. Г. Берзиной и др.); *5* — теоретическое накопление при $U_{конб}=0$; *6* — то же при $K_{конб}=0{,}1$

Из изложенного видно, что процесс кристаллизации расплавов является, по-существу, процессом концентрирования фторофильных элементов, в том числе и урана, в остаточном расплаве. Как известно, в остаточном расплаве также происходит относительное накопление летучих компонентов. Для проблемы источника ураноносных рудообразующих растворов кардинальное значение имеют данные относительно системы: насыщенный в отношении уранинита расплав — уранинит — флюид. Эта система, по-существу, характеризует конечные стадии кристаллизации ураноносных магматических расплавов, с которыми обычно связывается отделение рудоносных флюидов. Исследование этой системы в интересующем нас аспекте сводится к изучению растворимости уранинита в магматическом флюиде в присутствии алюмосиликатного буфера, представленного гранитным расплавом.

Поведение урана при формировании сингенетичных пегматитов

Для решения вопроса о принципиальной возможности отделения ураноносных растворов из кристаллизующегося гранитного расплава большой интерес представляет поведение урана при образовании сингенетичных пегматитов — продуктов кристаллизации остаточных, перенасыщенных летучими гранитных расплавов. Они дают информацию о фракционировании урана в системе твердая фаза—остаточный расплав—газообразная фаза, что является ключевым звеном проблемы рудогенерирующей способности гранитных расплавов на уран.

Сингенетичные (неперемещенные, внутригранитные, шлировые) пегматиты формации малых глубин, по А. И. Гинзбургу и др. [33], возникают на завершающих стадиях кристаллизации расплавов. Они приурочены к апикальным частям поздне-посторогенных интрузивов лейкогранитов, формирующихся в гипабиссальных условиях. Такие пегматиты имеют изометричную, линзовидную каплевидную, грибообразную форму, обладают обычно асимметрично-зональным строением.

Механизм формирования сингенетичных пегматитов сводится к следующему.

1. В «усадочные» раковины, формирующиеся вследствие термического сокращения объема закристаллизовавшегося гранита, поступают остаточный расплав и флюид — возникают пегматитообразующие камеры.

2. Раскристаллизация пегматитового расплава начинается по мере снижения температуры и проходит по направлению от периферии к центру камеры с постепенным укрупнением зернистости. В магматическую стадию раскристаллизовываются в основном внешние мелкозернистые зоны пегматитов. В центральных же частях камеры между каркасом твердой фазы к концу магматической стадии сохраняются полости, заполненные высококонцентрированным газово-солевым раствором (флюидом).

3. В собственно пегматитовую стадию на фоне общего понижения температуры и давления под воздействием флюида во внутренних частях камеры формируются крупноблоковые зоны. Образование их проходит с участием сегрегационной перекристаллизации вещества.

4. Дальнейшее понижение температуры приводит к нарушению

равновесия твердая фаза—флюид, в связи с чем развиваются процессы автометасоматоза (альбитизация, мусковитизация и т. д.).

Граниты над пегматитами часто подвержены биотитизации, которая может рассматриваться как одна из форм проявления раннего железо-магниевого метасоматоза — базификации пород кровли пегматитов. Л. И. Симоновой, Б. И. Омельяненко и др. [108] были изучены сингенетичные кварц-полевошпатовые пегматиты в 15 интрузивах Казахстана и Средней Азии. Полевые гамма-спектрометрические измерения по сетке различной плотности в зависимости от размеров тел сочетались с радиометрическим опробованием пегматитов и окружающих гранитов на интервале, в 10 раз и более превышающем размеры самих пегматитов.

Изученные авторами сингенетичные пегматиты Казахстана и Средней Азии приурочены к интрузивам лейкократовых гранитов и характеризуются отсутствием сколько-нибудь заметного проявления минералов гидротермальной стадии. По сравнению с материнскими гранитами они обеднены ураном. Так, из 42 кварц-полевошпатовых пегматитов в 38 содержание урана оказалось в 1,5—2,5 раза ниже, чем в гранитах.

Установлено зональное распределение урана в вертикальном разрезе сингенетичного пегматита и в гранитах над пегматитами (рис. 16), выражающееся в следующем: а) во внешних мелкозернистых зонах пегматитов содержание урана, как правило, в 1,5—2,5 раза выше, чем в материнских гранитах. При этом со стороны висячего контакта пегматитовых тел количество урана подвержено большим колебаниям и нередко оказывается меньше, чем со стороны бокового и нижнего контактов; б) внутренние крупноблоковые зоны подавляющей части пегматитовых тел имеют пониженные концентрации урана по сравнению с внешними зонами и материнскими гранитами. Поскольку основную часть объема пегматитов составляют внутренние зоны, общее содержание урана в сингенетичных пегматитах в целом также оказывается ниже, чем в материнских гранитах; в) в гранитах над пегматитами отмечается увеличение содержания урана. Так, в биотитизированных гранитах над пегматитами оно в 1,5—4 раза выше, чем в неизмененных разностях. Обогащенность ураном в 2—2,5 раза наблюдается также в слабо измененных гранитах над пегматитами.

Обедненность сингенетичных пегматитов ураном можно интерпретировать как результат удаления его из пегматитовой камеры в составе газовой фазы. Граниты над пегматитами часто обогащены новообразованными акцессорными минералами, отличающимися обычно малыми размерами, часто ксеноморфностью и приуроченностью к микротрещинкам и стыкам зерен. Полученные данные позволяют отметить следующие закономерности поведения урана при формировании сингенетичных пегматитов формации малых глубин.

1. Исходный пегматитовый расплав был обогащен ураном, ибо во внешних мелкозернистых зонах, образованиях магматической стадии, содержание урана выше, чем в гранитах.

2. Раскристаллизация вещества в пегматитообразующей камере сопровождалась отделением летучей фазы с соответствующими компонентами, в том числе ураном.

Рис. 16. Поведение урана в разрезе сингенетического пегматита и в гранитах под пегматитами (по Симоновой, Омельяненко и др., 1984 г.)

1 — граниты вне влияния пегматита; *2, 3* — граниты надпегматитовой зоны слабоизмененные (*2*), биотитизированные (*3*); *4* — крупноблоковые пегматиты внутренней зоны; *5* — мелкозернистые пегматиты внешней зоны

3. Удаленный из камер уран частично фиксировался в биотитизированных гранитах непосредственно над пегматитом, частично в слабоизмененных гранитах, находящихся выше зоны биотитизации.

4. Обедненность изученных сингенетичных пегматитов ураном, следовательно, можно рассматривать как результат удаления его из системы вместе с флюидом.

Соответственно приведенные данные подтверждают возможность выноса урана из кристаллизующейся гранитной магмы в составе флюидной фазы и свидетельствуют в пользу рудогенерирующей способности гранитных расплавов.

Физико-химические данные о фракционировании урана в системе флюид—магматический расплав—уранинит

Выбор условий проведения опытов основывается на современных данных о параметрах гранитоидного магматизма: температура большинства гранитоидных расплавов составляет 700—900° С, давление флюида 1—5 кбар, летучесть кислорода, соответствующая кварц-фаялит-магнетитовому буферу, от $f_{O_2}=-16$, при 750° С до более высоких значений [40, 77, 104]. Соотношения X_{CO_2} (мольная доля углекислоты) $=0{,}07\pm0{,}03$; $X_{NaCl+KCl}=0{,}02\pm0{,}01$; $X_{H_2S}=0{,}01\pm0{,}005$: $X_{HF}=10^{-4}\div10^{-3}$ определяют средний состав магматогенного флюида гранитоидов [5]. В килограмме такого флюида содержится (в молях): 2—5 углекислоты; $0{,}8\div1{,}5$ хлоридов щелочей; 0,2—0,7 сероводорода; 0,005—0,05 фтора. Углекислота находится в виде CO_2, сера в виде H_2S, хлор преимущественно связан с щелочами. Мольные отношения $HCl/NaCl+KCl=0{,}03\div0{,}07$. Главной формой нахождения фтора во флюиде является HF [49, 16].

С учетом сказанного выше для опытов по распределению урана

были выбраны следующие растворы: 1 моль/кг $H_2C_2O_4$ (при его разложении образуется 2 моля CO_2); 0,1 моль HCl+0,9 моль $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$ на 1 кг раствора; 0,1 моль/кг HF, а также дистиллированная вода.

Подготовку опытов осуществили следующим образом. К порошку стекла гранитного состава добавили синтетическую двуокись урана в количестве 1%, затем эту смесь тщательно перемешали в яшмовой ступке, 70—100 мг полученной шихты в виде порошка или столбика стекла, предварительно наплавленного при $T=750°$ С, $P=2$ кбар, поместили в открытую платиновую ампулу диаметром 3—4 мм. Эту ампулу подвесили внутри другой платиновой ампулы диаметром 5—7 мм, на дне которой находилось 200—500 мг исходного раствора. Перед запайкой большой ампулы ее в течение пяти минут продували аргоном для удаления кислорода воздуха. Длительность экспериментов — 5—6 сут. Согласно результатам кинетических опытов, этого времени достаточно для достижения постоянной концентрации урана в растворах. После окончания опыта ампулы вскрыли и раствор отделили от закаленного расплава (стекла). В растворах после опытов присутствует небольшое количество закалочной аморфной SiO_2 ($SiO_2 : H_2O=2 : 1$). Для разложения этой фазы, способной сорбировать уран, к растворам после опытов добавляли несколько капель концентрированной плавиковой кислоты. В дальнейшем фтор, мешающий определению урана, отгоняли трехкратным выпариванием с концентрированной соляной кислотой. После этого сухой остаток растворили в 6 молях HCl для последующего анализа на щелочи, алюминий и уран.

При изучении стекол на микроанализаторе было выявлено отличие составных краевых, граничащих с раствором участков от центральных частей. Меняется содержание таких компонентов, как SiO_2 и Al_2O_3, разница в содержаниях для центральных и краевых частей достигает 2—3%. Это связано с инконгруэнтным характером растворения расплава при его взаимодействии с флюидом. Результаты определений позволяют заключить, что в равновесие с флюидом в экспериментах приходит только тонкая краевая зона расплава.

Детальное изучение стекол показало, что во всем их объеме сохраняется твердая фаза — уранинит. Это вполне естественно, поскольку количество вводимого в исходную шихту уранинита значительно превышает концентрацию насыщения расплава ураном. Поэтому можно утверждать, что содержание урана в растворах после опытов характеризует растворимость в них уранинита (табл. 3). Как видно из приведенных данных, концентрация урана во флюиде зависит от его исходного состава и парциального давления кислорода.

Отношение концентрации урана в растворе к таковой в расплаве характеризует значение коэффициента разделения в условиях насыщения расплава и флюида в отношении урана. Такие условия могут возникать на наиболее поздних стадиях кристаллизации гранитных расплавов, существенно обогащенных ураном.

Анализируя результаты экспериментов, можно заключить, что магматогенные флюиды, отделяющиеся на конечных стадиях кристаллизации ураноносных гранитоидных расплавов, когда достигается насыщение расплавов уранинитом, могут содержать уран в концентрациях до тысяч-

Таблица 3

Содержание урана в растворах опытов по взаимодействию флюида с урансодержащим расплавом $T=750°$ С, $P=2$ кбар

Исходный раствор	Число опытов	$C_{р-р}\cdot10^{-4}$, мас.%		$\frac{C_{U_{р\cdot р}}}{C_{U_{р\cdot в}}}$
		без разложения закалочной фазы	с разложением закалочной фазы	
Буфер Ni—NiO				
H_2O	1	Не обн.	$1{,}5\cdot10^{-4}$	0,005
0,1 моль HF/кг H_2O	1	$3\cdot10^{-4}$	$12\cdot10^{-4}$	0,04
0,3 моль HF/кг H_2O	1	Не обн.	$12\cdot10^{-4}$	0,04
0,5 моль HF/кг H_2O	3	$15\cdot10^{-4}$	$35\cdot10^{-4}$	0,12
1 моль $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$/кг H_2O	2	$5\cdot10^{-4}$	$10\cdot10^{-4}$	0,03
0,9 моль $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$ + 0,1 моль HCl/кг H_2O	4	Не обн.	$15\cdot10^{-4}$	0,05
Буфер F_3O_4—Fe_2O_3				
1 моль $H_2C_2O_4$/кг H_2O	1	$1\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$	0,008
1 моль $(Na_{0,5}K_{0,5})Cl$/кг H_2O	3	$40\cdot10^{-4}$	$50\cdot10^{-4}$	0,13

ных долей процента. По оценке Г. Б. Наумова [80], концентрация урана в рудообразующих гидротермальных растворах составляет 10^{-4}—10^{-6}%. Эти цифры даже ниже тех, которые получены в эксперименте.

Значительное количество опытов проделано в эксперименте по изучению взаимодействия флюида с урансодержащим расплавом щелочного гранита. В опытах использовалось стекло, содержащее 0,35% урана. Эта величина ниже концентрации насыщения расплава соответствующего состава, в связи с чем твердая фаза в закаленных стеклах отсутствовала. В результате концентрация урана в закаленных растворах определялась не растворимостью в них уранинита, как это имело место в опытах с шихтой гранитного состава, а величиной коэффициента разделения в системе расплав—флюид.

Содержание урана в соответствующих фазах и определенные на их основе коэффициенты разделения зависят от состава исходного раствора и фугитивности кислорода. Повышение фугитивности кислорода приводит к изменению распределения урана в пользу расплава. Для хлоридных растворов $K_р$ больше, чем для воды и углекислого раствора. Опыты показали, что во всех случаях концентрация урана в щелочно-гранитном расплаве в 70—300 раз выше, чем в равновесном с ним магматогенном флюиде. В последнем концентрация урана составляет первые тысячные доли процента.

Таким образом, если при кристаллизации щелочно-гранитных расплавов достигается насыщение остаточных порций в отношении уранинита, возможность образования ураноносных рудообразующих растворов, судя по экспериментальным данным, представляется вполне реальной.

Следует однако подчеркнуть, что природные системы значительно сложнее экспериментальных. В случае обильного выделения минералов,

характеризующихся высокой изоморфной емкостью в отношении урана (пиртолит, апатит, сфен, монацит, танталониобаты и др.), насыщение расплавов в отношении уранинита может не достигаться. В таких случаях образование ураноносных флюидов на стадии кристаллизации расплавов представляется значительно менее вероятным. Несомненно значительно сложнее также состав реальных магматогенных флюидов.

В связи с этим целесообразно рассмотреть имеющиеся данные, так или иначе свидетельствующие о реальности существования ураноносных магматогенных флюидов.

О возможной концентрации урана в магматогенных флюидах

Ранее на основе обобщения данных 248 анализов кислых вулканических стекол было показано, что концентрация в них урана варьирует в пределах от $4 \cdot 10^{-4}$% до $4 \cdot 10^{-3}$%, в среднем составляя $11{,}8 \cdot 10^{-4}$%.

Здесь следует подчеркнуть, что ошибка в определении среднего содержания урана в вулканических стеклах возможно лишь в сторону занижения, так как не исключено, что некоторая часть анализов относится к стеклам, претерпевшим частичную девитрификацию. Последняя, как это однозначно установлено, сопровождается выносом урана [123, 147, 83]. Однако если приведенную выше величину принять в качестве среднего содержания урана для кислых вулканических стекол, приходится признать, что она значительно выше кларка урана для гранитов. Согласно А. П. Виноградову [20] среднее содержание урана в гранитах составляет (в %) $3{,}5 \cdot 10^{-4}$, А. А. Смыслову [111] — $4{,}1 \cdot 10^{-4}$, Л. В. Комлеву (1974 г.) — $5{,}4 \cdot 10^{-4}$. Можно поэтому полностью согласиться с Дж. Адамсом [1] в том, что концентрация урана в граните по крайней мере вдвое ниже, чем в вулканическом стекле.

Некоторые исследователи приходят к выводу об обогащенности ураном всех эффузивных пород по сравнению с гранитами [48], хотя такой вывод не является однозначным.

По данным Дж. Рошольта с соавторами [139, 140], только в вулканических стеклах отмечается радиоактивное равновесие между изотопами ^{234}U и ^{238}U, а изотопы ^{230}Th и ^{231}Pa находятся в равновесии с соответствующими изотопами урана. В гранитах дефицит ^{234}U часто составляет около 30%, а дочерние продукты ^{230}Th и ^{231}Pa редко находятся в равновесии с родственными изотопами. Все это дает основание предполагать, что содержание урана в нераскристаллизованных кислых стеклах наиболее близко к таковому в магматическом расплаве.

Сказанное выше позволяет сделать вывод, что гранитоидные магмы теряют значительную часть урана в процессе своей кристаллизации. Если принять, что содержание урана в кислом магматическом расплаве составляет $12 \cdot 10^{-4}$%, а в гранитах — $6 \cdot 10^{-4}$%, содержание воды в расплавах на глубине порядка 15 км — 10%, нетрудно показать, что для обеспечения соответствующего выноса урана его концентрация во флюиде должна составлять порядка $6 \cdot 10^{-3}$%. Как видим, указанная величина даже превышает предельную концентрацию урана в магматогенном флюиде, полученную экспериментально.

Реальность выноса урана из кристаллизующегося расплава подтверждается данными изучения сингенетичных внутригранитных пегматитов, представляющих собой продукты кристаллизации пересыщенных флюидом наиболее легкоплавких расплавов [108]. Изучение нескольких десятков пегматитовых тел из 15 гранитных интрузивов Казахстана и Средней Азии показало, что основной их объем составляют крупноблоковые пегматиты, меньшее значение имеют мелкозернистые разновидности внешней зоны.

Содержание урана в крупноблоковых пегматитах, как правило, в 1,5—3 раза ниже, чем в материнских гранитах, а в мелкозернистых разностях — в 1,5—2,5 раза выше. Возрастает содержание урана и фтора в надпегматитовом пространстве, здесь же отмечается биотитизация пород. Отмеченные соотношения невозможно объяснить каким-либо иным путем, кроме как выносом урана из пегматитового расплава вместе с летучими. Удалению урана из кристаллизующегося расплава благоприятствуют его насыщенность летучими и спокойные условия кристаллизации.

Частая обогащенность ураном апикальных частей интрузивных тел, а также зон биотитизации магматической стадии в экзоконтактах интрузивов и пегматитов также свидетельствует о возможности его перемещения вместе с флюидом.

Изучение возгонов, связанных с базальтоидными магмами, проведенное Л. Л. Леоновой и Н. И. Удальцовой [63] показало, что содержание урана во фторидах достигает $0{,}25 \cdot 10^{-4}\%$, в сульфатах и хлоридах — в несколько раз ниже.

С. И. Набоко [76] в эксгаляционной медной руде, отобранной на втором конусе Большого трещинного Толбачинского извержения на Камчатке, отмечены концентрации урана, достигающие $15 \cdot 10^{-4}\%$. Эти возгоны также связаны с газами из толеитового базальта. К сожалению, концентрация урана в самих газах не определялась. Если учесть, что отделение газов происходило в магматическую стадию и связано с основными магмами, ожидать высоких концентраций урана в таких газах, конечно, не приходится.

В отношении ураноносности магматогенных флюидов, связанных с кислыми магмами, к настоящему времени имеются лишь единичные данные. Была, в частности, установлена повышенная концентрация урана в газово-жидких включениях в апатите из биотитовых монцонитов [37]. Отсутствие каких-либо постмагматических изменений позволяет считать апатит магматическим. На приведенной иллюстрации (рис. 17) видно, что плотность треков полностью коррелируется с количеством газово-жидких включений в апатите. Очевидно, что сгущение треков связано не с самими включениями, а с солями, находившимися во включениях. Последние были вскрыты при шлифовке, водная и газовая фаза улетучилась, и на месте вскрытого пузырька сохранился налет солей с высокой концентрацией урана. Хотя нет возможности точно оценить концентрацию урана во включениях, можно уверенно утверждать, что она заведомо выше таковой в акцессорных апатитах, составляющей примерно $[1 \div 4] \cdot 10^{-3}\%$.

Повышение концентрации урана в газово-жидких включениях в кварце

Рис. 17. Повышенные концентрации урана в участках апатита, насыщенных газово-жидкими включениями

а — шлиф при 1-м николе, *б* — лавсан; увел. 50

из гранит-порфиров отмечены Н. С. Кравченко и Б. Н. Бурдэ [54]. Авторы оценили ее величиной $(5 \div 6) \cdot 10^{-3}\%$.

При изучении методом осколковой радиографии порфировидных гранитов массива Большой Койтас (Северный Казахстан) Л. И. Симоновой [83] было установлено существенное увеличение концентрации урана в периферических частях порфировых вкрапленников ортоклаза (рис. 18). Детальное их изучение показало, что периферические участки вкрапленников ортоклаза насыщены большим количеством мельчайших включений. При 1600-кратном увеличении в наиболее крупных включениях удается установить наряду с жидкой фазой наличие также мельчайшего газового пузырька. Отсутствие включений в центральной части вкрапленников и их резкое увеличение по направлению к периферической позволяют предполагать, что раскристаллизация пород приводила к пересыщению остаточного расплава флюидом, который в виде пузырьков захватывался быстрорастущими кристаллами ортоклаза. Изучение пород методом осколковой радиографии показало, что распределение урана в различных участках кристаллов ортоклаза полностью согласуется с их насыщенностью газово-жидкими включениями. Можно уверенно заключить, что именно включения ответственны за повышенную концентрацию урана. К сожалению, количественная оценка концентрации урана во включениях не представляется возможной.

А. Ранкиным с соавторами [138] приведены данные по концентрациям ряда элементов, в том числе и урана, в газово-жидких включениях из гранитов. Определение проводилось методом эмиссионной спектроскопии при помощи индукционной плазмы. Общая концентрация солей была оценена в 10%. Содержание урана во включениях в кварце из гранитов составило по 28 образцам $3{,}5 \cdot 10^{-2}\%$.

Рис. 18. Повышенные концентрации урана в краевых частях порфировых выделений ортоклаза, связанные с газово-жидкими включениями

а — шлиф при 1-м николе, *б* — лавсан, увел. 14,5

Приведенные выше материалы свидетельствуют о крайней ограниченности данных в отношении концентрации урана в магматогенных флюидах. Тем не менее на основании экспериментальных данных, сопоставления концентраций урана в гранитах и кислых вулканических стеклах, данных осколковой радиографии и прямых определений концентрации урана в магматогенных флюидах, связанных с кислыми магмами, достаточно уверенно можно оценить диапазоном концентраций от десятичных до сотых долей процента.

Вопрос об изменении содержаний урана в последовательных порциях магматогенных флюидов может быть решен лишь в самом общем виде. Известно, что уран относится к группе фторофильных элементов. Коэффициент разделения фтора, так же как и урана, в системе расплав—флюид четко сдвинут в сторону расплава [16]. Следовательно, отделение фтора и урана должно преимущественно проходить на завершающих стадиях раскристаллизации расплава. Поэтому каждая последующая порция флюида в общем случае должна характеризоваться более высокой концентрацией урана, чем последующая. Этим, по-видимому, объясняется то, что в ряду эндогенных месторождений, связанных с определенным тектоно-магматическим циклом, урановые месторождения являются наиболее поздними.

Уран в постмагматических растворах

При полной раскристаллизации магматических расплавов остаются две фазы — кристаллическая горная порода и магматогенный флюид. Дальнейшая геохимическая история урана протекает на фоне взаимодействия растворов с минералами пород, понижения температуры, миграции растворов в область пониженных давлений. Обоснование возможности переноса урана такими растворами является одним из узловых вопросов рассматриваемой проблемы. Анализ этого вопроса целесообразно начать с рассмотрения имеющихся экспериментальных данных.

Растворимость окислов урана в воде и галоидном растворе при высоких значениях P—T параметров

Изучение растворимости двуокиси урана в воде при 500° С и 1 кбар было изучено А. Ф. Редькиным с соавторами [91]. В опытах с фугитивностью кислорода, задаваемой буферами Ni—NiO и Fe_2O_3—Fe_3O_4, она составила $10^{-6\pm0,3}$ моль/кг H_2O. Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными И. М. Баюшкина и Ю. П. Дикова [7], согласно которым истинная растворимость двуокиси урана в водяном паре при тех же условиях составляет $10^{-5,85}$ моль/кг H_2O.

Существенно иные результаты по растворимости двуокиси урана получены Т. Нгуеном и Б. Поти [137]. При тех же температуре и давлении в условиях буфера Ni—NiO концентрация насыщения раствора ураном, по их данным, составляет $10^{-4,70\pm0,02}$ моль/кг H_2O, а для Fe_2O_3—Fe_3O_4 буфера $10^{-3,93\pm0,03}$ моль/кг H_2O.

Более пристального внимания заслуживают эксперименты по растворимости уранинита в галлоидном растворе в интервале температур 400—600° С и 1 кбар, описанные в работе А. Ф. Редькина, И. П. Иванова и Б. И. Омельяненко [92].

Опыты проводили в платиновых ампулах в актоклавах, объемом 75 см^3, помещаемых в безградиентную зону автоклавной печи. Температуру в режиме опыта регулировали с точностью $\pm10°$ электронным регулятором температур, тип 01-Т4 (производство ГДР), а давление в автоклаве создавали путем заполнения их водой в соответствии с *P—V—T* данными. Необходимую фугитивность кислорода в автоклаве и в проницаемых для водорода платиновых ампулах создавали буферной смесью, помещенной на дно автоклава. Материалами для опытов служили кристаллы двуокиси урана, синтезированные при 500° С, 1 кбар, буфере Ni—NiO за 20 сут в солянокислых растворах (m_{HCl}= =0,1—1 моль/кг H_2O), хлористый калий, соляная кислота, аргон марки *ОС4*, бидистилированная вода. В нескольких опытах использовались алюмосиликатные буферные ассоциации: микроклин + кварц + мусковит и андалузит + кварц + мусковит, которые в 1 m_{KCl} поддерживали определенную концентрацию HCl.

Принципиальная схема приготовленных для опытов платиновых ампул показана на рис. 19. Пробоотборниками служили 4—8 полуоткрытых (отверстие диаметром 2 мм) платиновых ампул диаметром 5 мм толщиной стенок 0,2 мм и длиной 50 мм (5×0,2×50), заполненных

Рис. 19. Схема снаряжения ампул для эксперимента

изначально исследуемым раствором и помещенных в большую платиновую пробирку 14×0,3×150 мм объемом 20 см³. Двуокись урана в количестве 5—7 кристаллов, общим весом 6—7 мг, а также рассчитанное количество (5—7 мл) раствора хлорида калия в соляной кислоте ($m_{Cl}=m_{KCl}+m_{HCl}=$ $=1$ моль/кг H_2O) помещали в платиновую пробирку. Во время опыта и при проведении всех других операций пробирка находилась в вертикальном положении. Автоклавы после опытов охлаждали на воздухе в течение 2—3 ч до 100—200° С, а затем в холодной воде. Из автоклавов извлекали платиновую пробирку, вскрывали ее в верхней части по месту сварки, и из нее извлекали пробоотборники, которые взвешивали, и по разности с весом платиновой ампулы определяли вес содержимого. Внутреннее содержимое каждого протоотборника, включая и осадок, выделившийся в процессе закалки, переводили в раствор и затем подвергали химическому анализу. Параллельно с этим выполняли анализ «закаленного» раствора, находящегося в пробирке. Уран в растворе определяли спектрофотометрически на ФЭК-60 в кювете длиной 50 мм, в виде зеленого комплекса (IV) с арсеназо-III в 4,6 моль HCl.

Разброс значений количества урана при определении 1 мкг в 25 мл анализируемого раствора не превышал ±0,1 мкг.

Результаты кинетических исследований показали, что значения фугитивности кислорода, соответствующие кислородному буферу, достигаются в опытах через 2 сут, а насыщение 8 мл раствора двуокисью урана общей поверхностью 7 мм² происходит через 5 сут. Экспериментальные данные приведены в табл. 4. Полученные данные указывают на то, что для флюидов ранней постмагматической стадии концентрация урана в пределах $10^{-4} \div 10^{-3}$ мас.% представляется вполне реальной.

Поведение урана в ранних постмагматических процессах

Выше было показано, что при раскристаллизации магматических расплавов значительная доля урана выносится из расплава вместе с флюидом. Этот вынос может осуществляться на различных стадиях, как в процессе кристаллизации, так и после полного ее завершения. Представление о геохимической истории урана можно было бы получить на основе изучения последовательных минеральных ассоциаций, связанных с постмагматической деятельностью магматических очагов. К сожа-

Таблица 4

Результаты изучения растворимости двуокиси урана при $P_{H_2O}=1$ кбар

T, °C	Время, ч	Состав исходного раствора (моль/кг H_2O)		$C_U \cdot 10^{-4}$, мас.%
		m_{KCl}	m_{HCl}	
		Буфер Ni—NiO		
400	576	1,0	0,010	0,15
400	600	1,0	0,10	4,8
400	600	0,0	1,0	47,9
500*	480	1,0	0,02	0,15
500**	336	1,0	0,063	0,76
500	120	0,70	0,30	15,1
600	336	1,0	0,010	0,38
600	312	1,0	0,10	1,9
600	240	0,70	0,30	4,7
		Буфер Fe_2O_3—Fe_3O_4		
500	360	1,0	0,10	$7{,}6 \cdot 10^{-3}$

* Опыт проведен с алюмосиликатным буфером *Кпш + Кв + Мс*.
** То же, с буфером *Анд + Кв + Мс*.

Примечание. Значения C_U в пробоотборнике являются средними из 4—8 анализируемых проб.

лению, значительная удаленность таких ассоциаций от магматических очагов вызывает серьезные трудности в выделении такого ряда ассоциаций и, главное, в обосновании их связи с магматизмом. Гораздо проще эти вопросы решаются в отношении постмагматических образований, связанных с конкретными магматическими телами. Особый интерес в этом отношении представляют продукты наиболее ранних постмагматических процессов, связь которых с конкретными интрузивными массивами является наиболее очевидной. К ним относятся формации известковых скарнов, альбитизированных гранитов, грейзенов. Данные изучения поведения урана при их образовании могут служить индикаторами геохимической истории этого элемента на постмагматическом этапе становления гранитоидных магматических очагов. Главной целью такого изучения является получение ответа на вопрос о реальности переноса урана постмагматическими растворами.

Уран в известковых скарнах. Известковые скарны формируются на ранней стадии послемагматического процесса. Накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют о резкой неоднородности скарнов по содержанию урана. В большинстве случаев отмечаются низкие концентрации урана в скарнах, порядка $(1—3) \cdot 10^{-4}$%. Так, по данным Е. В. Плющева с соавторами (1978 г.), концентрация урана в эпидот-пироксеновых, пироксен-гранатовых и амфибол-гранатовых скарнах варьирует в пределах от $0{,}5 \cdot 10^{-4}$% до $4{,}3 \cdot 10^{-4}$%, составляя в среднем около $1{,}5 \cdot 10^{-4}$%. Значительно более высокие концентрации отмечаются в скарнах, обогащенных минералами-концентраторами. К таким минералам относятся, в частности, везувиан и, особенно, ортит.

По данным А. Ф. Ножкина с соавторами (1975 г.), содержание урана в исходных известковистых породах составляет $1{,}4 \cdot 10^{-4}$%, в пироксен-гранатовых, пироксеновых и амфиболовых скарнах соответственно $0{,}9 \cdot 10^{-4}$%; $1{,}1 \cdot 10^{-4}$; $1{,}4 \cdot 10^{-4}$%, а в ортитоносных — $10 \cdot 10^{-4}$%. Т. М. Кайкова (1973 г.) выделяет формацию скарновых месторождений, главным урановым минералом которых является уранинит. К ним отнесены месторождения Мери-Кетлин (Австралия), Аскерзунд (Швеция), Азегур (Марокко), ряд месторождений о-ва Мадагаскар и др. Хотя скарновая природа месторождений в отдельных случаях является дискуссионной, следует признать, что Т. М. Кайковой приведены однозначные факты образования уранинита на завершающей стадии скарнового процесса. Типоморфным признаком этих месторождений является парагенезис уранинита с обыкновенной роговой обманкой и сульфидами.

В природе встречаются ураноносные скарны, которые выделяются в самостоятельную формацию скарновых месторождений с уран-торит-редкоземельной минерализацией [24]. Главными минералами — концентраторами урана в них являются ортит, торит, торианит, церит, карбонаты редких земель и др.

Обширные материалы по радиохимическим особенностям скарнов приведены Л. П. Рихвановым с соавторами (1985 г.). Показано, что процесс скарнирования известняков сопровождается накоплением урана. Среднее содержание урана в скарнах по 13 изученным проявлениям составляет $7{,}2 \cdot 10^{-4}$% с широкими вариациями от $1{,}6 \cdot 10^{-4}$% до $13{,}7 \cdot 10^{-4}$%. Установлено, что концентрации урана в минералах ранней (собственно скарновой) стадии относительно невысоки. В волластоните в среднем $2{,}6 \cdot 10^{-4}$%, в пироксене — $(0{,}1—2{,}7) \cdot 10^{-4}$%, в гранате — $(0{,}9—8{,}4) \cdot 10^{-4}$%. Существенное накопление урана авторы связывают с водносиликатной стадией, когда образуются такие минералы-концентраторы, как эпидот, ортит, везувиан. В ортите содержание урана составляет в среднем $200 \cdot 10^{-4}$% в отдельных случаях достигая $1700 \cdot 10^{-4}$%, в эпидоте — $(0{,}7—50) \cdot 10^{-4}$, в везувиане — $(30—120) \cdot 10^{-4}$%. В указанных минералах уран концентрируется в виде изоморфной примеси.

В работе Б. И. Омельяненко с соавторами [83] описано распределение урана в известковых скарнах в контакте со щелочными сиенитами (в %): карбонатная порода — $5 \cdot 10^{-4}$, тремолитовый скарн — $5 \cdot 10^{-4}$, везувиан-гранат-диопсидовый скарн — $36 \cdot 10^{-4}$, мизерит-эгирин-салитовый скарн — $143 \cdot 10^{-4}$. Обычные скарны нормальной щелочности везувиан-гранат-диопсидового состава характеризуются более низкими концентрациями урана, входящего в виде изоморфной примеси в везувиан и в незначительных количествах в диопсид ($9{,}4 \cdot 10^{-4}$%) и гранат ($0{,}2 \cdot 10^{-4}$%). В везувиане выявлено зональное распределение урана, причем наибольшие его концентрации ($30 \cdot 10^{-4}$%) отмечаются в периферических участках кристаллов (рис. 20). Самые низкие концентрации урана отмечены в волластонитовых скарнах, в которых отсутствуют минералы-концентраторы и уран практически целиком сосредоточен в трещинках и межзерновом пространстве.

В распоряжении авторов, так же как и в литературе, имеются другие примеры, которые в совокупности с изложенными выше данными позволяют сделать следующие вполне определенные выводы.

Рис. 20. Зональное распределение в кристаллах везувиана
а — шлифы при 1-м николе, *б* — лавсан; увел. 20

1. Скарнирование карбонатных пород, как правило, сопровождается накоплением урана.

2. Скарны существенно варьируются по содержанию урана от десятитысячных до десятых долей процента.

3. По содержанию урана в скарнах выделяются минералы с низкой (волластонит, пироксены, гранат, амфибол, кальцит) и высокой (ортит, везувиан, гранат, мизерит, эвдиалит, иногда эпидот и титансодержащий гранат) изоморфной емкостью в отношении урана. В рудоносных скарнах могут присутствовать уранинит, пирохлор, монацит, ортит, карбонаты редких земель и др.

4. В наиболее раннюю (собственно скарновую) стадию процесса урансодержащие минералы, как правило, не образуются. Основная их часть связана с постериорной (водосиликатной) стадией, характеризующей понижение температуры минералообразования.

5. Можно утверждать, что скарнирующие растворы, по крайней мере в некоторых случаях, характеризовались достаточно высокими концентрациями урана. На ранней стадии процесса превалировали условия перекоса, что не благоприятствовало отложению урана. Кроме того, минералообразование ранней стадии не сопровождалось образованием минералов-концентратов. Поэтому низкое содержание урана

в скарнах не является показателем низкой его концентрации в скарнирующих растворах.

6. Показателем относительной ураноносности растворов может служить содержание урана в однотипных минералах-концентраторах. На основе сопоставления имеющихся данных можно утверждать, что содержание урана в скарнирующих растворах варьировало в широких пределах, достигая в ряде случаев концентраций, достаточных для отложения собственно урановых минералов.

7. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о возможности переноса урана высокотемпературными растворами ранней постмагматической стадии.

Уран в альбитизированных гранитах. Альбитизация относится к одной из наиболее ранных стадий постмагматического процесса. Она проявляется в связи с поздними фазами гранитоидных магматических комплексов. С формацией альбитизированных гранитов часто связаны промышленные концентрации бериллия, тантала, ниобия, циркония, редких земель, которые повсеместно сопровождаются повышенными содержаниями урана. Основная доля урана обычно приурочена к танталониобатам и циртолитам. Данное обстоятельство позволяет во многих случаях использовать радиометрические приборы и гамма-каротаж для поисков тантало-ниобиевого оруденения. В среднем содержание урана в альбитизированных гранитах в 5—20 раз выше, чем в неизмененных разностях. Таким образом, возможность переноса урана альбитизирующими растворами и обогащенность их ураном едва ли могут вызвать сомнение. Вместе с тем следует подчеркнуть, что указанный факт не мог бы быть однозначно зафиксирован, если бы не происходило отложение минералов с высокой изоморфной емкостью в отношении урана. Отсутствие собственно урановых минералов свидетельствует о том, что в процессе альбитизации уран находился в растворах в легко растворимой форме. Иными словами, условия переноса явно превалировали над условиями отложения. При детальном изучении распределения урана выявляются признаки возрастания интенсивности его накопления на наиболее поздних стадиях процесса. В цирконах и циртолитах отмечается существенная обогащенность периферических частей по сравнению с внутренними. Уран также фиксируется в микротрещинках, выполненных гематитом и хлоритом, которые можно рассматривать как результат деятельнсти «остаточных» («защемленных») растворов, сохранившихся в микротрещинках и порах после завершения альбитизации [83]. Это является свидетельством высокой ураноносности «отработанных» растворов. Сопоставляя поведение урана при процессах скарнирования и альбитизации, можно заключить, что скарнирование осуществляется под воздействием растворов с резко различной ураноносностью. Формация же альбитизированных гранитов, несомненно, образуется под воздействием растворов, специализированных на редкие и радиоактивные элементы. Причина этого кроется в существенном отличии диапазона петрологических условий образования указанных формаций. Если образование известковых скарнов не зависит от петрохимического состава гранитоидов, то образование редкометальных аль-

бититовых пород отмечается лишь в связи с наиболее поздними фазами магматических комплексов. Как было показано выше, именно такие фазы характеризуют магматические расплавы, прошедшие наиболее полную метамагматичекую дебазификацию и кристаллизационную дифференциацию и в максимальной степени обогащенные фторофильными элементами. Доля таких интрузивов составляет, по данным Б. В. Коваля, не более 1% по отношению к общей площади, занятой гранитоидами соответствующего комплекса. Следовательно, существенное накопление натрия в магматогенных флюидах следует рассматривать как особенность постмагматических процессов, обусловленную специфическим составом кристаллизующейся магмы.

Уран в грейзенах. Во времени альбитизация постепенно и практически непрерывно сменяется грейзенизацией. Большинство исследователей (Апельцин и др., 1975; Берзина, Доломанова, 1967; Дмитриев, Леонова, 1962; Крылов, 1959; Миронов и др. 1979; Омельяненко и др., 1973, 1978; Плющев, 1975; Сыромятников и др., 1976) отмечают повышенное содержание урана в 2—5 и более раз по сравнению с вмещающими породами, причем уран накапливается в некоторых рудных минералах (молибденит, вольфрамит, гюбнерит, касситерит, висмутин и др.). Характерно, что в большинстве случаев увеличение интенсивности грейзенизации сопровождается и ростом содержания урана. Так, в слабо грейзенизированных гранитах по сравнению с неизмененными отмечено повышение содержания урана в 5 раз, а в интенсивно грейзенизированных — в 10 раз. В слабо грейзенизированных сланцах концентрация урана увеличивается в 8, а в интенсивно грейзенизированных — в 4 раза [83]. Для неизмененных, слабо и сильно грейзенизированных гранитов И. Г. Сыромятников для одного массива дает содержание (в %): $3{,}3 \cdot 10^{-4}$; $4{,}4 \cdot 10^{-4}$; $4{,}7 \cdot 10^{-4}$, для другого — $3{,}5 \cdot 10^{-4}$; $8{,}7 \cdot 10^{-4}$; $15 \cdot 10^{-4}$. Основная доля урана отлагалась на поздних стадиях грейзенового процесса. На это указывают: высокорадиоактивные цирконы и апатиты, приуроченные к трещинам в топазе; явно повышенные по сравнению с неизмененными породами концентрации урана в межзерновых швах и микротрещинах; образование в постгрейзеновую стадию касситерита и хлорита с повышенным содержанием урана. При этом в краевых частях зерен касситерита оно в 4—20 раз выше, чем в центральных [83].

Обращают на себя внимание детали распределения урана в вольфрамитах (рис. 21). Они показывают наличие многочисленных зон роста, характеризующихся резкими вариациями в концентрации урана. Возможно, зональное распределение отражает вариации условий кристаллизации, наличие переходов от инфильтрационного до диффузионного массообмена. Обращает на себя внимание резкое обогащение ураном микротрещин в вольфрамите, свидетельствующее о нарастании активности урана к концу грейзенового процесса.

Е. В. Плющев (1975 г.) отметил, что основная доля урана в грейзенах заключена в уранините, браннерите, торите, монаците. Наш опыт изучения грейзенов позволяет заключить, что уранинит, браннерит, торит в грейзенах встречаются довольно редко. Специальное изучение представительных грейзеновых месторождений показало, что главными концентраторами урана в грейзенах являются псевдо-

Рис. 21. Распределение урана в кристаллах вольфрамита
Лавсан; увел. 20

морфозы титанистых минералов (рутил, анатаз, лейкоксен), образующихся по биотиту, циркон, апатит, пирит, касситерит, вольфрамит, межзерновые швы и микротрещинки. Отмечены повышенные концентрации урана в газово-жидких включениях в кварце и топазе. Приближенная оценка концентрации урана во включениях, исходя из плотности треков, показывает, что содержание в них урана в пределах тысячных долей процента представляется наиболее вероятным.

Прямые определения концентрации урана в газово-жидких включениях в кварце олово-вольфрамовых жил, выполненные А. Ранкиным с соавторами [138], дали концентрацию $2{,}23 \cdot 10^{-2}\%$, а в кварце ураноносных жил — $3{,}9 \cdot 10^{-2}\%$.

Отмеченное выше позволяет заключить, что перенос урана грейзенизирующими растворами вряд ли может вызвать сомнение. Редкое образование собственных минералов урана в связи с грейзеновым процессом, очевидно, обусловлено высокой растворимостью этого элемента в грейзенизирующих растворах.

Проведенное рассмотрение поведения урана при гидротермально-метасоматических процессах ранних постмагматических стадий свидетельствует о реальности переноса этого элемента постмагматическими флюидами. Наблюдаемое во многих случаях накопление этого элемента в метасоматитах в большинстве случаев связано с образованием минералов-концентраторов, характеризующихся большой изоморфной емкостью в отношении урана. Образование уранинита отмечается крайне редко, что свидетельствует о недосыщенности растворов в отношении этого минерала.

Очевидно поэтому, что нельзя однозначно ответить на вопрос, выщелачивают ли постмагматические растворы уран из вмещающих пород или отлагают его. Обеднение растворов ураном должно происходить в случае, если при метасоматическом преобразовании пород образуются минералы-концентраторы и если сами вмещающие породы обогащены минералами, способными активно сорбировать уран (минералы титана, окислы железа, углистое вещество). Обогащение растворов ураном может происходить, если исходные породы содержат легковыщелачиваемый («избыточный») уран, а минералы-концентраторы отсутствуют. Концентрация урана в постмагматических растворах, определяемая тысячными долями процента, представляется наиболее вероятной.

Модель взаимосвязи петрогенетических процессов, ответственных за формирование ураноносных рудообразующих растворов

Предлагаемая модель отражает представление авторов об источнике и механизме формирования ураноносных гидротермальных растворов, взаимосвязи процессов рудогенерирования с разнообразными геологическими явлениями. Она опирается на совокупность современных данных о пространственно-временных соотношениях урановых месторождений с магматическими породами и месторождениями других металлов, данные физико-химической петрологии и геохимии о составе и строении верхней мантии, процессах гранитизации и магмообразования, закономерностях эволюции магматизма во времени, флюидном режиме гранитообразования и т. д.

При разработке модели авторы использовали лишь те гипотетические положения, которые на данном этапе наиболее обоснованы и разделяются большинством петрологов. Значительная роль в аргументации развиваемых авторами генетических представлений принадлежит изучению горных пород и минералов методом осколковой радиографии, позволяющим проследить поведение урана при раскристаллизации магматических расплавов, доказать реальность высоких концентраций урана в магматогенных флюидах. Авторами предпринята попытка экспериментально обосновать наиболее важные положения развиваемой концепции. Эти положения касаются возможности переноса урана трансмагматическими флюидами, накопления его в магматическом расплаве, выноса урана магматическими флюидами на наиболее поздних стадиях раскристаллизации расплавов.

Предлагаемая модель описывает совокупность процессов, которые свойственны определенному временному интервалу в развитии складчатых областей. Этот интервал охватывает орогенную стадию развития складчатых областей или период их активизации, для которых характерно усиление роли кислого (или щелочно-базальтоидного) магматизма и связанных с ним постмагматических явлений.

Важной предпосылкой развития рудогенерирующих процессов является наличие глубинных разломов. В их пределах вещество мантии разуплотняется, что обеспечивает отделение и интенсивную циркуляцию трансмагматических флюидов. Образование очагов базальтоидных магм в подкоровых горизонтах и очагов кислых магм в земной коре является следствием продолжительного и интенсивного воздействия таких флюидов.

Наконец, важным условием рудогенерирующей способности магматических расплавов является специализация трансмагматических флюидов на уран.

Только с учетом этого фактора могут быть объяснены и металлогеническая специализация магматических расплавов, и значительные размеры ураноносных провинций, и удивительная однотипность месторождений в пределах таких провинций.

Причины, определяющие металлогеническую специализацию трансмагматических флюидов, относятся к вопросам гипотетического плана. Возможно, они отражают уровень проникновения разломов в мантию,

глубину флюидоотделения или, наконец, геохимическую неоднородность самой мантии в различных частях Земли.

Формированию рудоносных растворов предшествует ряд последовательных петрогенетических явлений, протекавших многие миллионы лет: возникновение глубинных разломов, заложение и дальнейшее развитие зон тектоно-магматической активности, магматизм и метаморфизм предорогенной стадии.

Основная трудность в анализе этих явлений заключается в гипотетичности представлений о глубине, условиях и механизме формирования магматических расплавов в мантии.

Представляется целесообразным несколько упростить задачу, ограничившись рассмотрением лишь тех петрогенетических явлений, которые непосредственно предшествуют и тесно связаны с этапом рудообразования. Поэтому совокупность рассмотренных петрогенетических явлений целиком относится к орогенному этапу (стадии) развития геосинклинально-складчатых и внегеосинклинальных подвижных поясов. Напомним, что переход к орогенической стадии развития сопровождается понижением интенсивности теплового потока, изменением флюидного режима в сторону усиления во флюидах роли воды. Регрессивный характер процессов орогенной стадии доказывается наложением метаморфизма амфиболитовой фации на продукты доорогенного гранулитового метаморфизма [71]. Несмотря на понижение температуры, метаморфизм в условиях повышенного флюидного давления по масштабам и интенсивности достигает в орогеническую стадию максимального развития, соответствуя по своим особенностям понятию «ультраметаморфизм». Данный термин подразумевает интенсивное проявление процессов кремнещелочного метасоматоза, мигматизации и магматического замещения (гранитизации). Гранитизация является следствием повышения во флюидах парциальных давлений воды, фтора, бора и других компонентов, стабилизирующих кислые расплавы. Поэтому переход к орогеническим стадиям эволюции подвижных складчатых зон сопровождается усилением роли гранитоидного магматизма. Основным механизмом формирования гранитоидных магм является магматическое замещение при посредстве трансмагматических флюидов подкорового происхождения. Предполагается, что изменение флюидного режима в орогеническую стадию является следствием отделения летучих компонентов в процессе кристаллизующихся подкоровых базальтоидных магм, происходящего на фоне понижения интенсивности теплового потока. Если подкоровые базальтоидные магмы интенсивно поглощали водную фазу в предорогенную стадию, пропуская в земную кору лишь компоненты, характеризующиеся слабой растворимостью в магматических расплавах (например, CO_2), то в процессе своей раскристаллизации они начинают активно отделять водную фазу. С этих позиций находит объяснение изменение флюидного режима, мощное развитие явлений гранитизации и связанное с ней грандиозное перераспределение вещества между мантией и корой.

Метасоматизм и гранитизация орогенной стадии, сопряженные в складчатых областях с развитием корового магматизма, являются главным процессом формирования земной коры континентального типа. Рассмотрим совокупность последовательных петрогенетических явлений,

ответственных за формирование ураноносных рудообразующих растворов.

1. Переход к орогенической стадии развития, сопровождающийся возрастанием во флюидах роли фторофильных компонентов, особенно воды.

2. Формирование региональных глубинных разломов, проникающих в верхнюю мантию.

3. Генерация восходящего потока глубинных флюидов, которые по мере снижения температуры во все большей степени приобретают способность к дебазификации пород.

4. Кремнещелочной метасоматоз, сопровождающийся выносом из пород оснований и привносом кремния и щелочей.

5. Магматическое замещение пород (мигматизация) в зонах наиболее интенсивного поступления глубинных флюидов с образованием гранитоидных магматических очагов.

6. Метамагматическая дебазификация, сопровождающаяся раскислением расплавов и накоплением рудных и рассеянных элементов.

7. Затухание интенсивности потока флюидов, стабилизация объема магматических очагов, дальнейшее раскисление магматических расплавов.

8. Кристаллизационная дифференциация, сопровождающаяся накоплением в остаточных расплавах воды, фтора, урана и других фторофильных элементов.

9. Развитие гидротермально-метасоматических процессов. ранних и средних стадий, связанных с магматическими очагами.

10. Завершение кристаллизации остаточных магматических расплавов в очагах, отделение ураноносных рудообразующих растворов.

Следует подчеркнуть, что в приведенных выше пунктах нами не указаны многие петрогенетические процессы, которые, хотя и сопровождают становление и развитие гранитоидных магматических очагов, в то же время не относятся к числу условий, необходимых для генерации ураноносных рудообразующих растворов. К таким процессам относятся, в частности, интрузивный магматизм и вулканизм, развитие контактово-реакционных и постмагматических явлений в связи с конкретными магматическими телами, тектонические движения и т. д. Вместе с тем изучение указанных явлений позволяет получить определенную информацию об эволюции магматических очагов, путях миграции рудоносных растворов и закономерностях размещения оруденения.

В заключение кратко суммируем основные результаты, вытекающие из петрологических, геохимических и экспериментальных исследований по рассматриваемой проблеме, которые наряду с геохимическими данными являются фундаментом развиваемой авторами генетической модели источника ураноносных рудообразующих растворов.

1. Концентрация урана в кислых вулканических стеклах объективно характеризует таковую в гранитоидных расплавах и варьирует в пределах (в %) от $4 \cdot 10^{-4}$, до $40 \cdot 10^{-4}$, в среднем составляя $11{,}8 \cdot 10^{-4}$. Наличие стекол с резко повышенными концентрациями урана указывает на то, что в природе реально существуют ураноносные магматические расплавы.

2. Концентрация насыщения гранитного расплава ураном, по экспе-

риментальным данным, составляет сотые доли процента, что значительно ниже его концентрации в природных расплавах. Следовательно, природные расплавы в общем случае недосыщены ураном. По этой причине магматическое замещение пород должно сопровождаться рассеянием урана во всем объеме магматического расплава.

3. Комбинированный коэффициент распределения урана между расплавом и образующимися минералами определяется интервалом 0,1—0,5 в пользу расплава. В этой связи кристаллизация магм является процессом концентрирования урана в остаточном расплаве. В условиях длительной кристаллизации богатых ураном магм создаются предпосылки для насыщения остаточного расплава ураном и образования магматического уранинита.

4. На конечных ступенях раскристаллизации расплавов концентрация урана в магматогенном флюиде определяется растворимостью в нем уранинита в присутствии алюмосиликатного буфера (насыщенный в отношении уранинита расплавов плюс гранит). Экспериментальное изучение подобной системы позволяет оценить концентрацию урана в магматогенном флюиде значениями, достигающими тысячных долей массового процента.

5. На основе сопоставления содержания урана в кислых стеклах и гранитах, данных осколковой радиографии, указывающих на наличие в магматических минералах газово-жидких включений, обогащенных ураном, и результатов прямых определений, приведенных в литературе, обосновывается реальность существования в природе магматогенных флюидов с концентрациями урана в тысячные и даже сотые доли массового процента.

6. Доказан перенос урана растворами ранней постмагматической стадии (пегматитообразование, скарнирование, альбитизация, грейзенизация). Показано, что уран в этих растворах находился в легкорастворимой форме и фиксировался в твердой фазе только при наличии минералов-концентраторов с высокой изоморфной емкостью. Экспериментальными работами подтверждена возможность переноса урана хлоридными растворами в восстановительных условиях при температурах 400—600° С в концентрациях 10^{-4}—10^{-3} мас.%.

Глава V

ОСНОВЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВНУТРИКОРОВЫХ ГЛУБИННЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ УРАНА

Общие представления

Во многих урановорудных провинциях, кроме рассмотренных выше, существует большая группа урановых месторождений разных типов, первичные руды которых были сформированы из гидротермальных растворов, и по происхождению они могут быть отнесены к эндогенным, но эти месторождения либо вообще не обнаруживают видимой связи с кислым магматизмом, либо эта связь является более сложной (опосредованной). Такие месторождения локализуются в различной геологической обстановке и относятся к разным генетическим сериям. Судя по целому ряду признаков, для их формирования предполагается не магматический, а глубинный фильтрационный источник урана.

Под «фильтрационным» источником рудного вещества эндогенных урановых месторождений авторами понимаются такие разнотипные образования ураноносного субстрата континентальной земной коры, находящегося в твердой, жидко-твердой или жидкой фазах, из которых уран мог быть мобилизован любыми восходящими минерализованными водными, газово-водными или газовыми растворами.

Согласно представлениям о фильтрационном типе источника рудного вещества урановых месторождений, генезис растворов и происхождение источника урана далеко не всегда совпадали между собой и поэтому обычно были разобщены в пространстве или во времени. Уран мог извлекаться агрессивными минерализованными (кислотными или щелочными) термальными растворами различного происхождения либо из горных пород, непосредственно вмещающих месторождения, либо восходящими потоками эндогенных флюидов из подстилающих или глубоко залегающих под месторождениями ураноносных кристаллических пород (в том числе закристаллизовавшихся магматических очагов). Соответственно среди разновидностей фильтрационного типа источников рудного вещества обычно различаются источники ближней или местной мобилизации и дальней или глубинной мобилизации. Фильтрующиеся через ураноносные образования растворы могли быть как корового, так и подкорового происхождения, т. е. гидротермальные магматогенные и внемагматические мантийные флюиды, а также, возможно, иногда подогретые инфильтрационные и эксфильтрационные воды. Однако всегда формирование растворов происходило гораздо позже и их рудоносность обусловлена проникновением сквозь ранее образованный ураноносный субстрат.

Правильное понимание вопросов источников рудного вещества во многом зависит от достоверно установленной истории развития рудных районов и процессов уранового рудообразования (последовательности их проявления), этапов и условий накопления урана в этом субстрате, формы нахождения его, времени и природы происхождения растворов (флюидов).

Накопление урана в горных породах, вмещающих или подстилающих

месторождения (т. е. в фундаменте), происходило в специфических условиях в более ранние дорудные или рудоподготовительные эпохи либо в процессе доорогенного седиментогенеза и диагенеза (ураноносные углеродистые сланцы, песчаники, конгломераты), либо в процессе доорогенного ультраметаморфизма (продукты гранитизации, мигматизации, калишпатизации), либо в процессе орогенного гранитоидного магматизма (граниты, пегматиты, липариты, застывшие «остаточные» магматические очаги и др.).

Формирование эндогенного уранового оруденения связано с появлением в определенные периоды развития провинций огромных объемов потоков различных термальных растворов (газовых, газово-водных или водных), их минерализацией, интенсивностью и направлением движения (динамикой). Проявление гидротермальной деятельности в такие эпохи рудообразования, в свою очередь, обусловлено различными внутрикоровыми и подкоровыми процессами тектонической и магматической активности орогенных этапов развития.

Гидротермальные урановые месторождения, для которых авторы предполагают глубинный (эндогенный) фильтрационный источник дальней мобилизации, принадлежат преимущественно к полигенной, а также частично к эндогенной и метаморфогенной сериям. В основном такие источники характерны для гидротермальных немагматогенных (телетермальных) месторождений различных типов, независимо от их возраста, для месторождений неясного или сложного генезиса и ряда других.

Среди них в первую очередь следует отметить месторождения: а) не обнаруживающие видимой связи с магматизмом (стратиформные месторождения в черных сланцах, метасоматические, штокверковые и жильные месторождения в метаморфических толщах и гранитоидах, в зонах сквозных глубинных разломов среди различных пород и др.); б) пространственно и во времени связанные с основным или щелочно-основным магматизмом, в том числе сложным по составу дайковым комплексом регионального распространения, проявления которых непосредственно предшествовали урановому оруденению и вызывали активизацию гидротермальной деятельности как в зонах разломов фундамента, так и в структурах чехла; в) пространственно связанные с образованиями кислого (гранитоидного или липаритового) магматизма, но по времени значительно оторванные от его проявления.

Кроме того, глубинный фильтрационный механизм мобилизации металла из ураноносного субстрата «гранито-метаморфического» слоя земной коры, вернее комбинированный или переходный фильтрационно-магматический источник рудного вещества, вполне можно предполагать для гидротермальных урановых месторождений, пространственно и структурно связанных и во времени относительно близких с кислым орогенным магматизмом, но развитых в районах (провинциях), в которых между периодом кристаллизации внутрикоровых магматических очагов и этапом проявления ураноносной гидротермальной деятельности произошли существенные тектонические перестройки и другие важные геологические события.

Основанием для представлений одного из авторов о внутрикоровом фильтрационном источнике рудного вещества (глубинной мобилиза-

ции) для эндогенных гидротермальных урановых месторождений послужили следующие общие соображения и данные по закономерностям их размещения, особенностям развития рудных провинций и районов, в которых они проявлены, условиям формирования оруденения:

месторождения, для которых предполагается фильтрационный источник этого типа, проявлены в тех же провинциях — в соседних или иногда даже в тех же районах, в которых развиты магматогенные гидротермальные месторождения, но сформировались в других геологических условиях и подчиняются несколько иным закономерностям размещения;

месторождения этого типа приурочены к крупным тектоническим блокам земной коры, сложенным разнотипными ураноносными породами, которые были образованы в результате проявления различных эндогенных и экзогенных процессов, приведших к постепенному накоплению урана в разных геологических формациях и созданию крупных геохимических аномалий на разных уровнях;

формирование таких месторождений связано с завершающей стадией проявления последовательно сменявших друг друга эндогенных процессов (метаморфизма, магматизма, метасоматизма), происходивших на общем фоне длительного унаследованного непрерывно-прерывистого воздействия на эти участки земной коры глубинных (подкоровых) газово-тепловых потоков;

многие месторождения пространственно совпадают и по времени образования близки к проявлениям основного или щелочного магматизма подкорового происхождения (дайкам, вулканитам, интрузивам);

месторождения разных типов, не имеющие видимой связи с кислым магматизмом с предполагаемым фильтрационным источником, формировались в течение единой эпохи рудообразования с магматогенными месторождениями и обнаруживают с ними сходство (связь, взаимные переходы);

месторождения, образованные в разных условиях и обычно имеющие разную тектоническую позицию, нередко принадлежат к одной и той же рудной формации, контролируются едиными сквозными глубинными разломами;

для рудных провинций в целом или их отдельных месторождений нередко характерно полихронное урановое оруденение, формирование которого обусловлено проявлением новой гидротермальной деятельности, связанной по времени с активизацией тектоно-магматических или тектонических процессов орогенных этапов;

наконец, существуют конвергентные месторождения, для которых по совокупности данных можно предполагать как магматический, так и фильтрационный тип источника дальней мобилизации.

Среди необходимых условий, обеспечивающих формирование ураноносных гидротермальных растворов за счет извлечения металла из различных урансодержащих образований и подтверждающих правомерность этой концепции, следует отметить следующие:

наличие на глубине горных пород (гранитоидов, гранито-гнейсов, мигматитов, пегматитов, углеродистых сланцев, песчаников, конгломератов, метасоматитов и т. п.), характеризующихся не только общей геохими-

ческой урановой специализацией, но и большой долей легко мобилизуемой («подвижной») формы урана;

интенсивное и широкое проявление как предрудных, так и рудосопровождающих метасоматических процессов (кислотных и щелочных), обеспечивавших сначала перевод урана в «подвижную» форму, а затем — наиболее полное его экстрагирование из пород;

большие объемы ураноносных пород и благоприятные для мобилизации условия их залегания, а также соответствующие пути (проницаемые зоны тектонических дислокаций) и динамика (направление и скорость движения) растворов;

приуроченность к зонам глубинных (подкоровых) разломов, по которым устанавливаются признаки проявления внемагматической гидротермальной деятельности.

Отсюда следует, что одним из главных признаков мобилизации металла из ураноносных пород могут служить следы развития этих процессов и наличие широко проявленных в горных породах, особенно непосредственно под месторождениями, мощных и распространяющихся на большую глубину зон «выноса» этого элемента в количествах, достаточных для образования рудных тел. Для наиболее убедительного доказательства такого типа источника, естественно, необходимы веские доказательства достоверности существования таких зон.

Обычно в качестве фильтрационного источника рудного вещества ближней мобилизации для урановых месторождений разных типов, развитых во многих рудных провинциях, некоторыми авторами предполагаются непосредственно вмещающие или расположенные поблизости, а также подстилающие горные породы, характеризующиеся повышенными содержаниями урана (т. е. урановой геохимической специализацией). Такими породами могли служить, по их мнению, либо углеродистые сланцы (для стратиформных, некоторых жильных и других месторождений), либо граниты (для жильных и других месторождений), либо кислые эффузивы (для штокверковых и жильных месторождений).

Одной из главных предпосылок фильтрационного источника ближней мобилизации считается наличие геохимически специализированных ураноносных пород, а также характер концентрации урана и формы его нахождения. К сожалению, лишь в некоторых случаях приводятся динамика, состав, характер и происхождение растворов, например, — артезианские бассейны, напорные подземные воды или смешанные растворы и т. д. При этом далеко не всегда учитываются объемы и условия залегания ураноносных пород, в целом восходящий характер движения растворов, их пути движения, а также детальные данные по радиогеохимии вмещающих пород, масштабы зон выноса. Как правило, приводятся данные о содержании урана в 1 км^3 и общие запасы, при этом, по-видимому, подразумевается почти полное извлечение металла. В то же время результаты некоторых исследователей (Винокуров и др., 1980 г.) на различных урановых месторождениях по природному преобразованию горных пород (углеродистых сланцев, гранитоидов) гидротермальными или гипергенными процессами свидетельствуют о том, что из вмещающих или подстилающих пород, даже при весьма существенном их изменении, происходит лишь частичный (не

более 25—30%, редко до 40%) и довольно локальный (в определенных зонах, участках) вынос урана. Наиболее интенсивная миграция металла устанавливается в процессе проявления как дорудной, так и пострудной гидротермальной деятельности типа кислотного выщелачивания (аргиллизации, окварцевания и т. п.), а также в процессе гипергенного преобразования пород (зоны окисления, коры выветривания). При этом дальнейшая судьба экстрагированного урана — условия, время и направление его миграции остаются, как правило, невыясненными. Судя по незначительной доле извлечения металла из пород и низким концентрациям в подобных растворах, с учетом времени его миграции (в дорудные и пострудные этапы) скорее всего в основном он рассеивался, смешиваясь с подземными водами и не создавая рудоносных растворов.

Как уже отмечалось, результаты комплексных геолого-структурных, литологических, минералогических и радиогеохимических исследований на многих урановых месторождениях главных типов и на территориях различных урановорудных провинций фанерозойских складчатых областей дают основание сделать важный вывод о том, что фильтрационный источник местной или ближней мобилизации, обусловленный выщелачиванием урана из пород, непосредственно вмещающих рудные тела месторождений, с последующим его переотложением в рудоконцентрирующих зонах не играл существенной роли в создании ураноносных рудных растворов. Поэтому в формировании промышленных концентраций урановых руд этот тип источника, по-видимому, имел в целом резко подчиненное или даже ничтожное значение.

Отчетливо, длительно и устойчиво проявленный эндогенный режим развития и особенности направленного развития тектоно-магматических и рудно-метасоматических процессов в пределах крупных рудоносных структур урановорудных провинций несомненно свидетельствуют о том, что как дорудные — магматические и метасоматические, так и постмагматические гидротермальные образования, в том числе урановые месторождения разных типов, возникли в результате единых процессов — воздействия на верхние оболочки земной коры мощных подкоровых газово-тепловых (флюидных) потоков. Однако, связаны они с разными этапами и стадиями этого развития. К сожалению, далеко не всегда удается проследить всю последовательность проявления каждого из этих процессов. Нередко отсутствуют четкие и прямые признаки проявления одного или нескольких из них, что не позволяет равнозначно установить все этапы истории развития, достоверно выяснить происхождение рудоносности флюидов, природу источника урана и механизм его извлечения из жидкого или твердого субстрата. Можно лишь определенно утверждать, что источник урана — эндогенный внутрикоровый. Источник растворов мог быть разным — либо коровым, либо подкоровым.

В пределах полихронных урановорудных провинций или суперпровинций среди урановых месторождений одной или разных (двух-трех) металлогенических эпох обычно проявлены различные типы, развитые в тектонических блоках и имеющие различные соотношения с магматизмом, например, жильные и метасоматические в березитах—гидрослюдизитах, метасоматические в альбитах, стратиформные в гидрослюдизитах—аргиллизитах среди черных сланцев и др. Эти месторождения, несмотря на

существенные различия в геологических условиях локализации и в составе рудных ассоциаций, их возрасте и т. п., обнаруживают многие черты сходства или даже единство в происхождении, подчиняются общей металлогенической зональности.

Поэтому вопросы об источниках урана месторождений каждого типа нельзя решать изолированно друг от друга, только на примерах месторождений одного типа. Для их понимания необходим более широкий металлогенический анализ, региональные сопоставления и сравнения с месторождениями других типов.

Эндогенные урановые месторождения разных типов и возраста, развитые в пределах одной рудной провинции, могут иметь как общий (единый) или сходный (близкий) тип источника рудного вещества, так и совершенно разный. Показать возможность его существования в природной обстановке можно лишь на основании комплексного и регионального анализа. Даже при детальном комплексном изучении одной группы месторождений необходимы общие региональные сопоставления. Существуют месторождения, пространственно связанные с гранитоидами, как геохимически специализированными, так и не обнаруживающими такой специализации. В то же время подобные месторождения, расположенные в экзоконтактах гранитоидов, залегают как в ураноносных черных сланцах, так и среди других пород и везде они принадлежат к единой рудной формации, образовавшейся в течение одной металлогенической эпохи. Все это заставляет искать другое, более универсальное объяснение.

Как уже неоднократно отмечалось, при решении проблемы источников рудного вещества для гидротермальных урановых месторождений разных типов (серий) на современном уровне знаний, на основании комплекса преимущественно геологических данных можно наметить лишь наиболее вероятные варианты. Исходя из изложенных выше соображений о направленности развития глубинных процессов в рудных провинциях, среди эндогенных коровых типов источников наиболее вероятными могут быть наряду с магматическим фильтрационный дальней мобилизации или комбинированный.

Прежде всего необходимо отметить, что даже для урановых месторождений, которые обнаруживают пространственно-временную (парагенетическую) связь с орогенным магматизмом и для которых обычно предполагается магматический источник, имеются факты, которые не укладываются в прежние представления о магматическом источнике в классическом понимании, что все ураноносные гидротермальные растворы являются непосредственными призводными «остаточных расплавов» или флюидов, сохранившихся на месте опустошенных («отработанных») магматических очагов. В связи с этим возникает целый ряд неясных вопросов, которые требуют нового подхода в их интерпретации, или их можно трактовать по-иному.

Анализ наиболее существенных фактов во многих урановорудных провинциях, которые при генетических построениях нельзя не учитывать, позволяет сделать следующие важные выводы:

ко времени проявления поздних стадий многоэтапной постмагматической гидротермальной деятельности внутрикоровые ураноносные магматические очаги гранитоидного состава полностью или почти полностью иссякли и были закристаллизованы;

большая часть летучих компонентов (в основном галоидов и др.) из этих очагов была удалена в ранние стадии их эволюции (пегматиты, скарны, грейзены и др.);

содержания и объемы некоторых летучих компонентов (особенно углекислоты и др.) в коровых магматических очагах, видимо, не всегда были достаточными по количеству и соответствующими по составу для того, чтобы создавать мощные потоки ураноносных рудных растворов, тем более что подобные флюиды проявлялись весьма длительно не только в ранние (доурановые), но и в поздние уже урановорудные и послеурановые стадии;

многие признаки свидетельствуют о возобновлении деятельности подкоровых очагов основного состава (внедрение диабазов и лампрофиров, поступление больших объемов углекислоты, при наличии углеводородов, галоидов, серы).

Отсюда следует важный вывод о том, что формирование ураноносных гидротермальных растворов позднего (последайкового) этапа развития без поступления в «застывшие» гранитоидные магматические очаги новых порций подкоровых газово-тепловых потоков вряд ли было возможным.

На основании изложенного видно, что возникает необходимость существенной корректировки прежнего «классического» представления о магматическом типе источника, в первую очередь о происхождении летучих компонентов (углекислоты, галоидов, серы) во флюидах — растворах, а также о механизме извлечения урана из «остаточного расплава—раствора».

Поэтому с учетом общих доводов и на основании данных о времени и условиях образования урановых месторождений, а также данных о составе главных минеральных ассоциаций их руд, наряду с магматическим вполне можно предполагать эндогенный (глубинный) фильтрационный тип источника. Представления о фильтрационном источнике дальней мобилизации или комбинированном (фильтрационно-магматическом) источнике, на наш взгляд, пригодны для многих типов месторождений, в том числе для месторождений, связанных с кислым магматизмом. В целом этот вариант, по-видимому, имеет более общее и широкое, т. е. универсальное, значение, поскольку он объясняет многие отмеченные выше факты или снимает противоречия.

Обоснование глубинного (внутрикорового) фильтрационного источника рудного вещества (дальней мобилизации) или его варианта — комбинированного фильтрационно-магматического источника наиболее целесообразно рассмотреть на примерах особенностей формирования в орогенные этапы урановорудных провинций и отдельных районов, в которых развиты урановые месторождения разных типов — как связанные с кислым магматизмом, так и не обнаруживающие такой связи, но характеризующиеся многими чертами сходства или единства в происхождении. Здесь даже на месторождениях, пространственно связанных с кислым магматизмом, отмечаются признаки фильтрационного источника.

Поэтому для наиболее убедительного доказательства общих представлений об этом типе источника, на наш взгляд, необходим детальный и всесторонний анализ истории развития и последовательности проявления различных магматических и постмагматических процессов именно на этих

месторождениях и рудных районах, в которых они распространены, а также сопоставление их с другими месторождениями. На основании полученных положительных результатов этот тип источника вполне можно предполагать и для других гидротермальных месторождений, не обнаруживающих парагенетической связи вообще (например, месторождений в «черных» сланцах) или для месторождений, тяготеющих к районам (узлам) развития близко одновозрастного магматизма основного и щелочно-основного состава подкорового происхождения.

Как уже отмечалось, для урановорудных провинций и районов разных типов и возраста характерны следующие общие особенности их положения в глубинных структурах земной коры и эндогенного развития:

1. Специфическая тектоническая позиция в узлах сочленения подвижных поясов (глубинных разломов), отличающихся повышенной проницаемостью и проникновением в глубокие подкоровые оболочки, по которым могли поступать основные магмы и подкоровые флюиды.

В то же время они приурочены к жестким, ранее консолидированным участкам (блокам) континентальной земной коры, испытавшим многократные процессы гранитизации и гранитообразования.

2. Направленность специфического эндогенного развития тектонических, магматических и метасоматических процессов, приводивших к накоплению и перераспределению радиоактивных элементов, в том числе урана и перевода его в «подвижную» форму.

Все природные эндогенные явления, происходившие в пределах определенных структур крупных ураноносных блоков континентальной земной коры (региональный метаморфизм, ультраметаморфизм, гранитоидный магматизм, кремний-калиевый метасоматоз и постмагматическая гидротермальная, в том числе ураноносная, дятельность), представляют собой разные, но взаимосвязанные и последовательно развивающиеся звенья (этапы, стадии) единого унаследованно проявленного глубинного процесса. Этот процесс протекал длительное время под воздействием и при участии интенсивных подкоровых (мантийных) газово-тепловых потоков (флюидов), содержащих в своем составе в разных соотношениях прежде всего многие летучие и подвижные компоненты (углекислоту, галоиды, щелочи, кремний и др.), а также некоторые другие элементы.

Ареалы развития кислого магматизма, проявленного в орогенные этапы развития, как в интрузивной, так и вулканической формах, связаны с палингенезом в пределах гранито-метаморфического слоя геоантиклинальных блоков, в которых возникали внутрикоровые магматические очаги, давшие эти образования. В ряде случаев от них по зонам секущих глубинных (сквозных) разломов отходили своеобразные «апофизы» гранитной магмы в соседние блоки, где они обеспечивали локальное проявление постмагматической деятельности.

Развитие мантийного магматизма (диабазов-базальтов, лампрофиров, сиенитов, фонолитов, кимберлитов, карбонатитов и др.) в интрузивной, вулканической или дайковой формах и признаки проявления восходящих подкоровых (мантийных) флюидов — разновозрастных минеральных ассоциаций карбонатов, а также натрия, кремния и др. — было гораздо шире в пространстве и по продолжительности во времени, чем проявления внутрикорового гранитоидного магматизма с его минерализацией. Про-

явление мантийных флюидов с разной интенсивностью и при разном температурном режиме предшествовало рудообразованию, а также происходило одновременно с этими процессами и после них. С ними вполне могло быть связано образование гидротермальных растворов.

В процессе длительной эволюции магматизма разного состава и происхождения, по единого тектоно-магматического цикла развития в пределах урановорудных провинций устанавливается вполне определенная закономерность в его проявлении как в пространстве (в тектонических структурах), так и во времени (по этапам). В соответствии с этим обнаруживаются различные соотношения и разные формы связи магматизма и уранового оруденения.

В целом в проявлении основного (подкорового) и кислого (внутрикорового) магматизма намечается общая тенденция чередования по этапам развития и приуроченность к определенным глубинным структурам земной коры (тектоническим блокам, зонам и др.). Развитие основного магматизма гораздо шире, продолжительнее и связано с более глубинными (подкоровыми) очагами. Развитие кислого магматизма — относительно более локально и менее продолжительно и связано с вутрикоровыми очагами и структурами.

Последовательное чередование и перекрытие во времени и пространстве проявлений основного магматизма по сравнению с кислым свидетельствует о том, что подкоровые магматические очаги еще продолжали свое развитие, когда коровые уже прекратили, т. е. закристаллизовались или иссякли. Формирование некоторых месторождений в пространстве и во времени совпадает или близко с проявлением позднего основного магматизма, с которым, однако, они не обнаруживают парагенетической связи. В то же время среди большого и сложного формационного ряда постмагматических месторождений, образованных в разные стадии развития и пространственно и во времени связанных с кислым магматизмом, существуют разновозрастные и разнотипные группы. Все это свидетельствует о том, что подкоровые магматические и метасоматические процессы и вызвавшие их газово-тепловые потоки продолжались гораздо дольше внутрикорового магматизма кислого состава.

Как вытекает из анализа материалов, формы связи уранового оруденения с магматизмом даже для близких пространственно-временных ассоциаций могут быть разные, далеко не всегда генетические или парагенетические. Проявления корового магматизма и постмагматических процессов находятся в зависимости от развития подкорового магматизма, отсюда происходит их чередование, одновременное или последующее развитие. Постмагматическая гидротермальная деятельность (после проявления кислого магматизма) находится под влиянием воздействия подкоровых магматических очагов и их выделявшихся флюидов.

Внедрение даек «порфиритов» (диабазов, лампрофиров и др.) регионального распространения или иногда излияния базальтоидов характеризуют собой новый и весьма важный этап развития магматических процессов в крупных глубинных структурах земной коры и верхней мантии. С одной стороны, они отображают завершение (застывание, кристаллизацию) внутрикоровых гранитоидных магматических очагов, а с другой — возобновление или продолжение активизации подкоровых

очагов основного состава, сопровождавшееся интенсивным выделением мантийных флюидов. Как правило, большинство магматических комплексов разных типов основного состава сопровождается различными карбонатными ассоциациями. Как показали исследования В. Б. Наумова и В. И. Коваленко (1985 г.), магмы основного и кислого состава существенно различаются между собой по составу главных летучих компонентов. Для основных магматических расплавов весьма характерно наличие больших количеств углекислоты и почти полное отсутствие воды, в газовом составе кислых магм, наоборот, преобладает вода и очень мало углекислоты.

Как известно, в урановорудном гидротермальном процессе наряду с другими компонентами появляется огромное количество карбонатов, флюорита (т. е. углекислоты, галоидов и др.), поступавших по проницаемым зонам глубинных разломов скорее всего из подкоровых оболочек — либо в результате возобновления или активизации дегазации мантии (более локально на затухающем ослабленном фоне дегазации), либо в результате отделения из остывающих кристаллизующихся магматических очагов основного состава, обогащенных углекислотой и породивших на последних стадиях их эволюции эффузивы или дайки (базальты-диабазы, лампрофиры).

Для реализации источника металла дальней мобилизации из застывших ураноносных магматических очагов с большой долей «подвижной» его формы обязательно необходимо дополнительное поступление таких восходящих подкоровых флюидов извне (снизу) — в результате дегазации мантии или отделения летучих компонентов из подкоровых магматических очагов.

Размещение гидротермальных урановых месторождений в пределах таких провинций в разных тектонических блоках и в то же время сохранение основных минеральных ассоциаций, принадлежащих к тем же рудным формациям, независимо от локализации в различных вмещающих породах и структурах, свидетельствуют об однотипном или близком, глубинном (эндогенном), источнике металла. Во всяком случае, для них можно предполагать общий фильтрационный механизм извлечения урана, но, возможно, из различного субстрата.

На территории рудных провинций пространственное размещение рудных скоплений и метасоматических образований, особенности развития комплексов магматических пород в пределах различных районов (тектонических блоков), зон и узлов, в которых длительно и унаследованно проявились глубинные тектоно-магматические и метасоматические процессы, свидетельствуют о том, что все предшествующее постмагматическое оруденение W, Sn, Mo, Au, Pb-Zn-Ag, Sb, F и других месторождений образовалось из поднимавшихся снизу потоков флюидов. Урановые месторождения, образованные, как правило, после этих рудных формаций, не составляют исключения, везде устанавливается, что в их формировании преобладали восходящие потоки.

Движение рудоносных растворов в различные этапы формирования урановых месторождений, залегающих в экзоконтактах интрузивов и находящиеся в крупных тектонических узлах в целом, было ориентировано снизу вверх в вертикальном или близком к нему направлении и проис-

ходило преимущественно по системе наиболее приоткрытых поперечных (по отношению к основным складчато-разрывным дислокациям и интрузивам гранитоидов) разрывов. Лишь в приповерхностных частях месторождений, в зависимости от условий залегания вмещающих пород и их общей структуры, потоки имели возможность локально растекаться в субгоризонтальном направлении. В связи с таким направлением движения растворов они могли заимствовать уран только по ходу циркуляции из подстилающих на глубине пород. При таких гидродинамических условиях взаимодействие растворов с вмещающими породами (например, углеродистыми сланцами), имеющими хотя и высокие содержания урана, но сравнительно небольшую мощность и ограниченную распространенность на глубину, пространственно было крайне ограничено. К тому же резко гетерогенное строение таких толщ и фациальная изменчивость их литологического состава, а также интенсивная и сложная их дислоцированность весьма затрудняют получение представительных данных фоновых содержаний урана для пород по району. Поэтому достоверно судить о наличии зон «выноса» урана в этих породах не представляется возможным.

Восходящие гидротермальные растворы имели гораздо большую возможность (по сравнению с вмещающими углеродистыми сланцами) взаимодействовать с залегающими под всеми месторождениями гранитами, которые имеют огромные объемы, характеризуются повышенными концентрациями урана и высокой долей его «подвижной» формы. Поэтому значение гранитоидов, как наиболее вероятного источника урана на глубине, во много раз больше по сравнению с другими породами.

Анализ геолого-структурных условий формирования и локализации уранового оруденения на месторождениях в пределах рудных провинций дает основание считать, что динамика ураноносных гидротермальных растворов в их пределах имела в целом восходящий характер. Это показано, например, для жильных месторождений Б. П. Власовым и другими [19]. Преобладающий восходящий вектор движения в целом подтверждается результатами термобарометрических исследований Г. Б. Наумова и В. Б. Наумова [77, 80]. Потоки гидротермальных растворов, по-видимому, поднимались снизу вверх по зонам трещиноватости пород в пределах крупных тектонических узлов, образованных пересечением зон продольных межблоковых и поперечных трансблоковых глубинных разломов. Такие участки совпадают с зонами разуплотнения пород, установленных по геофизическим данным. Наименьшей плотностью и сравнительно наибольшей проницаемостью здесь обладали интрузивы гранитоидов, распространяющиеся на большую глубину. Особенно проницаемыми для растворов были их эндо- и экзоконтактовые зоны, в пределах которых резко возрастала трещиноватость.

Ураноносные гранитоиды, залегающие на глубине под урановыми месторождениями рудных геоантиклинальных блоков, слагают крупные плутоны и обладают относительно более высокой, чем вмещающие метаморфические толщи, проницаемостью. Они вполне могли служить дополнительным источником урана при проникновении сквозь них восходящих потоков флюидов. Однако наличие таких гранитоидов, видимо, было еще недостаточным для образования ураноносных растворов и соответ-

ственно месторождений. Граниты распространены на глубине большей части блоков, в пределах которых широко проявились различные, в том числе ранние (доурановые), постмагматические процессы. Однако урановые месторождения, сформированные в более поздние стадии, распространены весьма локально только в определенных тектонических узлах. Следовательно, источником урана могли быть не только интрузивы гранитоидов, развитые на глубине под месторождениями. К тому же отчетливых следов «выноса» урана из гранитов в мощных зонах (т. е. широких и уходящих на глубину зон со сниженными или контрастно дифференцированными фоновыми концентрациями урана при сравнительно постоянных содержаниях тория) под месторождениями или вокруг них далеко не всегда удается установить. Имеются лишь отдельные участки перераспределения урана, а также намечается общая тенденция снижения содержаний его в эндоконтактах. К сожалению, радиогеохимическая характеристика глубоких частей интрузивов гранитов обычно весьма ограничена и имеющиеся данные далеко не всегда представительны.

Значительные по масштабам зоны перераспределения и частичного выноса «фонового» урана из гранитоидов, ультраметаморфических и метасоматических образований фундамента установлены И. С. Модниковым и др. [75] в результате детальных геологических, петрографических и радиогеохимических исследований на одном из месторождений молибден-урановой формации, локализованном среди вулканогенных толщ рудной провинции позднемезозойского заложения.

По данным этого автора, в наиболее ранние доорогенные этапы развития (в конце позднего протерозоя, в раннем и позднем палеозое) — задолго до проявления позднемезозойского вулканизма, в пределах этого блока континентальной земной коры интенсивно проявились различные рудоподготовительные процессы. Среди них — ранняя гранитизация, связанная с купольным ультраметаморфизмом, интрузивный гранитоидный магматизм и мощный кремний-калиевый метасоматоз, каждый из которых сопровождался привносом и накоплением радиоактивных элементов. Некоторые из продуктов этих процессов характеризуются высокими (до 20—35·10^{-4}%) содержаниями урана и большей долей (до 50—60%) «подвижной» формы его. При этом ураноносные акцессорные минералы, представленные тонкой вкрапленностью уранинита и др., сосредоточены преимущественно в биотите.

Непосредственно в дорудный и рудный (орогенный) этап широко и интенсивно проявилась многостадийная постмагматическая гидротермальная деятельность, причем восходящие потоки флюидов как кислотных, так и щелочных свойств отличались весьма агрессивным характером, были способны выщелачивать металл из пород и переносить его на значительные расстояния вверх по восстанию. В породах фундамента здесь установлены многие признаки проявления этих процессов. На глубине под месторождением в гранитоидах выявлены широкие и протяженные зоны, распространяющиеся на большую глубину, которые характеризуются контрастно дифференцированным содержанием металла, а участками (обычно воронкообразной формы) установлен значительный (до 15—20%) вынос его из этих пород. В некоторых местах содержания урана падают до 1·10^{-4}% и даже по n·10^{-5}%.

В зонах выноса среди гранитоидов наблюдается выщелачивание из биотита не только уранинита и других акцессорных минералов, но и отчасти породообразующих кварца и алюмосиликатов, причем этот процесс сопровождается образованием кавернозности, заполнением мелких пустот или замещением минералов гидрослюдой, а также кальцитом, кварцем, флюоритом и др. Обычно такие участки обрамлены широкими зонами с резко дифференцированными содержаниями урана.

Богатые руды подобных месторождений содержат нередко привнесенный радиогенный свинец. По данным О. В. Андреевой и В. А. Головина (1968 г.), рудные тела, как правило, сопровождаются ореолами гидрослюдизации и нередко околопрожилковой альбитизацией. На глубине, под месторождением также отмечается альбитизация пород, которая далеко не всегда несет урановое оруденение.

Конечно, только этими данными нельзя объяснить происхождение высокой ураноносности гидротермальных растворов, сформировавших контрастные рудные тела промышленных урановых месторождений. Однако дополнительным и нередко даже весьма значительным источником урана фильтрационного (глубинного) типа подобные породы фундамента вполне могли служить.

В то же время хорошо известно, что содержание урана в интрузивных массивах гранитоидов практически всегда выше, чем во вмещающих осадочных и метаморфических породах. Учитывая их большой объем (многие кубические километры), некоторые исследователи делают вывод, что в таких гранитах содержится столько «кларкового» урана, что его хватило бы для создания любого месторождения даже при малой доле извлечения. Однако следует иметь в виду, что в обыкновенных гранитах находится весьма мало (10—20%) «подвижной формы» урана, поскольку сосредоточен он в основном в труднорастворимых акцессорных минералах — цирконе, апатите и др. лишь ничтожная часть его находится в интерстициях. Даже при выветривании, когда из обыкновенных гранитоидов образуется дресва или глинистая кора выветривания, по данным В. В. Викторова (1980 г.), не наблюдается выноса урана. Лишь в участках проявления наложенных постмагматических процессов (в катаклазированных, трещиноватых гранитах) значительная часть металла переходит в «подвижную форму» и он может мигрировать.

В зависимости от петрологических особенностей гранитоидов, типа акцессорных минералов и характера наложенных постмагматических процессов Л. И. Симонова (1988 г.) выделяет три группы.

Первая группа включает интрузивные массивы гранодиорит-гранитной формации, в которых ведущими концентраторами урана являются сфен и ортит, неустойчивые при проявлении широко развитых постмагматических процессов. В 1 км^3 высокорадиоактивных гранитов содержится до 1,5—2 т и более урана. Под воздействием высокотемпературных постмагматических процессов, характеризовавшихся повышенной активностью фтора, сфен обычно замещается агрегатом ильменита и флюорита, а затем при пропилитизации и березитизации — лейкоксеном, нередко ураноносным. В зоне катаклаза гранитов происходит интенсивный вынос урана.

Ко второй группе относятся слабо эродированные интрузивные мас-

сивы высокоурановоносной лейкогранитной формации, подвергнутые частичной постмагматической биотитизации, интенсивной грейзенизации и березитизации. Биотитизация этих специализированных гранитов сопровождалась дополнительным привносом урана и концентрацией его в виде мельчайших включений циртолита, уранинита, фосфатов редкоземельных элементов и др. Под воздействием последующих процессов кислотного выщелачивания происходил частичный вынос урана из этих микровключений. Из 1 км^3 внешней зоны таких метасоматитов по биотизированным гранитам в гидротермальный раствор могло переходить до 6 тыс. т. урана.

Наконец, третья, наибольшая, группа включает массивы других типов гранитоидов, в которых основная часть урана находится в труднорастворимых акцессорных минералах магматического происхождения — в цирконе, апатите, монаците и др. Такие граниты, особенно при отсутствии метасоматических изменений, вряд ли могли служить источником урана в гидротермальных растворах.

Из изложенного видно, что гранитоиды могут служить источником урана в зависимости от формы его нахождения в породе. Если в гранитах присутствуют урансодержащие акцессорные минералы (циркон, апатит и др.), то при наложенных поцессах, как правило, не происходит выноса урана. Если в породе присутствует уранинит или другие легко растворимые формы переотложенного урана, сосредоточенного обычно в интерстициях породообразующих минералов, то при наложенных процессах происходит его вынос или новое перераспределение. Высокое содержание «подвижной формы» металла в гранитах (до 50% и более), которая обычно фиксируется низким торий-урановым отношением, как правило, обусловлено «наложенным» ураном (за счет привноса или перераспределения). Такие породы, обычно измененные, очевидно, могли быть фильтрационным источником урана в гидротермальных растворах.

Закономерности пространственного размещения уранового оруденения в пределах рудных провинций, приуроченность главных гидротермальных урановых месторождений разных типов к определенным рудоносным структурам (тектоническим блокам разных масштабов и этапов формирования — геоантиклинальным и инверсионным поднятиям, орогенным сводовым сооружениям и т. п.), пространственная связь многих из них с магматизмом (гранитоидным, вулканическим) и локализация в зонах долгоживущих разломов, а также время формирования (принадлежность к определенным металлогеническим эпохам) однозначно свидетельствуют об эндогенном коровом источнике урана и глубинном происхождении ураноносных растворов.

Признаки возрастного отрыва гидротермального уранового оруденения от магматизма

Урановые месторождения жильного и штокверкового типов, широко развитые в пределах срединных массивов палеозойских геосинклинальных систем Средиземноморского складчатого пояса Европы, тесно ассоциируют с интрузивами орогенных гранитоидов герцинского тектономагматического цикла (см. рис. 1, 4, 5). Наиболее вероятным для них считается

магматический источник и происхождение рудоносных растворов предполагается из «остаточных» расплавов застывших гранитоидных магматических очагов, обогащенных многими, в том числе ураноносными, акцессорными минералами и летучими компонентами. Как уже отмечалось, эти месторождения обнаруживают отчетливую пространственную и структурную связь и геохимическое родство с подобными гранитоидами. Однако разрыв в возрастных соотношениях поздних проявлений кислого магматизма и уранового оруденения, судя по геологическим данным и определениям абсолютного возраста, варьирует в разных рудных провинциях и районах в широких пределах от 0—10 млн лет до 50—70 млн лет.

В провинциях Франко-Чешского срединного массива наряду с временной близостью между проявлениями поздних процессов гранитоидного магматизма и уранового рудообразования в одних рудных районах (геоантиклинальных блоках) устанавливается незначительный разрыв во времени, в других — этот разрыв существенно увеличивается. Особенно значительный разрыв наблюдается при наличии на некоторых месторождениях полихронного уранового оруденения разных металлогенических эпох.

Герцинский гранитоидный интрузивный и кислый эффузивный магматизм, представленный в пределах Франко-Чешского срединного массива тремя разновозрастными интрузивными и вулкано-плутоническими комплексами, развивался под воздействием интенсивных глубинных газово-тепловых потоков длительно (60—80 млн лет) и обнаруживая зональную латеральную миграцию во времени и пространстве от ядер массива по блокам к его периферии. Завершался магматизм в разных рудных районах далеко не одновременно. При этом следует учитывать, что магматический очаг не был единым, а главные — наиболее крупные из них — были сосредоточены в «гранито-метаморфическом» слое преимущественно в пределах геоантиклинальных поднятий (блоков) и развивались также не одновременно. В центральных ядерных блоках срединного массива гранитоидный магматизм завершился в позднем карбоне (340—320 млн лет), в промежуточных блоках (340—280 млн лет), в краевых блоках континентальный наземный вулканизм продолжался до конца ранней перми (270—260 млн лет). Наиболее отчетливо зональное развитие орогенного магматизма устанавливается в Чешском массиве. Такая же зональность намечается в Центрально-Французском и других массивах.

Для многих рудных провинций характерно полихронное урановое оруденение, однако главным является позднепалеозойское (герцинское) [87].

Как уже отмечалось, герцинские (главные) гидротермальные месторождения урана, развитые в разных рудных повинциях и районах Франко-Чешского срединного массива и других массивов палеозойских складчатых областей Европы, локализуются как в экзоконтактовых зонах гипабиссальных интрузивов разновозрастных герцинских гранитов, так и среди самих гранитоидов в их эндоконтактах. При этом часть месторождений залегает в наиболее поздних, а некоторые в более ранних гранитах, подвергнутых эрозии еще до проявления урановорудных процессов (галька этих гранитов и их контактовых роговиков содержится в конгломератах

нижней перми). Существуют также гидротермальные урановые месторождения, не обнаруживающие видимой связи с гранитоидами. Судя по ареалам развития гранитов и кислых эффузивов, магмообразование в пределах «гранито-метаморфического» слоя земной коры было не сплошным, т. е. не в едином магматическом очаге под всей рудной провинцией, а происходило в отдельных очагах (тектонических блоках). Однако все эти месторождения, несмотря на различные условия залегания, относятся к единой урановорудной формации и везде имеют один и тот же раннепермский (P_1^2), но постгранитный и постдайковый геологический возраст и близкий изотопный (280—260 млн лет) возраст уранового оруденения.

В связи с этим временной разрыв между проявлением магматизма и уранового рудообразования в разных районах весьма различный. В одних блоках эта урановорудная формация наиболее близка по возрасту к самым поздним герцинским гранитам. Разрыв во времени их образования здесь не превышает методической ошибки определения возраста (т. е. 10—25 млн лет). В других блоках, где молодые граниты не проявлены, урановое оруденение той же формации и того же возраста оторвано от времени становления гранитоидов уже на 70—50 млн лет. Временной разрыв между проявлением процессов кислого магматизма и рудообразования подтверждается также целым рядом геологических событий.

В позднеорогенный этап (P_1), уже после завершения гранитоидного магматизма, местами даже после размыва апикальных частей крупных интрузивов, но до образования герцинского уранового оруденения произошли значительные сбросовые и сдвиговые перемещения по отдельным наиболее крупным тектоническим зонам глубинных разломов поперечного направления. В этот же этап в разных районах произошло внедрение многочисленных даек поздних диабазов и лампрофиров регионального распространения, которые скорее всего имели более глубинное (подкоровое) происхождение. Все это может свидетельствовать о том, что большая часть кислых (коровых) магматических очагов к этому времени была опустошена и уже успела в значительной степени закристаллизоваться.

Обращает на себя внимание, что в поведении радиоактивных элементов, особенно урана и тория, в процессе эволюции гранитоидного магматизма устанавливается отклонение от общей закономерности их накопления в продуктах наиболее поздних фаз. В некоторых урановорудных районах, приуроченных к крупным геоантиклинальным блокам, среди ураноносных гранитоидов разновозрастных герцинских комплексов намечаются две взаимно противоположные тенденции распределения этих элементов по фазам — прямая (по восходящей линии) и обратная (по нисходящей линии). В гранитах более раннего комплекса (340—320 млн лет) наблюдается обычное увеличение концентрации урана и тория от ранних фаз к поздним. В то время как в гранитах позднего комплекса (300—285 млн лет), наиболее близкого по возрасту к урановому оруденению, намечается уменьшение содержаний урана и тория от ранних фаз к поздним.

По-видимому, обе эти тенденции в распределении радиоактивных элементов в гранитоидах разных комплексов и фаз отображают их по-

ведение в процессе кристаллизации не только в интрузивах, но и в самих магматических очагах на разных этапах и стадиях их эволюции. Обратная тенденция может быть связана с эманационной дифференциацией и выносом урана на ранних стадиях становления.

Все эти данные показывают, что урановые месторождения, ассоциирующие с ураноносными гранитами, не всегда имеют прямую парагенетическую связь с кислым магматизмом, а связь с его интрузивами обычно более сложная — в основном пространственная и структурная.

Разновозрастные рудные формации объединяются в три группы, которые сформировались в течение позднегерцинской, позднекиммерийской и альпийской металлогенических эпох.

Рудные формации герцинской эпохи образуют два разновозрастных формационных ряда, наиболее ранний из которых связан с позднекарбоновым, а более поздний с пермо-карбоновым или раннепермским комплексами гранитоидов [87]. Первый из них включает: а) магнезиальные и известковые скарны с магнетитом, шеелитом и сульфидами; б) локально развитые грейзены (кварц-мусковитовые и турмалиновые) с кварц-вольфрамитовыми жилами; в) кварц-колчеданные (местами с золотом) жилы. Урановой минерализации не обнаружено. Абсолютный возраст 340—320 млн лет.

Второй ряд объединяет (от ранних к поздним): а) известковые скарны с шеелитом, касситеритом и сульфидами; б) грейзены с касситеритом, топазом, флюоритом, литиевыми слюдами и др., кварц-касситеритовые жилы; в) кварц (сидерит, доломит)-сульфидные (Pb, Zn, Ag, Sb, As, Bi) и жилы с березитами; г) кварц-калишпат-флюоритовые жилы с березитами; д) кальцит (кварц, хлорит)-настурановые и кварц·(флюорит-барит)-коффинитовые жилы с березитами. Сюда по-видимому, относятся прожилково-вкрапленные руды, титанаты урана, коффинит с кварц-хлорит-альбитовыми метасоматитами. Однако не исключено, что последняя ассоциация является более молодой. Абсолютный возраст 310—270 млн лет.

Рудные формации позднекиммерийской эпохи связаны с предпозднемеловой тектонической активизацией и, предположительно, с проявлением щелочного и основного магматизма: а) кварц-анкерит-сульфидная и кварц-доломит-настурановая с селенидами или арсенидами в гидрослюдизитах; б) кварц-флюорит-баритовая с сульфидами в аргиллизитах; в) «пятиметальная», или арсенидная, иногда с настураном. Абсолютный возраст 150 и 120—100 млн лет.

Рудные формации альпийской эпохи связаны с миоцен-плиоценовой тектоно-магматической активизацией и пространственно и во времени с проявлением основного и щелочно-основного магматизма (абсолютный возраст 30—20 млн лет).

В длительном (50—60 млн лет) проявлении многоэтапной и многостадийной постмагматической пневматолитовой и гидротермальной деятельности герцинской эпохи также устанавливаются значительные перерывы во времени, существенные изменения в составе растворов и структурной обстановке. Сложные и различные по составу, относительному возрасту и условиям образования многочисленные рудные формации герцинской металлогенической эпохи, создающие в пределах рудных провин-

ций по крайней мере два рудно-формационных ряда, разделены между собой этапами внедрения гранитоидов и даек. Урановое оруденение проявлено только в наиболее позднем рудно-формационном ряду, в котором оно занимает вполне определенное последнее место и который также имеет непрерывно-прерывистый характер. При этом в одних районах этот ряд почти непрерывный, в других блоках он отчетливо прерывистый.

Наиболее тесно в этом ряду низкотемпературное урановое оруденение связано лишь с близкими к нему по времени образования и некоторым минералогическим особенностям средне-низкотемпературными сурьмяными, свинцово-цинковыми и флюоритовыми месторождениями, которые широко проявлены в разных геоантиклинальных блоках срединного массива и нередко по секущим (сквозным) тектоническим зонам распространяются в соседние прилегающие прогибы.

В то же время ранние скарновые и грейзеновые (вольфрамово-рудные и оловорудные) формации, наиболее тесно (генетически) связанные с разновозрастными комплексами гранитоидного магматизма, в некоторых рудных районах (блоках) проявлены либо неполно и слабо, либо вообще не проявлены. Поэтому здесь урановое оруденение оторвано в пространстве и во времени от ранних стадий и этапов минерализации, а также от магматизма. Весьма характерно отсутствие урановой минерализации (кроме незначительных количеств акцессорного уранинита в некоторых грейзенах) во всех доурановых, как высокотемпературных, так и среднетемпературных образованиях. Все это свидетельствует о том, что в ранних порциях постмагматических флюидов уран вряд ли переносился в ощутимых количествах.

Это также подтверждается общими закономерностями распределения разновозрастных рудных формаций герцинской металлогенической эпохи, пространственной разобщенностью многих из них и зональностью в размещении месторождений. Анализ последовательного развития разновозрастных рудных формаций во времени и в пространстве, изменения их состава (минеральных ассоциаций) показывают, что далеко не все из них обнаруживают тесную связь с магматизмом, единство происхождения растворов (флюидов) и источника металлов.

Высокотемпературное редкометальное (W, Mo, Sn, Be, Li и др.) оруденение ранних этапов и стадий проявления постмагматической деятельности приурочено к геоантиклинальным блокам и особенно к их орогенным сводовым поднятиям, в пределах которых сосредоточены поздние гранитоиды и которые характеризуются относительно повышенной мощностью «гранито-метаморфического» слоя земной коры. Скопления месторождений, рудопроявлений и точек минирализации наиболее ранних рудных формаций (W, Sn) образуют близизометричные овальные ареалы центрального типа вокруг гранитов соответствующих комплексов, с которыми они тесно связаны генетически или парагенетически. Формирование этих редкометальных месторождений происходило непосредственно вслед за внедрением богатых летучими компонентами гранитов их поздних фаз и даек I и II этапов на общем фоне проявления наиболее интенсивных галоидных (B, F, Cl) потоков, содержащих также K, Si и др. В результате из кристаллизующихся магматических очагов уже на этой стадии была удалена значительная часть летучих компонентов.

По мере развития последующих рудообразующих процессов, проявленных уже в средне- и низкотемпературных условиях, при другом структурном плане, после внедрения даек диабазов и лампрофиров, изменился не только состав рудных компонентов, но и анионный состав рудоносных растворов. В них наряду с флюоритом и кварцем появляются карбонаты, барит и др. Продукты этих процессов уже не обнаруживают такой тесной связи с интрузивами гранитоидов, не подчиняются отмеченной выше закономерности, а имеют иное (линейное или линейно-узловое) пространственное распределение. Скопления более поздних рудных формаций (Pb—Zn—Ag, Sb, F) образуют протяженные линейные рудные зоны, которые отчетливо контролируются продольными межблоковыми и поперечными трансблоковыми глубинными разломами, ограничивающими и рассекающими разные тектонические блоки (в том числе рудоносные геоантиклинальные). В еще большей степени это относится к наиболее поздней урановорудной формации. Однако при наложении на более ранние формации в некоторых участках (крупных долгоживущих тектонических узлах сочленения разломов) происходит их пространственное совпадение с образованием комплексных рудных полей, создающих впечатление их тесной генетической связи. Месторождения этих формаций образовались из рудоносных растворов с участием соединений не только галоидов (F, Cl), но и большого количества углекислоты, которая вряд ли могла содержаться в таких объемах в гранитных магматических очагах.

Эти особенности изменения состава минеральных ассоциаций рудных формаций, геологических и физико-химических условий их образования, а также закономерности их пространственного распределения свидетельствуют о том, что все наиболее поздние рудные формации, в том числе и урановорудные, сформировались в другой (по сравнению с ранними) тектонической обстановке, уже при твердофазовом состоянии и ином газовом составе «остаточных» магматических очагов. Если некоторые из этих рудных формаций и обнаруживают связь с кислым магматизмом, то формы их связи, происхождение большей части рудоносных флюидов и механизм извлечения рудного вещества уже не были прежними. К тому же, по-видимому, большая часть растворенных в магматических очагах газовых летучих компонентов (главным образом галоидов и воды) должна была удалиться в процессе позднемагматической и ранней постмагматической деятельности. Происхождение растворов такого состава, богатых CO_2, в более поздние стадии, по-видимому, связано не столько с отделением уже закристаллизовавшихся «остаточных» гранитоидных магматических очагов, сколько в основном с поступлением новых порций потоков из более глубоких подкоровых оболочек (дегазация мантии или магматических очагов основного состава). Без поступления новых и в больших объемах порций некогерентных летучих компонентов уже иного (преимущественно углекислого или галоидно-углекислого) состава вряд ли могли возникать мощные потоки растворов, породившие совершенно новые (по составу, температуре и т. п.) месторождения. Такие растворы, очевидно, не были равновесными с обогащенными ураном «остаточными» расплавами застывших или истощенных магматических очагов.

В связи с этим наиболее вероятной представляется глубинная мобилизация урана, т. е. заимствование рудного вещества потоками под-

коровых флюидов из ураноносного субстрата, залегающего на глубине «гранито-метаморфического» слоя коры. Этот слой в рудных районах (тектонических блоках) провинций имеет обычно большую мощность и преимущественно сиалический (гранитоидный) состав с относительно повышенными, но дифференцированными концентрациями урана. Основным источником урана здесь (т. е. на глубинах 5—15 км), по-видимому, могли служить большие по объему полностью или частично закристаллизовавшиеся магматические очаги, их «остаточные расплавы». В их пределах так называемые «ущемленные» или «остаточные» растворы (?) были сосредоточены в интерстициях кристаллов породообразующих и акцессорных минералов. Такие растворы были обогащены ураном и частично некоторыми летучими компонентами (галоидами, водой). Источником металла, кроме того, могли быть залегающие на глубине ультраметаморфические (гранитизированные) породы — реоморфические гранитоиды, мигматиты, пегматиты, а также некоторые метаморфические породы (ураноносные конгломераты, песчаники, углеродистые сланцы) с высокими концентрациями урана, который находился в легко мобилизуемой («подвижной») форме. Дополнительным источником урана могли служить также расположенные на путях движения растворов крупные интрузивы ураноносных гранитоидов.

Такие выводы об однотипном эндогенном (коровом) фильтрационном источнике правомерны, по-видимому, для всех гидротермальных урановых месторождений жильного и метасоматического типов, как пространственно связанных, так и не связанных с орогенными позднегерцинскими гранитоидами и развитых в пределах разных геоантиклинальных блоков Франко-Чешского срединного массива Европейских рудных провинций.

Признаки проявления эндогенных фильтрационных процессов на месторождениях, связанных с гранитоидами

Представления о глубинном фильтрационном источнике урана в гидротермальных рудных растворах, сформировавших в пределах провинций герцинские и более молодые месторождения разных типов, базируются на следующих основных данных.

Прежде всего обращает на себя внимание, что все гидротермальные месторождения (как жильные, так и метасоматические) приурочены к единым крупным тектоническим блокам, которые длительное время (в предрудные, рудные и пострудные этапы) были подвержены воздействию интенсивных глубинных (подкоровых) газово-тепловых потоков. В результате они сложены огромными объемами метаморфических и магматических пород кислого состава, нередко обогащенных ураном, в том числе его «подвижной» формой. Для более поздних восходящих флюидов определенного состава, которые на протяжении многих километров по восстанию циркулировали в мощных проницаемых зонах разломов, имелась реальная возможность экстрагирования урана из таких пород на глубине под месторождениями.

В Центально-Европейской и других провинциях Европы (см. рис. 1) все месторождения урана, пространственно связанные с герцинскими

орогенными гранитоидами, располагаются только в пределах крупных геоантиклинальных блоков (см. рис. 2), которые имеют специфическое строение (см. рис. 3) и состав верхней части земной коры [87]. Они характеризовались длительным воздыманием и направленным к консолидации тектоно-магматическим развитием, происходившим на фоне и в результате воздействия мощных глубинных (подкоровых) газово-тепловых потоков.

Фундамент таких геоантиклинальных блоков, в которых сосредоточены гидротермальные жильные и метасоматические месторождения урана, сложен в основном мощными догерцинскими полиметаморфическими комплексами, а также разновозрастными, главным образом герцинскими, орогенными гранитоидами. Судя по геофизическим данным, блоки характеризуются повышенной мощностью (18—25 км) «гранито-метаморфического» слоя.

Среди метаморфических толщ докебрийского фундамента в этих блоках широко развиты крупные гранито-гнейсовые купола, в которых породы были подвергнуты ультраметаморфизму и гранитизации в условиях, обычно (в верхней части) не превышающих амфиболитовой фации. Некоторые из них отличаются повышенными концентрациями радиоактивных элементов, в том числе урана (5—10 до $15 \cdot 10^{-4}$%) [39].

В пределах таких блоков сосредоточены крупные гипабиссальные интрузивы более поздних калиевых биотитовых и двуслюдяных лейкократовых гранитов разновозрастных и многофазных герцинских комплексов, характеризующихся контрастной урановой специализацией. Они отличаются высокими содержаниями урана (до 10—$15 \cdot 10^{-4}$%), тория (до 30—$45 \cdot 10^{-4}$%), а также многих рудных и редких элементов и летучих компонентов. В урановорудных районах граниты характеризуются, кроме того, большой долей (до 30—50%) «подвижной» формы урана, а также весьма низкими значениями ($<2{,}5$) торий-уранового отношения за счет низкого содержания в них тория. Такие интрузивы ураноносных гранитоидов развиты практически под всеми урановыми месторождениями и распространяются, судя по геофизическим данным, на глубину 5—10 км, а в корневых частях интрузивов и гораздо более. Однако месторождения приурочены только к определенным проницаемым глубинным разломам, особенно узлам их сочленения.

Интрузивы герцинских ураноносных гранитоидов палингенного корового происхождения являются индикаторами повышенной ураноносности магматических очагов, и в то же время они отображают ураноносность глубоких частей блоков, т. е. субстрата «гранито-метаморфического» слоя коры (осадочно-метаморфических, кислых магматических и гранитизированных пород), из которого выплавлялись гранитоидные магмы.

Все эти магматические и метаморфические породы, залегающие на глубине, вполне могли служить дополнительным источником урана при фильтрации сквозь них рудообразующих флюидов.

Другими доводами, возможно главными, свидетельствующими в пользу фильтрационного типа источника, являются признаки проявления восходящих потоков, которые далеко не всегда связаны (во времени, пространстве и по составу) с кислым магматизмом и породившими его магматическими очагами.

Все имеющиеся данные показывают, что горные породы рудоносных

геоантиклинальных блоков в целом и их отдельные структуры длительное время и в различные этапы развития, особенно в постмагматические этапы, были подвергнуты воздействию подкоровых газово-тепловых потоков разного состава и интенсивности.

Устойчивое унаследованное воздымание ураноносных геоантиклинальных блоков сопровождалось интенсивным проявлением различных глубинных процессов — метаморфизма и ультраметаморфизма, гранитизации и гранитообразования, особенно герцинского гранитного магматизма в крупных сводовых структурах орогенного этапа развития, а также более позднего герцинского и постгерцинского метасоматоза и рудообразования, в том числе уранового. Все эти разновозрастные и разнотипные процессы происходили под воздействием огромных объемов газово-тепловых потоков с участием летучих и подвижных компонентов (B, F, Cl, CO_2, S, K, Na, Si и др.). На это указывает сосредоточенность в рудных блоках бор- и фторсодержащих разновозрастнах и разнотипных образований (пород и минералов — гранитизированных гнейсов, различных гранитов, пегматитов с турмалином, флюоритом, топазом, корнерупином и др.). Здесь наблюдается контрастная фторовая (содержания фтора достигают 0,1—0,2% и более), боровая и другая специализация герцинских гранитов и пегматитов, широкое развитие минералов фтора и бора (топаза, флюорита, турмалина, аксинита, людвигита и т. п.) среди ранних (доурановых), а флюорита наряду с карбонатами кварцем и другими минералами и среди более поздних (как герцинских, так и постгерцинских) метасоматических и рудных формаций. Все это также свидетельствует о том, что глубинные газово-тепловые потоки продолжались весьма длительно и широко после завершения гранитоидного магматизма и имели различный, сначала преимущественно галоидный (борфторовый или фторовый), затем галоидно-углекислый, углекислый, сернистый состав. Такие флюиды носили весьма агрессивный характер и могли выщелачивать «подвижный» уран из любых ураноносных образований (пород).

Характерной особенностью постмагматической гидротермальной деятельности является появление на поздних (средне-низкотемпературных) стадиях и весьма широкое развитие в огромных объемах наряду с галоидами различных минеральных комплексов, особенно Mg-карбонатов, а также сульфидов, при подчиненном значении арсенидов, селенидов и других компонентов (Co, Ni и др.), не свойственных гранитной магме. Примечательно, что появление или резкое возрастание потоков с этими компонентами (CO_2, S) произошло после внедрения даек подкоровой магмы (лампрофиров, диабазов), когда гранитоидные очаги на глубине рудоносных геоантиклинальных блоков в основном иссякли или закристаллизовались. Среди ураноносных карбонатных жил некоторых месторождений провинции присутствуют углеводороды (антраксолит и др.), которые также могли иметь глубинное происхождение.

Ареалы развития флюорита и карбонатов (т. е. главных компонентов, содержащих фтор и углекислоту) в жилах доурановых и урановой формации развиты в разных блоках, но в основном в блоках устойчивых геоантиклинальных поднятий. Здесь их скопления приурочены к проницаемым зонам некоторых (трансблоковых и межблоковых) глубинных

разломов, уходящих в подкоровые слои мантии. По наиболее значительным трансблоковым разломам эти комплексы минералов (F, CO_2) распространяются в соседние прогибы и далее, т. е. далеко за пределы главных коровых магматических очагов.

Количество карбонатов и соответственно потоков преимущественно углекислого состава резко возрастает в зонах межблоковых и некоторых трансблоковых разломов, т. е. главным образом в краевых частях блоков и, по-видимому, их магматических очагов. Соответственно в этих зонах резко увеличивается масштабность уранового оруденения. Подавляющее большинство урановых месторождений, причем всех наиболее значительных, сосредоточено в краевых частях блоков и, следовательно, краевых частях их магматических очагов. Внутри блоков, т. е. непосредственно над магматическими очагами, развиты лишь мелкие месторождения и рудопроявления урана.

Для рудных провинций в целом, в том числе для наиболее значительных эндогенных месторождений разных типов, развитых в их пределах, характерна полихронность проявления гидротермальной деятельности и уранового оруденения, которое формировалось не только в главную — позднегерцинскую, но также в позднекиммерийскую и альпийскую металлогенические эпохи. На некоторых урановых месторождениях кроме герцинских (275 млн лет) установлены позднекиммерийские урановые руды (150 млн лет), сформированные в эпоху позднемезозойской постплатформенной тектонической активизации примерно через 150—130 млн лет после проявления самого позднего герцинского магматизма. Эти руды также ассоциируют с карбонатами (доломитом, паранкеритом), флюоритом, баритом, кварцем, а также минералами Bi, Co, Ni, Ag, As, Se. Пространственно и структурно они обычно наследуют ранние урановорудные жилы. На некоторых метасоматических месторождениях прожилково-вкрапленное урановорудное оруденение сопровождается околорудными ореолами альбититов. Происхождение ураноносности таких жил и метасоматических образований окончательно не выяснено, по-видимому, часть уранового оруденения является переотложенной, но не исключено, что какая-то часть урана была привнесена. Однако появление молодых урановорудных ассоциаций несомненно свидетельствует о возобновлении гидротермальных процессов в тех же структурах под влиянием новых мощных глубинных потоков флюидов того же или сходного состава (т. е. содержащих CO_2, F, S, Si, Mg, Co, Ni и другие компоненты). Подобные потоки скорее всего имели подкоровое происхождение, поскольку в эту эпоху внутрикоровые магматические очаги уже полностью закристаллизовались и они вполне могли выщелачивать металл из ураноносных образований.

Результаты изотопно-геохимических и геохронологических исследований А. И. Тугаринова и др. (1976 г.) по рудам урановых и неурановых (полиметаллических) месторождений также свидетельствуют о возможном заимствовании свинца, урана и сопутствующих элементов из пород фундамента, подстилающих месторождения на глубине.

Таким образом, приведенные выше доводы и данные позволяют высказать предположение, что как магматические, так и постмагматические образования, в том числе разновозрастное урановое оруденение

месторождений, имели общую причину происхождения и возникали в результате воздействия на верхние оболочки земной коры подкоровых газово-тепловых потоков. Они также дают основание считать, что наряду с магматическим источником вполне мог иметь место эндогенный (коровый) фильтрационный источник рудного вещества (дальней мобилизации). В то же время эти данные свидетельствуют о том, что представления о магматическом источнике в прежнем понимании требуют существенного уточнения или дополнения.

Опустошенные или почти закристаллизовавшиеся магматические очаги на поздних стадиях развития (т. е. так называемые «остаточные» или «флюидные» расплавы) без поступления новых порций флюидопотоков, по-видимому, уже не могли самостоятельно и в достаточных объемах генерировать рудоносные гидротермальные растворы.

Возможный механизм и формы переноса урана

Исходя из тектонической позиции и истории развития урановорудных провинций, вполне можно предполагать, что формирование месторождений, связанных с поздними гранитоидами, происходило под влиянием единых, но трансформирующихся глубинных высокотемпературных газово-тепловых потоков. Вначале, на ранних этапах, эти флюиды, содержащие наряду с другими компонентами преимущественно щелочи, кремний, галоиды (в основном F-B), вызывали расплавление (палингенез) ураноносных метаморфических и ультраметаморфических пород «гранито-метаморфического» слоя коры и сопровождались образованием редкометальных гранитоидных магматических очагов. В дальнейшем, на поздних этапах, после снижения температуры, частичной или полной кристаллизации очагов, продолжавшиеся, но постепенно и пульсационно затухающие флюидопотоки примерно того же состава с преобладанием галоидов и углекислоты проникали на своем пути по глубинным разломам через ураноносные «остаточные» расплавы, а также через кристаллические магматические или ультраметаморфические породы, экстрагировали наиболее подвижную часть урана и превращались при своем движении выше в ураноносные гидротермальные растворы (рис. 22).

Однако конкретный механизм процесса мобилизации (переход металла в растворенное состояние), состав первоначальных высокотемпературных газовых флюидов, формы переноса и возможные содержания его при этих условиях, а также состояние субстрата (твердая фаза, расплав или их смесь), из которого происходило экстрагирование его потоками трансмагматических растворов, остаются во многом неясными и гипотетичными. В настоящее время в этом отношении можно высказать лишь некоторые общие соображения, наметить самую общую схему развития отмеченных процессов.

Как уже отмечалось, мантийные высокотемпературные флюиды в целом отличались восстановительным характером и имели сложный в основном водородно-углеводородно-углекислый состав, местами с высокими содержаниями галоидов (F, B, Cl), щелочей (K, Na), а нередко также азота, серы и примесью других газов. В отношении наличия и содержания

Рис. 22. Схема развития ураноносных тектонических блоков континентальной земной коры под воздействием подкоровых газово-тепловых потоков (в разрезе)

А — геоантиклинальные поднятия; *Б* — прилегающие субгеосинклинальные прогибы; *В* — орогенные впадины; *Г* — платформенные депрессии. Этапы развития эндогенных процессов: *I* — доорогенной многоактной гранитизации; *II* — образования внутрикоровых ураноносных магматических очагов; *III* — поздних стадий постмагматической гидротермальной деятельности; *IV* — этапы гидротермальной деятельности последующих (постплатформенных) эпох тектонической и тектоно-магматической активизации; *1* — верхняя мантия; *2—6* — земная кора: *2* — «гранулито-базитовый» слой; *3* — «гранито-метаморфический» слой; *4* — гранитизированные породы гранито-гнейсовых куполов;

калиевые граниты (*а*), пегматоидные граниты (*б*), калиевые мигматиты (*в*), плагиогранито-гнейсы (*г*), гнейсы (*д*); *5* — внутрикоровый гранитоидный магматический очаг с повышенными содержаниями урана (*а*) и летучих компонентов (*б*); *6* — закристаллизованные магматические очаги с ураноносными остаточными расплавами; *7* — складчатое основание «осадочного» слоя; *8* — молассовые отложения; *9* — платформенные отложения; *10* — глубинные (подкоровые) разломы межблоковые (*а*), трансблоковые-сквозные (*б*), внутрикоровые (*в*); *11* — векторы направления и интенсивности движения восходящих мантийных флюидов (*а*), флюидов из «остаточных магматических расплавов» (*б*), смешанных ураноносных гидротермальных растворов (*в*); *12* — участки уранового рудообразования (месторождения)

воды в мантийных магматических расплавах и флюидах не существует единого мнения.

Согласно результатам исследований И. А. Петерсилье, Л. В. Агафоновой, Г. А. Андреевой, Ф. А. Летникова, Б. О. Шкандрия, Б. Г. Лутца, А. А. Маракушева, Л. Л. Перчука и др., газовый состав верхней мантии преимущественно водородный или метаново-водородный; «гранулито-базитового» слоя земной коры — метаново-углекислый и «гранито-гнейсового» слоя — водный. В работах И. А. Петерсилье (1960, 1983 гг.) отмечается, что газовая фаза многих магматических пород подкорового происхождения, особенно агпаитовых щелочных пород, характеризуется очень высокой летучестью метана, водорода, сероводорода, причем главные компоненты газов (метан, водород, тяжелые углеводороды, окись углерода) имеют в них ювенильную природу.

По данным И. Д. Рябчикова и др. (1982—1985 гг.), в мантийных магматических образованиях присутствует вода в количествах, достаточных для создания гидротермальных флюидов.

Как показано исследованиями Ф. А. Летникова, И. К. Карпова, А. И. Киселева, Б. О. Шкандрия и др. [64, 66], в истории развития верхней мантии и земной коры флюидный режим претерпевал существенную эволюцию эндогенных систем по составу, интенсивности, температуре и давлению как в пространстве (по вертикали), так и во времени. Из верхней мантии в земную кору, в процессе мощных тектонических движений наиболее интенсивно мигрировали флюиды существенно восстановительного характера, т. е. углеводородная ветвь развития постмагматических систем. Считается, что при высоких температурах и давлении такой флюид сложного состава (с преобладанием CH_4, H_2, CO и т. п.) мог растворять и переносить на большие расстояния всю генерируемую здесь (хотя в небольших количествах) воду. В то же время высокая активность метана в верхней мантии и нижних слоях земной коры в областях активизации (но на стадиях относительного затухания тектонических движений) и особенно в зонах разломов, дренирующих верхнюю мантию, в условиях значительной концентрации фтора и хлора и низкой активности воды и кислорода, по мнению этих авторов, позволяет предполагать наличие широкого спектра галоидозамещенных соединений метана (типа CH_3F, CH_2F_2, CHF_3, CF_4 и т. п.). Такие соединения, в которых имеются главные компоненты для формирования будущих гидротерм, в более верхних слоях при повышении активности кислорода, т. е. на уровне окисленных восстановительных флюидов, должны разлагаться с образованием фтористого водорода и углекислоты.

В связи с этим, очевидно, в зонах многих глубинных разломов и особенно в крупных тектонических узлах (районах) разновозрастные горные породы, метасоматические, жильные и рудные образования обогащены фтором, бором (проявления флюорита, топаза, турмалина и др.). В этих же участках (зонах, узлах) широко развиты различные, в том числе жильные и метасоматические, магнезиальные карбонаты (доломит, парankерит и др.), проявлена интенсивная карбонатизация пород, а иногда отмечаются карбонатиты. В составе газово-жидких включений специфических минеральных фтор-карбонатных (флюорит-карбонатных) парагенезисов обычно характерны высокие содержания восстановительных флюидов.

Большая часть углекислоты скорее всего имела подкоровое происхождение и обычно была связана с проявлениями магматизма основного и щелочного состава разновозрастных, в том числе наиболее поздних комплексов (вулканогенных, интрузивных, дайковых). Об этом же свидетельствуют изотопные данные углерода. Не исключено, что какая-то часть углекислоты по-видимому, могла выделиться из подстилающих карбонатных и карбонатсодержащих пород осадочных толщ при фильтрации сквозь них газово-тепловых потоков.

Сера сульфидная, судя по результатам изотопных исследований, в основном также имела ювенильное происхождение. Однако наряду с этим незначительная часть «облегченной» серы, особенно на месторождениях, распространенных в прогибах, впадинах и депрессиях, по-видимому, могла быть заимствована из осадочных карбонатных, а также солегипсоносных вмещающих или подстилающих толщ.

В составе подкоровых флюидов, кроме того, присутствовали щелочи (натрий, калий), соединения кремния и другие компоненты.

Продвижение восходящих потоков газовых флюидов на большом пути из верхней мантии из подкоровых магматических очагов к местам разгрузки в верхних частях континентальной земной коры сопровождалось не только снижением температуры, но и естественной эволюцией в составе. В частности, преобразование флюидов и появлявшихся в них хлор- и фторзамещенного метана (CH_3F) и других подобных соединений происходило в пределах верхней части земной коры — на глубинах примерно от 15—20 км до 5—7 км, т. е. на уровне застывших гранитоидных магматических очагов. Повышение режима и активности кислорода, особенно в зонах глубинных разломов, приводило к их окислению и образованию не только углекислоты и фтористого водорода, но и, по-видимому, какой-то части воды. Здесь, очевидно, формировались основные компоненты комплексных карбонато-галоидных (с кремнием, щелочами) газово-водных растворов агрессивных свойств. Выщелачивая уран и другие элементы и смешиваясь в верхних частях в проникающими сюда подогретыми инфильтрационными водами, они создавали рудоносные гидротермальные растворы.

Такие растворы могли заимствовать уран из любого ураноносного субстрата при наличии в достаточных количествах его подвижных форм. В переносе урана флюидами и растворами, видимо, происходила определенная трансформация, т. е. имела место как бы «эстафетность» форм переноса рудного вещества. Одной из возможных форм переноса урана на ранних стадиях (на глубине), т. е. в условиях высоких температур, в связи с высокими содержаниями галоидов во флюидах вполне можно предполагать летучие комплексные соединения хлоридов или фторидов. На поздних стадиях (в приповерхностных низкотемпературных условиях) уже преобладала карбонатная форма переноса урана.

Учитывая тесную пространственную связь герцинских гидротермальных урановых месторождений с кислым палингенным магматизмом (кристаллизующимися или уже застывшими очагами), а также с глубинными (подкоровыми) разломами и проявлениями соответствующих флюидов, такой тип источника можно считать как глубинным (внутрикоровым) фильтрационным в широком смысле, так и комбинированным фильтрационно-магматическим.

Фильтрационные источники урана на стратиформных месторождениях

Фильтрационный источник рудного вещества дальней мобилизации можно предполагать для стратиформных месторождений, залегающих как в благоприятных породах складчатого основания, так и в красноцветных и сероцветных угленосных молассах орогенного яруса или в осадочных отложениях платформенного чехла. Многие из этих месторождений, как правило, не обнаруживают видимой связи с магматизмом. Обычно их относят либо к телетермальным, либо к сложным эндогенно-экзогенным, т. е. «полигенным».

Особое значение среди них имеют рудные залежи стратиформных урановых месторождений, локализованных в черных (углеродистых или углеродсодержащих) сланцах складчатого основания. Вопросы генезиса и источника урана подобных месторождений являются наиболее сложными и во многом нерешенными (дискуссионными), они неоднократно разбирались в печати [22, 23, 56, 97]. Большинство исследователей считают их «полигенными», в образовании которых принимали участие осадочные, метаморфические, гидротермальные и гипергенные процессы. Однако, по-нашему мнению, современный облик месторождений этого типа обусловлен главным образом проявлением рудообразующих процессов двух типов: эндогенных (гидротермальных) с которыми связано появление первичной урановой рудоносности, и повторных гидротермальных или экзогенных (гипергенных), которые приводили к его перераспределению, а в ряде случаев — к обогащению. Для этих месторождений характерно полихронное оруденение, возникшее в результате многократного проявления рудообразующих процессов разных металлогенических эпох. При этом на протяжении длительной истории геологического развития рудных районов (узлов) неоднократно и на протяжении длительного времени возникали условия для мобилизации и миграции урана (седиментогенез, диагенез, метаморфизм пород, гипергенез), но благоприятные обстановки для промышленного гидротермального рудообразования создавались лишь в определенные интервалы времени — в орогенные этапы и эпохи активизации.

Предполагаемое наиболее раннее оруденение этих месторождений, как правило, практически нигде не сохранилось или присутствует лишь в виде трудно диагностируемых реликтов. Судя по общим геологическим данным, оно могло сформироваться в конце орогенного этапа, после проявления тектоно-магматических процессов палеозойского субгеосинклинального цикла.

В более поздние эпохи постплатформенной тектонической (позднекиммерийской) и тектоно-магматической (альпийской) активизации сформировалась основная масса промышленных руд, представленная доломит (паранкерит)-коффинит-настурановым и сульфидно (арсенидно)-настурановым парагенезисами, сопровождаемые, по данным В. А. Головина (1976 г.), С. Ф. Винокурова (1976 г.) и др., карбонатно-гидрослюдистыми метасоматитами. Иногда проявлена самая молодая пирит-марказит (гематит)-настурановая ассоциация в широких зонах аргиллизации.

Как в течение орогенного этапа, так и в условиях постплатформенной

активизации отдельные рудоносные блоки испытывали воздымание, которое сопровождалось сильной эрозией (вплоть до образования пенеплена) и развитием экзогенных процессов, формированием площадных и линейных кор выветривания. При этом в орогенный период преобладал жаркий аридный климат, обусловивший развитие красноцветов, в эпохи постплатформенной активизации ландшафтные условия жаркого влажного (тропического) климата приводили к образованию каолиновой коры выветривания. Эти гипергенные преобразования пород и руд сопровождались не только их разрушением, но и значительной миграцией урана. Количество и судьба мигрировавшего при этом металла остается не выясненной. Однако нигде эти процессы не приводили к созданию нового промышленного скопления оруденения только за счет фоновых концентраций урана в породах.

Общие региональные закономерности размещения стратиформных месторождений в разных тектонических сооружениях черносланцевых толщ, особенности развития (этапность) рудных районов, условия локализации и формирования оруденения, некоторые черты сходства с месторождениями других типов однозначно свидетельствуют о едином эндогенном происхождении основных рудообразующих процессов, приведших к возникновению этих скоплений уранового оруденения. Отчетливая приуроченность месторождений к зонам долгоживущих глубинных разломов, а наиболее значительных из них (рудных полей) — к сложным тектоническим узлам сочленения свидетельствуют о том, что они сформировались преимущественно из восходящих рудоносных гидротермальных растворов. Сложная гидродинамика этих минералообразующих растворов была обусловлена закрытыми системами различных, особенно секущих разрывных нарушений и складчатых структур проницаемых пород, перекрытых маломощным чехлом осадочных молассовых и платформенных отложений.

По данным многих исследователей, рудо- и сопровождающее минералообразование происходило при температурах 100—200° и достаточно высоком давлении растворов, которое способствовало их продвижению по крутопадающим тектоническим зонам снизу вверх, а в приповерхностных условиях они растекались вдоль пологих надвигов, покровных структур и зон межформационных нарушений.

Судя по развитию на месторождениях прожилковых и метасоматических карбонатов (Fe, Ca, Mg), сульфатов (Ca, Sr, Ba), прожилково-вкрапленных скоплений сульфидов (Fe, Cu, As, Ni), в составе гидротермальных растворов преобладали углекислота и сернистые соединения.

Продвижение растворов снизу вверх уже в приповерхностных условиях по мере проникновения в тектонически нарушенные (трещиноватые, брекчированные) участки пород, контрастных по физико-механическим и химическим свойствам, резко снижались их температура и давление, менялся состав, сопровождаемый инверсией щелочности-кислотности, что приводило к выпадению из растворов не только карбонатов и сульфидов, но и окислов урана в виде тонковкрапленного (дисперсного) и прожилково-вкрапленного настурана.

В зависимости от тектонического режима (в условиях открытых трещинных систем, по мере их вскрытия) происходило стягивание рудообразующих растворов к дренирующим тектоническим зонам (зонам повышен-

ной трещиноватости). Здесь, на глубине в первые сотни метров в благоприятной структурной обстановке и при температурах до 150—200° С рудоотложение во многом зависело от литологического состава вмещающих пород, гетерогенных по химическому составу и физико-механическим свойствам (чередование углеродистых кремнисто-глинистых сланцев, известняков и диабазов).

Агрессивные свойства кислотных растворов и восходящий их характер создавали возможность переноса (привноса) большей части урана с глубины из ураноносных пород (субстрата) гранито-метаморфического слоя коры. В данном случае для этих месторождений вполне можно предполагать фильтрационный источник урана дальней (глубинной) мобилизации. При этом не исключено также заимствование некоторого количества металла из вмещающих ураноносных пород по пути движения растворов. Однако доля участия его в создании их ураноносности остается неизвестной, но судя по многим геологическим и радиогеохимическим признакам была, по-видимому, весьма ничтожной.

Некоторые из стратиформных месторождений, локализованные в терригенных отложениях платформенного чехла, пространственно и по времени образования весьма близки к проявлению альпийского базальтоидного или щелочно-базальтоидного вулканизма, с которым связано возобновление гидротермальной деятельности. Месторождения располагаются в пределах широких и протяженных тектонических зон глубинных разломов, которые в других блоках контролируют типичное гидротермальное оруденение. Пластообразные рудные залежи локализованы среди проницаемых песчано-алевролитовых отложений, обогащенных органическим веществом и сульфидами. Дисперсные и прожилково-вкрапленные руды представлены главным образом окислами урана, ассоциирующими с сульфидами и реже с окислами железа, иногда локально отмечается уранциркониевое оруденение [120]. Возраст (U-Pb) оруденения 20—16 млн лет. Наиболее богатые желваковые или местами секущие скопления прожилковых руд приурочены к полосам трещиноватости, развивающимся над зонами крупных погребенных разломов, крутопадающих контактов разновозрастных гранитоидов и даек и т. п. В пределах месторождений во вмещающих оруденение породах установлены метасоматические изменения типа аргиллизации, а также проявление прожилков барита, сульфидов, иногда флюорита и др.

По генезису эти месторождения относят либо к экзогенным эпигенетическим («гидрогенным»), либо к смешанным эндогенно-экзогенным, либо к низкотемпературным телетермальным. Месторождения обычно располагаются в зонах глубинных разломов, в крупных тектонических узлах их сочленения, и в то же время пространственно тяготеют к рудоносным геоантиклинальным блокам. По времени образования они синхронны или весьма близки к аналогичным по составу минеральным ассоциациям (формациям) соответствующих металлогенических эпох гидротермальных месторождений, развитых в соседних рудных блоках. Возраст оруденения этих месторождений близок времени проявления магматизма основного-щелочного состава, с которым связана гидротермальная деятельность.

Вопрос об источнике урана этих месторождений в настоящее время

вряд ли может быть решен однозначно. По комплексу геологических, минералогических и других данных можно лишь наметить вероятные варианты его решения. Наиболее приемлемым вариантом по совокупности всех данных, по нашему мнению, следует считать привнос большей части металла восходящими потоками растворов снизу, из пород фундамента. Для этих месторождений вполне можно предполагать коровый фильтрационный источник урана в результате его экстрагирования (дальняя мобилизация) из различных ураноносных образований (гранитоидов, метаморфических и ультраметаморфических пород и др.), залегающих в фундаменте на глубине под месторождениями.

Таким образом, на примерах особенностей тектоно-магматического развития и металлогении полихронных урановорудных провинций, в пределах которых проявлены гидротермальные месторождения урана разных типов и возраста, имеющих неодинаковое отношение к магматизму, отчетливо намечаются 2—3 главных типа источника рудного вещества — магматический и глубинный фильтрационный, а также переходный — комбинированный.

Наряду с эндогенными постмагматическими месторождениями, которые тесно пространственно, во времени и радиогеохимически связаны с кислым коровым магматизмом орогенного или активизационного этапов развития, на их территории распространены месторождения, которые либо вообще не обнаруживают видимой связи с магматизмом, либо пространственно и по возрасту близки с проявлениями подкорового основного и щелочно-основного магматизма постплатформенных орогенных (активизационных) этапов развития.

На этом основании выделяются три группы месторождений: 1) парагенетически связанные с кислым орогенным магматизмом (ассоциирующие с гранитоидами или вулканитами); 2) вне видимой связи с магматизмом (в черносланцевых толщах складчатого основания, в альбититах (?) и др.); 3) пространственно и во времени связанные с проявлением основного и щелочно-основного магматизма (в фундаменте в зонах глубинных разломов, в платформенном или молассовом чехлах).

По комплексу геологических и некоторых минералогических данных для первой группы месторождений предполагается магматический или фильтрационно-магматический источник рудного вещества; для более поздних рудных формаций молодых эпох рудообразования — глубинный фильтрационный источник урана (дальней мобилизации).

Рудогенерирующим субстратом, который был сформирован в рудоподготовительный этап и из которого извлекался уран в рудные этапы, служили закристаллизовавшиеся («иссякшие») остаточные магматические очаги, гранитизированные породы, гранитоиды и другие геохимически специализированные ураноносные образования, расположенные на глубине в «гранито-метаморфическом» слое континентальной земной коры. Рудное вещества подобного потенциального источника урана могло быть мобилизовано и переходить в раствор только при поступлении новых порций подкоровых газово-тепловых потоков (флюидов), содержащих в своем составе углекислоту, галоиды, щелочи и другие летучие и подвижные компоненты. Проявления подобных флюидов происходило по зонам глубинных разломов в результате локальной дегазации мантии или

отделения летучих возгонов от мантийных магматических очагов. При мобилизации металла скорее всего преобладал фильтрационный механизм его извлечения. В переносе урана, по-видимому, вначале преобладали формы комплексных галоидных (фторидных) соединений, а на последних стадиях — карбонатных комплексов.

На общем фоне цикличного развития разновозрастного и разнотипного магматизма, связанного с подкоровыми и внутрикоровыми магматическими очагами, а также проявления полихронной гидротермальной деятельности и рудообразования разных металлогенических эпох намечается эволюция в происхождении источников рудного вещества и рудоносных растворов, сформировавших гидротермальные месторождения урана разных типов.

1. В постгеосинклинальный орогенный этап:

на ранних стадиях постмагматической гидротермальной деятельности основную роль играют магматические источники, на поздних стадиях или этапах формирования некоторых месторождений — фильтрационно-магматические источники.

2. В постплатформенные орогенные (активизационные) этапы главное и универсальное значение приобретает глубинный фильтрационный источник (дальней мобилизации).

Глава VI

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РУДОНОСНЫХ РАСТВОРОВ

Среди других представлений о происхождении растворов и о возможных типах источников урана следует рассмотреть альтернативные механизмы формирования ураноносных рудных растворов — представления о метаморфогенном, фильтрационном (ближней мобилизации), полигенных и подкоровых источниках.

Метаморфогенные источники

Общие представления

Рассматривая проявление процессов регионального метаморфизма и процессов образования урановых месторождений, локализованных в метаморфических и ультраметаморфических комплексах, некоторые исследователи (В. С. Домарев, Р. В. Гецева, Я. Н. Белевцев, В. А. Буряк, В. Б. Коваль, Н. П. Гречишников, Р. Д. Мортон, Г. П. Сессано и др.) приходят к выводу о том, что в природе возможно метаморфогенное вообще (и в том числе урановое) рудообразование.

Источником рудного вещества при метаморфогенном урановом рудообразовании, т. е. метаморфогенным источником урана, считаются вмещающие осадочные, вулканогенные и метаморфические породы с повышенными кларковыми (фоновыми) содержаниями металла, которые

были мобилизованы в процессе метаморфизма. Основанием для этой гипотезы послужили: пространственная связь урановых месторождений и целых районов с определенными комплексами метаморфических пород, обычно обогащенных ураном, преобладание субсогласных залежей и геохимическая общность руд и вмещающих толщ.

Прежде всего необходимо отметить, что многие аспекты точки зрения об метаморфогенном урановом рудообразовании окончательно еще не отработаны, авторы и наиболее активные сторонники ее (Р. В. Гецева, Я. Н. Белевцев и др.) постепенно изменяли (трансформировали) свои представления об условиях локализации и составе оруденения метаморфогенных месторождений урана, характере проявления процессов и вызвавших их растворов, все время расширяя и смещая многие из своих позиций в сторону постмагматической гидротермальной гипотезы. Это относится к таким вопросам, как типы месторождений, удаленность источника и расстояния миграции урана, ураноносность метаморфизуемых пород, их глубина и условия залегания, развитие околорудных метасоматитов, минералого-геохимические особенности руд, характер и относительный возраст рудоконтролирующих структур, а также происхождение и состав рудообразующих растворов.

В результате в настоящее время ими выделяются метаморфогенно-гидротермальные и постгранитизационные месторождения и растворы, которые, по существу, во многом смыкаются с постмагматическими месторождениями.

Наиболее обстоятельно представление о метаморфогенных источниках разрабатывается для месторождений, залегающих в метаморфических породах древних щитов.

Я. Н. Белевцев и его сотрудники [8, 9, 25] считают, что проведенное ими геологическое изучение месторождений и полученные результаты экспериментальных исследований дают основание рассматривать региональный метаморфизм как достаточно мощный фактор рудообразования. При благоприятных условиях он может привести к созданию промышленных скоплений урана путем мобилизации рудного вещества термальными метаморфогенными растворами из пород, подвергшихся метаморфическому изменению. Уран, рассеянный в первичных породах, мобилен в процессах всех фаций регионального метаморфизма и ультраметаморфизма (гранитизации). Как литофильный элемент, он весьма подвижен, начиная с самых низких (при температурах 100—300° С) эпигенетических образований пород. Наиболее благоприятные условия для формирования рудных концентраций урана создаются при метаморфизме более высоких фаций (преимущественно амфиболитовой).

Предполагается, что в результате проявления процессов различных типов метаморфизма пород из них в первую очередь происходило удаление воды, углекислоты и других подвижных компонентов, которые образовывали метаморфогенные минерализованные растворы, весьма близкие по составу и физико-химическим условиям к гидротермальным растворам (?). Я. Н. Белевцев (1975, 1980 г.г.), А. И. Тугаринов (1963 г.) и др., критикуя основы классической магматогенной гипотезы образования постмагматических гидротермальных растворов, подчеркивали, что первичные содержания воды и углекислоты в магмах ничтожны и что

главные источники рудообразующих горячих водных и газово-водных или гидротермальных растворов неотъемлемо связаны с более широкими процессами прогрессивного регионального динамотермального и контактового метаморфизма, а также глубинного ультраметаморфизма.

Процессы регионального динамотермального метаморфизма и ультраметаморфизма, по их мнению, вызывали также широкую миграцию породо- и рудообразующих элементов, которые во многих случаях приводили к образованию рудных скоплений, достигающих по масштабам промышленные месторождения метаморфогенного класса. Выделяя метаморфогенные месторождения урана, указанные авторы высказывают соображения о возможном метаморфогенном источнике рудных веществ и в первую очередь урана, заимствованном в результате мобилизации в процессе метаморфизма на прогрессивной стадии из ураноносных вмещающих (окружающих) пород в результате селективного растворения и перекристаллизации урансодержащих и урановых минералов. Предполагается, что метаморфические породы (растворы) из области ультраметаморфизма (на глубине) выносили и на верхних горизонтах зон глубинных разломов отлагали рудные компоненты, извлеченные из метаморфизуемых пород. Такие представления отмеченных выше исследователей, основанные вначале на наиболее ими изученных урановых месторождениях, залегающих в древних (докембрийских) глубоко-метаморфизованных комплексах пород, затем были распространены и на другие типы месторождений в провинциях фанерозойских складчатых областей.

В общем процессе метаморфизма Я. Н. Белевцев [25] выделяет три возможных этапа рудообразования. Первый этап соответствует начальному дозеленосланцевому метаморфизму, или эпигенезу. В результате миграции молекулярно рассеянного урана (неминеральных форм) образовывались преимущественно бедные пластовые рудные тела. Второй этап отвечает средним и высоким фациям метаморфизма. В миграцию вовлекались минеральные формы урана, в результате чего образовывались стратиформные и сложной морфологии рудные тела со средними и высокими концентрациями металла. Третий этап проявлялся при завершении процесса ультраметаморфизма вследствие мобилизации и переноса урана всех форм остаточными растворами по проницаемым зонам. В этот этап образовывались крупные метасоматические залежи, а также тела жильных и прожилково-вкрапленных урановых руд.

К метаморфогенным месторождениям Я. Н. Белевцев (1968, 1980 гг.) относит также скопления металлов (в том числе урана) в осадочных и вулканогенных породах, которые интенсивно перекристаллизованы процессами метаморфизма или возникали в условиях динамотермального преобразования и ультраметаморфизма. Перемещение и концентрация рудогенных элементов вмещающих пород происходили в процессе их растворения, перекристаллизации или переплавления. Важнейшими отличительными признаками метаморфогенных месторождений, по мнению этого исследователя, являются следующие.

1. Рудные залежи метаморфизованных и автохтонно-метаморфических месторождений размещаются среди метаморфических пород одинаковых

или близких фаций, развитых на больших пространствах древних щитов и фундамента древних платформ.

2. Минеральный состав рудных залежей этих месторождений аналогичен составу вмещающих пород, отличаясь только преобладанием рудных минералов и более высокими содержаниями урана, а околорудные изменения отсутствуют. Главные минеральные ассоциации в породах и рудах одновозрастны и принадлежат к одним и тем же фациям.

3. Руды этих месторождений содержат тот же набор химических элементов, что и породы, поскольку при метаморфизме происходило только их перераспределение.

4. Рудные залежи не выходят за пределы горизонтов вмещающих пород, и на месторождениях преобладают рудные тела пластовой морфологии.

5. Размещение рудных залежей и месторождений обусловлено субсогласными (пластообразными) и продольными складчато-трещинными структурами. Крупные разрывные нарушения обычно являются пострудными и секут рудные тела. Наблюдается строгое сочетание рудообразующих процессов в пространстве и во времени со складкообразованием.

Среди отличительных особенностей ультраметаморфических и аллохтонно-метаморфических месторождений Я. Н. Белевцев приводит следующие.

1. Размещение рудоносных метасоматических залежей обычно контролируется весьма протяженными складчато-трещинными структурами, которые нередко развиваются по относительно узким зонам смятия, представленным милонитами, бластомилонитами или катаклазитами, наложенными на метаморфические и ультраметаморфические породы.

2. Фронт метасоматитов достаточно широк и приводит к коренному изменению вмещающих пород, в то время как рудные образования занимают в нем относительно небольшое место.

3. Месторождения этого типа размещаются преимущественно среди метаморфических пород вблизи полей (куполов) гранитизации. При этом развитые в районе интрузии обычно имеют более поздний возраст, чем метаморфизм и рудообразование.

Как отмечает сам автор, приведенные критерии отличия метаморфических месторождений от постмагматических недостаточно определенны.

Месторождения, залегающие среди метаморфических пород и образованные из горячих гидротермальных растворов, являются конвергентными, поскольку могут быть связаны как с ультраметаморфическими, так и с постмагматическими процессами. Однако они резко отличаются по некоторым общим закономерностям размещения.

Я. Н. Белевцевым совместно с В. Б. Ковалем, Н. Т. Гречишниковым и другими его сотрудниками разработана генетическая классификация метаморфогенных месторождений урана, в которой выделено три подкласса — метаморфизованных, метаморфических и ультраметаморфических месторождений, подразделенных, в свою очередь, по термодинамическим условиям образования на типы и формации [8, 25].

Подкласс метаморфизованных месторождений объединяет такие месторождения, в которых накопление металлов (урана, ванадия, золота

и др.) в породах (углеродистых сланцах, конгломератах и т. п.) произошло до регионального метаморфизма, а в последующем они претерпели существенные преобразования в условиях различных фаций преимущественно низких температур — 100—450° С, т. е. регионального эпигенеза и зеленосланцевой фации. К этому подклассу относятся урановые месторождения карбонатно-урановой и золото-урановой формаций. Первая, залегающая среди углеродисто-кремнистых сланцев и битуминозных песчаников, образовалась в начальные и низкие фации метаморфизма (регионального эпигенеза и зеленосланцевой фации). Вторая формация, представленная древними ураноносными конгломератами и гравелитами (с браннеритовой и уранинит-настурановой подформациями), образовалась в результате преобразования пород в условиях средних и низких фаций метаморфизма.

Подкласс метаморфических месторождений включает месторождения, сформированные в процессе регионального метаморфизма пород, а в участках перемещения H_2O, CO_2 — породо- и рудообразующих (U и др.) компонентов из зон сжатия в зоны растяжения. Среди метаморфических месторождений урана выделяются три рудные формации: железоурановая, карбонат-уранинитовая, медно-урановая (сульфидно-уранинитовая и хлорит-настурановая) и редкоземельно-урановая (ортит-уранинитовая), которые образовались в условиях средних температур (450—650° С) — эпидот-амфиболитовой и высоких температур (650—1000° С) — амфиболитовой и гранулитовой фаций.

К подклассу ультраметаморфических или постгранитизационных отнесены такие месторождения урана, которые образовались из растворов, сформировавшихся при гранитизации разнообразных метаморфических пород и превращения их в мигматиты и граниты. Эти месторождения возникали на завершающих стадиях ультраметаморфизма при поступлении по проницаемым зонам гидротермальных постгранитизирующих растворов из зон ультраметаморфизма в другие участки — метаморфические породы и гранитоиды.

Среди урановых месторождений ультраметаморфического подкласса выделяются пегматитовая (титан-тантал-ниобий-уранинитовая), натрий-урановая (альбит-уранинит-урано-титановая), калий-урановая (микроклин-уранинитовая) и кремнисто-урановая (кварц-арсенид-уранинит-настурановая) урановорудные формации.

Характерной особенностью натрий-урановой формации, объединяющей большую группу месторождений урана, является тесная связь урановой минерализации с натриевыми метасоматитами. К наиболее распространенной альбит-уранинит-урано-титановой разновидности формации относится группа месторождений, которые размещаются в метасоматически измененных (альбититах и альбитизированных) гранитах, мигматитах и гнейсах. Рудные тела месторождений представлены в основном линзо- и столбообразными залежами, которые располагаются в альбититах в участках сочленения главных ветвей крупных разломов с оперяющими нарушениями, а также на крыльях синклинальных складок, осложненных изгибами и разрывными нарушениями. Температура образования урановых минералов, по данным гомогенизации газово-жидких включений, 300—200° С.

Как видно, в эту классификацию метаморфогенных месторождений вошли месторождения совершенно разных типов, возраста и генетических особенностей.

Более простая систематика урановых месторождений предложена Н. П. Лаверовым [87], который, учитывая представления Я. Н. Белевцева (1968, 1980 гг.), В. И. Казанского (1978 г.), А. И. Тугаринова (1963 г.) и других, также выделяет серию метаморфогенных месторождений древнего (докембрийского) возраста, включающую две группы: А — метаморфизованных и Б — ультраметаморфических в зонах глубинных разломов фундамента.

Среди метаморфизованных месторождений (группа А) по генетическим особенностям преобразованных пород выделяется два класса: 1 — древние прибрежно-морские россыпи (золото-урановые и торийсодержащие редкоземельно-урановые конгломераты) и 2 — древние ураноносные песчаники и сланцы (собственно урановые песчаники и торий-урановые кварциты). К ультраметаморфическим (группа Б) отнесены месторождения одного генетического класса — ураноносные метаморфогенные альбититы (железо-урановые и собственно урановые, иногда редкоземельные и апатитсодержащие).

Как уже отмечалось ранее, месторождения ураноносных альбититов, пространственно связанных и сравнительно близких по времени формирования с ультраметаморфическими комплексами пород, являются типичными гидротермальными месторождениями, вопросы источников рудного вещества которых остаются неясными и дискуссионными.

Однако процессы ультраметаморфического гранитообразования и более поздняя интрузивная деятельность в эпоху тектоно-магматической активизации по многим параметрам весьма напоминают процессы гранитоидного магматизма. Поэтому некоторые исследователи (В. А. Лучицкий, Ю. И. Половинкина, Г. И. Каляев, А. Н. Комаров, Ю. А. Мещерский и др.) высказывали соображения о постмагматическом гидротермальном генезисе этих месторождений и связывали их с ультраметагенным гранитоидным магматизмом.

Возможность мобилизации урана из вмещающих ураноносных пород в процессе метаморфизма

В качестве обоснований своих представлений о возможности мобилизации урана и других рудных элементов из вмещающих ураноносных пород в процессе метаморфизма авторы метаморфогенного рудообразования обычно приводят следующие доводы, некоторые геохимические и петрографические данные, а также результаты экспериментальных исследований.

1. Уран является легко подвижным элементом, способным мигрировать в благоприятных условиях при любых геологических процессах, в том числе при региональном метаморфизме.

2. Минеральный состав, фоновые содержания урана и формы его нахождения как в первичных (до метаморфизма), так и метаморфических породах, при этом особое значение имеет степень подвижности урана.

7 Заказ 2123

3. В истории развития любой рудной провинции устанавливаются этапы проявления интенсивного регионального метаморфизма горных пород.

4. В процессе метаморфизма происходило не только преобразование минерального состава пород, но и их дегидратация и дегазация, т. е. удаление воды и углекислоты, которые мигрировали из области высоких значений температуры и давления в области более низких параметров.

5. Представления о том, что за счет этих компонентов (H_2O и CO_2) возникала возможность создания метаморфогенных растворов, вполне сопоставимых с гидротермальными и способных не только выщелачивать и переносить уран, но и сосредоточенно стягиваться в определенные зоны, и откладывать свой груз в благоприятных геологических и геохимических условиях.

6. Низкие фоновые содержания урана в глубоко метаморфизованных комплексах пород, особенно гранулитовой фации, которые связываются с потерей урана при процессах регионального метаморфизма в связи с дегидратацией и дегазацией пород и выносом его метаморфогенными растворами в сторону более низких ступеней метаморфизма.

7. Неравномерность в фоновых содержаниях урана в породах и наличие низкофоновых разновидностей пород рассматриваются как зоны выноса металла.

8. Урановые месторождения рассматриваемого класса обнаруживают пространственную связь с метаморфическими комплексами пород и нередко характеризуются субсогласным залеганием среди них.

9. Некоторые результаты изотопно-геохимических исследований свидетельствуют о сходном изотопном составе метаморфических пород и руд.

Ураноносность метаморфических и ультраметаморфических образований в основном зависит от литологического состава и геохимических особенностей исходных пород, а также от степени их метаморфических и метасоматических преобразований. Наиболее низкими содержаниями урана характеризуются метаморфизованные вулканогенные породы основного состава, а также хемогенные (железисто-кремнистые и карбонатные) отложения независимо от их возраста ($0{,}5—1{,}0 \cdot 10^{-4}\%$). Несколько большие значения содержаний урана ($2{,}0—2{,}4 \cdot 10^{-4}\%$) имеют породы исходного илисто-глинистого состава, представленные различными кристаллическими сланцами и парагнейсами. Повышенными и дифференцированными значениями ураноносности характеризуются породы терригенных формаций нижнего протерозоя (метапелиты, алюмосиликатные и кварц-полевошпатовые породы) до $4{,}0—4{,}5 \cdot 10^{-4}\%$. Наиболее высокие содержания урана (до $6{,}7 \cdot 10^{-4}\%$) отмечаются в ультраметаморфических образованиях (реоморфических гранитах) и щелочных метасоматитах раннего протерозоя. Наблюдается рост концентраций урана в гранитоидах от более древних к более молодым, от плагиогранитов к микроклиновым гранитам, причем в последних содержание металла возрастает в 2—3 раза и более. Однако самые высокие содержания урана (до $10 \cdot 10^{-4}\%$) установлены в породах углеродистых формаций и конгломератах.

Как известно, помимо средних значений фоновых содержаний урана в метаморфических породах показателем степени рассеяния элемента

в них является коэффициент вариации (дисперсии). Метаморфизованные осадочно-вулканогенные породы характеризуются относительной однородностью распределения урана (относительно спокойной вариационной кривой). Ультраметаморфические образования (мигматиты, автохтонные анатектические гранитоиды) как с низкими содержаниями урана (плагиограниты), так и с высокими концентрациями (микроклиновые и щелочные гранитоиды) отличаются резко выраженной неоднородностью его распределения с высокими значениями коэффициента вариации (до 70% и выше).

По данным А. М. Жуковой (1974 г.), Ю. В. Герасимова (1978 г.) и др., среди докембрийских метаморфических комплексов фундамента древних щитов, характеризующихся в целом низкими, но дифференцированными содержаниями урана в породах (в зависимости от их состава и степени метаморфизма), выделяются разновидности с повышенными концентрациями. Так, среди пачки конгломератов, кварцевых и аркозовых песчаников, филлитов (метаморфизованных от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций) в некоторых районах среднее содержание урана составляет $7 \cdot 10^{-4}\%$ (на фоне $1{,}5—3 \cdot 10^{-4}\%$), а в отдельных участках в доломитах и кварцитах, возможно за счет наложенных процессов, достигает $(9—10 \cdot 10^{-4}\%)$. В породах углеродисто-терригенной формации (графит-слюдистых сланцах) содержания урана обычно не превышают $3—4 \cdot 10^{-4}\%$, а в отдельных разновидностях достигают $9{,}7 \cdot 10^{-4}\%$. Коэффициент вариации обычно составляет 30—50%, в отдельных случаях — 70%. В гранитоидах содержания урана варьируют в пределах $(2{,}5—4{,}5) \cdot 10^{-4}\%$, тория — $(15—40) \cdot 10^{-4}\%$, Th/U=5—17. В некоторых разновидностях средние содержания урана составляют $(2{,}5—6{,}5) \cdot 10^{-4}\%$, иногда достигают $9{,}2 \cdot 10^{-4}\%$, тория — $(30—70) \cdot 10^{-4}\%$, Th/U=9—15 [41].

Анализ радиогеохимических данных по метаморфическим толщам докембрия показывает, что породы гранулитовой фации метаморфизма в целом значительно беднее ураном (по сравнению с породами амфиболитовой и особенно зеленосланцевой фаций). Это может быть обусловлено как более низкой концентрацией металла в исходных породах, так и его существенным выносом при метаморфизме. Некоторое обеднение пород ураном отмечается и при переходе от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций метаморфизма. Ультраметаморфические гранитоиды, преобразованные в условиях амфиболитовой фации, обычно более ураноносны по сравнению с исходными гнейсами. Заметное обогащение ураном таких гранитов наблюдается, когда гранитизации в этих условиях, сопровождаемой калиевым метасоматозом, подвергались гнейсы с кларковыми содержаниями урана [9, 90].

Относительно повышенные концентрации урана в породах зеленосланцевой и амфиболитовой фаций (по сравнению с породами гранулитовой фации) позволяет многим исследователям считать их наиболее вероятным источником урана. При этом предполагается, что извлечение урана из пород в достаточных количествах возможно не только при относительно повышенной общей концентрации, но и особенно при достаточно высокой доле его «подвижной» формы. По данным А. М. Жуковой [41] и др., на долю «подвижного» урана в метаморфических толщах

приходится не более 25% от его общего содержания. При увеличении степени метаморфических преобразований пород от зеленосланцевой до гранулитовой фаций одновременно со снижением общей ураноносности происходит уменьшение абсолютного и относительного количества «подвижной» формы. Большая часть урана содержится в пироксене, амфиболах, биотите и акцессорных (циркон, апатит, сфен, гранат и др.) минералах и слабо выщелачивается или совсем не выщелачивается из пород. В кварце, полевых шпатах он, по-видимому, находится в шестивалентном состоянии и может выщелачиваться из них в гораздо большем количестве. Концентрация легкорастворимого урана в этих минералах при относительно повышенном содержании последних в сланцах, гнейсах и гранитоидах зеленосланцевой и амфиболитовой фаций метаморфизма позволяет предполагать, что эти породы могли служить наиболее вероятным источником урана при прохождении сквозь них растворов и в благоприятных условиях образовывать месторождения [41].

Проявление процессов метаморфизма не выше амфиболитовой фации, и последующий ультраметаморфизмом, а также калишпатизация терригенных и кислых вулканогенных пород сопровождались образованием биотитовых гнейсов и микроклиновых гранитов с повышенным содержанием общего урана и долей «подвижной» его формы.

Решение проблемы источника рудного вещества для урановых месторождений, возникших при метаморфизме, по мнению Я. Н. Белевцева (1980 г.), связано в первую очередь с изучением форм нахождения урана в суперкрустальных метаморфических толщах, поскольку от этого во многом зависит степень подвижности урана.

Как известно, уран в породах может находиться в различных формах — подвижной (в составе аутигенных, в том числе самостоятельных легкорастворимых минералов), малоподвижной (в микровключениях и составе темноцветных минералов) и неподвижной (в урансодержащих акцессорных минералах). Выяснение вопроса о различных формах нахождения урана в породах возможно только в результате комплексных исследований с применением следующих методов: а) установление содержания урана в различных минералах (поминеральный баланс); б) определение степени выщелачивания урана из пород (количество легко- и трудновыщелачиваемого металла) и в) изучение пространственного распределения урана в породе с помощью микрорадиографии и осколковой радиографии (*f*-радиографии) [25]. Формы нахождения урана в изверженных породах детально изучены Д. Нейербургом (1956 г.). Метаморфические породы древних щитов в этом отношении изучены пока весьма слабо. Некоторые данные получены А. С. Митропольским (1972, 1975 гг.), Н. П. Ермолаевым (1971, 1983 гг.) и др. по геосинклинальным отложениям и метаморфическим комплексам палеозойских складчатых областей.

Изучение содержаний урана в минералах пород хемогенной и терригенной формаций высоких фаций метаморфизма показало, что в главных породообразующих минералах сосредоточено до 60% металла и 40% приходится на акцессорные минералы-концентраторы (апатит, ортит, сфен, циркон, сульфиды, графит и др.), которые составляют около 1%.

Исследованиями многих авторов установлено, что не только общее

содержание урана в породах и породообразующих минералах, но и его «подвижной» (легкоизвлекаемой) формы уменьшается по мере возрастания степени метаморфизма, при этом наибольшее значение они имеют в породах зеленосланцевой фации и наименьшее — в породах гранулитовой фации.

Еще более высокими значениями этих параметров характеризуются продукты ультраметаморфизма, в том числе гранитоиды. Большая доля «подвижного» урана и относительно высокое (до 25%) значение отношения его к общему количеству этого элемента в таких гранитоидах свидетельствует о том, что в них преобладает шестивалентный уран, который может быть легко извлечен из пород. В связи с этим ультраметаморфические гранитоиды могут рассматриваться в качестве потенциального источника миграционноспособного металла.

Повышенные концентрации «подвижного» (легковыщелачиваемого) урана в метаморфических породах зеленосланцевой фации (по сравнению с породами более высоких фаций) и гранитоидах, по-видимому, связаны с присутствием этого элемента в основном в рассеянном состоянии.

Как считает Я. Н. Белевцев (1980 г.), уран, относительно легковыщелачиваемый из породообразующих минералов без разрушения их кристаллической решетки, может находиться либо в виде тончайшей труднодиагностируемой вкрапленности (пигментации) растворимых урановых минералов, либо в микроскопическом рассеянном состоянии в породах и минералах, что обуславливает высокую степень дисперсии. Считается, что преобладающей формой нахождения урана в породообразующих минералах (легкой фракции) метаморфических пород является молекулярное рассеяние. В темноцветных породообразующих минералах уран, по-видимому, находится в основном в изоморфной примеси, но не исключена также возможность присутствия его в рассеянной форме.

По мере усиления степени метаморфизма пород, при переходе от зеленосланцевой фации к амфиболитовой концентрация урана во всех минералах (кроме акцессорных) заметно уменьшается. В минералах пород, метаморфизованных в условиях зеленосланцевой фации, значительная часть урана находится в форме молекулярного рассеяния и поэтому в процессе региональных преобразований могла извлекаться метаморфогенными растворами. В породах гранулитовой фации метаморфизма уран концентрируется преимущественно в акцессорных минералах (циркон, апатит, сфен и др.). Некоторая часть легкоизвлекаемого урана, освобожденного при метаморфизме и находящегося в молекулярной форме, заполняет дефекты кристаллических структур во вновь образованных минеральных ассоциациях глубоко метаморфизованных пород.

На основании геологических и аналитических данных Я. Н. Белевцев [25] сделал выводы о подвижности урана при процессах прогрессивного метаморфизма, ультраметаморфизма и диафтореза.

Докембрийские первичные осадочные и вулканогенные породы, из которых образовались метаморфические комплексы фундамента древних щитов, весьма дифференцированы по содержанию радиоактивных элементов, в том числе урана. Среди слабометаморфизованных пород изначально наиболее ураноносными были терригенные породы нижнего протерозоя, промежуточное значение имеют глинистые осадки и наиболее

складчатых областей Р. В. Гецева, А. А. Дерягин [23] и др. выделяли осадочно-метаморфогенные месторождения, к которым они относили стратиформные урановые месторождения, залегающие в ураноносных черносланцевых толщах нижнего палеозоя, претерпевших региональный метаморфизм в условиях низких ступеней зеленосланцевой фации. На основании результатов минералого-петрографических и геохимических исследований вмещающих пород и руд этих месторождений, исследователи пришли к выводам, что они были сформированы в результате перераспределения повышенных фоновых концентраций урана (9—10)·10^{-4}% вмещающих углеродистых кремнисто-глинистых сланцев метаморфогенными водными растворами. Источником рудоносных растворов, в которых мигрировал уран и другие сопутствующие элементы, по их мнению, являлись огромные массы конституциональной, пленочной и капиллярной (поровой) воды, отделявшейся при региональном метаморфизме весьма низкотемпературных начальных ступеней зеленосланцевой фации из осадочных пород главным образом под воздействием одностороннего давления (стресса) при складкообразовании и рассланцевании глинисто-алевролитовых толщ. Предполагается, что эти растворы, циркулировавшие продолжительное время по различным трещинам, порам и межзерновому пространству, насыщались щелочами и летучими компонентами пород, а при повышении (?) температуры и давления приобретали способность растворять и переносить вещества, вступать в метасоматические реакции, приобретали другие особенности типичных постмагматических гидротермальных растворов. За счет мобилизованных в толще пород растворов в них образовались «свои собственные гидротермы», «мобилизаты», «регенерированные гидротермальные растворы», «псевдогидротермы», «субгидротермы» и т. д., которые в той или иной степени должны были обогащаться определенными комплексами выщелоченных из пород рудных элементов, в том числе урана [22, 23].

Г. Б. Наумовым с соавторами (1985 г.) на основании количественных петрохимических, радиогеохимических и термобарических данных, полученных при изучении жильных урановых месторождений в зонах контактового метаморфизма, предпринята попытка рассмотреть механизм миграции вещества, в том числе урана, в подобных условиях. В результате предложена геохимическая модель проявления процессов контактового метаморфизма, при котором на прогрессивной стадии возникал ореол высокоплотных водно-углекислых флюидов (компрессия) и затем его разгрузка в локальных участках трещинообразования на регрессивной стадии (декомпрессия). Авторы считают, что миграция урана осуществлялась благодаря образованию его подвижных форм при ранних рудоподготовительных процессах, мобилизации отмеченными выше флюидами и концентрации на геохимических барьерах.

Критический анализ представлений о метаморфогенном источнике рудного вещества

Анализ закономерностей размещения урановых месторождений различных типов в провинциях, заложенных и сформированных в разные этапы развития земной коры, а также анализ условий локализации урановых руд в пределах месторождений и данных по их возрасту показали, что сторонники гипотезы метаморфогенного рудообразования, к сожалению, не учитывают многих геологических данных по условиям формирования месторождений (историю развития, время и условия рудообразования, пути движения рудных растворов, возможности мобилизации рудного вещества из пород и т. д.), не придают значения большому временному разрыву (в десятки и даже сотни миллионов лет) между периодом проявления процессов метаморфизма и создания метаморфогенных растворов, с одной стороны, и этапом гидротермального рудообразования, с другой.

Поэтому представления о метаморфогенном урановом рудообразовании не могут быть приняты в таком виде. Геологическими исследованиями на месторождениях установлено, что урановое оруденение и сопровождающие его метасоматиты накладываются на все метаморфические и ультраметаморфические комплексы пород и оторваны от периода их образования значительным интервалом времени, свидетельствующим о существенной структурной перестройке и изменении геологических и физико-химических условий формирования.

Для протерозойских урановых месторождений, залегающих в древних докембрийских метаморфических комплексах, эти вопросы освещены в работах В. А. Крупенникова [30; 32], который показал, что ураноносные натриевые метасоматиты сформированы из гидротермальных растворов и наложены на все метаморфические и ультраметаморфические породы архея—нижнего протерозоя. Ураноносные альбититы, связанные с процессами среднепротерозойской тектоно-магматической активизации, резко оторваны от ультраметаморфических комплексов по времени и условиям образования. Ультраметаморфические гранитоиды, древние структурные элементы разломов и связанные с ними калиевые метасоматиты имеют возраст около 2 млрд лет и образованы в глубинных абиссальных и высокотемпературных условиях.

Ураноносные альбититы, по данным этого автора [32], имеют возраст около 1,7 млрд лет, образовались в зонах глубинных разломов среди ультраметаморфических пород после длительной эрозии уже в гипабиссальных — приповерхностных условиях. Разрыв во времени образования ультраметаморфических комплексов и натриевых метасоматитов составляет 300—200 млн лет. Эти метасоматиты вместе с предшествовавшими им милонитами и катаклазитами зеленосланцевой фации наложены на близкие к ним по возрасту гипабиссальные или приповерхностные среднепротерозойские граниты рапакиви, анортозиты и дайки пикритов и, в свою очередь, пересечены дайками габбро-диабазов, анорто-сиенитов и диабазовых порфиритов. Ураноносные альбититы образовались одновременно с формированием в среднем протерозое катаклазитов и милонитов (в зонах глубинных разломов), тектонических впадин, выпол-

ненных вулканогенно-осадочными отложениями, а также внедрением интрузивов и даек пород кислого, щелочного и основного состава подкорового происхождения [32].

Все это свидетельствует о том, что урановое рудообразование не связано с процессами метаморфизма и ультраметаморфизма, а сформировано гораздо позднее. В то же время вероятность мобилизации урана из пород метаморфических комплексов особенно гранулитовой фации в связи с низкими содержаниями, по-видимому, весьма мала.

Как уже отмечалось выше, результаты изотопно-геохимических исследований жильных и рудных минералов месторождений ураноносных альбититов дают основание считать, что в составе растворов, сформировавших их, присутствовали углекислота, сера и другие компоненты, которые имели более глубинное, скорее всего подкоровое происхождение.

Вопросы генезиса и возраста стратиформных урановых месторождений, залегающих в ураноносной черносланцевой толще нижнего палеозоя, вопросы источников рудного вещества являются очень сложными для однозначного решения и потому весьма дискуссионны. О происхождении оруденения месторождений этого типа в разное время высказывались различные точки зрения. Выдвигались осадочно-метаморфогенная, гидротермальная и инфильтрационная гипотезы. Критический разбор осадочно-метаморфогенной гипотезы этих месторождений неоднократно приводился в литературе [27, 32, 56, 97].

Геолого-структурными, минералогическими и петрографическими исследованиями установлено, что урановое оруденение этих месторождений сформировалось после складкообразования и проявления процессов регионального метаморфизма сланцевых толщ, после внедрения даек лампрофиров и диабазовых порфиритов регионального распространения, контролируется крупными долгоживущими разломами, постскладчатыми разрывными нарушениями и нередко сопровождается низкотемпературными метасоматическими изменениями вмещающих пород.

Среди сланцевых толщ, в которых локализованы месторождения, развиты разновозрастные новообразованные минеральные ассоциации, отображающие многоэтапный и многостадийный процесс минерало- и рудообразования. Среди них выделяются комплексы минеральных ассоциаций метаморфогенного происхождения, тесно связанные со слоистостью и сланцеватостью вмещающих пород и их литологическим составом, жилы и прожилки более молодых минеральных ассоциаций, весьма сходных с гидротермальными образованиями, а также минеральные комплексы явно гипергенного происхождения. Ранние метаморфогенные образования кварца, некоторых карбонатов, слюд, части моносульфидов железа, графита, антраксолита и другие совершенно не содержат парагенной с ними урановой минерализации. Более поздний комплекс минеральных ассоциаций, в том числе урановое оруденение (настуран, коффинит и др. нескольких генераций) отчетливо накладывается на все эти образования, рассекая или метасоматически замещая их. Вблизи рудных тел, судя по данным многих исследователей, вмещающие породы обычно подвергнуты различным метасоматическим изменениям, с развитием новообразованного серицита, хлорита, карбонатов и других, а также глинистых минералов, сопровождаемых нередко окислами и гидроокислами железа. Из из-

ложенного следует, что урановое рудообразование происходило после проявления процессов регионального метаморфизма.

Геологические наблюдения над пространственно-возрастными соотношениями уранового оруденения с породами разных структурных этажей и ярусов и данные геохронологических исследований, а также результаты анализа истории геологического развития района и его металлогении, сопоставления оруденения с месторождениями других типов показывают, что здесь развито полихронное урановое оруденение. Наиболее раннее оруденение этих месторождений, судя по всем данным, по-видимому, сформировалось в конце орогенного этапа палеозойского тектоно-магматического цикла и сохранилось только местами и в виде реликтов.

В более поздние эпохи постплатформенной активизации сформировалась основная масса промышленных руд, представленная доломит-паранкерит-коффинит-настурановым и сульфидно-(арсенидно)-настурановым парагенезисами среди карбонат-гидрослюдистых метасоматитов, а также иногда наиболее поздней пирит-(гематит)-настурановой ассоциацией в аргиллизитах. Это подтверждается данными абсолютного возраста [27, 87]. Как видно, урановое оруденение месторождений, залегающих в черносланцевой толще складчатого основания, никак не могло быть связано с процессами регионального метаморфизма.

Кроме того, обращают на себя внимание многие другие факты несоответствия представлений о времени и условиях проявления метаморфических процессов и истории геологического развития рудоносных структур, а также конкретной геологической обстановки формирования месторождений. Авторы гипотезы метаморфогенного рудообразования не объясняют механизма извлечения урана из вмещающих пород, не придают значения отсутствию различий по условиям мобилизации металла и его отложения практически здесь же, но в рудных зонах. При метаморфизме, особенно низких ступеней, эти процессы, согласно рассматриваемым представлениям, происходили почти одновременно, примерно в одних и тех же или весьма близких геологических и физико-химических обстановках, по-существу под воздействием одних и тех же растворов. Движение метаморфогенных растворов, очевидно, в целом имело как восходящий так и латеральный (субгоризонтальный) характер. Растворы были рассредоточены по всей толще пород и растекались по слоистости, сланцеватости, вдоль послойных и соскладчатых нарушений. В то же время на урановых месторождениях наблюдается локальное развитие метасоматитов и оруденения, свидетельствующее о более сосредоточенном движении рудоносных растворов под большим давлением вдоль зон крутопадающих разломов, уходящих на большую глубину. Промышленные рудные залежи месторождений, как и сами месторождения и рудные поля, располагаются только в пределах определенных долгоживущих структурных узлов, окончательно сформированных к концу орогенного этапа развития, а также подновленных в эпохи постплатформенной активизации.

Кроме того, судя по данным Р. В. Гецевой и А. А. Дерягина [22, 23], такие рудные элементы, как уран, молибден, медь, свинец, никель и другие, по степени подвижности являются наиболее мобильными. Однако,

как уже отмечалось, в ранних продуктах метаморфизма (метакристаллах, прожилках, стяжениях, желваках) ими не установлено каких-либо заметных следов миграции малых элементов, то есть сингенетичный уран в основном находился в инертном состоянии на всех наиболее интенсивных стадиях низкотемпературного регионального метаморфизма. Не установлено также существенных зон выноса урана из вмещающих пород при метаморфизме.

Все сказанное не отрицает возможности миграции и перераспределения многих петрогенных элементов при проявлении различных метаморфических процессов. Однако разнообразные метаморфогенные жилки и прожилки, стяжения, желваки кварца, карбонатов, слюд, метакристаллов пирита и другие не образуют крупных скоплений в структурных узлах. Они либо разбросаны по всей толще сланцев, приурачиваясь к слоистости или станцеватости, либо тяготеют к зонам надвигов, послойных и других соскладчатых нарушений. Но везде минеральные образования лишены повышенных концентраций парагенного урана. Видимо, метаморфогенные водные растворы были весьма слабо минерализованы, находились в равновесии с вмещающими породами, их циркуляция, поскольку они присутствовали в виде пленок и капель, была крайне замедленна и рассредоточена по всей толще пород. В связи с тем, что растворы не имели агрессивного характера, вряд ли они могли экстрагировать из пород уран, присутствующий в рассеянной и в основном в труднорастворимой форме. Все это не исключает, что какая-то незначительная часть «подвижного» урана могла локально перераспределяться внутри пород вмещающих толщ. Однако в данных условиях, если даже и происходила частичная миграция растворимых соединений этого элемента, то скорее всего она приводила к рассеиванию их в огромных объемах метаморфогенных и инфильтрационных вод.

Таким образом, рассмотрение представлений о метаморфогенном урановом рудообразовании и соответственно метаморфогенном источнике рудного вещества (урана), а также анализ данных, на основании которых аргументированы эти представления, позволили сделать вывод о том, что проявления процессов регионального преобразования горных пород и формирования урановых месторождений не совпадают между собой по возрасту и относятся к разным этапам развития рудных провинций. На основании полученных результатов детальных геологических исследований на всех изученных разновозрастных и разнотипных урановых месторождениях, залегающих в метаморфических породах, а также региональных работ в рудных провинциях устанавливается значительный временной разрыв проявления этих процессов. При этом показано, что образование уранового оруденения происходило в совершенно других тектонических условиях и иной физико-химической обстановке. В связи с этим не может быть поддержана точка зрения о метаморфическом источнике урана, т. е. мобилизации его из ураноносных вмещающих пород метаморфогенными растворами в процессе их регионального преобразования.

Урановое оруденение промышленных урановых месторождений, локализованных в метаморфических толщах, отчетливо контолируется постметаморфическими структурами и формировалось в орогенные

этапы развития данного участка земной коры в совершенно иной структурной обстановке. Судя по условиям проявления и относительному возрасту процессов регионального метаморфизма, охватывающих на большом интервале времени весьма широкие пространства преобразуемых толщ, метаморфогенные водные и водно-углекислые растворы были рассредоточены по всему их объему и по своему составу находились в равновесии с вмещающими породами. Эти растворы не были достаточно минерализованными, поэтому не имели агрессивного характера и не могли иметь существенных концентраций урана.

В процессе проявления регионального метаморфизма происходило лишь местное перераспределение наиболее «подвижной» формы урана. Не исключена частичная миграция его в растворимых соединениях, которые скорее всего рассеивались в метаморфогенных растворах и не приводили к формированию рудообразующих растворов.

В то же время развитие процессов внутрикорового аллохимического ультраметаморфизма (гранитизации), происходивших на глубине под влиянием мантийных флюидов, по существу весьма приближалось или перерастало в процессы переплавления пород и образования гранитоидных магматических очагов. Они также сопровождались накоплением радиоактивных элементов и летучих компонентов, что вполне могло приводить к проявлению постгранитизационной гидротермальной деятельности, в том числе к образованию ураноносных растворов, сформировавших урановые месторождения специфических типов в калишпатовых и, возможно, альбитовых метасоматитах.

Фильтрационные источники ближней мобилизации

Общие представления

Как уже отмечалось, в современной науке об урановом рудообразовании, наряду с другими известными гипотезами довольно широко распространено представление о так называемых «фильтрационных» типах источников, среди которых следует различать источники ближней и дальней (глубинной) мобилизации.

Согласно первой из них, одним из главных источников рудного вещества урановых месторождений являются различные ураноносные горные породы, с которыми урановое оруденение независимо от его генезиса тесно пространственно ассоциирует, вплоть до непосредственного залегания, и обнаруживает при этом вполне определенное геохимическое родство. Сторонники такой концепции местного или «автохтонного» источника урана уверенно считают, что металла во вмещающих ураноносных породах вполне достаточно для создания рудных залежей в результате его мобилизации любыми геологическими процессами (гипергенными, метаморфогенными, гидротермальными), при этом не требуется никакого привноса элемента извне. Как видно, это представление подкупает своей простотой и кажущейся очевидностью. С позиций подобной концепции ее авторы предлагают объяснение многих важных как региональных, так и локальных закономерностей размещения рудных полей и месторождений, пытаются решить вопросы

образования уранового оруденения, залегающего в разных геологических условиях.

Однако далеко не каждая ураноносная порода, вмещающая урановое оруденение, могла служить источником рудного вещества. Необходимо учитывать многие геологические, геохимические, физико-химические и гидродинамические особенности — условия залегания пород, их объем, наличие подвижной формы металла, пути и направления движения растворов, их агрессивность (состав и концентрация), время (этапы) формирования и продолжительность (длительность) процессов.

Как известно, представления о том, что источником рудного вещества месторождений являются непосредственно сами вмещающие их горные породы, высказывали еще многие авторы и сторонники латеральсекреционной гипотезы.

В последнее время концепция местного источника рудного вещества не только экзогенных, но и метаморфогенных и эндогенных месторождений урана развивается в трудах многих советских и зарубежных геологов (В. С. Домарева, Р. В. Гецевой, Я. Н. Белевцева, А. И. Тугаринова, Г. Б. Наумова, Н. П. Ермолаева, Б. Б. Голубева, Е. Д. Карповой и др.). Одним из аргументов в пользу таких представлений о местном источнике являются количественные расчеты по определению предполагаемых общих запасов фоновых содержаний урана в 1 км^3 горных пород, вполне сопоставимых с запасами крупных и средних промышленных месторождений, а также различные геологические и геохимические признаки миграции урана, в частности долю «подвижной» формы металла, наличие участков (зон) перераспределения, выноса и привноса.

Авторы рассматриваемой концепции объясняют эмпирические закономерности размещения не только урановых месторождений, но и многих урановорудных провинций и районов тесной пространственной связью их (приуроченностью) с областями, районами и участками (структурами) распространения различных геологических (осадочных, метаморфических, магматических) формаций, обогащенных ураном и другими рудными компонентами. Ураноносные породы, развитые на этих территориях, характеризуются высокой дисперсией их содержаний и большой долей его «подвижной» (легкомобилизуемой) формы. Так, например, Е. Д. Карпова и др., предполагают, что в 1 км^3 первично ураноносных углеродистых пород содержится не менее 40—50 тыс. т урана, причем значительная часть в легкоизвлекаемой форме, которая вполне могла служить источником при образовании стратиформных урановых месторождений.

Так, А. А. Смыслов, В. К. Титов, А. И. Тугаринов, Т. В. Билибина, В. М. Терентьев, Н. П. Ермолаев и др. на основании регионального анализа размещения урановых месторождений разных типов в весьма неоднородном радиогеохимическом поле пришли к выводу, что все ураноносные рудные провинции и наиболее важные рудные районы пространственно приурочены к «высокодифференцированным радиогеохимическим провинциям», одной из главных особенностей которых является обязательное и широкое развитие специализированных ураноносных геологических формаций. На основании выявленных подобных региональных

закономерностей эти исследователи считают, что источником урана в рудах месторождений являются обогащенные им горные породы, с которыми они пространственно ассоциируют.

Согласно представлениям сторонников этой концепции (Т. В. Билибина, Е. В. Плющев, В. Е. Кудрявцев и др.) роль различных геологических процессов в формировании урановых месторождений разных типов и классов заключалась сначала в образовании ураноносных горных пород (осадочных, метаморфических, магматических), затем в возникновении на определенных этапах геологического развития регионов (рудных провинций) благоприятных условий в результате частичного или полного эпигенетического преобразования (метаморфического, гидротермально-метасоматического или гипергенного) горных пород для перевода металла в подвижную форму, его перераспределения и мобилизации и, наконец, в создании в определенной геологической обстановке рудных скоплений — концентраций (месторождений). При этом в природных условиях возможны весьма различные варианты сочетания ураноносных горных пород как потенциального источника металла, благоприятных геологических условий (процессов) для его миграции и условий локализации уранового оруденения. По мнению этих исследователей, существуют сравнительно устойчивые ассоциации некоторых типов рудных месторождений с определенными комплексами горных пород, что может быть связано со специфическими геологическими процессами, обусловившими унаследованную и последовательную концентрацию урана в пределах локальных участков земной коры.

Неясными и потому наиболее дискуссионными в рассматриваемой концепции являются вопросы механизма мобилизации рудных элементов, в том числе урана, рассеянных в горных породах, а затем их концентрации. В качестве возможных процессов, которые приводили к извлечению урана из вмещающих пород, сторонниками этой концепции предполагаются региональный метаморфизм, постмагматическая гидротермальная деятельность и гипергенез. Соответственно такое заимствование рудного вещества из пород рассматривается в метаморфогенной, магматогенной и эпигенетической экзогенной гипотезах.

Сравнительно проще этот вопрос решается для месторождений экзогенной серии, для которых в качестве главных источников рудного вещества предполагаются либо рудовмещающие горные породы, либо морские воды, либо кислородные подземные воды метеорного происхождения. Весьма сложной представляется проблема мобилизации рудного вещества из вмещающих пород для эндогенных гидротермальных месторождений, и особенно неясным остается этот вопрос для обширной группы стратиформных месторождений полигенной серии со спорным и сложным (эндогенно-экзогенным) генезисом.

Некоторые сторонники вариантов магматогенной гипотезы, связывая формирование определенных типов рудных месторождений с постмагматической деятельностью, предполагают, что гидротермальные растворы могли обогащаться рудными элементами, в том числе ураном, либо в результате ассимиляции или контаминации пород магмой, либо в результате мобилизации их из вмещающих пород растворами, возникшими в процессе остывания и кристаллизации магматических очагов.

Представители метаморфогенной гипотезы рудообразования, как уже отмечалось, полагают, что при метаморфизме вмещающих горных пород провинций древних щитов и других типов отделяющаяся вода и углекислота вовлекали в миграцию рассеянные в них уран и другие рудные и петрогенные элементы, в результате чего могли возникать рудоносные растворы, способные формировать урановые месторождения [25]. Одним из вариантов этой гипотезы можно считать представления Н. П. Ермолаева [90] и др., развиваемые ими на примерах жильных и других ураноаых месторождений, в различных рудных провинциях герцинских складчатых областей, согласно которым ураноносные вмещающие породы сначала в процессе метаморфизма прошли соответствующие рудоподготовительные преобразования, а затем в более поздние этапы уран непосредственно заимствовался из этих пород проходящими гидротермальными растворами. Этот автор считает, что при региональном и контактовом метаморфизме на прогрессивной стадии происходило «вскрытие» горных пород в отношении ряда рассеянных в них микроэлементов, в том числе урана, т. е. перевод их в форму, способную к геохимической миграции при более поздних гидротермальных процессах на регрессивной стадии.

На основании анализа различных радиогеохимических данных многие исследователи приходят к выводам, что широкое развитие в рудных провинциях предрудных и более поздних наложенных процессов вызывало в горных породах вторичное перераспределение или перевод в легко извлекаемые («подвижные») формы, а также вынос или привнос многих рудных элементов, в том числе урана.

Как уже упоминалось, проявления высокотемпературного регионального и контактового метаморфизма разновозрастных осадочных и вулканогенных толщ приводило в целом к удалению урана из пород и, соответственно, к снижению его фоновых концентраций. При этом вторичное уменьшение содержания урана в осадочно-вулканогенных и метаморфических толщах (т. е. вынос этого элемента) происходило не только при высокой степени регионального и контактового метаморфизма (гранулитовой и амфиболитовой фациях), но и при интенсивных наложенных гидротермальных процессах, особенно типа кислотного выщелачивания (гидрослюдизации, аргиллизации, окварцевания и т. п.) или при гипергенных процессах (в коре выветривания и т. п.).

Вопросы источников урана при магматогенном, метаморфогенном и комбинированном рудообразовании детально разбираются в самостоятельных разделах, здесь мы остановимся на внемагматическом, собственно фильтрационном (ближней мабилизации) типе источника (Смирнов, 1976).

Точка зрения о внемагматическом фильтрационном источнике рудного вещества и происхождении гидротермальных урановых месторождений, выдвинутая А. И. Тугариновым [117] и развиваемая В. Л. Барсуковым, Г. Б. Наумовым и др., вообще отрицает активную рудогенерирующую роль гранитоидного и кислого вулканического магматизма в гидротермальном урановом рудообразовании. Эти авторы считают, что магматические процессы играли лишь пассивную энергетическую роль теплоносителя («нагревателя»), активизирующего гидротермальную деятельность и региональный метасоматоз вмещающих пород. При этом важное значе-

ние авторы отводят рудовмещающим комплексам пород, обогащенных ураном и другими рудными элементами (ураноносные углеродистые сланцы, конгломераты, граниты и др.), которые могли служить главным источником металла в гидротермальных растворах. Такие выводы базируются прежде всего на данных геохимических, изотопных и экспериментальных исследований вещества руд и вмещающих пород месторождений, которые свидетельствуют о возможности проявления в природе процессов экстракции урана из пород нагретыми минерализованными растворами. Кроме того, они основываются на представлении об исключительной роли углекислоты в транспортировке урана в бикарбонатных комплексах в низкотемпературных гидротермальных растворах и извлечении его из пород.

Отчасти это не противоречит некоторым минералогическим и общегеологическим наблюдениям, свидетельствующим об отсутствии отчетливых видимых связей уранового оруденения определенного типа месторождений с магматизмом.

Разновидностью гипотезы внемагматического рудообразования, предусматривающей фильтрационный тип источника (ближней мобилизации), является положение о происхождении рудоносных растворов, развиваемое в работах советских гидрогеологов (А. М. Овчинникова, А. И. Германова и др.), а также ряда канадских, французских и других зарубежных геологов. Эти исследователи, полностью отрицая магматогенное происхождение рудообразующих гидротермальных растворов, по существу возрождают латераль-секреционную гипотезу, рассматривают такие растворы как гидрогеологические потоки, подчиняющиеся в своем движении напорным градиентам приповерхностных депрессионных структур и приобретающие нередко свойства термальных растворов за счет теплового воздействия местных геотермических аномалий. Источником металла при этом могли являться также различные ураноносные породы (граниты, вулканиты, черные сланцы и т .д.), через которые просачивались минерализованные подземные воды.

Внемагматические инфильтрационные растворы, по мнению А. М. Овчинникова (1960 г.), А. И. Германова (1957 г.) и др., представляют собой подземные воды метеорного (вадозного) происхождения глубокой циркуляции. Считается, что инфильтрационные воды могут опускаться на глубину до 5—7 км и даже более, создавая в районах с высоким геотермическим градиентом подогретые геотермальные минерализованные растворы, весьма сходные с гидротермальными. В таких условиях вполне возможно смешение их с эндогенными флюидами.

По данным многих вулканологов (Д. Уайт, Г. Бато, Х. Кренг, 1957 г., С. И. Набоко, 1963 г., Е. К. Мархинин, 1958, 1964гг., и др.), в гидротермальных системах современных вулканических областей участвуют смешанные в разной пропорции растворы как эндогенные (магматогенные или ювенильные подкоровые), содержащие многие газы и другие летучие соединения, так и экзогенные (метеорные) воды. Д. Уайт, С. Мацуо, Д. С. Коржинский и многие другие отмечают, что воды и собственно другие летучие компоненты магматогенного или сквозьмагматического происхождения, смешивающиеся с метеорными водами, составляют обычно не более 5—10%. Предполагается, что именно они могли обуславливать агрессивные свойства и рудоносность образующихся гидротермальных растворов.

В. Л. Барсуков, Н. П. Лаверов и др. [119] пришли к выводам, что гидротермальные растворы, сформировавшие месторождения урана и сопутствующих элементов (Mo, Pb и др.) в районах палеовулканизма, имели в основном метеорное происхождение (т. е. из артезианских бассейнов) с небольшой примесью эндогенных газовых и жидких «термальных» флюидов.

Критически рассматривая гипотезу фильтрационных внемагматических источников рудного вещества в чистом виде, В. И. Смирнов (1974, 1976 г.) отмечал, что она не дает определенного ответа на целый ряд геологических вопросов. Вместе с тем он справедливо подчеркивал, что какая-то часть рудного вещества некоторых постмагматических рудных, особенно железорудных, урановых и других месторождений заимствуется из пород на путях движения и подъема рудообразующих гидротермальных растворов. Например, как уже отмечалось, на основании детальных комплексных исследований на одном из урановых месторождений в палеозойской вулканической области В. Л. Барсуков, Н. П. Лаверов и др. [119] сделали вывод о частичном заимствовании многих элементов, в том числе урана, из вмещающих пород. Однако основная часть металла была привнесена гидротермальными растворами. К аналогичному выводу пришел И. С. Модников, изучавший урановое месторождение, залегающее в зоне разлома среди гранитоидов фундамента под вулканической депрессией.

Все это показывает, что, по-видимому, имеется основание предполагать, что при формировании оруденения ряда урановых месторождений были возможности мобилизации урана и других компонентов из вмещающих и особенно подстилающих пород в процессе гидротермальной деятельности. Однако, не отрицая важной роли фильтрационных источников дальней мобилизации, в первую очередь при образовании стратиформных месторождений урана, не обнаруживающих видимой связи с магматизмом, следует отметить, что в процессах масштабного-гидротермального уранового рудообразования промышленного значения источники ближней мобилизации, по-видимому, имели весьма ограниченное значение лишь при наличии благоприятных условий залегания больших объемов ураноносных пород, расположенных на путях движения растворов. В результате воздействия на ураноносные породы агрессивных, но безрудных растворов (гидротермальных или гипергенных) среди них могли возникать лишь незначительные по масштабам концентрации (аномалии, проявления минерализации и т. п.). Поэтому в целом при урановом рудообразовании вряд ли можно придавать всеобщее, универсальное значение механизму экстракции урана из вмещающих пород.

Признаки мобилизации урана при формировании рудообразующих растворов

Согласно концепции местного («автохтонного») источника рудного вещества, предполагается, что ассоциации элементов в урановых рудах наследуют геохимические особенности вмещающих пород. Отсюда следует, что состав элементов — спутников урана в рудоносных зонах месторождений во многом обусловлен этими породами. Однако вопрос является весьма дискуссионным. На основании анализа геохимических ассоциа-

ций руд месторождений, залегающих в разных геологических условиях в ряде районов, сторонники этой точки зрения намечают определенную зависимость геохимического спектра руд от состава вмещающих пород. Так, в качестве примеров обычно приводятся известные ассоциации урана с молибденом, ванадием, титаном, цирконием, селеном, мышьяком, золотом, фосфором и другими элементами, которые нередко содержатся в повышенных концентрациях в породах некоторых осадочных (особенно углеродистых) формаций. Однако многие из этих элементов вполне могут иметь и другое — эндогенное — происхождение.

Выводы об источниках урана в рудоносных зонах урановых месторождений, залегающих в докембрийских метаморфических породах древних щитов, сделаны Я. Н. Белевцевым, А. П. Никольским, А. И. Тугариновым, Т. В. Билибиной, В. Е. Кудрявцевым, В. М. Терентьевым, В. К. Титовым и др., которые считают, что уран, сконцентрированный в рудах, был заимствован из вмещающих пород. Свои представления о «породном» источнике урана в рудах они обычно подтверждают разультатами специальных геохимических методов сравнительного изучения урановых руд и вмещающих пород. К сожалению, эти исследователи не разбирают механизма мобилизации металла.

На основании изучения изотопного состава свинца и геохимических особенностей руд и рудовмещающих пород жильных месторождений срединных массивов палеозойских складчатых областей, метасоматических месторождений древних и активизированных щитов и других провинций А. И. Тугаринов, Г. Е. Ордынец, Я. Н. Белевцев, и др., пришли к выводу, что источником урана в рудоносных зонах были вмещающие их горные породы.

А. И. Тугаринов (1963) высказывал соображения о том, что в рудных провинциях докембрийских кристаллических щитов и срединных массивов палеозойских складчатых областей источником рудного вещества урановых месторождений служили либо древние конгломераты (в первом случае), либо углеродистые сланцы нижнего палеозоя (во втором случае), характеризующиеся повышенными содержаниями этого металла. В подтверждение этих представлений обычно приводились данные по изотопному составу свинца. Однако в пределах этих провинций известны многие урановые месторождения и целые урановорудные районы, которые залегают в другой обстановке и с этими породами не обнаруживают никакой пространственной связи.

Как уже отмечалось, Белевцев Я. Н., Жуков Ф. И. и др. в подтверждение своих представлений об источнике рудогенных веществ для метаморфогенных железо-урановых и натрий-урановых месторождений, залегающих в зонах развития щелочного метасоматоза среди различных докембрийских метаморфических толщ древних щитов, приводят данные по результатам изотопно-геохимических исследований вмещающих пород и минералов руд.

На основании полученных ими данных о характере изменения изотопного состава свинца, углерода, серы, кислорода в метаморфических и гидротермальных минералах, а также результатов экспериментальных исследований эти авторы приходят к выводу о единстве источника урана рудоносных растворов, сформировавших урановые месторождения разных

типов, которые пространственно разобщены и залегают в различной геологической обстановке. Вместе с тем они считают, что, судя по наиболее высоким средним значениям ^{206}Pb в некоторых осадочно-метаморфических породах обрамления рудоносных тектонических блоков, парапороды докембрия отличались первично-повышенными содержаниями урана. На этом основании они приходят к выводу, что уран был мобилизован из вмещающих пород разного состава и неодинаковой степени метаморфизма. Однако эти месторождения отличаются по происхождению рудных растворов.

Исходя из концепции заимствования рудного вещества из горных пород, следует ожидать вокруг месторождений или под ними наличия зон «выноса» урана, т. е. участков пород со сниженными или крайне неравномерными фоновыми его содержаниями. Для обоснования таких выводов необходимо детальное комплексное изучение всех разновидностей горных пород, развитых как в районе, так и на рудном поле и месторождении.

Однако многие авторы делают выводы о мобилизации урана из горных пород лишь на основании общих, нередко непредставительных или геологически непривязанных радиохимических данных, не сопоставляя их с результатами детальных исследований. Нередко используется фактический материал, полученный при радиогеохимическом картировании территорий урановорудных провинций с помощью полевой гамма-спектрометрии. Установленные при этом поля неоднородного распределения радиоактивных элементов в пределах известных здесь урановорудных районов обычно объясняют как своеобразную эпигенетическую зональность.

Например, считается, что выявленные в пределах рудных провинций складчатых областей урановые месторождения независимо от их генетических особенностей и геологических условий локализации оруденения (в гранитах, кислых эффузивах, осадочных породах) располагаются в зонах «привноса» урана (т. е. относительно повышенного его содержания), которые непосредственно примыкают к зонам «выноса» этого металла (относительно пониженного или дифференцированного его содержания). По мере удаления, они сменяются зонами с ненарушенными первично-конституциональными содержаниями элементов. Судя по данным содержаний урана в аналогичных породах различных радиогеохимических зон, делают вывод о том, что в рудных телах, залегающих в зонах «привноса», сконцентрирована лишь относительно небольшая часть урана, вынесенного якобы из зон «выноса».

В рудных районах древних щитов, на территории рудоносных блоков, сложенных ультраметаморфическими гранитами, В. Н. Обризанов (1974 г.) и др. выделяют положительные и отрицательные аномалии, которые обрамляют рудоносные зоны урановых месторождений в виде неправильных участков или примыкают к ним. Эти данные обычно используются в качестве одного из главных аргументов для подтверждения представлений о заимствовании урана и других микроэлементов из вмещающих пород в процессе уранового рудообразования.

К сожалению, все эти работы не сопровождались специальными детальными геологическими, петрографическими, минералогическими и геохронологическими исследованиями, поэтому их результаты не являются представительными и требуют детальной проверки.

При рассмотрении вопросов возможного заимствования урана растворами из горных пород необходимо различать два возможных варианта условий их залегания: а) вмещающие породы, в которых непосредственно размещаются месторождения (т. е. пространственно ассоциируют) и б) подстилающие породы, залегающие на глубине под месторождениями. Вероятность извлечения рудного вещества из тех или иных ураноносных пород зависит, в первую очередь, от возможности и условий прохождения через них этих растворов. Поэтому для более уверенного высказывания соображений о горных породах как о возможном источнике урана, необходимо знать гидродинамику гидротермальных растворов, т. е. общее направление и пути их движения по проницаемым структурам, условия залегания ураноносных пород и формы нахождения урана.

Как показали детальные геолого-структурные и минералогические исследования, на большинстве гидротермальных урановых месторождений в динамике рудоносных растворов преобладали восходящие составляющие их движения, т. е. в целом они двигались снизу вверх вдоль зон крутопадающих разломов. При такой циркуляции растворов непосредственно вмещающие оруденение породы практически выпадали из сферы их влияния или не успевали прореагировать. В то же время взаимодействие растворов с подстилающими породами на глубоких уровнях далеко не всегда поддается конкретному изучению. Однако и по ряду других признаков (изучение геохимических ореолов и зон гидротермально измененных пород) также можно сделать вывод о том, что уран привносился снизу.

Кислые магматические породы как один из вероятных источников урана. Как уже отмечалось, во многих фанерозойских рудных провинциях наблюдается пространственная ассоциация урановых месторождений, находящихся в различной геологической обстановке, с кислыми магматическими породами (интрузивными или эффузивными), которые характеризуются повышенными содержаниями урана. На территории этих провинций подавляющее большинство урановых месторождений так или иначе пространственно тяготеет к ураноносным гранитам — либо они располагаются в их эндо- и экзоконтактах, либо залегают среди более поздних вулканогенных или осадочных формаций над гранитным фундаментом.

Гранитоиды. Формы нахождения урана в гранитах, как известно, различны, но четырехвалентный металл является первичным, а шестивалентный — вторичным.

Наиболее отчетливая пространственная связь месторождений с гранитами устанавливается в урановорудных провинциях палеозойских складчатых областей Центральной и Западной Европы (Чешский, Центрально-Французский, Арморикaнский, Иберийский массивы, Корнуэлл и др.), где подавляющее большинство известных здесь жильных месторождений урана локализуется в зонах экзоконтактов герцинских гипабиссальных высокорадиоактивных гранитов, иногда кварцевых сиенитов, либо в самих интрузивах гранитоидов.

Урановые месторождения рудных районов Чешского массива располагаются в пределах геоантиклинальных блоков с увеличенной мощностью «гранито-метаморфического» слоя коры и в их пределах тяготеют к экзоконтактам и реже эндоконтактам интрузивов поздних герцинских комплексов, имеющих абсолютный (K-Ar и Rb-Sr) возраст 340—320 млн лет

и 310—280 млн лет. Изотопный (U-Pb) возраст первичного уранового оруденения — 270—240 млн лет (Ф. Лейтвайн, 1957 г.; И. Бернард, И. Легиерский, 1967 г. и др.). Граниты характеризуются повышенными содержаниями урана — до $9—15 \cdot 10^{-4}$%, высокой долей (до 50% и более) «подвижной» его формы и низким Th/U отношением ($<1—3$). Главной отличительной особенностью этих урановых месторождений является их тесная пространственная и структурная связь, геохимическое родство и возрастная близость с указанными гранитоидами. Сходные геологические условия и возрастные взаимоотношения интрузивных пород и уранового оруденения характерны также и для рудных районов Центрально-Французского и Армориканского массивов (Ж. А. Сарсия, М. Рубо, В. И. Смирнов, А. И. Тугаринов, 1969 г. и др.).

Гидротермальные жильные урановые месторождения, по данным этих авторов, сконцентрированы в различных частях отмеченных массивов, характеризующихся интенсивным развитием позднегерцинского гранитоидного магматизма. Здесь выделяется два комплекса гранитов: ранние — биотитовые (340—336 млн лет) и поздние — двуслюдяные, обычно альбитизированные или калишпатизированные (300—280 млн лет). И те и другие граниты обладают повышенными содержаниями урана: в биотитовых оно составляет $9 \cdot 10^{-4}$%, в двуслюдяных гранитах — достигает $20 \cdot 10^{-4}$% (за счет развития в них акцессорного уранинита). Урановые месторождения этих районов тесно связаны с двуслюдяными гранитами и «сиенитами», в пределах которых они главным образом и залегают. Возраст настуранового оруденения, полученный Ч. Костольяни (1973 г.) из разных месторождений этой провинции, составляет 280—265 млн лет. С учетом ошибок измерений (± 25 млн лет) эти цифры достаточно близки данным по времени внедрения поздних гранитов.

Обсуждая проблему образования так называемых «интрагранитных» жильных месторождений урана в различных провинциях Европы, многие исследователи (М. Краус, Ю. М. Дымков, М. Морроу, Дж. Матос Диас, А. Н. Болотников, Г. Херрманн, Дж. Барбье), занимающиеся изучением их геологии и минералогии, вопросами радиогеохимии и петрографии горных пород рудных районов, пришли к выводу о том, что источником урана для этих месторождений служили непосредственно сами граниты после застывания магмы и некоторого их преобразования.

Одни исследователи считают их гидротермальными, другие — экзогенными инфильтрационными. Действительно, промышленные руды располагаются в зоне окисления или цементации. Однако представители инфильтрационной гипотезы обычно не учитывают всего геологического фактического материала. Например, не принимаются во внимание история развития районов и закономерности размещения месторождений, факты локализации ураноносных жил в эндоконтактах интрузивов гранитов, и они не встречаются в их эродированных частях. Предрудные метасоматические изменения вмещающих пород и термобарометрия руд свидетельствуют скорее всего о том, что они были сформированы гидротермальными растворами.

Ю. М. Дымков [35] на основании общих геологических закономерностей размещения гидротермальных жильных месторождений Рудных гор, высокой радиоактивности развитых здесь поздневарисцийских гранитов

и детальных минералогических исследований высказал соображение о том, что вероятным источником урана для них могли служить залегающие под месторождениями граниты в участках их интенсивных преобразований. По его представлениям, настурановые руды этих месторождений сформировались из восходящих гидротермальных растворов, заимствуя металл из кислых гранитоидов. Некоторые исследователи (А. Н. Болотников и др., 1972 г.) на основании изучения магматических пород краевой части Чешского массива с помощью гамма-спектрометрических методов приходят к выводу, что близкие по радиоактивности позднекарбоновые и раннепермские граниты, к интрузивным массивам которых пространственно тяготеют урановые месторождения, и которые в рудных районах характеризуются не только общим повышенным содержанием урана и сравнительно высоким процентом его «подвижной» формы, но и низким торий-урановым отношением, могли служить непосредственным источником урана в уже закристаллизованном состоянии. Предполагается, что мобилизация урана из доступной («подвижной») формы в гранитах осуществлялась восходящими постмагматическими гидротермальными растворами. Эти исследователи считают, что для образования урановых месторождений необходимы следующие условия: а) накопление в процессе магматизма значительных количеств урана в гранитных массивах больших объемов; б) предварительная подготовка гранитов и перевод соответствующего количества урана в «подвижную» форму; в) определенная обстановка, обеспечивающая возможность его перемещения; г) благоприятные условия для концентрированного осаждения урана из растворов.

Многие французские, испанские, португальские, а также канадские геологи (Е. Смит и др.) высказывают соображения о том, что низкотемпературные жильные месторождения Западной Европы, залегающие в специализированных ураноносных гранитах или вокруг них, образовались вблизи эрозионной (раннепермской) поверхности выравнивания под воздействием гипергенных процессов коры выветривания. В результате перевода урана в подвижное состояние и его миграции в поверхностных водах в условиях аридного климата и были сформированы не только слюдковые и черниевые, но и настурановые руды. Однако такие представления не согласуются с общими закономерностями размещения месторождений в регионе, а также с результатами детальных геолого-структурных минералого-геохимических, термобарометрических и других исследований. Как известно, среди первичных руд здесь имеются кварц-флюорит-настурановые и другие ассоциации, температура образования которых достигала 100—200°.

Считается, что основным источником урана для руд месторождений, залегающих в гранитоидах массивов Франции (Центральном, Вандеи), служили сами вмещающие гранитоиды и урановое оруденение связано с миграцией урана в более поздние этапы. Наиболее благоприятными для образования урановых месторождений считаются ураноносные дифференцированные граниты с проявлением различного, особенно раннего кремний-калиевого и натриевого метасоматоза («эписиениты»). Граниты отличаются повышенными и высокими фоновыми содержаниями урана ($8—25 \cdot 10^{-4}\%$) и тория ($20—70 \cdot 10^{-4}\%$), обусловленными наличием

акцессорных минералов — уранита, ураноторита, а также торита, монацита и др. Однако концентрации урана и тория далеко не всегда коррелируются между собой. В то же время здесь нередко устанавливается пространственная и структурная связь уранового оруденения с проявлениями основного (дайкового) магматизма. Предполагается также, что для переноса урана и образования его минералов значительная роль принадлежала углекислоте. Положение месторождений в определенных участках гранитных интрузивов контролируется зонами поздне- и посторогенной трещиноватости, вдоль которых произошло внедрение многочисленных даек лампрофиров и родственных им пород.

Аналогичные калиевые, натриевые и калий-натриевые метасоматиты по гранитам повышенной пористости («эписиениты»), развитые по секущим телам аплитов, установлены в Крконошском интрузивном массиве в Западных Судетах, где также известны урановые месторождения и рудопроявления.

Урановая минерализация месторождений Великобритании (район Корнуолла и др.), приуроченных к каледонским и герцинским гранитам, по мнению геологов (П. Симпсон, Дж. Браун, И. Плент, Д. Остл), обусловлена содержанием и распределением в них урана, их возрастом и структурным положением. Оруденение ассоциирует с интрузивами гранитоидов, для которых характерны не только высокие средние содержания урана, но и повышенные концентрации фтора и таких «некогерентных» элементов, как литий, рубидий, бериллий, бор, а также низкое общее содержание стронция и низкие отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$, K/Rb. В этих районах обычно отмечается высокий геотермический градиент. Поэтому авторы предполагают, что развитие урановой минерализации здесь обусловлено не привносом урана извне, а перераспределением его в самих гранитоидах. Повышенные содержания урана в гранитах связаны в основном с устойчивыми первичными акцессорными минералами — цирконом и др. Считается, что при более поздних процессах грейзенизации и турмалинизации происходило извлечение его растворами и переотложение в благоприятной обстановке.

Исследования тепловых потоков в плутоне Конуэй в Кордильерах (штат Нью-Гемпшир, США), проведенные американскими геологами, показали, что не исключена возможность формирования урановых месторождений в гранитах с аномально высокими содержаниями урана и что она может быть обусловлена проявлением в их пределах конвективных флюидных потоков, возникавших за счет внутреннего тепла в пористых гранитах. Авторы считают, что при проницаемости гранитов примерно 0,5 миллидарси интенсивность такой конвекции вполне достаточна, чтобы гидротермальные растворы в течение 2 млн лет в благоприятной обстановке смогли сформировать месторождения с запасами примерно в 10 тыс. т. Возраст оруденения таких месторождений подтверждает представление о том, что они образовались в результате деятельности конвекционных потоков радиоактивного тепла, выделяемого самим интрузивом. Предполагается, что при охлаждении растворов вблизи дневной поверхности в участках с интенсивной циркуляцией как восходящих, так и нисходящих потоков и в результате восстановления шестивалентного урана до четырехвалентного из каждого 1 кг раствора могло отложиться 1 г урана.

Анализ особенностей размещения уранового оруденения на территории мезозойских рудных провинций, проведенный П. А. Строной (1977, 1981 г.), показал, что подавляющее большинство (более 90%) известных здесь месторождений и рудопроявлений урана располагается либо в зонах брекчированных гранитов, либо в породах «эпигранитных» геологических (вулканогенных и осадочных) формаций, залегающих на гранитном фундаменте. Те же самые геологические формации, залегающие на ином (не гранитном) фундаменте, практически не содержат урановых месторождений.

Аналогичные закономерности размещения урановых месторождений, пространственно тяготеющих к блокам развития гранито-гнейсовых куполов и интрузивов гранитоидов, отмечаются многими исследователями урановых провинций срединных массивов каледонид и герцинид.

Признаки перераспределения либо привноса и выноса урана из гранитов, вмещающих месторождения или залегающих в фундаменте вулканических депрессий под месторождениями, устанавливаются рядом исследователей в разных рудных провинциях. Так, И. С. Модников [75] отмечает, что фоновые содержания урана в гранитоидах фундамента вулканических депрессий весьма дифференцированы в широких и протяженных зонах и в целом ниже, чем в аналогичных породах, выходящих на дневную поверхность по их обрамлению. Однако этих данных, видимо, еще недостаточно для однозначных выводов, тем более, что в рудных районах развиты разновозрастные граниты, значительно различающиеся по содержанию радиоактивных элементов. В то же время более детальное изучение этого вопроса, проведенное тем же автором на месторождении, залегающем в гранитах фундамента, также показало, что вокруг главной рудоносной зоны существуют участки, характеризуемые относительно пониженными концентрациями урана, которые, очевидно, обусловлены его выносом. Локальный вынос этого элемента из гранитоидов в процессе их гидротермальной гидрослюдизации и аргиллизации на аналогичных месторождениях установлен детальными петрографическими исследованиями О. В. Андреевой и В. А. Головина (1986 г.) и др.

Анализ распределения радиоактивных элементов по результатам полевых гамма-спектрометрических и рентгеноспектральных методов среди гранитов в районе месторождений неясного (гидротермального или гипергенного?) генезиса позволил некоторым авторам (Е. К. Мельников, 1978 г. и др.) выделить ряд последовательно сменяющих друг друга (сверху вниз) зон, различающихся между собой по концентрациям урана при сравнительно одинаковых, близких к кларковым содержаниям в каждой из них тория и калия: а) верхняя зона лимонитизированных гранитов $3{,}6 \cdot 10^{-4}\%$ U; б) средняя зона, представленная метасоматически измененными породами и включающая местами рудные тела — до $12 \cdot 10^{-4}\%$ U; в) нижняя зона слабо измененных гранитов — $8 \cdot 10^{-4}\%$U.

На основании этих данных, автором предполагается вынос урана из гранитов богатыми кислородом метеорными (нисходящими) или смешанными термальными (восходящими) водами из приповерхностных зон с последующей миграцией, переотложением и накоплением урана в благоприятных условиях средней зоны. Однако эти выводы совершенно не однозначны, требуют более детальных исследований.

Изучение радиогеохимических особенностей гранитоидов методами осколковой радиографии в урановорудных провинциях каледонских и герцинских складчатых областей О. П. Елисеевой и И. М. Воловиковой (1979 г.) и др. показало, что в этих породах помимо акцессорных минералов до 50—60% урана находится в микротрещинах, межзерновых швах, а также связано со вторичными минералами (хлоритом, окислами и гидроокислами титана, железа и др.). Эти выделения имеют отчетливо эпигенетический характер и отображают «подвижную» форму урана. Они обусловлены перераспределением первичноконституционального урана или привносом его в результате проявления наложенных (гидротермальных или гипергенных) процессов. Автометасоматические, постмагматические и гипергенные процессы здесь приводят к перераспределению урана и адсорбции его окислами и гидроокислами титана и железа. Наблюдается обогащение ураном лейкоксенизированных участков сфена, каемок вокруг зерен титано-магнетита, магнетита и ильменита, скопления урана по краям зерен и по спайности измененного биотита, роговой обманки и пироксена. Уран концентрируется также в прожилках и неправильных пятнах окислов и гидроокислов железа. Наиболее интенсивное вторичное изменение и отчетливо выраженное перераспределение урана наблюдается в зонах разломов, которые являлись благоприятными путями для циркуляции растворов.

Кислые эффузивы. На основании эмпирических закономерностей размещения урановых месторождений, пространственно связанных с проявлением континентального кислого вулканизма, в разных рудных провинциях установлено, что в пределах вулканических и вулкано-тектонических депрессионных структур оруденение отчетливо концентрируется в зонах повышенной проницаемости (брекчирования, трещиноватости, пористости пород) осадочно-вулканогенных толщ, которые отличаются высокой радиогеохимической дифференциацией и наличием пород с повышенным содержанием урана. Многие исследователи допускают, что при формировании уранового оруденения в подобной геологической обстановке уран в значительной степени заимствовался из вмещающих вулканогенных пород.

В. Л. Барсуков, Н. П. Лаверов и др. [119], изучая геологические условия формирования и минеральный состав оруденения на урановом месторождении, являющемся типичным представителем (моделью) месторождений молибден-урановой формации и залегающем в лавах и пирокластах вулканической депрессии герцинской провинции, пришли к выводу, что при образовании урановых руд наряду с восходящими эндогенными гидротермальными растворами участвовали вадозные пластовые минерализованные воды артезианского (напорного) типа. Такие смешанные растворы циркулировали по межпластовым зонам и проницаемым породам, обогащенным ураном, выщелачивая из них значительную часть этого и других элементов.

По данным этих авторов, чашеобразная структура депрессии обеспечивала возможность возникновения и длительного существования в ее вулканогенных толщах напорных гидродинамических систем, в участках разгрузки которых и сформировались урановые месторождения. В строении депрессии принимают участие вулканогенные и терригенные отложения

верхнего палеозоя. Многие из этих пород по физико-механическим свойствам представляют собой коллекторы большой и средней емкости, а также высокой и средней проницаемости. В связи с такими условиями залегания вулканогенно-осадочных толщ этой депрессии в горизонтах проницаемых пород (туфов, туфопесчаников, песчаников и др.) и в послойных зонах дробления образовались подземные бассейны напорных растворов, гидравлически связанных с поверхностными водами краевых частей депрессии. Здесь, по-видимому, существовала принципиально та же схема перемещения растворов, которая наблюдается в районах современной вулканической и гидротермальной деятельности, а также в депрессиях, выполненных продуктами неоген-четвертичного вулканизма. Поэтому можно предполагать, что в палеогидротермальных системах древних вулканических депрессий вероятность участия инфильтрационных вод в гидротермальном процессе была гораздо выше, чем в других геологических условиях. Эти системы, по-видимому, получали большую часть растворов не из глубинных источников, а из поверхностных областей краевых зон.

В таких депрессиях вулканического происхождения создавались условия для циркуляции растворов по послойным проницаемым зонам (коллекторам), что способствовало миграции растворенных в них компонентов. Предполагается, что особенно благоприятные условия в них имелись для интенсивной мобилизации и перемещения урана [119].

Во-первых, гидротермальная система гидравлически была связана с инфильтрационными водами, и непрерывно питавшаяся ими в краевых частях депрессии, отличалась высоким окислительно-восстановительным потенциалом. В силу растворяющей способности они могли окислять и выщелачивать уран практически из любых природных сред, с которыми растворы взаимодействовали на своем пути.

Во-вторых, благодаря особенностям циркуляции растворов в пределах депрессий по поверхности напластования пород эти растворы на значительных интервалах своего пути и длительное время имели возможность реагировать с эффузивами, обогащенными ураном до $(9—10)\cdot10^{-4}\%$, молибденом — $(1—9)\cdot10^{-4}\%$ и другими элементами, а нередко и с осадочными породами, среди которых встречаются разности, отличающиеся высокими содержаниями урана. Кроме того, в краевых частях депрессий в циркуляцию растворов вовлекались подземные воды, контактировавшие с разрушавшимися породами кальдерных экструзий или гранитов фундамента, почти всегда отличавшимися относительно повышенными концентрациями урана — $6{,}2\cdot10^{-4}\%$, молибдена. Благодаря этому в гидротермальных системах вулканических депрессий практически неограниченные по запасам растворы с высоким окислительным потенциалом могли длительное время выщелачивать уран из больших масс пород, первично обогащенных этим металлом, который непрерывно накапливался в растворах, повышая их концентрацию.

Во многих депрессиях, имеющих сходное строение, вполне реальна принципиальная схема последовательности взаимодействия растворов с разными типами пород. Просачиваясь по проницаемым зонам послойных разрывных нарушений в течение длительного времени, на наиболее длинном отрезке своего пути растворы в основании депрессии взаимо-

действовали с породами основного и среднего состава, насыщались кальцием, магнием, железом, а в верхней части разреза депрессии — рассеянными компонентами, свойственными кислым эффузивным и осадочным отложениям вулканических депрессий — ураном, молибденом, свинцом, мышьяком, медью, фосфором и др. [119].

Признаками взаимодействия растворов с породами является наличие послойных зон осветления (с развитием серицита, кварца, альбита, глинистых минералов, окисленного пирита и т. п.) и покраснения (гематитизация) пористых эффузивов, пирокластов, песчаников и других проницаемых пород. К сожалению, авторы не приводят каких-либо данных, свидетельствующих о признаках выщелачивания из пород рудных компонентов, т. е. об уменьшении содержаний урана и других сопутствующих элементов в таких зонах.

Косвенными признаками перераспределения фоновых содержаний урана во вмещающих вулканогенных породах вокруг некоторых месторождений и их рудоносных зон, являются так называемые «субфоновые» ореолы, выделяемые в их пределах А. В. Канцелем и др. (1984 г.).

В результате изучения статистической структуры полей концентрации урана в зонах первичных ореолов урановых месторождений с помощью математических методов анализа обширного фактического материала по гамма-каротажу поисковых и разведочных скважин, этими авторами было установлено, что:

поля первичной неоднородности распределения фоновых концентраций урана в горных породах вокруг месторождений претерпевают существенные изменения;

эти изменения фиксируются уже на значительном удалении от рудных залежей и распространяются в виде широких зон при переходе от полей фоновых концентраций урана (в неизмененных породах) к первичным (аномальным) ореолам рудных месторождений;

в пределах таких зон «субфоновых» ореолов содержания урана в породах соответствуют в целом фоновому уровню, а неоднородность распределения этих содержаний (дисперсия) является аномальной.

Предположительно эти зоны рассматриваются авторами как внешние зоны первичного (аномального) ореола рассеяния, в которых процессы перераспределения урана преобладала над процессами его накопления. Однако природа «субфоновых ореолов» пока точно не установлена, не выяснены причины их образования и связь данных ореолов с урановорудным процессом, а также с поведением других радиоактивных и рудных элементов. Исходя из этого, «субфоновые ореолы» нельзя считать теми участками, где происходила мобилизация урана, в то же время учитывая условия формирования этих ореолов в результате циркуляции гидротермальных, вернее смешанных растворов, можно сделать выводы, что из вмещающих пород уран не выносился, а только перераспределялся на месте. На подобное перераспределение при взаимодействии гидротермальных растворов с породами указывают также А. С. Митропольский и др. (1972, 1985 гг.).

Анализ размещения, строения и условий залегания зон «субфоновых ореолов» в разрезе вулканических депрессий показывает, что они характеризуются следующими чертами: а) широким распространением на пло-

щади района, прослеживаясь в плане непрерывно на несколько км; б) в основном субгоризонтальной ориентировкой залегания, согласной с напластованием пород и развитием преимущественно среди кислых эффузивных толщ; в) в целом многоярусном строением, обусловленном горизонтами различно проницаемых пород и подстилающих их водоупоров; г) подчиненным и локальным развитием крутопадающих зон «субфоновых ореолов» вблизи разломов, экструзивных тел и куполов липаритов, жерловых образований, дайковых поясов, особенно участков их сочленения. Такие ореолы установлены в районе флюоритовых месторождений, которые определяются условиями залегания разрывных нарушений и контактов различных магматических пород; д) наличием участков перехода и распространения зон «субфоновых» ореолов из вулканогенных пород депрессий в гранитоиды фундамента.

Все эти данные о пространственном размещении и положении наложенных (вторичных) радиогеохимических полей урана позволяют сделать вывод о том, что в пределах вулканогенных толщ депрессий, где формировались руды молибден-урановых месторождений, на весьма значительной площади происходили процессы перераспределения фоновых концентраций урана в породах.

Полученные результаты об условиях залегания зон субфоновых ореолов подтверждают представления В. Л. Барсукова, Н. П. Лаверова и др. [119] не только о гидродинамическом режиме растворов, циркулировавших в вулканогенных толщах, о направлении и путях их движения, но также и о том, что в гидротермальном урановом рудообразовании в пределах депрессии значительную роль играли пластовые инфильтрационные воды. В качестве главных растворопроводящих систем здесь служили проницаемые туфогенные породы и песчаники. Вопрос о поступлении в эту систему ювенильных растворов и потоков тепла окончательно не был решен и потому являлся спорным. Данные, полученные А. В. Канцелем и др., позволили наметить возможные пути поступления растворов по разломам из фундамента в вулканогенные породы депрессий. В этом отношении по прямым и косвенным признакам (выдержанные и мощные зоны «субфоновых» ореолов в гранитоидах фундамента и участки максимальной мощности их в пологом залегании наряду с крутопадающими зонами в вулканогенных толщах депрессий) отчетливо выделяются развитые в районе флюоритовые месторождения в зонах крупных разломов.

В то же время, как отмечалось выше, «субфоновые» ореолы представляют собой зоны перераспределения урана, средние содержания которого остаются практически на том же уровне. В них не только не устанавливается ощутимых признаков выноса металла, но даже нередко наблюдаются некоторое увеличение радиоактивности. Расчеты показали, что среднее значение радиоактивности пород в пределах «субфоновых ореолов» несколько выше, чем среднее значение натурального фона радиоактивности в эффузивных породах за пределами месторождений. Отсюда следует важный вывод: если «субфоновые ореолы» отражают пути циркуляции рудоносных растворов, то можно уверенно утверждать, что на изученных интервалах во вмещающих породах не устанавливается признаков выноса урана.

Л. Н. Шаткова и Г. А. Шатков (1973 г.), проводившие радиогеохимиче-

ские исследования в пределах некоторых урановорудных провинций высказали мнение о том, что источником рудного вещества для урановых месторождений, залегающих в вулканогенных толщах депрессий, могли служить сами кислые эффузивы еще в процессе их раскристаллизации. По данным этих авторов, процесс девитрификации («фельзитизации») кислых магматических расплавов в поверхностных условиях сопровождался выносом урана, молибдена, фтора, хлора, бериллия, церия. По их подсчетам, из 1 км^3 стекловатых игнимбритов с повышенными первичными концентрациями урана — до $(18—24)\cdot10^{-4}$% по мере превращения их в фельзиты, содержащих урана уже $(10—13)\cdot10^{-4}$%, выносилось до 20—25 тыс. т металла. Авторы предполагают, что переотлагаясь в благоприятных геологических условиях, уран вполне мог сформировать рудные залежи в пределах этих же вулканогенных толщ [123].

Уменьшение (на 35—70%) содержания урана, тория и других элементов в процессе раскристаллизации стекловатых разновидностей эффузивов подтверждено исследованиями Б. М. Сельцова, П. С. Козловой и др. [90] в пределах аналогичных депрессий. Кроме того, ими установлено, что в процессе последующей постмагматической гидротермальной деятельности в результате кислотного выщелачивания и замещения вулканических стекол (перлитов), монтмориллонитом также происходило извлечение из пород урана низкотемпературными растворами.

Однако, по мнению этих авторов, образование промышленных гидротермальных урановых месторождений подобным способом, представляется маловероятным, поскольку на месторождениях, локализованных в вулканогенных депрессиях, скопления типичных эндогенных уран-флюоритовых руд залегают нередко не только в вулканитах, но и в гранитоидах и других породах фундамента. К тому же они сформировались гораздо позднее процессов девитрификации эффузивов и из восходящих гидротермальных растворов.

В то же время, по мнению этих авторов, уран, освобождавшийся при девитрификации кислых эффузивов, а также во время поствулканической фумарольно-сольфатарной деятельности и поступавший в поверхностные воды, мог создавать в соседних угленосных впадинах на восстановительных барьерах эпигенетические месторождения.

Следует отметить, что упомянутые выше авторы, базируясь на представлениях о полигенном происхождении рудного вещества в гидротермальных растворах, рассматривают в своих работах вмещающие породы как один из возможных дополнительных источников урана. Вместе с тем они полагают, что основная масса урана в растворах имела эндогенное происхождение.

Таким образом, кислые изверженные породы (уже после кристаллизации магмы) могли служить дополнительным источником урана для минерализованных растворов. Природные геохимические модели мобилизации и миграции этого элемента могли создаваться в результате перекристаллизации эффузивов или воздействия последующих фумарольно-сольфатарных, гидротермальных и гипергенных процессов на вулканиты или граниты. Однако возможности формирования промышленных концентраций урана в этих районах обусловлены многими другими более важными геологическими факторами.

«Черные» углеродистые сланцы как один из вероятных источников урана. В некоторых урановорудных провинциях палеозойских складчатых областей развиты своеобразные стратиформные, собственно урановые или ванадий-урановые месторождения дисперсных метаосматических и прожилкововкрапленных руд, промышленные концентрации которых пространственно связаны с геохимически специализированными породами углеродистой формации нижнего палеозоя. В соседних районах таких провинций распространены также типичные гидротермальные месторождения урана и других металлов, которые нередко залегают среди тех же литолого-стратиграфических комплексов пород, но пространственно связаны с позднепалеозойскими гранитоидами. Не только источник рудного вещества, но и происхождение многих месторождений, остаются не выясненными, поэтому являются предметом длительной и острой дискуссии среди геологов. Особо сложной и спорной представляется проблема источника урана и генезиса стратиформных урановых месторождений, локализованных в черносланцевых толщах. Эти дискуссионные вопросы сложной проблемы уранового рудообразования в таких вмещающих породах неоднократно обсуждались в печати [22, 23, 27, 56, 97].

Многие исследователи, изучавшие подобные стратиформные месторождения в разных провинциях, пришли к выводу, что источником оруденения служили маломощные (десятки метров) горизонты углеродистых сланцев, характеризующихся повышенным геохимическим фоном урана — от (10—15) до (20—30) $\cdot 10^{-4}\%$ — и ряда сопутствующих элементов. В качестве доказательств представления о локальном источнике урана ими приводились факты тесной пространственной связи месторождений и геохимическое родство рудных образований с отложениями этой формации, отчетливая урановая специализация вмещающих пород, а также стратиформный (пластообразный) характер рудных залежей, минералого-геохимические их особенности и признаки частичного выноса урана в условиях кислотного выщелачивания. В разное время выдвигался различный механизм мобилизации урана из вмещающих пород: либо метаморфогенный, либо гипергенный, либо полигенный.

Б. Б. Голубев (1980 г.) и другие исследователи, изучавшие ванадий-урановые месторождения, вторичные слюдковые руды которых залегают в углеродисто-сланцевой толще и находятся в зоне мезозойской коры выветривания, пришли к выводу, что источником рудных компонентов служили сами углеродистые породы и продукты их химической дезинтеграции.

Как уже отмечалось, некоторые исследователи (А. И. Тугаринов, Г. Б. Наумов, Н. П. Ермолаев и др.) считают, что источником оруденения не только стратиформных, но и гидротермальных жильных месторождений урана также могли служить маломощные горизонты углеродистых сланцев нижнего палеозоя или верхнего протерозоя, отличающихся повышенным геохимическим фоном урана и сопутствующих элементов. На основании радиогеохимических, минералого-геохимических и термобарометрических, а также экспериментальных данных они приходят к выводу, что значительная часть урана, содержащегося в углеродистых сланцах могла извлекаться карбонатными (содовыми) растворами.

Признаки мобилизации урана и сопутствующих компонентов из углеродистых сланцев, а также следы возможной миграции этих элементов в различной природной обстановке отмечаются многими авторами. Наиболее отчетливо эти признаки устанавливаются в приповерхностных гипергенных условиях, где инфильтрационные воды в результате окисления пиритоносных углеродистых пород имели сернокислый состав с низким pH и высоким окислительно-восстановительным потенциалом, и поэтому были способны выщелачивать из пород многие рудные элементы, в том числе уран. В преобразованных разными эпигенетическими процессами породах повышается доля «подвижной» формы урана.

В результате изучения распределения концентраций рудных элементов по разрезу вмещающих пород продуктивной пачки черносланцевой толщи нижнего палеозоя в пределах урановых месторождений Р. В. Гецевой и А. А. Дерягиным [23] установлено, что вблизи нижней стратиграфической границы (но обычно тектонически нарушенной) горизонта углистых кремнисто-глинистых сланцев наблюдается некоторое локальное обеднение пород ураном, а также медью, никелем, свинцом, молибденом, ванадием и другими элементами при одновременном незначительном обогащении ими подстилающих глинисто-слюдистых сланцев. На этом основании ими был сделан вывод о том, что отмеченные рудные элементы мигрировали из «черных» сланцев с высоким геохимическим фоном урана и сопутствующих элементов в подстилающие углеродсодержащие глинисто-слюдистые сланцы с близкими к кларковым содержаниями. По их мнению, такая общая направленность миграции и переотложения урана в целом объясняет закономерную приуроченность уранового оруденения месторождений к породам приконтактовой части кровли подстилающей толщи и отсутствие оруденения на этих участках в вышележащих углеродистых сланцах. Аналогичная миграция тех же самых рудных элементов, а также органического вещества из «черных» сланцев устанавливается в залегающих среди них силлах диабазов. Авторы связывали эту миграцию с проявлениями процессов регионального метаморфизма в эпоху герцинской складчатости. Однако следует заметить, что опробование пород проводилось на сравнительно небольших (120—180 м) от дневной поверхности глубинах, т. е. в зоне влияния гипергенных процессов.

Р. В. Гецева и А. А. Дерягин (1963 г.) отмечали, что относительная степень мобилизации и концентрации рассеянных в черносланцевой толще элементов не зависят от их содержания в породах. По степени мобильности в процессе миграции и способности к концентрации ими выделены три ряда (группы): 1 — весьма мобильные — уран, молибден, медь, свинец, никель, возможно мышьяк и сурьма; 2 — мобильные — бериллий, кобальт, серебро, цинк, ванадий, цирконий; 3 — относительно инертные — барий, титан, стронций, хром.

Однако следов миграции отмеченных малых элементов в ранних продуктах метаморфизма (кварц-слюдистых и сульфидных стяжениях, свилях и т. п.), как уже отмечалось, этими исследователями нигде не установлено, а в мономинеральных ранних и дорудных новообразованиях (метакристаллах пирита, прожилках кварца, карбонатов, стяжениях маркизита, мельниковита и др.) элементы-примеси практически

отсутствуют. Тем не менее наличие в рудах месторождений сульфидов и арсенидов железа, меди, никеля и кобальта, а также прожилков барита и др. они объясняют миграцией рудных элементов из диабазов.

Как было показано детальными геолого-структурными и минералогическими исследованиями [27, 56, 97] урановое оруденение стратиформных месторождений этого типа является полихронным, формировалось неоднократно и гораздо позднее проявления процессов регионального низкотемпературного метаморфизма вмещающих пород в орогенные этапы и эпохи активизации. Поэтому ураноносные растворы, из которых образовались промышленные руды, не могли быть метаморфогенными, как уже говорилось, скорее всего первичные руды имели гидротермальный генезис, а затем претерпели гипергенные преобразования. Вопрос источника металла является гораздо более сложным и окончательно не выясненным. Однако региональный металлогенический анализ и закономерности размещения этих месторождений свидетельствуют о том, что локальным источником их происхождения объяснить нельзя.

В последнее время некоторые исследователи высказывают соображения о гипергенном происхождении оруденения за счет вмещающих пород. Результаты исследований (И. П. Сергеев и др., 1986 г.), выполненных на месторождениях и в районе, показали, что в приповерхностных условиях (до глубины 20—30 м) под воздействием разновозрастных гипергенных процессов (в том числе коры выветривания) из углистых сланцев происходит частичный — до 25—50% — вынос урана и многих сопутствующих элементов (Cu, Zn, Co, Ni, Mo, As, Ag, Ba и др.).

С глубиной через мощную (100—180 м) переходную зону с контрастно дифференцированными содержаниями (повышенной дисперсией) этих элементов углеродистые сланцы сменяются практически (кроме отдельных приразломных зон) неизменными гипергенезом породами, в которых содержания урана соответствует наиболее высокому — $(25—30)\cdot 10^{-4}\%$ — в районе геохимическому фону.

Приведенные данные являются весьма неточными и ориентировочными и могут зависеть от многих причин, а фоновые содержания в районе явно завышены. По данным С. Ф. Винокурова (1980 г.), они составляют $15—20\cdot 10^{-4}\%$. Это свидетельствует о том, что уран и некоторые сопутствующие элементы в обстановке кислотного выщелачивания, в том числе и гипергенных условиях, частично и локально переходили в подвижную форму и могли выноситься из «черных» сланцев. Дальнейшая судьба их и условия миграции в подземных водах или других растворах совершенно не выяснены и не исключена возможность полного рассеивания, о чем свидетельствуют повышенные содержания урана в красноцветах. Они могли служить дополнительным, но никак не главным источником урана в растворах, сформировавших рудные залежи этих месторождений.

Как уже отмечалось, судя по многочисленным геологическим и минералогическим данным, эти месторождения обычно относят к «полигенным», первичные (настурановые, коффинитовые и др.) руды которых были образованы в результате проявления гидротермальной деятельности и затем в приповерхностных условиях переотложены гипергенными процессами. При этом основная доля урана была привнесена восходящими гидротермальными рудными растворами снизу и лишь ничтожная

часть, в зависимости от путей их циркуляции, по-видимому, могла быть заимствована из вмещающих пород.

Таким образом, рассмотрение вопросов, связанных с возможной мобализацией урана из различных ураноносных горных пород под воздействием гидротермальных или гипергенных процессов, а также анализ геологических материалов по закономерностям размещения урановых месторождений разных типов, пространственно ассоциирующих с такими породами, анализ радиогеохимических данных и гидродинамики рудообразующих растворов позволяет сделать следующие выводы:

1. Геохимическая модель мобилизации урана из различных ураноносных пород, непосредственно вмещающих месторождения, очевидно, существует в природе. Однако, анализ конкретных геологических условий и времени формирования оруденения урановых месторождений показывает, что эта модель далеко не всегда имела прямое отношение к процессам рудообразования. Возможности и доля участия экстрагированного урана в создании рудоносных растворов были часто весьма ограничены, а время их правления не совпадало.

2. Роль и значение фильтрационного источника рудного вещества ближней мобилизации, т. е. заимствование урана из различных ураноносных пород, непосредственно вмещающих месторождения, зависели от многих причин и конкретных геологических условий — объемов и условий залегания этих пород, количества (содержания) и формы нахождения в них металла, путей направления и скорости движения растворов, их состава (агрессивности).

3. В ураноносных рудовмещающих породах (метаморфических и ультраметаморфических толщах, гранитоидах, вулканитах, углеродистых сланцах и др.), характеризующихся повышенными концентрациями урана и большой долей его «подвижной формы» при проявлении гидротермальных или гипергенных процессов (в благоприятных структурных условиях, в соответствующей физико-химической обстановке и при высокой растворяющей способности растворов) происходила частичная, иногда значительная, но локальная миграция металла с образованием широких и протяженных зон перераспределения или выноса его. Однако по условиям залегания (размещения) таких пород на пути движения растворов и своему объему, а также по времени уранового рудообразования они далеко не всегда могли обусловить или принимать участие в создании ураноносности рудных растворов.

4. Вмещающие породы, даже высокоураноносные (гранитизированные породы, граниты, углеродистые сланцы и др.), среди которых непосредственно локализуются урановые месторождения разных типов в целом как правило, не имели существенного значения в образовании рудоносных растворов, сформировавших промышленные урановое оруденение, т. е. роль фильтрационного источника рудного вещества ближней мобилизации была весьма ограничена.

В то же время, в зависимости от объема и благоприятных условий залегания подобных ураноносных пород (большие объемы расположенных на глубине под месторождениями гранитоидов или других пород и при наличии существенной доли «подвижной» формы урана), путей и направления движения (преимущественно восходящего или комбиниро-

ванного вектора движения) растворов и соответствующего их состава, они вполне могли служить дополнительным источником металла в рудообразующих растворах. Однако доля участия этого источника урана остается не выясненной, скорее всего она была незначительной.

Подкоровые источники

Общие представления о мантийных процессах

Как уже отмечалось, в ходе общей истории геологического развития литосферы Земли весьма длительный процесс создания континентальной земной коры происходил в результате дифференциации ее вещества и сопровождался отчетливым накоплением в верхнем сиалическом слое не только петрогенных элементов (кремния, алюминия, щелочей и др.), но и радиоактивных элементов, в том числе урана. Как сейчас доказано результатами многих исследований, эта общая закономерность связана с проявлением различных эндогенных процессов, происходивших в недрах мантии и, возможно, в более глубоких оболочках Земли. Прежде всего в ходе непрерывной дифференциации вещества мантии, приводившая к ее неоднородности, по мнению А. П. Виноградова, В. В. Белоусова и др., происходила непрекращающаяся, но с разной интенсивностью ее дегазация, которая сопровождалась систематическим выносом многих элементов.

В особенностях поведения (миграции) радиоактивных и многих сопутствующих литофильных элементов, концентрации их в «гранитометаморфическом» слое коры, с учетом данных А. А. Смыслова и др., можно наметить, по крайней мере, две тенденции, которые обусловлены общим направлением развития и характером проявления эндогенных процессов в глубинных структурах земной коры: а) длительное, унаследованное и постепенное, но неравномерное, накопление урана, тория и калия на широкой площади крупных блоков континентальной коры (рудных провинций), приводившие к возрастанию концентраций этих элементов в породах разновозрастных ультраметаморфических и кислых (гранитоидных) магматических формаций от ранних комплексов и фаз к наиболее поздним; б) сравнительно локальный, более быстрый и инородный (сквозной или «сквозьструктурный») характер проявления ураноносных щелочных, щелочно-ультраосновных и щелочно-основных магматических процессов (пород), а также метасоматических образований, связанных либо с подкоровым магматизмом, либо с метасоматозом в зонах древних глубинных разломов, особенно рифтогенного типа.

Среди проявлений этих двух групп глубинных процессов, процессы ультраметаморфизма или гранитизации калиевой линии являются основным механизмом накопления урана в сиалической оболочке континентальной земной коры, обусловившим аномальную радиогеохимическую специализацию фундамента крупных ураноносных блоков урановорудных провинций. Однако распределение радиоактивных элементов в их пределах и по геологическим формациям весьма неравномерное, а формы нахождения весьма различны.

Возникновение подкоровых газово-тепловых или флюидных потоков

многие исследователи (Е. В. Артюшков, В. В Белоусов, П. Н. Кропоткин, О. Г. Сорохтин, В. В. Велинский, А. А. Маракушев и др.) объясняют процессами дегазации мантии, которые, в свою очередь (исходя из хондритовой модели образования планеты А. П. Виноградова), могут быть связаны с неоднородной аккрецией и происходившими в ее недрах различными (гравитационными, химическими, температурными) процессами дифференциации вещества.

Как уже отмечалось, представление Д. С. Коржинского о существовании в мантии потоков «трансмагматических» флюидов, которые вызывали в земной коре метаморфические и метасоматические преобразования пород, а затем — магмообразование и постмагматическую деятельность, в последнее время нашло свое дальнейшее широкое развитие. Однако, вопросы источников и состава этих флюидов остаются во многом неясными и дискуссионными. Судя по весьма высокому (в десятки кбар) всестороннему давлению, существующему в породах мантии, нахождение этих элементов обусловлено их растворимостью в твердой фазе. Это подтверждается результатами исследований Л. В. Бершова и др. (1970 г.), установивших присутствие водорода, азота и других газов в силикатах магматических пород подкорового происхождения. Появление флюидной фазы в породах мантии и дегазации последней может быть связана либо с первичной неоднородностью этой подкоровой оболочки,— либо с химическими реакциями и дифференциацией вещества под воздействием разогрева на ранних и других стадиях развития (в процессе аккреции, радиоактивного распада и т. п.), а также снятия давления в разломах.

Судя по результатам исследований газово-жидких включений в минералах и газовых вытяжек из магматических образований подкорового происхождения, а также на основании изучения содержащихся в них ксенолитов глубинных пород, состав мантийных флюидов был весьма сложный и разнообразный. Как уже отмечалось, по данным многих исследователей [62, 66, 70, 98, 105], в них присутствует углекислота, окись углерода, водород, метан, сероводород, а также вода, азот, сера, фтор, хлор и другие. По мнению Б. Г. Лутца (1975 г.) среди них преобладают водород, углекислота, углеводород и другие газы. Состав флюидов в основном зависит от глубинности. А. А. Маракушев, Л. Л. Перчук [70] и др. считают, что соотношение восстановленных и окисленных форм флюидов находится в зависимости от парциального давления (фугитивности) кислорода и температурных условий, т. е. меняется по вертикали в зависимости от глубины их нахождения. Среди них во многих зонах глубинных разломов преобладала углекислота [99—103, 114]. По данным И. А. Петерсилье, В. К. Каржавина, Б. Г. Лутца (1978 г.) и др., газовый состав верхней мантии менялся по вертикали от преимущественно водородного внизу до водородно-метанового в самой верхней ее части. По-видимому, он испытывал также значительные изменения и в плане. Многими исследователями отмечалось, что состав подкоровых флюидов меняется в зависимости от состава и глубины образования магматических расплавов (пород). Так, в нефелиновых сиенитах газовые включения, по данным Л. Н. Когарко (1978, 1983 гг.), И. А. Петерсилье (1947, 1964 гг.) и др. представлены преимущественно метаном и другими углеводородами, а также водородом, сероводородом, углекислотой и

окисью углерода; в карбонатитах преобладает углекислота, присутствует также водород и метан, в меньшей степени — гелий, углеводородные соединения и окись углерода. Во многих рудных провинциях проявления базальтоидного и щелочно-базальтоидного магматизма сопровождается значительным привносом углекислоты и натрия.

В составе газовых и расплавных включений в минералах ультраосновных нодулей из щелочных базальтов и кимберлитов главным компонентом, по данным исследований В. Б. Наумова и В. И. Коваленко (1985 г.), является углекислота, иногда присутствует окись углерода и сернистый газ. Вода, как правило, отсутствует. Возможность существования глубинных флюидов и расплавов, по мнению этих авторов, находится в широких термодинамических пределах — с высокой температурой (до 1500° С) и давлением (до 12—13 кбар). В термодинамических интервалах, соответствующих глубинам более 20 км (с температурой 500—1100° С и давлением 6—12 кбар) флюиды представлены в основном углекислотой, метаном и азотом, причем вода в них, по-видимому, практически отсутствует. В то же время имеются данные некоторых исследователей о содержании воды в стеклах толеитовых базальтов.

Как было показано ранее, наличие щелочей во флюидах, вызывавших процессы гранитизации и гранитообразования в земной коре в присутствии воды, обязано мантийному происхождению. Разбирая поведение и роль калия Д. С. Коржинский обращал особое внимание на возникновение щелочных гранитоидов (сиенитов) и других пород, а также щелочных мемасоматитов среди них. Развитие этих процессов он связывал не столько с эволюцией магматических очагов и постмагматических явлений, сколько с поступлением новых порций «трансмагматических» щелочных флюидов в результате углубления разломов в подкоровые оболочки. При этом подчеркивалось, что состав магматических расплавов зависел в основном от щелочности ювенильных флюидов, поступление которых обусловливало выдержанность щелочного состава магматизма по простиранию глобальных тектонических поясов.

Предполагается, что области зарождения флюидов, по-видимому, располагались ниже слоя «истощенной» мантии, т. е. на глубинах 120—180 км и более. Прямыми признаками проявления мантийных магматических и метасоматических процессов в блоках континентальной земной коры на территории некоторых урановорудных провинций и районов является развитие комплексов щелочных ультраосновных и основных пород, сопровождаемых обычно щелочными (K и Na) и карбонатными метасоматитами. По щелочности исследователи различают магматизм калиевой и натриевой линий.

Щелочные ультрабазиты, базальтоиды и др., по мнению О. А. Воробьевой, В. А. Кононовой, Р. М. Яшиной, Е. Д. Андреевой, Л. Н. Когарко, Л. С. Бородина и многих других изучавших их исследователей, являются производными подкоровых магматических очагов.

Среди них выделяется три основных формации, с которыми связаны различные типы постмагматических редкометально-торий-урановых месторождений: 1) карбонатитоносных ультраосновных-щелочных пород; 2) щелочных нефелиновых сиенитов, сопровождаемых редкоземельно-торкевым оруденением с ураном и ниобием; 3) щелочных и субщелочных

гранитоидов, с которыми связана редкоземельно-ториевая минерализация с бериллием, оловом, молибденом, вольфрамом [24]. Как известно, самостоятельных щелочных магм нигде не установлено, их образование связано с процессами дифференциации и внутримагматического метасоматоза ультраосновных, основных и кислых магм различного происхождения.

Общей закономерностью пространственного размещения этих комплексов пород, по мнению Ю. М. Шеймана, Ф. Р. Апельцина, Е. В. Свешниковой и др., является отчетливая приуроченность их к протяженным зонам глубинных разломов разных типов — к краевым швам древних щитов и платформ, а также срединных массивов, отделяющим их от геосинклинально-складчатых областей, к так называемым «сквозьструктурным» или «сквозным» разломам, которые рассекают крупные консолидированные блоки континентальной земной коры и проникают на большую глубину в мантию. Появление этих комплексов пород связано с интенсивными процессами глобальных эпох тектоно-магматической активизации.

По данным В. А. Кононовой (1966 г.), Е. М. Эпштейна и др. (1962 г.), формация ультраосновных-щелочных пород с карбонатитами образует весьма длительно развивающиеся многоэтапные и многофазные гипабиссальные и субвулканические интрузивы и вулкано-плутонические сооружения центрального типа с зонально-концентрическим строением, нередко сопровождаемые кальдерами проседания, обычно они цепочками вытягиваются вдоль зон глубинных разломов или располагаются в узлах их сочленения. Для этих комплексов установлена вполне определенная последовательность формирования от ультраосновных к щелочным породам, причем последние обычно имеют незначительное развитие, что связано, по мнению О. А. Воробьевой (1963 г.), с малыми содержаниями щелочей в первичных ультраосновных расплавах и ограниченными объемами щелочных магм в процессе их дифференциации. При формировании щелочных пород существенную роль играли метасоматические процессы нефелинизации и образования карбонатитов, а во вмещающих породах — появление натриевых фенитов.

По мнению О. А. Воробьевой (1963 г.), Б. М. Шейнмана (1960 г.), В. С. Соболева (1960 г.), А. А. Кухаренко, М. Н. Орловой (1964 г.) и др., изверженные породы этой карбонатитоносной формации являются продуктами дифференциации единой родоначальной щелочно-ультраосновной магмы, возникшей в результате плавления мантийного субстрата перидотит-эклогитового состава [24]. Обогащение щелочами происходило на поздних стадиях этой дифференциации.

Согласно представлениям Ю. М. Шейнмана (1960 г.), В. В. Белоусова (1962 г.) и др., щелочно-ультраосновные и базальтоидные магмы зарождались в верхней мантии на глубинах порядка 150—100 км. В. В. Белоусов считает, что дифференциация подобных магм происходила не в первичных очагах, т. е. в зоне их зарождения в верхней мантии, а уже во вторичных (периферических) очагах в нижней части земной коры, где в них также мог попадать гранитоидный материал.

По данным П. С. Козловой [24], для пород щелочно-ультраосновной формации характерно присутствие углекислоты, фосфора, воды и других

компонентов, содержания которых увеличиваются от ранних фаз к поздним. В этом же направлении наряду с возрастанием щелочности и кремнекислотности пород, закономерно увеличиваются содержания ниобия, циркония, тория, урана, редких земель цериевой группы и др.

Среди рассматриваемых магматических комплексов по насыщенности их летучими компонентами Л. Н. Когарко (1982 г.) выделяет два основных типа: а) относительно «сухие» магмы, образующие недифференцированные серии, в которых все редкие и радиоактивные элементы, в т. ч. повышенные содержания тория, урана и др. остаются в породах. Они слагают рудоносные щелочные интрузивные массивы; б) флюидонасыщенные магмы, создающие разновозрастные дифференцированные серии пород, с которыми связаны постмагматические образования.

Образование щелочных метасоматитов различных типов (фениты и др.) В. А. Кононова (1971, 1976 гг.), Л. Н. Когарко (1977, 1982 г.) и др. также связывают с подкоровыми флюидами. Эти авторы считают, что щелочные магматические расплавы (нефелиновые сиениты фонолиты и др.) формировались в наиболее глубинных частях мантии под воздействием щелочных (натриевых) флюидов. Представления о переносе натрия мантийными флюидами подтверждаются присутствием этого элемента в породах мантии на уровнях образования кимберлитов (160—180 км и более).

В отношении миграции калия в мантийных условиях, свидетельствуют многие данные о привносе этого элемента глубинными щелочными флюидами при процессах гранитизации, образовании некоторых основных постмагматических пород и более поздних калишпатовых метасоматитов. В подкоровых условиях (среди гранатовых и шпинелевых лерцолитов) калий и натрий, по представлениям А. А. Маракушева и Л. Л. Перчука [70], сконцентрированы в основном в моноклинном пироксене и разновидности отроклаза. В пределах верхней мантии, судя по данным исследований А. Э. Рингвуда, И. Д. Рябчикова и др., эти щелочные элементы обычно пространственно разобщены, образуют обогащенные калием или натрием участки и зоны. Это отображает раздельную их миграцию в мантийных флюидах, участие в разных фазах и процессах.

Имеющиеся в настоящее время данные о содержании и характере распределения радиоактивных и других литофильных элементов в магматических, метаморфических и метасоматических породах и минералах подкорового происхождения, а также в кимберлитах и карбонатитах, с учетом некоторых экспериментальных данных показывают, что для мантийных образований в целом характерен весьма низкий уровень концентраций урана при контрастно неравномерном его распределении. На фоне очень низких содержаний урана, по данным Б. Г. Лутца (1975 г.), С. М. Кравченко (1983 г.), А. П. Акимова (1974 г.) и др., варьирующих от $0{,}004—0{,}02 \cdot 10^{-4}\%$ до $0{,}1—0{,}8 \cdot 10^{-4}\%$ в перидотитах, эклогитах, лерцолитах и других подобных гипербазитах. Эти концентрации повышаются до $1{,}6—3{,}0 \cdot 10^{-4}\%$ в нефелинитах и кимберлитах и резко возрастают в некоторых щелочных породах (нефелиновых сиенитах и других) до $16—18 \cdot 10^{-4}\%$. Контрастно высокие содержания урана и тория, а также редких литофильных элементов отмечаются в отдельных мантийных щелочных и особенно в агпаитовых породах, которые, по мнению Л. Н. Ко-

гарко и др. (1982 г.), могут являться остаточными дифференциатами щелочно-ультраосновных и щелочно-базальтоидных магм.

Комплекс нефелиновых сиенитов (агпаитных нефелиновых сиенитов, нефелиновых, псевдолейцитовых и щелочных сиенитов, нефелин-миаскитовых и щелочных сиенитов, щелочных граносиенитов и щелочных нефелиновых сиенитов, иногда карбонатитов, а также щелочных габброидов) везде характеризуется урановой и ториевой геохимической специализацией. Эти породы кроме того отличаются весьма высокими содержаниями фосфора, стронция, бария, бериллия, молибдена, олова, фтора, циркония, тантала, ниобия, гафния, редких щелочей, редких земель и др.

По мнению Б. Г. Лутца (1974, 1975 гг.), С. М. Кравченко (1983 г.), И. Д. Рябчикова (1982, 1985 гг.), А. А. Маракушева (1978, 1983 гг.) и др., уран, торий и сопутствующие элементы (цирконий, тантал, ниобий, рубидий, цезий, скандий, гафний, редкие земли и др.) в условиях мантии при весьма высоких давлениях сконцентрированы главным образом в минералах-концентраторах — гранате, в меньшей степени — в клинопироксене (в основном виде изоморфной примеси). Не исключена здесь также миграционноспособная форма в межзерновых пространствах и в различных дефектах минералов. Ведущим механизмом извлечения урана и других литофильных элементов из мантийных пород и минералов, по мнению Б. Г. Лутца (1974, 1975 гг.), вероятно, могло быть выщелачивание его флюидами (фильтрационный источник).

Кларк урана в щелочных магматических породах, по данным А. А. Смыслова (1974 г.), В. М. Терентьева (1980 г.) и др., составляет в среднем около $7 \cdot 10^{-4}\%$, в специализированных разностях — $8{,}5 \cdot 10^{-4}\%$, средние содержания наиболее ураноносных пород достигают $10 \cdot 10^{-4}\%$. В то же время имеются отдельные массивы щелочных комплексов, в пределах которых редкоземельно-торий-урановые минеральные ассоциации образуют промышленные концентрации (0,01—0,03%), но они являются низкосортными рудами.

Со сложными ультраосновными-щелочными и основными-щелочными комплексами мантийного происхождения, среди которых преобладают нефелиновые пироксениты, щелочные и субщелочные габброиды, реже — дуниты, в некоторых провинциях генетически связаны карбонатиты. Доля последних в этих сложных эндогенных комплексах весьма различна и варьирует вплоть до 50%.

Как известно, карбонатиты представляют собой гетерогенные полиформационные и полигенные многостадийные образования различной морфологии, среди которых наряду с известково-магнезиально-железистыми карбонатными породами встречаются щелочно-(K, Na)-карбонатные «лавы». Они отличаются по условиям формирования, геохимической и металлогенической специализации (редкометальные, фосфатоносные, ураноносные карбонатиты). Среди них отмечаются магнетит, апатит, флогопит, флюорит, а также акцессорные минералы — пирохлор, гатчеттолит, дизаналит, монацит, карбонаты и фосфаты редких земель. В эндоконтактовых зонах карбонатитовых тел развивается пироксен (диопсид), форстерит, флогопит, полевой шпат и другие минералы; в экзоконтактовых — нередко отмечается фенитизация вмещающих пород [24].

В настоящее время практически все исследователи придерживаются представлений об эндогенном происхождении карбонатитов, при этом среди них выделяются магматические породы, представленные интрузивной, субвулканической и вулканической фациями, а также метасоматические постмагматические образования. Предполагается, что они образовались при температурах до 800—900° С из насыщенных углекислых расплавов или растворов. Во включениях много углекислоты, водорода и совершенно нет воды.

Для пород карбонатитов характерен повышенный геохимический фон титана, хрома, меди, платины, золота, ниобия, тантала, цинка, циркония, бария, стронция, а также гафния, церия, фтора, хлора, и др. Содержания урана в карбонатитах колеблются в широких пределах от $5—10 \cdot 10^{-4}\%$ до $10 \cdot 10^{-2}\%$ и более, причем обычно устанавливается корреляционная связь его с торием, танталом, ниобием, цирконием. Уран сконцентрирован в основном в пирохлоре (особенно гатчеттолите), бадделеите, гайналите, фосфатах, карбонатах редких земель и других редких минералах. Наибольшие средние содержания урана ($12 \cdot 10^{-3}\%$) присущи рудной кальцитовой фации карбонатитов. В установленном А. А. Фроловым (1965 г.) среди карбонатитов ряду минералого-геохимической зональности уран, торий и другие элементы занимают одно из последних мест. Многие карбонатитовые породы нередко являются комплексными ниобиевыми, танталовыми, фосфорными (апатитовыми), медными, железными и редкоземельными рудами. В отдельных массивах карбонатитов, приуроченных к сложным комплексам щелочных пород, ураноносность достигает промышленных масштабов.

Причины возникновения таких высоких концентраций радиоактивных и многих редкометальных и редкоземельных сопутствующих элементов в щелочных магматических породах и карбонатитах не выяснены. Одни исследователи (Когарко и др., 1982 г.) предполагают, что накопление многих элементов (тантала, ниобия, циркония, урана, тория, редких земель и др.) произошло в результате фракционной дифференциации высокощелочных магм, другие (Соловьева и др., 1984 г.) считают, что подобные концентрации радиоактивных и литофильных элементов могут быть связаны с мантийным щелочным метасоматозом.

Развитие в пределах некоторых рудных провинций многофазных массивов щелочных пород с контрастной геохимической урановой специализацией, наличие редкометально-редкоземельных с торием и ураном карбонатитовых месторождений, связанных с массивами щелочных комплексов и сопровождающих их щелочных и карбонатных метасоматитов, свидетельствуют о возможности накопления весьма высоких концентраций редкоземельных и радиоактивных элементов, в том числе урана, в мантийных магматических и метасоматических образованиях.

Все это показывает, что в верхней мантии существовала возможность концентрации урана и других литофильных элементов в процессе развития щелочных магматических очагов и постмагматической деятельности, флюидные потоки которых сформировали карбонатиты и вызвали метасоматоз вмещающих пород.

Типы урановых месторождений и представления об их источниках

Возможный подкоровый источник рудного вещества некоторыми исследователями [24, 31, 32, 44] предполагается для эндогенных комплексных торий-урановых, редкоземельно-торий-урановых и урановых месторождений, тесно связанных с проявлением мантийного магматизма. К таким месторождениям с возможными подкоровыми источниками рудного вещества прежде всего следует отнести эндогенные месторождения, которые обнаруживают тесную пространственно-временную (парагенетическую и генетическую) связь с магматическими комплексами подкорового (мантийного) происхождения — щелочными, ультраосновными-щелочными породами.

Как уже отмечалось, среди эндогенных месторождений урана Н. П. Лаверов (1984, 1986 г.) первые две группы из трех относит именно к таким месторождениям, обнаруживающим связь с разными типами мантийного магматизма. Первая группа месторождений, связанных со щелочно-ультраосновным магматизмом, включает два генетических класса: 1) карбонатитовые (медно-урановые апатитсодержащие редкометальные); 2) магматогенные гидротермальные (редкоземельно-ниобий-урановые штокверки и жилы). Во второй группе месторождений, связанных со щелочным магматизмом выделены три класса месторождений: 1) позднемагматические (урансодержащие редкоземельно-ториевые луявриты и анальцим-апатитовые тела — залежи); 2) пегматитовые (ураноносные редкоземельно-циркониевые и редкоземельно-ториевые пирохлоровые); 3) магматогенные гидротермальные (цирконий-урановые, молибден-урановые с флюоритом и золотом, редкоземельные торий-урановые) штокверки и жилы в массивах щелочных пород.

В отношении магматических, позднемагматических и пегматитовых месторождений в щелочно-ультраосновных и щелочных комплексах пород, представленных ураноносными карбонатитами, ураноносными нефелиновыми сиенитами — луявритами, ураноносными редкометальными пегматитами и др., подкоровый магматический источник рудного вещества (урана и сопутствующих редких и редкоземельных элементов) не вызывает особых сомнений.

В то же время изучение многими исследователями разновозрастных комплексов щелочно-ультраосновных пород с связанных с ними карбонатитов в разных районах мира показало, что их формирование происходило в несколько этапов и стадий, причем далеко не все они были рудоносными.

По данным А. А. Кухаренко, М. П. Орловой, Э. А. Богдасарова и др., редкие элементы накапливались в результате высвобождения их из акцессорных и породообразующих минералов ультраосновных-щелочных пород в процессе их метасоматического преобразования. Решающую роль в формировании редкометального оруденения в карбонатитах играла мобилизация редких элементов из ультраосновных-щелочных пород более поздними процессами.

Как отмечают А. И. Гинзбург и Е. М. Эпштейн (1972 г.), анализ данных о распределении циркония, ниобия, тантала, тория и урана в кар-

бонатитах и вмещающих их породах ультраосновных-щелочных комплексов показал различное геохимическое поведение этих элементов в последовательно формирующихся карбонатитовых образованиях разных стадий. В карбонатитах первой стадии (кальцитовой) существенного привноса тантала и ниобия не установлено. Формирование карбонатитов второй стадии сопровождалось значительным привносом ниобия, тантала, тория и урана. В течение образования карбонатитов последующих третьей и четвертой стадий (доломитовой и анкеритовой) происходили переотложение и частичный вынос ниобия, тантала, урана, тория и, возможно, редкоземельных элементов.

В целом также более или менее ясно, хотя и несколько сложнее обстоит дело с вопросом источника рудных веществ для большинства постмагматических редкометально-редкоземельно-ториевых (Ta, Nb, Zr, Be, P, TR, Th), нередко с ураном месторождений разных типов, связанных со щелочно-ультраосновным и щелочно-основным магматизмом. К ним относятся пневматолитовые, высоко-, средне- и низкотемпературные гидротермальные месторождения, сформированные в разные эпохи в различных геологических условиях многих районов рудных провинций древних и активизированных щитов и складчатых областей.

В. А. Невский, П. С. Козлова и др. [24] среди них выделяют три группы месторождений: пневмато-гидротермальные (в альбититах, контактовых роговиках и скарнах), высокотемпературные гидротермальные и средне-, низкотемпературные. Контактовые роговики и скарны, а также образованные в более поздние стадии метасоматические альбититы развиваются в связи с проявлением магматизма как щелочного (сиенитов, нефелиновых сиенитов), так и гранитоидного (лейкократовых, субщелочных и щелочных гранитов и др.). Для большинства из них характерна пространственно-временная связь со щелочными породами, которая рассматривается как генетическая или парагенетическая.

Комплекс пород формации щелочных и нефелиновых сиенитов, по данным П. С. Козловой [24], распространен в рудных провинциях, в которых развиты постмагматические месторождения с торий-редкометальным и торий-урановым оруденением. Рассматриваемый гетерогенный комплекс сложен изверженными породами, которые являются производными ультраосновных, базальтоидных и гранитоидных магм. Среди продуктов щелочно-базальтоидных расплавов различаются щелочные породы натриевого и калиевого рядов.

Со щелочными породами натриевого ряда (щелочными и нефелиновыми сиенитами) пространственно и генетически связана группа пневмато-гидротермальных (альбититовых) и высокотемпературных гидротермальных редкоземельно-ториевых месторождений с ураном, ниобием, цирконом и др. Промышленных урановых месторождений неизвестно. Образования этого комплекса, приуроченные к зонам долгоживущих глубинных разломов, слагают как сравнительно простые и однородные (однофазные), так и сложные (многофазные) интрузивные массивы.

П. С. Козлова отмечает, что породы характеризуются не только высокими содержаниями щелочей (причем Na > K), но также фосфора, серы, хлора, фтора, углекислоты, воды и других летучих компонентов. В щелочных и нефелиновых сиенитах отмечаются повышенные содер-

жания циркония, тантала, ниобия, тория, урана, лития, бериллия, титана, стронция, марганца, галия, иттрия, редких земель цериевой группы и других. В постмагматических метасоматитах (микроклиновых, альбитовых, биотит-карбонатных и др.) концентрация этих элементов существенно возрастает. В экзоконтактовых зонах интрузивов щелочных и нефелиновых сиенитов вмещающие породы превращены в пироксен-полевошпатовые роговики, а сами щелочные магматиты подвергнуты автометасоматическим изменениям с образованием микроклина, канкринита, щелочного амфибола, альбита, карбоната, флюорита и др. В ряде случаев вблизи интрузивов отмечается проявление многостадийной постмагматической гидротермальной деятельности с торий-редкоземельной минерализацией с примесью урана [24].

Щелочные породы калиевого ряда образуют вулкано-плутонический комплекс, который слагают сложные многофазные сооружения центрального типа, формирование которых завершается внедрением дайковой серии, нередко трубок взрыва и проявлением постмагматической гидротермальной минерализации. Вулкано-интрузивный комплекс пород щелочноземельного и щелочного (калиевого) состава включает щелочные и нефелиновые сиениты, шонкиниты, сиенит-порфиры и щелочные пегматиты, а также псевдолейцитовые породы. Предполагается, что образования являются поздними дифференциатами базальтовой магмы. С этим комплексом связаны торий-урановые и собственно урановые месторождения [24].

По данным Т. В. Билибиной (1963 г.), Я. Д. Готмана (1979 г.), П. С. Козловой (1972 г.) и др., комплекс калиевых щелочных пород отличается повышенными содержаниями бария, стронция, титана, ванадия, марганца, фосфора в пегматитах, ниобия. В то же время они имеют относительно низкие содержания радиоактивных элементов. Содержания тория — $(6—10)\cdot10^{-4}\%$, урана — $(3—4)\cdot10^{-4}\%$ во всех разностях несколько увеличиваются в поздних щелочных гранитах, а в грорудитах — достигают $8\cdot10^{-4}\%$, торий-урановое отношение — 1,5—3,0.

Многостадийная постмагматическая минерализация, в том числе торий-урановая, связанная со щелочными породами калиевого ряда, обнаруживает геохимическое родство с ними, которое проявляется в повышенных содержаниях тория, бария, стронция, фтора, титана, ванадия, марганца, молибдена и других элементов. В раннюю стадию образовывалась торневая минерализация, в позднюю — собственно урановая [24].

Подкоровый магматический источник рудного вещества можно предполагать, судя по данным некоторых исследователей, для торий-урановых и урановых месторождений, связанных со щелочным и щелочноземельным магматизмом, который проявился в пределах урановорудных провинций позднемезозойского заложения в эпоху тектоно-магматической активизации [32, 44, 46]. Размещение субвулканических и гипабиссальных интрузивов и даек щелочноземельно-щелочного комплекса мезозойского возраста (160—110 млн лет) контролируется крупными, длительно развивавшимися разломами, заложенными еще в раннем протерозое. Магматические породы этого комплекса сформировались в два этапа, причем в первый этап образовались щелочные и нефелиновые

сиениты, сиенит-порфиры, шонкиниты, щелочные пегматиты, во второй — щелочные трахиты, фонолиты, их туфы и туфобрекчии, а также эгириновые граниты, кварцевые сиениты, грорудиты [87].

В одних урановорудных районах, по данным Т. В. Билибиной и др. (1963 г.), торий-урановые месторождения приурочены к гипабиссальному лакколитообразному многофазному интрузиву (вулкано-интрузивному сооружению), сложенному породами мезозойского щелочного комплекса и контролируемого узлом пересечения межблоковых и секущих разломов. Выделяется два этапа минералообразования. В первый этап образовались калиевые и натриевые метасоматиты и ториеносные эгиринанортоклаз-кварцевые жилы, которые накладываются на интрузивы щелочных пород первого этапа и сами рассекаются дайками тингуаитов. Второй, более поздний, этап соответствует постмагматической многостадийной гидротермальной деятельности, которая привела к окварцеванию и аргиллизации щелочных пород массивов и образованию кварц-барит-флюоритовых жил с сульфидами и уранинитом, рудоносных брекчий с уранинитом, настураном, а также пострудными кварцевыми жилами.

В других урановорудных районах, по данным Я. Д. Готмана (1972, 1979 гг.), проявлены две или три разновозрастные металлогенические эпохи: раннедокембрийская и мезозойская. В раннепротерозойскую эпоху образовались магнезиальные скарны с флогопитом и магнетитом, которые связаны с процессами гранитизации пород древнего фундамента. В позднемезозойскую эпоху сформировались в опущенных блоках золоторудные месторождения, а на поднятиях — титан-урановые (браннеритовые), собственно урановые, молибденовые и флюоритовые месторождения. В одних блоках разломы контролируют размещение не только гипабиссальных штоков и даек мезозойских щелочных пород, но и пространственно с ними связанных зон золотоносных кварц-карбонат-адуляровых метасоматитов с пиритом, халькопиритом, а также золотоносных кварц-гематитовых и кварц-сульфидных жил. В других блоках типа орогенных сводовых поднятий, по данным В. И. Казанского и В. А. Крупенникова [32, 46], урановые и титан-урановые месторождения приурочены к зонам омоложенных в мезозое раннепротерозойских разломов и тяготеют к позднемезозойским интрузивам щелочноземельно-щелочных пород калиевого ряда. Однако урановое оруденение здесь не обнаруживает столь тесной пространственной связи с магматизмом. Согласно Я. Д. Готману (1972, 1979 г.), М. Ф. Стрелкину (1967 г.) и др., процессы гидротермального минералообразования на месторождениях протекали в два этапа и несколько стадий. Сначала сформировались золотоносные низкотемпературные пирит-карбонат-калишпатовые метасоматиты (гумбеиты). Затем образовались барит-кварцевые жилы и сульфидные прожилки, а также ураноносные брекчии (кварц-карбонат, серицит, калиевый полевой шпат, браннерит, настуран, сульфиды) и кварц-карбонат-флюоритовые жилы. Интересно отметить, что все эти минеральные ассоциации рассекаются дайками щелочных пород.

Вопросы генезиса и источников рудного вещества древних редкоземельно-торий-урановых месторождений, ассоциирующих с продуктами протерозойский эпох ультраметаморфизма и гранитизации (аляскитовые граниты, мигматиты, пегматиты и т. п.), являются дискуссионными.

Обычно их относят к классу пегматитовых месторождений, которые связаны с гранитоидным магматизмом и имеют либо магматическое, либо метасоматическое происхождение. По геологическому и абсолютному возрасту (2,0 и 1,0 млрд лет) оруденение и сопутствующие минералы весьма близки ко времени становления ультраметаморфических гранитов, сформированных в абиссальных условиях. В. А. Крупенников [32] на основании геологических и геохронологических данных приходит к выводу, что редкоземельно-торий-урановое оруденение этих месторождений является гидротермальным, генетически связанным с проявлением в зонах глубинных разломов высокотемпературных калиевых метасоматитов, которые наложены на разнотипные разновозрастные образования и возникли под воздействием подкоровых процессов.

Кроме того, как уже отмечалось, подкоровый (мантийный) источник урана и многих сопутствующих редких и редкоземельных элементов, а также рудоносных флюидов предполагается некоторыми исследователями для месторождений ураноносных альбититов и других щелочных метасоматитов, развитых в рудных провинциях как древних щитов, так и фанерозойских складчатых и активизированных областей.

Протерозойские месторождения альбититов, по данным В. И. Казанского, В. А. Крупенникова [32], локализованы в сложно построенных зонах долгоживущих глубинных разломов, среди метаморфических и ультраметаморфических комплексов пород древних щитов. Как правило они не обнаруживают видимой связи с гранитоидным или щелочным магматизмом, близким по времени проявления к урановому оруденению. Однако обычно они приурочены к зонам глубинных разломов, контролирующих положение интрузивов и даек магматических пород основного, контрастного основного—кислого и другого состава мантийного происхождения. Урановое оруденение месторождений сформировалось 1,8—1,7 млрд лет назад в эпоху планетарной тектоно-магматической активизации.

Как уже отмечалось, в отношении урана и рудоносных растворов существуют различные представления: метаморфогенное, метеорно-ювенильное, гидротермальное.

По данным В. А. Крупенникова [30], альбитит-урановые месторождения сформировались вслед за становлением близких по возрасту магматических комплексов подкорового происхождения (габбро-анортозит-рапакиви-гранитного и щелочного состава). Генезис месторождений, по мнению этого автора, наиболее удовлетворительно объясняется с позиций глубинного происхождения ураноносных щелочных флюидов, возникших в связи с процессами дегазации и петрохимической дифференциации мантии. При этом представления о мантийном происхождении урановых месторождений он пытается подтвердить совокупностью следующих наиболее существенных особенностей:

постоянной приуроченностью их к зонам глубинных разломов подкорового заложения и огромной протяженностью ореолов ураноносных натриевых метасоматитов;

выдержанным характером геохимической специализации натриевых метасоматитов (U, Th, TR, Zr, P, V, Ti, Be) независимо от вмещающих

пород и степени их метаморфизма, а также глубинного строения земной коры;

содержаниями в заметных количествах водорода и углеводородов в альбитизирующих растворах, что свидетельствует о существенно восстановленном их характере;

изотопным составом углерода и серы в минералах ураноносных альбититов, указывающим на их глубинный источник;

отсутствием у альбитизирующих флюидов признаков физико-химической эволюции.

Л. Я. Шмураева [109] на основании геолого-структурных, петрологических и минералого-геохимических данных, образование таких месторождений, локализованных в различной геологической обстановке древнего фундамента Восточно-Европейской платформы и связанных с карбонатно-щелочным (натриевым) метасоматозом, а также источник урана пытается объяснить развитием глубинных подкоровых процессов. Проявление их обусловлено интрателлурическими тепломассопотоками, возникшими в мантии и земной коре под влиянием мощной раннепротерозойской тектонической активизации.

В качестве доказательств подкорового источника рудного вещества рассматриваемых месторождений приводится целый ряд особенностей, позволяющих считать их в генетическом плане как единое целое:

проявление ультрабазитов, в том числе щелочных пород натриевого ряда в пределах рудоносных разрывных структур;

приуроченность к зонам глубинных разломов подкорового заложения;

одинаковый минеральный состав и монометальность оруденения, особая геохимическая его специализация элементов-спутников мафического профиля (Fe, Ti, V, TR иттриевой группы, Zr, Th, иногда Cr, Cu, Zn, Mo, Li, Be и др.), а также наличие летучих компонентов (CO_2, S, B, P_2O_5, F);

мантийные соотношения стабильных изотопов ряда элементов (C, Sr и др.);

натриевые и карбонатно-натриевые метасоматиты, не связанные с предшествующей региональной коровой гранитизацией;

отсутствие в пределах рудных полей и месторождений геологических формаций с геохимической урановой специализацией.

Все изложенное выше показывает, что среди средне- и низкотемпературных гидротермальных торий-урановых и собственно урановых месторождений, которые локализованы в щелочных (натриевых и калиевых) метасоматитах и для которых предполагается подкоровый источник флюидов и рудного вещества, можно выделить по крайней мере две различные группы: 1) месторождения, связанные с подкоровым (щелочным, щелочно-ультраосновным) магматизмом, и 2) месторождения, не обнаруживающие видимой связи с проявлением такого магматизма. Месторождения обеих групп характеризуются многими общими геохимическими особенностями: не только высокими содержаниями щелочей (Na или K), но и набором редких, редкоземельных, радиоактивных и других элементов. Однако они существенно отличаются по ураноносности, т. е. по значению (масштабности и качеству) уранового оруденения.

В отношении месторождений первой группы следует признать, что не вызывает сомнений подкоровое происхождение ураноносных магматических очагов и, как следствие, подкоровых источников ураноносных магм, постмагматических флюидов и рудного вещества, в том числе тория, урана и др., их многостадийность. Эти месторождения приурочены к зонам глубинных (подкоровых) разломов, но развиты довольно локально, только вблизи щелочных интрузивов центрального типа, урановое оруденение в них не имеет первостепенного значения. Однако факты наличия этих месторождений свидетельствуют о принципиальной возможности существования в природе подкоровых (магматических) источников.

Вопросы происхождения месторождений второй группы и источников урана в рудоносных разломах, вдоль которых не устанавливается проявлений ураноносного подкорового (щелочного) магматизма, остаются во многом неясными и дискуссионными. Определенные черты сходства, в первую очередь по геохимическим особенностям развитых здесь метасоматитов и руд с аналогичными образованиями месторождений первой группы, позволяют согласиться с представлением о том, что сформировавшие их растворы (флюиды) имели в основном подкоровое происхождение и содержали углекислоту, фтор, щелочи (Na, K), а также значительные количества фосфора, циркония, ванадия, редких земель и др. Не исключена также возможность присутствия в них весьма ничтожной части радиоактивных элементов (Th, U). Однако нельзя согласиться с мнением, что эти флюиды были ураноносными (рудообразующими) с самого начала их зарождения, способными создавать промышленные концентрации руд, и что основным источником урана служили мантийные породы.

Таким представлениям противоречат прежде всего закономерности размещения урановорудных провинций и месторождений — приуроченность их к определенным, длительно формирующимся структурам континентальной земной коры, с хорошо развитым «гранитным» слоем, противоречат вся длительная направленность предшествовавшей истории специфического геологического развития коры и проявление различных эндогенных процессов, приводивших к созданию многокилометровой сиалической оболочки и ее геохимической специализации, накоплению в ней радиоактивных элементов, в том числе урана.

В подтверждение точки зрения о мантийном источнике урана ее авторы, кроме отмеченных выше особенностей, приводят и такие доводы: отсутствие специализированных геологических формаций — низкие фоновые содержания урана в породах метаморфических и ультраметаморфических комплексов (особенно образований гранулитовой фации), отсутствие близких по возрасту специализированных (ураноносных) гранитов, слабая насыщенность летучими компонентами известных пегматитов и гранитов.

Однако, как было показано ранее, концентрации урана в мантийных породах, несмотря на их резкую дифференцированность по радиоактивности и весьма локальное развитие отдельных ураноносных образований, щелочных и других магматических и метасоматических пород, в целом гораздо ниже, чем в породах земной коры. Исходя из общих особенностей

развития эндогенных процессов, здесь для формирования рудоносных растворов можно предполагать фильтрационный механизм извлечения урана восходящими флюидами из специализированных пород.

Как уже отмечалось, для метаморфических толщ и ультраметаморфических гранитоидов, слагающих кристаллический фундамент древних щитов, характерны довольно дифференцированные фоновые содержания урана и тория. Среди них развиты породы как с низкими содержаниями, так и с нормальными и повышенными концентрациями металла и разной долей его «подвижной» формы. Поэтому на многокилометровом пути продвижения восходящих активных флюидов вдоль мощных проницаемых зон подкоровых разломов вполне могла существовать возможность значительно повысить их ураноносность в результате глубинной мобилизации рудного вещества из различных, в том числе гранитоидных, пород земной коры (глубинный фильтрационный источник).

Все это свидетельствует о том, что происхождение эндогенных урановых месторождений данного типа не имеет на современном этапе изученности однозначного объяснения. Они вполне могли сформироваться в результате проявления постмагматической (постгранитизационной) гидротермальной деятельности на общем фоне поступления по зонам глубинных разломов мантийных флюидов. Поэтому при образовании рудоносных растворов совершенно не исключена возможность существования глубинного фильтрационного или фильтрационно-магматического источника.

Рассмотрение представлений о подкоровых источниках рудного вещества и имеющихся данных по некоторым группам эндогенных урановых месторождений позволяет сделать следующие выводы:

1) подкоровые магматические источники рудного вещества можно предполагать для комплексных торий-урановых, редкоземельно-торий-урановых и некоторых других урановых месторождений протерозойского, палеозойского и мезозойского возраста, тесно парагенетически связанных с проявлением мантийного ультраосновного-щелочного, основного-щелочного и щелочного магматизма;

2) для группы собственно урановых месторождений, локализованных в щелочных метасоматитах (альбититах) и не обнаруживающих видимой связи с проявлениями внутрикорового гранитоидного магматизма, но пространственно и по времени образования тяготеющих к комплексам ультраосновных, основных и основных-кислых пород, вопрос источников рудного вещества остается во многом неясным и дискуссионным, поэтому существуют альтернативные представления.

Все месторождения являются эндогенными гидротермальными. Происхождение флюидов, содержащих в своем составе углекислоту, щелочи, галоиды, фосфор и другие летучие и подвижные компоненты, а также редкие и редкоземельные элементы, скорее всего следует связывать с развитием подкоровых процессов — дегазацией мантии или подкоровых магматических очагов. Источником урана, по данным одних исследователей, служили гранитизированные и диафторизированные метаморфические породы «гранито-метаморфического» слоя коры (внутрикоровые глубинные фильтрационные источники); по мнению других,— мантийное вещество (подкоровые источники).

1/2 9 Заказ 2123

Как было показано в предыдущих главах, уран вместе с некоторыми другими элементами длительное время и в небольших количествах переносился в мантийных гранитизирующих флюидах, вызывавших на ранних этапах развития рудных провинций гранитизацию пород земной коры. Однако вряд ли ураноносность подкоровых флюидов, проявившихся в рудные орогенные этапы, могла достигать таких значений, чтобы непосредственно создавать первичные мантийные рудообразующие растворы.

Полигенные источники

Среди урановых месторождений с возможными полигенными источниками, в первую очередь следует отметить месторождения выделяемой Н. П. Лаверовым (1984, 1986 гг.) полигенной серии. К ним принадлежат прежде всего крупные месторождения собственно урановых и комплексных урансодержащих руд (с никелем, кобальтом, мышьяком, медью, золотом, серебром) в протерозойских провинциях Атабаска (Канада), Северной и Южной Австралии, которые относятся к особому типу полигенных месторождений в зонах «несогласий». Формирование этих месторождений многие исследователи связывают с проявлениями целого ряда процессов последовательной концентрации и перераспределения урана: сингенетичным накоплением в сапропелевых илах, их метаморфизмом, более поздней гидротермальной деятельностью, связанной с постскладчатым гранитоидным магматизмом и концентрацией богатых урановых руд и других сопутствующих металлов в зонах вторичного обогащения.

На полигенное происхождение этих месторождений указывают приуроченность их к зонам региональных поверхностей несогласия, особый состав перекрывающих платформенных отложений, отчетливый контроль оруденения разрывами и карстогенными структурами, специфические составы руд и последовательность минералообразования, наличие разновозрастных генераций урановых минералов [87]. Среди них Н. П. Лаверов выделяет две генетические группы.

Первая группа включает месторождения двух классов, образованные в процессе окисления первичных урановых концентраций разного происхождения.

1. Трещинно-инфильтрационные зоны вторичного обогащения гидротермальных месторождений в зонах «несогласия» (собственно урановые, иногда с золотом, полиметальные урановые с никелем, кобальтом, медью, серебром, собственно урановые и ванадий-урановые с молибденом и др. в черных сланцах).

2. Пластово-инфильтрационные зоны вторичного обогащения седиментационно-диагенетических и эпигенетических месторождений (селен-урановые и ванадий-урановые в песчаниках).

Ко второй группе относятся месторождения, образованные при пространственном совмещении различных и разновозрастных рудообразующих процессов.

3. Совмещенные гидротермальные и экзогенные (седиментационно-диагенетические) — полиметальные урановые с медью, золотом и се-

ребром; полиметальные торий-урановые с никелем, кобальтом, медью, золотом и платиной.

Как видно, в представлениях о генезисе полигенных месторождений урана предусматривается участие нескольких процессов, а в вопросах об источниках рудного вещества — как сингенетичный уран вмещающих пород, перераспределенный этими процессами, так и эпигенетический уран, привнесенный растворами гидротермальной деятельности. Однако происхождение последнего остается во многом неясным.

Анализируя возможности существования нескольких источников рудного вещества для урановых месторождений сложного происхождения, необходимо обратить внимание на тенденциозный подход некоторых исследователей при решении трудных генетических вопросов на этих объектах. Как правило, такие месторождения являются стратиформными или характеризуются более сложной (комбинированной) морфологией рудных залежей, которые локализуются среди геохимически специализированных ураноносных осадочных пород, в том числе углеродистых черных сланцев. При этом даже в случаях проявления признаков явно наложенных гидротермальных процессов (метасоматитов, рудной и жильной минерализации и т. д.) обычно принято считать, что сингенетичный фоновый уран вмещающих пород был перераспределен при региональном метаморфизме и в процессе гидротермальной деятельности. Нередко такие выводы делаются без особых доказательств, в основном умозрительно, на основании пространственной приуроченности к этим ураноносным породам.

Кроме того, следует заметить, что такое компромиссное объяснение формирования урановых месторождений с привлечением многих генетических процессов (сингенеза, регионального метаморфизма, гидротермальной деятельности, гипергенеза), а также предположение об участии сингенетических и эпигенетических концентраций урана затушевывают вопрос об основных причинах возникновения первичного уранового оруденения и его вторичных промышленных концентраций. По существу этот термин не полностью объясняет генезис месторождений и тем более происхождение источника урана в их рудах. Поэтому применение понятия «полигенные» месторождения без оговорок и объяснения роли каждого процесса и особенно без выделения главного процесса уранового рудообразования не отображает их происхождения.

В термины и представления «полигенные» и «полихромные» месторождения (или оруденение) необходимо вносить разъяснение: когда происходило рудообразование и с какими процессами оно связано, какие типы источников урана имели место. В противном случае возникает неопределенность и неясность понятия, за которыми скрываются любые генетические представления.

Оценивая роль «полигенных» источников рудного вещества в целом, также необходимо обратить особое внимание на долю участия каждого и выделить среди них основной тип источника, т. е. обусловивший формирование большей части первичного уранового оруденения и приводивший к созданию промышленных, в том числе богатых руд.

Как было показано в предыдущих главах и разделах, процессы седиметогенеза и регионального метаморфизма пород не приводили

непосредственно к урановому рудообразованию, а при высоких ступенях их преобразования способствовали выносу и рассеиванию урана. Кроме того было также показано, что вмещающие месторождения породы как источник рудного вещества при проявлении любых эпигенетических процессов, в том числе гидротермальных, имели весьма ничтожное значение. В то же время на многочисленных примерах изученных стратиформных месторождений такого типа, залегающих как в складчатом основании, так и в молассовом и платформенном чехлах, установлено, что главной причиной появления первичного оруденения (нередко убогого) являются гидротермальные процессы, сопровождаемые привносом урана восходящими растворами из урансодержащих пород фундамента.

Как уже отмечалось, такое происхождение могут иметь «полигенные» месторождения, локализованные в черных сланцах нижнего палеозоя. Однако промышленные, особенно богатые, руды в зонах вторичного обогащения обязаны своим происхождением различным более поздним, в том числе гидротермальным и гипергенным, процессам, которые приводили к перераспределению первичного оруденения и, возможно, сопровождались частичным заимствованием металла из вмещающих углеродистых пород. Значение такого экстрагированного урана, судя по геологическим и геохимическим данным, было далеко не главным.

Таким образом, оценка разных генетических типов источников рудного вещества и доли участия каждого из них должна проводиться для соответствующих сложных, особенно полигенных урановых месторождений. В первую очередь необходимо учитывать реальные возможности участия первично сингенетических концентраций урана во вмещающих породах, наличие «подвижной» формы, условия залегания этих пород, степень перераспределения их в результате регионального метаморфизма и признаки заимствования какой-то части при проявлении гидротермальной деятельности и гипергенных процессах (фильтрационный источник ближней мобилизации). Важно установить долю привноса урана восходящими растворами (глубинный фильтрационный или фильтрационно-магматический источник). При этом обязательно должен выделяться основной источник, который обусловил появление первичного (возможно и убогого) уранового оруденения. Вмещающие породы в качестве источника рудного вещества, как было показано ранее, имели скорее всего подчиненное значение.

Глубинные фильтрационные источники дальней мобилизации или комбинированные фильтрационно-магматические источники рудного вещества в определенной степени также можно рассматривать как полигенные источники, поскольку уран в растворах мог появляться из различных ураноносных образований, земной коры (как застывших магматических очагов, так и ультраметаморфических пород и др.) при участии подкоровых флюидов, несущих некоторое количество рудных, редких и редкоземельных элементов.

Полигенные (комбинированные) источники можно предполагать для урановых месторождений метаморфогенной и магматогенной серий в альбититах, в образовании которых из гидротермальных растворов принимали участие рудное вещество земной коры и многие компоненты подкорового происхождения, в том числе флюиды — агенты переноса.

Глава VII

КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА ЭНДОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СВЕТЕ ПРОБЛЕМЫ ИСТОЧНИКОВ РУДООБРАЗУЮЩИХ РАСТВОРОВ

Разработка критериев прогноза эндогенных урановых месторождений на основании эмпирических закономерностей их размещения и сложившихся представлений об их происхождении тесно связана с выяснением условий формирования и причин возникновения не только самих месторождений, но и урановорудных провинций и районов, в которых они развиты. При этом кардинальным является вопрос об источниках рудного вещества в рудообразующих растворах.

Многими исследователями отмечается отчетливая связь ураноносных рудных провинций различных типов с определенными геотектоническими элементами земной коры, а месторождений — с отдельными частями этих структур.

Анализ геологических и металлогенических материалов по закономерностям размещения эндогенных урановых месторождений в различных участках земной коры по истории тектонического развития урановорудных провинций и районов в разные геологические эпохи показал, что между процессами создания сиалической оболочки коры и ее ураноносностью существует вполне определенная связь, которая обусловлена общностью их происхождения [87]. Вместе с тем, из такого анализа вытекает важный вывод о том, что главные причины возникновения повышенной ураноносности этих участков связаны с происходившими в пределах подкоровых оболочек глубинными процессами, которые отразились не только на особенностях состава, физического состояния и строения верхней мантии, но и земной коры. В первую очередь такие процессы, происходившие под воздействием газово-тепловых потоков, обусловили развитие подкорового и внутрикорового магматизма, постмагматической гидротермальной деятельности, особые физико-химические их условия, а также интенсивность и продолжительность, унаследованность и многократность их проявления в определенных участках литосферы. Особенности глубинных процессов в верхних оболочках Земли в свою очередь определили специфику тектонического и магматического развития и, в конечном счете обусловили ураноносность рудных провинций и районов, локальное проявление месторождений.

Как известно, промышленные эндогенные урановые месторождения разных типов формировались только на коре континентального типа. В общей истории развития Земли установлено, что образование первичного сиалического слоя коры и появление наиболее ранних ураноносных калиевых гранитов, а затем формирование первых скоплений торий-урановой и урановой минерализации в верхней части литосферы произошли в эпохи раннего докембрия. В процессе длительной эволюции земной коры наиболее ранние урановые месторождения различного генезиса начали появляться лишь после того, как был сформирован достаточно мощный «гранито-гнейсовый» слой. В более поздние эпохи протерозоя и фанерозоя эндогенное урановое оруденение формировалось

неоднократно в определенные орогенные этапы проявления мощных тектоно-магматических и тектонических процессов, сопровождаемых гидротермальной деятельностью. Некоторые, наиболее значительные, урановорудные провинции характеризуются полихронным и полигенным урановым оруденением, однако первые промышленные концентрации его везде являются эндогенными и связаны с эпохами «заложения» или «зарождения» провинций [87]. Среди эндогенных урановых месторождений выделяется две группы: 1) месторождения, связанные с позднеорогенным кислым магматизмом (постмагматические гидротермальные), 2) месторождения, не обнаруживающие видимой связи с таким магматизмом (телетермальные).

Как уже отмечалось, ураноносность отдельных участков земной коры (т. е. рудных провинций и районов), на территории которых возникли эндогенные урановые месторождения разных типов, обусловлена специфической направленностью глубинного развития этих территорий и определяется целым рядом глобальных геологических предпосылок, региональных и локальных геологических факторов [87]. Среди них наиболее важными являются тектонические, геолого-исторические, термобарические, геохимические, металлогенические и другие группы факторов. Все они прямым или косвенным образом предопределили происхождение рудообразующих растворов, сформировавших урановые месторождения, обусловили источники рудного вещества (урана).

Тектонические факторы включают положение (позицию) урановых месторождений и рудных полей в различных тектонических структурах континентальной земной коры, в которых развивались глубинные процессы разных этапов. Геолого-исторические факторы подразумевают общий тектонический режим развития, проявленность тектоно-магматических и тектонических процессов данного цикла, особенно в орогенные этапы, когда образовались урановые месторождения. Термобарические факторы объединяют метаморфические (ультраметаморфические), магматические, некоторые ранние метасоматические образования, которые могли послужить источниками рудообразующих растворов. Геохимические факторы отображают общую геохимическую и урановую специализацию горных пород осадочных, метаморфических и магматических формаций, слагающих территории урановорудных районов и возникших в результате образования их в предрудные этапы. Металлогенические факторы включают различные рудно-метасоматические образования как позднемагматические, так и особенно постмагматические, из которых лишь часть является ураноносной.

Многие отмеченные факторы являются общими для месторождений обеих групп, однако отношение к магматическим процессам у них несколько различное. Поэтому источники урана и происхождение растворов также различаются — ибо магматические, либо фильтрационные.

Среди геологических предпосылок тектоническая позиция урановорудных провинций, районов и сконцентрированных в их пределах урановых месторождений является наиболее важной и определяется положением их, с одной стороны, в подвижных поясах (геосинклинально-складчатых, дейтероорогенных, рифтогенных, вулканических и др.), а с другой,—

в стабильных (жестких, консолидированных) участках (массивах) континентальной земной коры, имеющей определенное строение, состав и отображающее специфическое их развитие.

Для таких массивов характерно:

интенсивное проявление в предрудные эпохи различных эндогенных процессов, главным образом аллохимического ультраметаморфизма (гранитизации) и палингенного гранитоидного магматизма, сопровождавшихся длительным и постепенным накоплением радиоактивных и других рудных элементов в верхней части земной коры, как в целом, так и особенно в отдельных ее участках;

в целом жесткий, но неравномерно консолидированный и интенсивно гранитизированный, неглубоко залегающий древний (докембрийский) фундамент (мощностью до 10—20 км) гранитоидного состава, который имеет контрастно-блоковое строение;

такое строение фундамента в пределах ураноносных участков земной коры определяется сетью глубинных разломов разных категорий (межблоковых и трансблоковых или сквозных), различной ориентировки, входящих в состав соответствующих подвижных поясов, и обусловлено длительным формированием под воздействием подкоровых газово-тепловых потоков сложного рельефа кровли и подошвы «гранито-метаморфического» слоя;

проявление интенсивных постметаморфических и постмагматических эндогенных рудно-метасоматических процессов, приведших к созданию локальных повышенных концентраций (аномалий или месторождений) урана;

широкое развитие в определенных участках разновозрастной бор- и фторсодержащей, а также карбонатной и другой минерализации, совмещенные ареалы которых свидетельствуют об унаследованном проявлении потоков преимущественно галоидных, углекислых и других растворов;

полихронность уранового рудообразования.

Кроме того, на многих ураноносных территориях устанавливаются признаки непосредственного проявления различных подкоровых процессов:

разновозрастного и разнотипного базальтоидного и щелочного магматизма в разные этапы развития;

наличие мощных зон долгоживущих, глубоко проникающих в мантию разломов, характеризовавшихся повышенной подвижностью и проницаемостью;

широкое развитие метасоматитов (щелочных, карбонатных, магнезиальных и др.), возникших в результате интенсивного проявления глубинных (мантийных) флюидов калиевого, натриевого, углекислого и другого состава с характерным набором элементов (Ta, Nb, Zr, P, V, TR, Th, Cr и др.).

Специфические тектонические сооружения и магматические ареалы, в пределах которых сосредоточены урановые месторождения разных типов, резко отличаются от окружающих территорий, что обусловлено одновременной принадлежностью их к разным структурным элементам, многими особенностями их развития и проявления эндогенных процессов:

стабильным блокам ранней консолидации, подвергшимся воздействию интенсивных глубинных процессов и потому характеризующимся мощным «гранито-метаморфическим» слоем коры;

зонам глубинных разломов, входящим в состав подвижных поясов и потому наиболее проницаемым для газово-тепловых потоков;

широким развитием разновозрастных магматических образований различного состава и типа, среди которых отчетливо преобладают ураноносные кислые и субщелочные интрузивы и вулканиты орогенных этапов.

Наиболее благоприятные условия для возникновения урановых месторождений на сравнительно ограниченной площади создаются только при тесном сочетании отмеченных разнородных геотектонических элементов и геологических предпосылок.

Подвижность и проницаемость глубинных разломов разных категорий и ориентировки для восходящих подкоровых флюидов резко возрастала в сложных узлах их сочленения. Огромное значение для повышения проницаемости таких участков земной коры имели не только продольные (межблоковые), но и поперечные сквозные долгоживущие разломы.

Крупные блоки (кратоны, срединные, краевые и другие массивы, геоантиклинальные поднятия), в пределах которых формировались урановые месторождения, представляют собой выступы древнего гранитоидного фундамента, в различной степени подвергнутого динамотермальным и петрохимическим преобразованиям. Жестко консолидированная и интенсивно гранитизированная кора в таких участках была сформирована задолго до начала тех тектоно-магматических циклов, с завершением которых связано образование эндогенного уранового оруденения.

Установленная во многих рудных провинциях зависимость между строением, составом и мощностью земной коры и ее слоев, с одной стороны, и рудоносностью (в том числе ураноносностью) таких блоков, с другой, свидетельствует об их связи и общности в происхождении. Характерной особенностью строения и состава континентальной коры в рассматриваемых участках является развитие мощного отчетливо выраженного «гранитного» слоя, который отображает длительность, унаследованность, многократность и интенсивность проявленных процессов гранитизации и гранитообразования, их петрохимический состав. Мощности этого слоя испытывают существенные колебания, обычно они примерно равны или превышают мощности подстилающего («базальтового») и значительно больше перекрывающего («осадочного») слоев.

Максимальные мощности «гранитного» слоя совпадают с ядрами ранней консолидации ураноносных блоков и других тектонических сооружений. Раздувы этого слоя приходятся на крупные рудоносные геоантиклинальные блоки и зоны их сочленения с соседними прогибами или глубинными разломами.

Наиболее рудоносными, в том числе ураноносными, являются стабильные жесткие геоантиклинальные поднятия (блоки) ранней консолидации, которые характеризовались постоянной тенденцией к воздыманию и наиболее длительными и интенсивными проявлениями процессов

ультраметаморфизма (гранитизации), палингенного интрузивного гранитообразования, а затем — метасоматоза и рудообразования. В связи с этим такие блоки имеют увеличенную (до 15—25 км) мощность сравнительно однородного «гранито-метаморфического» слоя.

В ядрах этих блоков развиты гранито-гнейсовые купола, сложенные зонально построенными древними полиметаморфическими и ультраметаморфическими комплексами пород, сформированными в основном в амфиболитовой фации, а также более поздними (орогенными) крупными гипабиссальными и субвулканическими интрузивами калиевых гранитов, липаритов, обычно характеризующихся урановой, редкометальной и фтор-боровой специализацией. В орогенные (предрудный и рудный) этапы эти блоки или их отдельные части превратились в крупные сводовые поднятия, в центральных частях которых обычно проявлены поздние кислые и субщелочные интрузивные и вулкано-интрузивные комплексы, а в краевых частях затем сформировались эндогенные месторождения урана.

Геоантиклинальные блоки в целом, и особенно сформированные в их пределах поздние своды, обычно характеризуются интенсивным развитием разновозрастной бор- и фторсодержащей и другой минерализации, наибольшей общей, а в отдельных участках и урановой рудоносностью. Земная кора в пределах урановорудных провинций претерпела длительное и сложное полицикличное развитие, причем эпохи ее создания и консолидации сменялись эпохами разрушения.

Возникновение ранних эндогенных высокотемпературных торий-урановых месторождений древних (докембрийских) платформ и гидротермальных урановых месторождений фанерозойских складчатых областей связано с завершающими (орогенными) этапами тектоно-магматических циклов развития этих участков континентальной земной коры и создания ее «гранитного» слоя, т. е. происходило в конце длительной эпохи ее гранитизации (конструкции).

Образование более поздних гидротермальных урановых месторождений в пределах полихронных провинций и областей тектоно-магматической активизации (эпиплатформенного орогенеза) складчатых областей, древних платформ и щитов приходится на завершающие этапы, характеризовавшиеся началом распада (деструкцией) созданной ранее континентальной коры, т. е. начавшейся ее «базификацией».

Отмеченные общие закономерности размещения гидротермальных урановых месторождений разных типов в пределах подвижных поясов и рудных провинций, особенности их развития, а также пространственно-временные соотношения уранового оруденения с определенными структурами и магматизмом, время его образования однозначно свидетельствуют о связи рудообразования с процессами, происходившими в гранитизированных блоках континентальной земной коры, т. е. об эндогенном происхождении рудообразующих растворов и о внутрикоровом источнике рудного вещества (урана).

В то же время особенности тектоно-магматического развития ураноносных структур рудных провинций показывают, что как кислые магматические (гранитоидные), так и постмагматические образования, в том числе урановое оруденение, возникали в результате воздействия

на верхние оболочки земной коры единых подкоровых флюидов. В отношении природы источника урана возможны три близких варианта: наряду с магматическим типом источника рудного вещества вполне мог иметь место фильтрационный источник дальней мобилизации (заимствование урана из ураноносных гранитоидов или гранитизированных пород) или скорее всего комбинированный фильтрационно-магматический источник (экстрагирование урана из закристаллизовавшихся ураноносных магматических очагов восходящими подкоровыми растворами).

Такие представления о происхождении гидротермальных месторождений урана и его источнике позволяют во многом по-новому объяснить роль и значение главных геологических факторов уранового рудообразования.

Проявленность в пределах провинций, районов, месторождений разновозрастных и разнотипных эндогенных и некоторых экзогенных процессов, их ураноносность можно систематизировать по этапам развития, характеру (типу) газово-тепловых режимов и интенсивности, отображающих их цикличность и зональность в разрезе и плане.

I. *Рудоподготовительные этапы*, в течение которых проявились процессы ультраметаморфизма (гранитизации) и магматизма, способствовавшие накоплению радиоактивных элементов в верхней части земной коры: 1) ранние, доорогенные, обычно принадлежавшие другому тектоно-магматическому циклу. Проявление аллохимического ультраметаморфизма (иногда полицикличного) в гранито-гнейсовых куполах фундамента или геоантиклинальных поднятиях, анатектических гранитоидов и гранитизация пород калиевого ряда, сопровождавшаяся привносом радиоактивных элементов; 2) средние, инверсионные данного тектоно-магматического цикла. Накопление в специфических условиях внутриконтинентальных морей ураноносных углеродистых («черных») сланцев, залегающих в субгеосинклинальных прогибах. Проявление основного магматизма в прогибах и по зонам разломов, сопровождаемого привносом углекислоты, натрия и других элементов. Гранитизация (на глубине) и диафторез (в верхней части земной коры), внедрение батолитоподобных гранитоидов на поднятиях. Внедрение монцонитоидов (сиенито-диоритов, габбро-сиенитов) с повышенными содержаниями радиоактивных элементов в подвижных зонах межблоковых разломов. Проявление ураноносного кремний-калиевого метасоматоза; 3) поздние, орогенные интенсивного проявления в консолидированных блоках и орогенных сводовых поднятиях тектоно-магматических и тектонических процессов по зонам глубинных разломов. Внедрение орогенных гипабиссальных ураноносных лейкократовых (плюмазитовых, биотитовых и двуслюдяных) гранитов калиевого ряда. Формирование континентальных вулканических, субвулканических и вулкано-плутонических комплексов кислого, субщелочного и контрастного кислого—основного состава. Внедрение дайковой серии регионального распространения.

Накопление ураноносных континентальных сероцветных и угленосных молассовых формаций в орогенных межгорных впадинах.

II. *Рудообразующие или рудоформирующие этапы*, в течение которых проявилась позднемагматическая, постмагматическая или постгранити-

зационная гидротермальная деятельность, в том числе ураноносная: 1) позднемагматическая и ранняя (высокотемпературная) постмагматическая стадии — ураноносные пегматоидные граниты и пегматиты, кремний-калиевые метасоматиты и апогранитные альбититы, иногда скарны, грейзены (Mo, W, Sn, Ta, Nb, Be, Li, флюорит и др.).; 2) постмагматическая средне-низкотемпературные стадии кислотного выщелачивания — вторичные кварциты, березиты, лиственитыобычно неураноносные (Au±Sb, As, Cu, Cu-Mo, Pb, Zn, Ag±Au, Sb, флюорит и др.); 3) постмагматическая низкотемпературная урановорудная стадия — березиты, гидрослюдизиты, альбититы, гумбеиты, а также хлориталиты, иногда аргиллизиты и др. (U, Mo-U, P-U±Zr, Ti, Mo, Bi- Co- Ni- Ag-U±As, Se, сульфиды); 4) постмагматическая низкотемпературная пострудная стадия неураноносная (карбонаты, барит, флюорит, халцедон, каолинит, цеолиты±сульфиды).

III. *Этапы пострудных преобразований*, связанных с эпохами разрушения месторождений с новыми металлогеническими эпохами.

После периода относительно спокойной обстановки в платформенных условиях, ответственных за сохранность погребенного («слепого») оруденения или его гипергенного окисления и переотложения, во многих рудных районах проявлены этапы новой тектонической активизации и гидротермальной деятельности, в том числе уранового рудообразования.

В результате на таких участках отмечается развитие полихронного и полигенного уранового оруденения, которое формировалось либо с привносом урана и сопутствующих элементов, либо за счет его локального переотложения в пределах месторождений и его отдельных рудных тел.

Пострудные гипергенные преобразования ранее сформированного оруденения приводили к его перераспределению либо к образованию зон окисления и вторичного обогащения, либо к разрушению.

Проявление перечисленных этапов формирования и полнота их развития могут быть использованы в качестве критериев ураноносности прогнозируемых территорий и их отдельных участков.

Развитие в земной коре различных эндогенных процессов — регионального метаморфизма и магматизма (рудоподготовительные этапы), постмагматической гидротермальной деятельности (рудоформирующие этапы) — является проявлением разных этапов единых глубинных процессов, обусловленных воздействием на верхние оболочки литосферы мощных подкоровых газово-тепловых потоков различной интенсивности, температуры, давления и состава.

Для блоков (кратонов, срединных и краевых массивов), в пределах которых формировались урановые месторождения с эндогенным оруденением, характерно полицикличное проявление региональных метаморфических преобразований горных пород. При этом в ураноносных блоках, как правило, преобладали метаморфизм и ультраметаморфизм «воздымания», протекавшие в верхней части в условиях, обычно не превышающих амфиболитовой, реже — начала гранулитовой фации.

Восходящие подкоровые тепловые и газово-тепловые потоки, интенсивно и широко проявленные в раннем докембрии и вызвавшие глубокие преобразования комплексов горных пород фундамента древних кратонов,

возобновились и унаследованно продолжались в протерозое, иногда палеозое в пределах ядер ранней консолидации некоторых областей протоактивизации или срединных массивов фанерозойских складчатых и активизированных областей.

Проявление процессов метаморфизма и ультраметаморфизма пород способствовало перераспределению в них урана и других радиоактивных элементов, приводило к образованию структурных этажей и блоков, обедненных или обогащенных этим металлом. При аллохимическом ультраметаморфизме «воздымания» под воздействием мощных флюидов на сравнительно небольшой глубине и в условиях эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фации происходил привнос щелочей, кремния, галоидов, тория, иногда урана и других элементов.

Зональное строение полифациальных метаморфических и ультраметаморфических комплексов в пределах крупных геоантиклинальных блоков, отдельных гнейсовых куполов или их поясов, а также наблюдаемая нередко пространственная связь с ними разновозрастных многофазных гранитоидов свидетельствует о том, что их формирование было длительным и полицикличным и иногда завершалось кислым интрузивным магматизмом.

Проявление этих процессов, связанных с докембрийскими или палеозойскими тектоно-магматическими эпохами, сопровождалось привносом и перераспределением многих элементов. Интенсивность и продолжительность воздействия глубинных газово-тепловых потоков обусловили различную степень и полноту преобразований горных пород, в разной мере перераспределение и накопление в них радиоактивных элементов.

Комплексы ультраметаморфических (гранитизированных) пород с урановой, ториевой и другой специализацией, залегающих на глубине, могли служить либо непосредственным источником урана в восходящих фильтрующихся флюидах (фильтрационный источник дальней мобилизации), либо являться ураноносным субстратом при палингенезе и образовании вторичных магматических очагов внутри «гранитного» слоя коры (магматический источник).

Особенности развития магматизма, его петрохимический состав и геохимическая специализация, масштабы, интенсивность, условия и формы проявления являются одной из главных причин возникновения многих эндогенных урановых месторождений в пределах рудных провинций.

Проявление магматизма служит прямым индикатором многих глубинных процессов, которые обусловили не только основные черты тектонического режима в структурах земной коры и характер тектонических движений, но и глубинность магмообразования, вызванного эндогенными (мантийными) газово-тепловыми потоками.

Особенности развития магматизма в пределах разновозрастных и разнотипных урановорудных провинций, несмотря на существенные различия, характеризуются многими общими чертами. Эти ураноносные участки континентальной земной коры отличаются весьма широким, интенсивным и длительным проявлением магматических процессов различного состава. Среди разновозрастных и разнотипных магмати-

ческих образований преобладают кислые и субщелочные (гранитоидные) породы калиевого ряда корового происхождения, представленные интрузивными и вулканическими фациями. Палингенные магматические очаги формировались в пределах «гранито-метаморфического» слоя, в блоках повышенной мощности, возникшей в результате проявления предшествовавших процессов ультраметаморфизма и гранитизации.

Установленные во многих урановорудных районах провинций разных типов тесная пространственная приуроченность и отчетливая временная близость гидротермального уранового оруденения с поздним кислым или субщелочным магматизмом орогенных этапов развития свидетельствуют о их парагенетической связи.

Общими петрологическими признаками поздних потенциально ураноносных гранитоидов и кислых вулканитов являются: высокие и повышенные концентрации урана, высокая водонасыщенность (и, соответственно, относительно пониженные температуры их кристаллизации порядка 850—600° С), а также высокие содержания щелочей (калия) и фтора. Весьма характерно развитие наряду с нормальными щелочно-известковыми гранитами также редкометальных плюмазитовых лейкогранитов, которые относятся к семейству кислых плутонических пород нормального калиевого ряда ($SiO_2 > 73\%$, $Na_2O + K_2O > 7\%$, при устойчивом $K_2O > Na_2O$, с коэффициентом агпаитности 0,8). Длительное и унаследованное проявление в определенных тектонических узлах магматической деятельности приводило к образованию сложно построенных многофазных интрузивных и вулкано-интрузивных комплексов и сооружений.

Урановая геохимическая специализация магматических пород отражает ураноносность определенных рудных районов и указывает на парагенетическую связь с ними месторождений. Породившие их магматические очаги могут рассматриваться в качестве одного из наиболее вероятных источников рудного вещества в сформировавших их гидротермальных растворах.

Наряду с кислым магматизмом практически все урановорудные провинции характеризуются достаточно широким развитием основного, иногда основного-щелочного магматизма или контрастного по составу (основного и кислого) магматизма, который имеет обычно иной возраст, проявлен нередко в других блоках и связан с более глубинными (подкоровыми) магматическими очагами. Однако по интенсивности и условиям проявления этот магматизм существенно отличается от такового в неураноносных эвгеосинклинальных областях.

Для некоторых урановорудных провинций разных типов с наиболее значительными месторождениями характерно близко одновременное проявление как кислого, так и основного магматизма в эффузивной, интрузивной и особенно дайковой фациях. Это связано с существованием двух параллельно развивавшихся магматических очагов на разных глубинных уровнях (коровом и подкоровом) при преобладающем рудогенерирующем значении первого и выступающем в роли возбудителя газово-тепловых потоков — второго.

Среди различных по происхождению и возрасту геологических формаций (осадочных, метаморфических, магматических), развитых на территориях отдельных урановорудных районов или провинций в целом,

выделяются особые породы, которые характеризуются отчетливой геохимической урановой и другой (сопутствующей) специализацией.

В субгеосинклинальных прогибах развиты накопившиеся в специфических условиях ураноносные углеродистые («черные») сланцы с высокими ($10—20 \cdot 10^{-4}\%$) сингенетичными концентрациями урана и многих сопутствующих элементов. В крупных тектонических узлах при значительных объемах и благоприятных условиях залегания на путях движения растворов подобные ураноносные сланцы могли служить дополнительным источником рудного вещества (фильтрационного типа).

В ядрах ранней консолидации некоторых ураноносных блоков среди гранито-гнейсовых куполов проявлены сложно построенные комплексы ультраметаморфических пород (мигматизированные и гранитизированные гнейсы, калишпатовые метасоматиты и т. п.), нередко с повышенными и высокими содержаниями калия, тория, иногда урана ($5—15 \cdot 10^{-4}\%$). Такие ураноносные породы, залегая на глубине под месторождениями, также могли являться фильтрационным источником урана для восходящих растворов во время гидротермальной деятельности.

В урановорудных провинциях разных типов, главным образом в пределах их рудоносных геоантиклинальных блоков, широко развиты разновозрастные геохимически специализированные ураноносные магматические образования кислого и субщелочного состава — интрузивные породы, а наложенных депрессиях — вулканогенные. Концентрации радиоактивных элементов характеризуются неравномерным распределением и возрастают от ранних к поздним комплексам и фазам многофазного магматизма единого цикла, достигая максимальных значений в молодых магматических образованиях, наиболее близких по возрасту к урановому оруденению.

Конечные продукты магматизма отличаются повышенными и нередко контрастно высокими первично-конституциональными содержаниями урана ($(10—25) \cdot 10^{-4}\%$, тория $(30—70) \cdot 10^{-4}\%$, калия до 5—6%. Кроме того, они обычно обогащены многими рудными и редкими элементами (W, Sn, Mo, Be), а также редкими щелочами (Li, Rb, Cs), фтором, бором и др. Содержания урана в некоторых кислых вулканических стеклах выше, чем в гранитоидах и других раскристаллизованных породах аналогичного состава, что можно объяснить возможным выделением значительной доли металла вместе с летучими компонентами из магматических расплавов в процессе их раскристаллизации. Общей закономерностью является концентрирование урана в «остаточном расплаве» и, по-видимому, во флюиде. В то же время резкие колебания содержаний урана в кислых вулканических стеклах, являющихся продуктами застывания (закалки) магматических расплавов, от $5 \cdot 10^{-4}\%$ до $25 \cdot 10^{-4}\%$ и выше могут свидетельствовать о реальной возможности существования геохимически специализированных ураноносных магматических расплавов и очагов.

Разновозрастные геохимически специализированные гранитоиды и липариты, слагающие гипабиссальные и субвулканические интрузивы и вулканогенные сооружения, являются индикаторами повышенной ураноносности вторичных магматических очагов и, возможно, субстрата «гранито-метаморфического» слоя континентальной коры, из которого выплавлялись палингенные кислые магмы. Однако большая часть рудных,

редких и радиоактивных элементов, по-видимому, была привнесена или перераспределена в результате воздействия восходящих подкоровых потоков.

Таким образом, присутствующие в общем разрезе блоков, в котором приурочены урановорудные провинции, разновозрастные магматические, ультраметаморфические и осадочные формации с повышенными и высокими содержаниями урана и сопутствующих элементов отображают, с одной стороны (во времени), геохимическую специализацию определенных тектоно-магматических циклов и этапов развития, а с другой (в пространстве),— специализацию отдельных тектонических сооружений и всей территории рудной провинции. В целом они являются показателями ураноносности определенных участков континентальной земной коры, в пределах которых впоследствии унаследованно проявились урановорудные процессы, приведшие к образованию промышленных месторождений урана разных типов.

Резкое различие в развитии, строении и рудоносности, в том числе ураноносности, блоков, наличие в пределах стабильных геоантиклинальных блоков гранито-гнейсовых куполов с ультраметаморфическими гранитизированными породами, крупных длительно формировавшихся разновозрастных интрузивных и вулкано-интрузивных узлов (сооружений), в которых сконцентрированы разновозрастные кислые и субщелочные образования, отчетливо специализированные на фтор, бор, щелочи, редкие щелочи, кремний, рудные и радиоактивные элементы, и которым соответствует увеличение мощности «гранито-метаморфического» слоя коры, свидетельствуют об интенсивном проявлении в пределах этих блоков длительно и унаследованно действовавших глубинных газово-тепловых потоков (флюидов). Такие потоки летучих (F, B, Cl, H_2O) компонентов проявлялись как в ранние — рудоподготовительные, так и непосредственно в рудообразующие этапы развития. Они, очевидно, вызывали на глубине блоков, в пределах «гранито-метаморфического» слоя коры, палингенез и селективную выплавку редкометальной кислой магмы, содержащей галоиды и другие элементы, потоки сопровождали процессы интрузивной деятельности. Их поступление продолжалось также в постмагматический этап, вызывая поздние метасоматические и рудообразующие процессы.

Урановорудные провинции разных типов и эпох заложения, на территории которых развиты эндогенные месторождения урана, характеризуются вполне определенным сиалическим или сиалическо-фемическим металлогеническим профилем. Гидротермальное урановое оруденение этих месторождений обычно обнаруживает тесные пространственные или временные ассоциации с рудами эндогенных месторождений других металлов и образует с ними единые непрерывно-прерывистые формационные ряды различных категорий.

В общих формационных рядах данной рудной провинции и данной металлогенической эпохи урановорудные формации занимают вполне определенное (обычно одно из последних) место, завершая своим возникновением единый постмагматический, но многостадийный эндогенный процесс, что объясняется их общностью и единством происхождения.

По минералого-геохимическим ассоциациям выделяется две группы урановорудных формаций, сопровождаемых развитием калиевых (пре-

имущественно кислотного выщелачивания) или натриевых (щелочных) метасоматитов, либо их комбинацией и различающихся не только по происхождению, но и по связи с магматизмом [18]. Металлогенический спектр (набор) в основном обусловлен составом проявленного в провинциях магматизма. В одних формационных рядах (главным образом в провинциях древних и активизированных платформ) наряду с урановым проявлено оруденение золота, железа, титана, ванадия, меди, никеля, кобальта, тория, циркония, фосфора, тантала, ниобия, редких земель и др. В других формационных рядах (преимущественно провинций складчатых и активизированных областей), кроме урановых месторождений, развиты месторождения олова, вольфрама, молибдена, свинца, цинка, серебра, сурьмы, висмута, фтора, а также золота, железа и др. Эти группы формационных рядов, очевидно, отображают два главных типа источников растворов и рудного вещества (преимущественно сопровождающих элементов): фемического профиля — наиболее глубинный, возможно, подкоровый и сиалического профиля — менее глубинный, внутрикоровый (магматический и фильтрационный). Существует также промежуточный или смешанный тип источника.

Исходя из таких представлений о геологических факторах эндогенной ураноносности территории, о типе источника рудного вещества и происхождении растворов, следует разрабатывать геологические предпосылки возникновения гидротермальных урановых месторождений, их прогнозные и поисковые критерии и признаки как регионального, так и локального значения. Из изложенного, следует, что среди них главными являются тектонические, магматические, геохимические и металлогенические критерии, а также структурные и минералого-геохимические (рудно-метасоматические) признаки проявления уранового оруденения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ имеющихся в распоряжении авторов материалов дал возможность всесторонне рассмотреть весьма сложную проблему источников рудного вещества эндогенных урановых месторождений на современном уровне знаний и наметить возможные варианты ее решения. Совокупность геологических, геохимических, петрологических и экспериментальных данных в отношении рудообразующих растворов, сформировавших эти месторождения, позволяет в качестве наиболее вероятных принять следующие два механизма (модели) их возникновения: 1) ураноносные растворы образовывались на поздних стадиях кристаллизации гранитоидных магматических очагов, отделяясь непосредственно от остаточных лейкогранитных расплавов, насыщенных в отношении урана и летучих компонентов; 2) ураноносными растворы становились по пути миграции за счет выщелачивания урана из урансодержащего субстрата (закристаллизовавшихся магматических очагов и других гранитоидных пород) восходящими потоками трансмагматических подкоровых флюидов в заключительные стадии их воздействия.

В настоящее время более обоснованным, особенно в отношении геохимических и экспериментальных данных, представляется первый механизм. Второй механизм, хотя и выглядит гипотетичным, но в то же время является более всеобъемлющим и универсальным. Оба варианта не противопоставляются, а дополняют друг друга и являются следствием единых глубинных процессов.

Среди результатов геологических исследований, на которых основаны развиваемые авторами представления, следует подчеркнуть следующие.

1. Закономерности размещения и формирования эндогенных урановых месторождений различных типов, сосредоточенных в рудных провинциях и районах разных эпох зарождения, свидетельствуют о том, что их возникновение является результатом развития многих взаимосвязанных глубинных процессов (метаморфизма и ультраметаморфизма, палингенного гранитоидного магматизма, постмагматического метасоматоза и рудообразования, в том числе уранового), которые происходили под воздействием и при участии подкоровых сквозьмагматических флюидов.

2. Урановорудные провинции с гидротермальными месторождениями различных типов формировались только на земной коре континентального типа.

3. Основной особенностью строения континентальной коры урановорудных провинций является наличие достаточно мощного и хорошо раз-

витого «гранито-метаморфического» слоя, в отдельных блоках которого длительно и многократно проявились процессы магматического замещения (гранитизации) и кремний-калиевого метасоматоза, сопровождаемые накоплением радиоактивных элементов, в том числе урана.

Наиболее рудоносными, в том числе ураноносными, являются тектонические блоки геоантиклинальных и сводовых орогенных поднятий, вулканических депрессий и куполов с достаточно мощным «гранито-метаморфическим» слоем, в котором проявились не только ранние процессы гранитообразования, но и поздние, наиболее близкие к урановому оруденению процессы интрузивного или вулканического магматизма кислого и субщелочного состава палингенного внутрикорового происхождения.

4. Формирование эндогенных урановых месторождений, как и многих других рудных месторождений, происходило в орогенные этапы развития складчатых и активизированных областей, в течение которых интенсивно проявились постепенно затухающие тектоно-магматические процессы.

5. Урановорудные провинции и районы, расположенные в глобальных подвижных поясах разных типов, тяготеют к крупным тектоническим узлам сочленения разноориентированных поясов. Наиболее значительные урановые месторождения приурочены к узлам пересечения межблоковых глубинных разломов сквозными (трансблоковыми) разломами, которые являются составными частями поперечных глобальных поясов, проникающих в подкоровые оболочки мантии. Вдоль зон таких разломов в разных тектонических сооружениях и структурных этажах проявлены различные и разновозрастные интрузивы, вулканиты, а также дайки основного состава, свидетельствующие о проявлении глубинных процессов из подкоровых магматических очагов. Размещение разнотипных магматических образований — интрузивов гранитоидов, вулканических сооружений и дайковых серий, с одной стороны, и гидротермальных урановых и других месторождений, с другой, контролируется общими тектоническими элементами — крупными геоантиклинальными тектоническими блоками, сводовыми поднятиями, вулкано-тектоническими депрессиями и вулканическими куполами, едиными подвижными и проницаемыми зонами глубинных разломов.

6. Урановорудные провинции и районы, как правило, характеризуются весьма широким развитием магматических образований различного состава, типа и возраста. При этом самыми близкими по времени образования к урановому оруденению являются наиболее поздние орогенные комплексы, среди которых отчетливо преобладают гранитоиды, кислые вулканиты или реже интрузивы субщелочного состава. Особое значение имеют дайковые серии основного, кислого и щелочного состава регионального распространения. Вместе с тем имеются гидротермальные урановые месторождения некоторых формационных типов (стратиформные в черных сланцах, альбититовые в зонах разломов среди гранито-гнейсовых и сланцевых комплексов и др.), не обнаруживающие видимой связи с ураноносными магматическими породами гранитоидного состава.

Данное обстоятельство послужило основанием для высказывания альтернативных генетических концепций о происхождении этих месторождений и отрицания некоторыми исследователями рудогенерирующей способности кислых магматических расплавов. Разработки авторов относятся

прежде всего к урановым месторождениям, обнаруживающим такую связь с магматическими образованиями. Однако некоторые аспекты этих разработок могут быть использованы и для гидротермальных месторождений, не обнаруживающих видимой связи с магматизмом.

7. Формирование эндогенных урановых месторождений происходило на наиболее поздних стадиях орогенного этапа данного тектоно-магматического цикла развития рудной провинции после завершения магматической деятельности. От становления поздних магматических комплексов гранитоидного состава урановое оруденение обычно отделено временным интервалом внедрения дайковой серии основного и лампрофирового состава, имевших более глубинное происхождение.

Среди других эндогенных месторождений определенного постмагматического этапа гидротермальные урановые месторождения также являются наиболее поздними. В пределах урановорудных провинций и районов урановому оруденению обычно предшествует редкометальное (W, Mo, Sn), иногда золотое, медное или медно-молибденовое, сурьмяное и постоянно полиметаллическое (Pb-Zn-Ag) и флюоритовое гидротермальное оруденение. Отмеченные типы рудных месторождений образуют единые рудно-формационные ряды, которые отображают закономерную эволюцию магматического рудообразования и породивших его растворов единого постмагматического гидротермального этапа. Таким образом, эндогенное урановое рудообразование занимает вполне определенное, обычно последнее место в общем ряду постмагматической гидротермальной деятельности, связанной с орогенным этапом соответствующего тектоно-магматического цикла.

Из петролого-геохимических данных, на которых базируется развиваемая авторами концепция, следует подчеркнуть следующие.

1. В целом, несмотря на очень низкое содержание урана в веществе мантии ($n \cdot 10^{-6}$—$n \cdot 10^{-7}$%), в отдельных участках мантии могли формироваться расплавы и зоны метасоматозы с концентрациями урана, в десятки и сотни раз превышающими фоновые. Единственным механизмом, который мог обеспечить высокое содержание урана (и других некогерентных элементов) в отдельных типах мантийных пород (кимберлиты, щелочные базальтоиды, карбонатиты), является их привнос в участки магмообразования мантийными флюидами. Накопление скорее всего осуществлялось как в процессе метасоматического преобразования пород субстрата мантии, так и в течение всего периода существования магматических расплавов.

2. В основе механизма дифференциации вещества мантии (кроме селективного плавления) лежит способность мантийных флюидов растворять в себе различные элементы в пропорциях, резко отличающихся от их количественных соотношений в мантийном субстрате. С этим, видимо, связано значительное истощение пород мантии в отношении щелочей многих рудных, рассеянных, а также радиоактивных элементов.

3. Непосредственное проникновение водных флюидов из мантии в земную кору было, по-видимому, маловероятным. Это связано с тем обстоятельством, что в случае проявления мощных потоков мантийных флюидов должно было происходить образование базальтоидных расплавов, ак-

тивно поглощающих воду. При этом в земную кору проникали лишь углекислота и инертные газы. В случае же потоков низкой активности вода расходовалась на реакции амфиболизации в верхнем горизонте мантии. В связи с этим можно предполагать, что за гранитизацию и привнос в земную кору многих рудных элементов, в том числе урана, ответственны растворы, отделяющиеся из подкоровых магматических очагов, которые были расположены в верхних горизонтах мантии.

4. Массообмен между веществом мантии и земной коры происходил как в результате поступления в земную кору магматических расплавов, так и в результате воздействия на породы коры и подстилающие ее верхние горизонты мантии восходящих глубинных флюидов. Оба этих процесса сопровождались истощением мантии в отношении радиоактивных элементов и их накоплением в земной коре. При этом гранитизация пород являлась главным процессом длительного накопления урана в земной коре.

5. Содержание радиоактивных элементов в последовательных магматических образованиях единого тектоно-магматического цикла в общем случае возрастает от ранних комплексов к поздним, что свидетельствует о накоплении урана в процессе эволюции внутрикоровых магматических очагов. Основным механизмом накопления урана в магматических очагах являлась магматическая дебазификация, обусловленная прохождением через расплавы трансмагматических флюидов, которые обеспечивали раскисление расплавов и накопление в них летучих, рудных и рассеянных элементов.

6. Содержание урана в кислых вулканических стеклах в среднем в 2 раза выше, чем в гранитах и других частично или полностью раскристаллизованных породах аналогичного состава. Это свидетельствует об удалении значительной доли урана из расплавов вместе с флюидами в процессе их раскристаллизации.

Концентрация урана в кислых стеклах варьирует в пределах от $4 \cdot 10^{-4}\%$ до $40 \cdot 10^{-4}\%$, в среднем составляя $11{,}8 \cdot 10^{-4}\%$. Наличие стекол с резко повышенными концентрациями урана свидетельствует о реальном существовании в природе ураноносных магматических расплавов.

7. Признавая существование в природе кислых расплавов, резко различающихся по концентрации урана, можно распространять этот же вывод на трансмагматические флюиды. Отсюда следует, что ураноносность магматических очагов, а следовательно, и их потенциальная рудогенерирующая способность определялись не столько концентрацией урана в гранитизированном субстрате, сколько ураноносностью трансмагматических флюидов. Выдержанность формационных признаков урановых месторождений в пределах урановорудных провинций в конечном счете, по-видимому, задавалась спецификой трансмагматических растворов, определяющих, в свою очередь, геохимическую специализацию магматических очагов.

8. Результаты геохронологических исследований свидетельствуют о возрастной близости поздней магматической деятельности и процессов гидротермального уранового рудообразования.

9. Для гранитоидов и вулканитов, близких по возрасту к урановому оруденению характерны контрастно высокие концентрации урана, низ-

кие значения торий-урановых отношений, высокий процент легковыщелачиваемой «подвижной» формы металла. Отмечено геохимическое родство указанных магматических пород и урановых руд, выражающееся в общности набора многих рудных и рассеянных элементов. Обогащенные ураном магматические породы определяют возрастание его концентрации в пределах ураноносных тектонических блоков и вулкано-тектонических сооружений. Таким образом, совокупность охарактеризованных особенностей поведения урана в магматических расплавах (очагах) указывает на принципиальную возможность существования магматического источника, т. е. свидетельствует о парагенетической связи эндогенных урановых месторождений с магматизмом, в основе которой лежит направленность его фракционирования.

Из экспериментальных и геохимических данных, имеющих отношение к вопросу механизма формирования рудообразующих растворов, необходимо отметить следующие:

1. Концентрация насыщения урана в гранитных расплавах по экспериментальным данным составляет сотые доли процента, что значительно превышает реальную концентрацию этого элемента в природных расплавах. Следовательно, все природные расплавы существенно недосыщены в отношении урана. По этой причине магматическое замещение пород должно сопровождаться достаточно равномерным рассеянием урана во всем объеме магматического расплава.

2. Комбинированный коэффициент распределения урана между расплавом и образующимися минералами определяется интервалом 0,1—0,5 в пользу расплава. Соответственно, кристаллизация магм является процессом концентрирования урана в остаточном расплаве. Это позволяет рассматривать длительно протекающий процесс кристаллизации гранитоидных магматических очагов в качестве главного механизма формирования остаточных расплавов, насыщенных в отношении уранинита.

3. Концентрация урана в магматогенном флюиде, равновесном с гранитным расплавом, насыщенным в отношении уранинита, экспериментально оценивается тысячными долями массового процента.

4. На основе сопоставления концентраций урана в кислых стеклах и гранитах, данных осколковой радиографии, указывающих на наличие в магматических минералах богатых ураном газово-жидких включений, и результатах прямых определений, приведенных в литературе, делается вывод о рельности существования в природе магматогенных флюидов с концентрациями урана в тысячные и сотые доли массового процента.

5. С помощью методов осколковой радиографии обоснована реальность переноса урана растворами ранней постмагматической стадии (пегматитообразование, скарнирование, альбитизация, грейзенизация). Экспериментально подтверждена возможность переноса урана хлоридными растворами в восстановительных условиях при температурах 400—600° С в концентрациях 10^{-4}—10^{-3} мас %.

Предлагаемая авторами модель предусматривает следующую цепь взаимосвязанных и взаимообусловленных явлений, ответственных за формирование ураноносных рудообразующих растворов.

1. Формирование в верхней части мантии в предорогенный (инверсионный) этап развития складчатых областей подкоровых базальтоидных

очагов, метаморфизм прогрессивной стадии горных пород коры, происходивший под воздействием безводных газово-тепловых потоков.

2. Переход к орогенному этапу развития, сопровождавшийся кристаллизацией базальтоидных очагов, отделением растворенных в них существенно водных флюидов, с широким проявлением процессов гранитизации и образованием гранитоидных магматических очагов.

3. Метамагматическая дебазификация магматических расплавов в очагах под воздействием трансмагматических флюидов, сопровождавшаяся раскислением расплавов и накоплением рудных и рассеянных элементов.

4. Затухание интенсивности потока трансмагматических (гранитизирующих) флюидов, стабилизация объема магматических очагов, дальнейшее раскисление магматических расплавов.

5. Кристаллизация магматических очагов, сопровождавшаяся явлениями кристаллизационной дифференциации, накоплением в остаточных расплавах воды, фтора, урана и других фторофильных элементов.

6. Развитие гидротермально-метасоматических процессов ранних и средних стадий, связанных с эволюцией магматических очагов;

7. Завершение кристаллизации остаточных лейкогранитных расплавов в очагах, отделение ураноносных рудообразующих растворов.

В отмеченных выше стадиях эволюции магматических очагов не указаны многие петрогенетические процессы, которые, хотя и сопровождали становление и развитие гранитоидных очагов, в то же время не относились к числу условий, определяющих генерацию ураноносных рудообразующих растворов. К таким процессам относятся, в частности, интрузивный магматизм и вулканизм, развитие контактово-реакционных и постмагматических явлений в связи с конкретными магматическими телами, тектонические движения и т. д. Изучение этих явлений является вместе с тем основой представления об эволюции магматических очагов, путях миграции рудоносных растворов и закономерностях размещения оруденения. Приведенная выше модель корового магматического источника рудообразующих растворов предусматривает их отделение в процессе заключительной стадии кристаллизации магматических расплавов. Авторы допускают также возможность кристаллизации очагов на фоне затухающего потока трансмагматических глубинных флюидов. Взаимодействие таких флюидов с гранитоидами и остаточными расплавами могло приводить к их обогащению ураном и формированию гидротермальных рудообразующих растворов (фильтрационный источник). Не исключено также смешение указанных флюидов с постмагматическими растворами с соответствующим участием фильтрационного и магматического источников.

Следует подчеркнуть, что наиболее гипотетичным элементом изложенной концепции являются причины металлогенической специализации магматических очагов, которые в конечном счете задавали и металлогеническую специализацию рудоносных провинций. Анализ накопленных данных не позволяет объяснить это явление за счет содержания соответствующих рудных элементов только в гранитизируемом субстрате. Поэтому приходится допускать, что ответственными за металлогеническую специализацию очагов являлись трансмагматические флюиды. При-

чинами неодинаковой металлоносности трансмагматических флюидов могли быть различные уровни их генерации (а следовательно, и способность к выщелачиванию и переносу различных элементов), неоднородность состава мантии и многие другие причины. Уровень современных знаний не позволяет надеяться на сколько-нибудь убедительное решение этой задачи в обозримом будущем. Что касается остальных положений изложенной концепции, то есть все основания рассчитывать на значительный прогресс в отношении дальнейшего всестороннего обоснования.

Представления о втором типе механизма формирования ураноносных рудообразующих растворов основываются на следующих наиболее важных данных:

развитие в пределах некоторых урановорудных провинций полихронного уранового оруденения, сформированного в разные эпохи и этапы и характеризующегося привносом урана восходящими растворами;

существование наряду с магматогенными урановыми месторождениями гидротермальных месторождений, которые не обнаруживают видимой связи со специализированными комплексами магматических пород кислого состава;

на некоторых сложных по строению урановых месторождениях, пространственно связанных с магматизмом, либо намечается временной разрыв в проявлениях этих процессов, либо развитие в их пределах полихронного оруденения, поздние ассоциации которого характеризуются привносом металла;

наличие урановых месторождений, которые обнаруживают пространственно-временную связь с магматизмом основного состава в интрузивной, вулканической и дайковой фации;

наличие среди пород фундамента более ранних ураноносных образований (ультраметаморфических, магматических, метасоматических);

установление в гранитоидах и других породах, развитых на глубине под некоторыми месторождениями масштабных зон выноса и перераспределения урана, в основном за счет его подвижной формы.

Урановые месторождения приурочены к участкам земной коры, которые сложены различными ураноносными породами, а в зонах глубинных разломов интенсивно проявилась гидротермальная деятельность разных этапов.

Предшествующие процессы прогрессивного регионального метаморфизма не приводили к созданию ураноносных рудообразующих растворов. Метаморфизм в региональном и локальном проявлении как прогрессивной, так и регрессивной стадий имел лишь «рудоподготовительное» значение, обуславливая перераспределение урана в горных породах и переход его в легко мобилизуемые формы. При ультраметаморфизме и гранитизации, вызванных воздействием трансмагматических глубинных флюидов, происходило длительное и медленное накопление урана в гранитизируемых породах за счет его привноса или перераспределения.

Детальные геологические исследования на урановых месторождениях разных типов показали, что внемагматические фильтрационные источники, обусловленные выщелачиванием урана из пород, в которых непосредственно локализуются месторождения (местная или ближняя мобилизация), не играли существенной роли в создании промышленных кон-

центраций урановых руд. Изучение поведения урана в процессах предрудного метасоматического изменения вмещающих пород показало, что на доступных для наблюдения глубинах уран в зависимости от типа метасоматоза либо выщелачивался, либо напротив, накапливался в измененных породах. Это дает основание авторам полагать, что растворы становились ураноносными не на путях их циркуляции в породах, непосредственно окружающих месторождения, а в более отдаленных глубинах, в том числе в местах их зарождения.

Отсюда следует, что концепция местной мобилизации урана из вмещающих пород с последующим его переотложением не может быть принята в качестве общего механизма формирования рудоносных растворов. Вместе с тем это не исключает возможности поступления ограниченных количеств урана в качестве дополнительного источника в рудоносные растворы на путях длительной циркуляции и продвижения к местам разгрузки.

Фильтрационные источники, связанные с извлечением урана из глубокозалегающих обогащенных им пород (дальняя или глубинная мобилизация), играют, наоборот, гораздо более значительную роль. Однако механизм этого процесса и природа гидротермальных растворов остаются пока во многом неясными. Наиболее вероятной представляется возможность заимствования рудного вещества трансмагматическими подкоровыми флюидами или смешанными растворами из ураноносного субстрата глубинных частей «гранито-метаморфического» слоя, в том числе, экстрагирование «подвижного» урана из закристаллизовавшихся магматических очагов гранитоидного состава. Последний вариант, по существу, приближается к представлениям о магматическом типе источников, когда мобилизация рудного вещества из кристаллизующихся магм происходила при участии сквозьмагматических растворов.

Для эндогенных гидротермальных месторождений урана разных типов как связанных пространственно с магматизмом, так и не обнаруживающих такой связи, намечаются следующие варианты магматических и глубинных фильтрационных источников рудного вещества.

Урановые месторождения фанерозойских урановорудных провинций, расположенных в областях континентального палеовулканизма, обнаруживают тесную пространственную, временную и, по-видимому, парагенетическую связь с кислым магматизмом — гипабиссальными гранитоидами, континентальными вулканическими и вулкано-интрузивными комплексами пород, сформировавшимися в палеозое на орогенных этапах развития складчатых областей или в периоды их мезозойско-кайнозойской тектоно-магматической активизации.

Источником рудного вещества этих месторождений, вероятно, являлись очаги кислых палингенных магм, заканчивавших свое развитие к моменту рудообразования и порождавших глубинные эманации, с которыми в верхние приповерхностные части земной коры привносились уран и ряд других компонентов. Существенная роль в мобилизации рудного вещества их магматических очагов принадлежала сквозьмагматическим глубинным растворам, просачивающимся через кристаллизующиеся на глубине магмы и захватывающим находящиеся в них «остаточные», обогащенные ураном флюиды.

Для урановых месторождений, тесно пространственно связанных с близкими по возрасту поздними орогенными гранитоидами, предполагается коровый тип источника рудного вещества. Формирование этих месторождений происходило, по-видимому, при участии подкоровых высокотемпературных флюидов, которые вначале вызывали расплавление метаморфических пород и образование очагов палингенных редкометальных гранитных магм. В дальнейшем, проникая через кристаллизующиеся или уже закристаллизовавшиеся магматические очаги, такие флюидопотоки на своем пути экстрагировали уран из магмы «остаточного» расплава или из кристаллических магматических и в меньшей степени метаморфических пород, а выше переходили в ураноносные гидротермальные растворы. Остается до конца неясным конкретный механизм мобилизации рудного вещества и состояние субстрата (расплав, твердая фаза или их смесь), из которого происходило экстрагирование металла. Принимая во внимание тесную связь источника урана с очагами кислых магм (кристаллизующимися или уже застывшими), можно такой тип источника считать как магматическим, так и фильтрационным или комбинированным фильтрационно-магматическим.

Для месторождений урановорудной альбититовой формации также можно предполагать фильтрационно-магматический источник урана в «гранито-метаморфическом» слое земной коры. В результате воздействия газово-тепловых подкоровых потоков, проникавших по зонам глубинных разломов, возникали магматические очаги. Уран мобилизовался, по-видимому, из закристаллизовавшихся магматических очагов высокотемпературными активными флюидами и переносился в верхние части земной коры, где и отлагался в благоприятных геологических условиях. Не исключено также, что какая-то часть сопутствующих компонентов привносилась вместе с потоками флюидов из подкоровых оболочек.

На основании геологических, минералого-геохимических и геохронологических исследований установлено, что стратиформные урановые месторождения, залегающие в «черных» сланцах и не обнаруживающие видимой связи с магматизмом наряду с существенными различиями, характеризуются некоторыми чертами сходства рудообразующих процессов с урановыми месторождениями, которые пространственно и во времени ассоциируют с орогенными гранитоидами. Полихронное урановое оруденение этих месторождений сформировалось в одни и те же этапы развития фанерозойских провинций, в течение единых металлогенических эпох. Все известные стратиформные месторождения располагаются в крупных долгоживущих тектонических узлах сочленения разноориентированных зон рудоконтролирующих глубинных разломов, в которых интенсивно проявились разновозрастные рудоподготовительные и гидротермальные процессы, в том числе и урановорудные.

Геологические особенности строения, закономерности размещения и формирования этих урановых месторождений не дают оснований рассматривать в качестве главного источника рудного вещества вмещающие углеродистые сланцы, также характеризующиеся повышенными содержаниями урана. Скорее всего эти месторождения имели однотипный или близкий к другим гидротермальным месторождениям сопредельных рудных районов, т. е. глубинный — коровый фильтрационный источ-

ник урана. Лишь незначительная часть урана, по-видимому, могла заимствоваться рудоносными растворами из «черных» сланцев по путям их движения.

Сделанные выводы о вероятных типах источников рудного вещества в охарактеризованных главных группах (формациях) ураиовых гидротермальных месторождений имеют не только научное, но и определенное практическое значение. Эти выводы наряду с другими предпосылками могут быть использованы при металлогенических построениях, поскольку они позволяют более целенаправленно подходить к обоснованию критериев оценки перспектив рудоносных территорий, выбору рациональных направлений поисково-разведочных работ. В основе своей они подтверждают направленность специфического развития урановорудных провинций и районов, связь эндогенного уранового рудообразования с определенными глубинными структурами континентальной земной коры, проявлениями подкоровых трансмагматических флюидов, процессами орогенного магматизма кислого, кислого-основного и субщелочного типов. Наиболее важными особенностями таких ураноносных участков земной коры являются широкое и интенсивное проявление рудоподготовительных процессов, геохимическая урановая специализация, близодновременное развитие магматических очагов на разных уровнях (внутрикоровом и подкоровом), признаки устойчивого и длительного проявления мощных газово-тепловых потоков в домагматические, магматические и постмагматические этапы, высокая флюидонасыщенность кислых магматических расплавов, полихронность процессов уранового рудообразования с привносом урана на каждом из урановорудных этапов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адамс Дж.* Содержание урана и тория в вулканических породах // Ядерная геология. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 122—133.
2. *Акимов А. П., Жемжурова З. Н., Золотарев Б. П.* и др. Распределение радиоактивных элементов в породах мантийного происхождения // Физические свойства, состав и строение верхней мантии. М.: Наука, 1974. С. 54—67.
3. *Аренс Л. Х.* Сравнительная геохимия калия, рубидия, кальция, аргона, стронция, урана, тория, свинца // Гамильтон Е. И. Прикладная геохронология. Л.: Недра, 1968. С. 9—16.
4. *Барсуков В. Л., Наумов Г. Б.* Некоторые замечания по поводу статьи А. Г. Бетехтина «О поведении радиоактивных элементов при процессах образования эндогенных месторождений» // Геология руд. месторождений. 1959. № 6. С. 121—124.
5. *Барсуков В. Л., Рябчиков И. Д.* Об источнике рудного вещества // Геохимия. 1980. № 10. С. 1439—1449.
6. *Батурин Г. Н.* Уран в современном морском осадкообразовании. М.: Атомиздат, 1975. С. 136—150.
7. *Баюшкин И. М., Диков Ю. П.* О силикатах урана в процессе гидротермального уранового рудообразования // Геохимия. 1974. № 11. С. 1654—1663.
8. *Белевцев Я. Н., Коваль В. Б.* Генетическая схема урановых месторождений, связанных с натриевым метасоматозом в кристаллических породах щитов // Геол. журн. 1968. Т. 28, № 3. С. 3—17.
9. *Белевцев Я. Н., Комаров А. И.* Уран в метаморфических породах и процессах // Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 133—140.
10. *Берзина И. Г., Елисеева О. П., Попенко Д. П.* Закономерности распределения урана в интрузивных породах Северного Казахстана // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1973. № 7. С. 16—31.
11. *Берзина И. Г., Кравченко С. М., Гуревич М. Ю., Золотарев Б. П.* Определение концентрации урана и его пространственного распределения в кайнозойских базальтоидах по следам от осколков деления // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1969. № 8. С. 70—81.
12. *Бетехтин А. Г.* О замечаниях В. Л. Барсукова и Г. Б. Наумова // Геология руд. месторождений. 1959а. № 6. С. 124—127.
13. *Бетехтин А. Г.* О поведении радиоактивных элементов при процессах образования эндогенных месторождений // Там же. 1959б. № 1. С. 5—24.
14. *Билибин Ю. А.* Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 88 с.
15. *Буранов М. И., Воинов А. С., Полеховский Ю. С.* Роль гранитизации, диафтореза и дислокационного метаморфизма в мобилизации и миграции радиоактивных элементов в докембрийских образованиях Карелии // Радиоактивные элементы в геологических процессах: Тез: докл. Душанбе: АН ТаджССР, 1975. С. 54—56.
16. *Бернем К. В.* Гидротермальные флюиды магматической стадии // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1970. С. 40—73.
17. *Велинский В. В.* Дегазация вещества верхней мантии как основной фактор магмообразования // Геология и геофизика. 1970. № 1. С. 10—21.

18. *Величкин В. И.* Особенности металлогении урановых областей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
19. *Власов Б. П., Жаркова О. В., Рыбалов Б. Л.* К вопросу о движении гидротермальных растворов // Геология руд. месторождений. 1970. № 1. С. 111—115.
20. *Виноградов А. П.* Химическая эволюция Земли: 1-е чтение им. Вернадского, 30 марта 1959 г. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 44 с.
21. *Вольфсон Ф. И., Кушнарев И. П., Лукин Л. И.* и др. Некоторые вопросы формирования гидротермальных урановых месторождений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1961. № 9. С. 12—24.
22. Вопросы геологии урана. М.: Атомиздат, 1975. 160 с.
23. Вопросы прикладной радиогеологии / Под ред. Д. Я. Суражского. М.: Госатомиздат, 1963. 278 с.
24. Геология постмагматических торнево-редкометальных месторождений / Под ред. В. А. Невского. М.: Атомиздат, 1972. 407 с.
25. Геология и генезис месторождений урана в осадочных и метаморфических толщах. М.: Недра, 1980. 270 с.
26. Геология рудных месторождений, петрография, минералогия. М.: Наука, 1976. 211 с.
27. Геология гидротермальных урановых месторождений / Под ред. Д. И. Щербакова, Ф. И. Вольфсона. М.: Наука, 1966. 443 с.
28. Геология месторождений уран-молибденовой рудной формации / Под ред. А. Б. Каждана. М.: Атомиздат, 1966. 182 с.
29. Геологические особенности и ураноносность формации черных сланцев. М.: Наука, 1981. 120 с.
30. Геологические структуры эндогенных урановых рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1986. 150 с.
31. Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / Под ред. А. И. Перельмана. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
32. Гидротермальные месторождения урана / Под ред. Ф. И. Вольфсона. М.: Недра, 1978. 446 с.
33. *Гинзбург А. И., Тимофеев Н. И., Фельдман Л. Г.* Основы гелогии гранитных пегматитов. М.: Недра, 1979. 296 с.
34. *Даусон Дж.* Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
35. *Дымков Ю. М.* Урановая минерализация Рудных гор. М.: Атомиздат, 1960. 100 с.
36. *Евсеева Л. С., Перельман А. И.* Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Госатомиздат, 1962. 239 с.
37. *Елисеева О. П., Омельяненко Б. И.* Локальное распределение урана в горных породах и минералах как индикаторов петрогенетических процессов // Сов. геология. 1976. № 1. С. 76—91.
38. *Ермолаев Н. П., Созинов Н. А.* Стратиформное рудообразование в черных сланцах. М.: Наука, 1986. 174 с.
39. *Ермолаев Н. П., Величкин В. И., Аверина А. С.* и др. Геохимические особенности гранитизации в Рудных горах // Геохимия. 1976. № 5. С. 696—706.
40. *Жариков В. А., Иванов И. П., Омельяненко Б. И.* и др. Экспериментальное изучение поведения урана в модельных гранитных расплавах и растворах при высоких параметрах // Геология руд. месторождений. 1987. № 3. С. 3—11.
41. *Жукова А. М., Венидиктов В. М., Жуков Г. В.* Особенности распределения урана в породах высокой ступени метаморфизма и ультраметаморфизма // Геол. журн. 1974. Т. 34, вып. 1. С. 118—122.
42. Изохронные построения и локализация отбора проб / И. В. Чернышев, В. Н. Голубев, В. А. Троицкий и др. // Масс-спектрометрия и изотопная геология. М.: Наука, 1983. С. 90—108.
43. Источники вещества и условия локализации оловорудных месторождений. М.: Наука, 1984. 127 с.
44. Источники рудного вещества эндогенных месторождений. М.: Наука, 1976. 340 с.
45. *Кадик А. А., Хитаров Н. И.* Роль естественной конвекции в переносе магматического пепла и вещества // Геохимия. 1968. № 6. С 651—666.

46. *Казанский В. И., Лаверов Н. П., Тугаринов А. И.* Эволюция уранового рудообразования. М.: Атомиздат, 1978. 208 с.
47. *Казанский В. И., Лаверов Н. П.* Месторождения урана // Рудные месторождения СССР. М.: Недра, 1978. Т. 2. С. 327—339.
48. *Ковалев В. П.* Герцинский магматизм Предсаянья (радиогеология, петрология, реконструкция). Новосибирск: Наука, 1980. 422 с.
49. *Когарко Л. Н., Рябчиков И. Д.* Летучие компоненты в магматических процессах // Геохимия. 1978. № 9. С. 1293—1321.
50. *Коржинский Д. С.* Гранитизация как магматическое замещение // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1952. № 2. С 56—69.
51. *Коржинский Д. С.* Метамагматические процессы // Там же. 1973. № 12. С. 3—6.
52. *Коржинский Д. С.* Проблема различия метасоматических образований от магматических и осадочных // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1974. С. 5—12.
53. *Котов Е. И., Тимофеев А. В., Хотеев А. Д.* Температуры образования некоторых гидротермальных урановых месторождений // Очерки по геологии и геохимии рудных месторождений. М.: Наука, 1970. С. 146—154.
54. *Кравченко Н. С., Бурдэ Б. И.* Распределение урана в некоторых магматических породах по данным осколковой радиографии // Сов. геология. 1979. № 9. С. 99—103.
55. *Кравченко С. М., Зайцев Е. И., Шатагина Е. В.* Уран — индикатор магматических процессов формирования дифференцированных интрузий // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218, № 5. С. 1192—1195.
56. *Крупенников В. А.* Закономерности размещения урановых руд на месторождениях, залегающих среди углисто-кремнистых сланцев и известняков // Геология руд. месторождений. 1969. № 4. С 74—87.
57. *Кузнецов И. Е., Матвеева С. С.* Петрохимические и геохимические аспекты процесса гранитизации (Восточные Мугоджары) // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1983. № 6. С. 42—49.
58. *Лаверов Н. П., Рыбалов Б. Л., Хорошилов Л. В.* Геологическая структура урановых гидротермальных месторождений, приуроченных к жерловым фациям эффузивов и субвулканическим интрузивам // Тр. ИГЕМ. 1962. Вып. 82. С. 116—135.
59. *Лаверов Н. П., Рыбалов Б. Л., Канцель А. В.* и др. Некоторые особенности геологии уран-молибденовых месторождений, приуроченных к субвулканическим интрузивам кислых пород // Геология руд. месторождений. 1965. № 6. С. 34—48.
60. *Лаверов Н. П., Чернышев И. В.* Временная связь урановых месторождений с континентальным вулканизмом // Геохронология и вопросы рудообразования. М.: Наука, 1977. С. 5—18.
61. *Лаверов Н. П., Смилкстын А. О., Шумилин М. В.* Зарубежные месторождения урана. М.: Недра, 1983. 320 с.
62. *Лапин А. В.* Некоторые особенности флюидно-магматического режима ранних карбонатитов // Флюиды в магматических процессах. М.: Наука, 1982. С. 27—41.
63. *Леонова Л. Л., Удальцова Н. И.* Геохимия урана и тория в вулканическом процессе на примере Курило-Камчатской зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 103 с.
64. *Летников Ф. А.* Гранитоиды глыбовых областей. Новосибирск: Наука, 1975. 213 с.
65. *Летников Ф. А., Леонтьев А. Н., Гантимурова Т. П.* Флюидный режим гранитообразования. Новосибирск: Наука, 1981. 184 с.
66. *Лутц Б. Г.* Петрология глубинных зон континентальной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1974. 304 с.
67. *Львов Б. К.* Уран и торий в гранитоидах Качкарского района (Ю. Урал) // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та: Н. С. 1963. С. 13—44.
68. *Львов Б. К., Петрова Н. И., Житкова А. С.* Условия накопления радиоактивных элементов в процессах гранитообразования и постмагматического перераспределения (Урал) // Радиоактивные элементы в геологических процессах: Тез. докл. Душанбе: АН ТаджССР, 1975. С. 54—56.

69. *Ляхович В. В.* Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза. М.: Наука, 1967. 448 с.
70. *Маракушев А. А., Перчук Л. Л., Соболев В. С.* и др. Обмен веществом между верхней мантией и корой // Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978. С. 420—432.
71. *Маракушев А. А., Безмен Н. И.* Эволюция метеоритного вещества планет и магматических серий. М.: Наука, 1983. 184 с.
72. *Марин Ю. Б.* Ассоциация акцессорных минералов и особенности их эволюции на разных уровнях образования гранитоидных серий // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1973. Ч. 102, вып. 5. С. 572—590.
73. Металлогения урана континентальных блоков земной коры // Под ред. Ю. М. Шувалова. Л.: Недра, 1980. 156 с.
74. *Митропольский А. С., Мельгунов С. В., Кулик Н. А.* и др. Уран и торий в процессе формирования пород метаторфических комплексов // Рудные формации и геохимия рудообразующих процессов. Новосибирск.: Наука, 1976. С. 178—190.
75. *Модников И. С., Сычев И. В.* Условия формирования уранового оруденения в вулканических депрессиях проседания // Геология руд. месторождений. 1984. № 1. С. 31—41.
76. *Набоко С. И., Главатских С. Ф.* Уран и торий в постэруптивном процессе большого трещинного Толбачинского извержения на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1983. № 6. С. 3—9.
77. *Наумов В. Б., Иванова Г. Ф.* Геохимические критерии генетической связи редкометального оруденения с кислым магматизмом // Геохимия. 1984. № 6. С. 792—804.
78. *Наумов Г. Б., Ачеев Б. Н., Ермолаев Н. П.* К вопросу о движении гидротермальных растворов // Геология руд. месторождений. 1968. № 4. С. 29—39.
79. *Наумов Г. Б.* К вопросу о карбонатной форме переноса урана в гидротермальных растворах // Геохимия. 1959. № 1. С. 6—19.
80. *Наумов Г. Б.* Основы физико-химической модели уранового рудообразования. М.: Атомиздат, 1978. 211 с.
81. *Наумов Г. Б. Соколова Е. Т., Матюшин Л. В.* и др. Роль контактового метаморфизма в формировании уранового оруденения // Геохимия. 1986. С. 1113—1129.
82. *Неручев С. Г.* Уран и жизнь в истории Земли. Л.: Недра, 1982. 208 с.
83. *Омельяненко Б. И., Козлова П. С., Елисеева О. П., Симонова Л. И.* Локальное распределение урана в породах и минералах как показатель его геохимической истории // Проблемы радиогеологии. М.: Недра, 1983. С. 140—163.
84. *Омельяненко Б. И., Елисеева О. П.* О связи эндогенных ореолов рассеяния урана с процессами околорудного изменения пород // Особенности геологии гидротермальных рудных месторождений. М.: Наука, 1978. Т. 1. С. 210—226.
85. *Омельяненко Б. И., Скороспелкин С. А., Резников А. М.* Поведение петрогенных и рудогенных элементов в процессе березитизации пород на урановых месторождениях // Радиоактивные элементы в горных породах: Тез. докл. Всесоюз. совещ. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1972. Ч. 2. С. 13—14.
86. *Омельяненко Б. И., Россман Г. И., Железнова Е. И.* и др. Поведение урана в процессе околорудного изменения пород // Геология руд. месторождений. 1973. № 5. С. 60—65.
87. Основы прогноза урановорудных провинций и районов / Под ред. Н. П. Лаверова. М.: Недра, 1986. 206 с.
88. *Петров Б. В., Макрыгина В. А.* Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск: Наука, 1975. 342 с.
89. *Плющев Е. В., Ушаков О. П., Шатов В. В., Беляев Г. М.* Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1981. 262 с.
90. Проблемы радиогеологии. М.: Наука, 1983. 292 с.
91. *Редькин А. Ф., Иванов И. П., Омельяненко Б. И.* и др. Равновесия в системе UO_2—H_2O при температурах до 773 К и давлении 100 мПа // Третья Всесоюз. конф. по химии урана: Тез. докл. М.: Наука, 1985. С. 83.
92. *Редькин А. Ф., Иванов И. П., Омельяненко Б. И.* Экспериментальное изучение растворимости двуокиси урана в кислых хлоридных флюидах при 400—600° С и 1 кбар // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292, № 6. С. 1453—1455.

93. *Рехарский В. И., Коваленко В. И., Петровская Н. Б.* и др. Источники и условия мобилизации рудного вещества // Докл. на XXVII Междунар. геол. конгр.: Металлогения и рудные месторождения. М.: Наука, 1984. С. 20—27.
94. *Рингвуд А. Е.* Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 581 с.
95. Розен О. М., Серых В. И. Основные черты истории геологического развития древнего ядра Кокчетавского массива и некоторые вопросы металлогении // Тр. Центр. Каз. геол. упр. 1969. Вып. 3. С. 30—44.
96. *Ронов А. Б., Ярошевский А. А.* Химический состав земной коры // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Киев: Наук. думка, 1971. С. 192—207.
97. *Рыбалов Б. Л.* Структурные особенности и вопросы генезиса урановых месторождений, залегающих в черных сланцах и карбонатных породах // Геология руд. месторождений. 1965. № 2. С. 3—24.
98. *Рябчиков И. Д.* Водные растворы в верхней мантии и проблемы дегазации Земли // Подземные воды и эволюция литосферы. М.: Наука, 1985а. Т. 1. С. 176—187.
99. *Рябчиков И. Д.* Мантийные источники гидротермальных растворов // Междунар. ассоц. по генезису руд. месторождений (МАГРМ): VI симпоз., Тбилиси, Тез. докл. Тбилиси: Геол. ин-т АН ГССР, 1982а. С. 44.
100. *Рябчиков И. Д.* Мобилизация вещества флюидами в земной коре и верхней мантии // Критерии отличия метаморфогенных и магматогенных гидротермальных месторождений. Новосибирск: Наука, 1985б. С. 64—70.
101. *Рябчиков И. Д.* Окислительно-восстановительные равновесия в верхней мантии // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268. № 3. С. 703—706.
102. *Рябчиков И. Д.* Природа кимберлитовых магм // Геология руд. месторождений. 1980. № 6. С. 18—26.
103. *Рябчиков И. Д., Беттчер А. Л.* Состав водных флюидов, равновесных с флогопитсодержащими мантийными парагенезисами при высоких температурах и давлениях // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1980. № 3. С. 56—62.
104. *Рябчиков И. Д.* Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 232 с.
105. *Рябчиков И. Д.* Флюидный массоперенос и мантийное магмообразование // Вулканология и сейсмология. 1982б. № 5. С. 3—9.
106. *Салова Т. П., Эпельбаум М. Б., Тихомирова В. И.* и др. Влияние температуры на кислотную агрессивность флюида по отношению к силикатному расплаву // Очерки физико-химической петрологии. М.: Наука, 1980. Вып. 9. С. 175—179.
107. *Семенов А. И.* Некоторые вопросы металлогении урана // Закономерности размещения полезных ископаемых. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 2. С. 110—135.
108. *Симонова Л. И., Омельяненко Б. И., Максимова И. Г.* и др. Поведение урана при формировании сингенетичных пегматитов // Изв. АН СССР. Сер. геол. № 12. С. 119—124.
109. Сквозные рудоконцентрирующие структуры: Тез. Всесоюз. совещ. М.: Наука, 1986. 216 с.
110. *Смирнов С. С.* Успехи в области теории образования магматогенных рудных месторождений // Юбилейный сборник. М.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 81—103.
111. *Смыслов А. А.* Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1974. 231 с.
112. *Соболев С. Ф., Золотарёв Б. П.* Геохимия пород верхней мантии и некоторых ее производных // Физические свойства, состав и строение верхней мантии. М.: Наука, 1974. С. 3—18.
113. *Соболев В. С.* К вопросу об образовании лейцитовых пород // Проблемы минералогии и петрологии. Л.: Наука, 1972. С. 36—43.
114. *Соловьева Л. В., Владимиров Б. М., Семенов В. Г.* и др. Мантийный метасоматоз и его роль в образовании кимберлитовых и щелочных оливин-базальтовых расплавов // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1984. С. 4—18.
115. *Титов В. Н.* Распределение радиоактивных элементов в суперкрустальных толщах Алданского щита. Материалы о содержании и распределении

радиоактивных элементов в горных породах // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та: Н. С. 1963. Т. 95. С. 155—161.
116. *Титов В. К., Билибина Т. В., Кочкин Г. Б.* Уран и торий в процессах регионального метаморфизма // Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 151—154.
117. *Тугаринов А. И.* О причинах формирования рудных провинций // Химия земной коры. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 1. С. 153—177.
118. *Тугаринов А. И.* Уран в магматическом процессе // Радиоактивные элементы в горных породах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 82—86.
119. Условия образования месторождений урана в вулканических депрессиях / Под ред. А. И. Тугаринова. М.: Атомиздат, 1972. 310 с.
120. Урановые месторождения Чехословакии. М.: Недра, 1984. 445 с.
121. *Уханов А. В., Соборнов О. П., Харькив А. Д., Смирнов Т. И.* Содержания тория и урана в кимберлитах Сибири и Африки по результатам новых гамма-спектрометрических определений // Геохимия. 1982. № 8. С. 1204—1210.
122. *Ходаковский И. Л.* Формы переноса элементов в рудообразующих растворах // Междунар. ассоц. по генезису руд. месторождений (МАГРМ): VI симпоз. Тбилиси: Геол. ин-т АН ГССР, 1982. С. 284—285.
123. *Шаткова Л. Н., Шатков Г. А.* О возможном источнике рудного вещества уранфлюоритовых месторождений // Геология руд. месторождений. 1973. № 4. С. 36—43.
124. *Шатков Г. А., Шатков Л. Н., Гущин Е. Н.* О распределении урана, тория, фтора, хлора, молибдена и ниобия в липаритах и кислых вулканических стеклах // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1970. Ч. 99, вып. 2. С. 165—177.
125. *Шейнманн Ю. М., Баженова Г. Н.* Общегеологическое значение некоторых черт состава базальтов океана и материков // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1972. Т. 47, вып. 3. С. 81—101.
126. *Эз В. В.* Тектоника глубинных зон континентальной земной коры. М.: Наука, 1976. 168 с.
127. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования / Под ред. А. И. Перельмана. М.: Атомиздат, 1965. 323 с.
128. Эндогенные источники рудного вещества. М.: Наука, 1987. 245 с.
129. *Эпельбаум М. Б., Кузнецов А. Д., Салова Т. П.* Сквозьмагматические растворы и их влияние на состав магматических пород // Флюиды в магматических процессах. М.: Наука, 1982. С. 254—269.
130. *Юдинцев С. В., Омельяненко Б. И.* О поведении урана в кристаллизующемся расплаве // Геохимия. 1986. № 4. С. 555—559.
131. *Юдинцев С. В., Иванов И. П., Омельяненко Б. И., Горбачева Г. А.* Экспериментальное изучение валентного состояния урана в расплавах // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 4. С. 112—114.
132. *Best M. G., Mokee E. N., Damon P. E.* Space-time-composition patterns of Late Conozoic mafic volcanism, Southwestern Utan and edjoining areas // Amer. J. Sci. 1980. Vol. 280, N 10. P. 1035—1050.
133. *Calas G.* Etude experimentale du comportement de l'uranium dans les magmas.: étals d'oxydation et coordinance // Geochim. et cosmochim. acta. 1979. Vol. 43, N 9. P. 1521—1531.
134. *Frantz J. D., Popp R. K.* The Ionization constant of HCl as a function of temperature and pressure // Annu. Rep. Bir. Geophys. Lab. Cornegie Inst., 1977—1978. Wash. (D. C.), 1978. 77 p.
135. *Giardini A. A., Melton Ch. E.* Gases released from natural and synthetic diamonds by crushing under high vaccuum at 200° C and their significance to diamond genesis // Fortshr. Miner. 1975. Vol. 52, spec. iss. P. 47—59.
136. *Nesbit B. E., Kelly W. G.* Magmatic and hydrothermal inclusions in carbonatite of the Magnet Cove Complex, Arcansas // Contrib. Mineral. and Petrol. 1977. Vol. 63, N 3. P. 271—894.
137. *Nguyen Trung Ch., Poty B.* Solubilite de UO_2 en milien aqueux à 400 et 500° et 1 kilobar // Extrait du rapport annuel 1976 du Centre de recher. petrogr. et geochim. Nancy, 1976. P. 37—39.
138. *Rankin A. H., Alderton D. H., Thompson M.* et al. Cakbon ratios in fluid

inclusion decrepitates by inductively coupled plasma emission spectroscopy // Miner. Mag. 1972. Vol. 46. P. 179—186.
139. *Roshot I. N., Prijana, Noble D. C.* Mobility of uranium end thorium in glassy and cristallized silicic volcanic rocks // Econ. Geol. and Bul. Soc. Econ. Geol. 1971. Vol. 66, N 7. P. 1061—1069.
140. *Rosholt I. N., Noble D. C.* Loss of uranium from crystallized silicic volcanic rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 1969. Vol. 6, N 4. P. 262—270.
141. *Schneider A., Wederpohl K. H., Mengel K.* Incipient melting of upper mantle rocks // XXVII Междунар. геол. конгр.: Тезисы. М.: Наука, 1984. Т. 5. С. 390—391.
142. *Schreiber H. D., Balazs G. B.* The chemistry of uranium in borosilicate glasses. Pt 1. Simple base compositions relevant to the immobilization of nuclear Waste // Phys. and Chem. Glas. 1982. Vol. 23, N 5. P. 139—146.
143. *Speer J. A., Solberg T. N., Becker S. W.* Petrography of the uranium-bearing minerals of the Liberty Hill Pluton South Carolina: Phase assemblages and migration of uranium in granitoid rocks // Econ. Geol. 1981. Vol. 76. P. 2162—2175.
144. *Sun S.* Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle // Geochim. et cosmochim. acta. 1982. Vol. 46. P. 179—192.
145. *Taylor S. R.* Trace element abundances and the chondritic Earth model // Ibid. 1964. Vol. 28, N 12. P. 17—31.
146. *Tuttle C. F., Bowen N. L.* Origin of granite in the light of experimental studies in the system $NaALSi_3O_8$—$KALSi_3O_8$—SiO_2—H_2O // Geol. Soc. Amer. Mem. 1958. Vol. 74. P. 1—153.
147. *Zielinski R. A.* Uranium abundances and distribution in associated glassy and crystalline rhyolites of the western United States // Bul. Geol. Soc. Amer. 1978. Vol. 89, N 3. P. 404—414.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава I

Типы урановых месторождений и возможные источники рудного вещества. 8

Генетические и формационные типы урановых месторождений 8
Обзор современных представлений о генезисе эндогенных месторождений урана и их источниках 11

Глава II

Геохимическая история урана в процессах, происходящих в литосфере. 24

Уран в экзогенных процессах 25
Уран в процессах метаморфизма 34
Уран в мантийном петрогенезе 48
Уран в процессах гранитообразования 54

Глава III

Критерии связи эндогенных урановых месторождений с внутрикоровым магматизмом 62

Гидротермальные месторождения урана, их положение в тектонических структурах и связь с магматическими комплексами 62
Пространственно-временные соотношения гидротермального уранового оруденения с магматизмом 73
Радиогеохимическая специализация магматических пород 95
Рудно-формационные ряды, минералого-геохимические ассоциации руд и сопровождающие их метасоматиты 105
Пути циркуляции рудообразующих растворов 113
Петрологические критерии потенциально ураноносных магматических комплексов 119

Глава IV

Петрологические и физико-химические основы корового магматического источника 125

Уран в магматических процессах 125
Уран в кристаллизующихся магматических расплавах 130
Поведение урана при формировании сингенетичных пегматитов 135

Физико-химические данные о фракционировании урана в системе флюид — магматический расплав—уранинит 137
О возможной концентрации урана в магматогенных флюидах 140
Уран в постмагматических растворах 144

Глава V

Основы представлений о внутрикоровых глубинных фильтрационных источниках урана 156

Общие представления 156
Признаки возрастного отрыва гидротермального уранового оруденения от магматизма 169
Признаки проявления эндогенных фильтрационных процессов на месторождениях, связанных с гранитоидами 175
Возможный механизм и формы переноса урана 179
Фильтрационные источники урана на стратиформных месторождениях. 184

Глава VI

Анализ альтернативных механизмов формирования рудоносных растворов. 188
Метаморфогенные источники 188
Фильтрационные источники ближней мобилизации 205
Подкоровые источники 227
Полигенные источники 242

Глава VII

Критерии прогноза эндогенных урановых месторождений в свете проблемы источников рудообразующих растворов 245
Заключение 257
Литература 267

Научное издание

РЫБАЛОВ Борис Леонтьевич
ОМЕЛЬЯНЕНКО Борис Иванович

ИСТОЧНИКИ
РУДНОГО ВЕЩЕСТВА
ЭНДОГЕННЫХ УРАНОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Утверждено к печати
Институтом геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
АН СССР

Художник *Н.М. Казаков*
Художественный редактор *В.В. Алексеев*
Технические редакторы *В.В. Лебедева,*
Л.Н. Богданова
Корректор *З.Д. Алексеева*

ИБ № 37058

Подписано к печати 21.02.89 Т — 07457
Формат 60X90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Литературная (фотонабор)
Печать офсетная
Усл.печ.л 17,5. Усл.кр.-отт. 17,9
Уч.-изд.л. 21,4. Тираж 550 экз.
Тип. зак. 2123.Цена 4р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука" 117864 ГСП-7,
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

2-я типография издательства "Наука"
121099, Москва Г-99, Шубинский пер., 6

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Готовятся к печати книги:

Кадик А. А., Луканин О. А., Лапин И. В.
Физико-химические условия эволюции базальтовых магм в приповерхностных очагах
1[illegible] л. 3 р. 40 к.

Изложены экспериментальные и теоретические основы условий образования базальтовых магм и их эволюции при подъеме к поверхности Земли. Рассмотрены главные процессы, определяющие дифференциацию базальтов в вулканических очагах, окислительно-восстановительный и флюидный режимы, отделение летучих компонентов от расплава, зависимость влияния лав на поверхность планеты от динамики процессов в вулканическом очаге.

Для петрологов, геохимиков, геологов и геофизиков.

Магматизм Земли и Луны: (Опыт сравнительного анализа).
20 л. 4р.

В сборнике собраны материалы по минералогическому и петрохимическому изучению лунных пород. Исследованы породы некоторых импактных земных структур и древнейшие земные магматические дифференциаты. Приведено сравнение земных и лунных образований. Выявлена активная роль компонентов в лунном магматизме, подобие лунных пород земным, гетерогенность лунных материков и морей и многоэтапность их формирования.

Для геологов, петрологов, геохимиков.

Зотов И. А.
Трансмагматические флюиды в магматизме и рудообразовании
16 л. 3 р. 20 к.

В монографии раскрыты вопросы зарождения флюидопотоков при инициальном мантийном магмообразовании и их участия в формировании и эволюции магматических очагов. На конкретном геологическом материале рассматриваются процессы метамагматизма, т. е. флюидо-магматического взаимодействия магматического замещения боковых пород, приводится их классификация. Обсуждается возможность использования гипотезы трансмаг-

матических флюидов для понимания генезиса и разработки признаков крупных рудных узлов и эндогенных месторождений.

Для геологов, минералогов, петрологов.

Зарайский Г. П.
Зональность и условия образования метасоматических пород.
20 л. 4 р. 50 к.

В книге представлен оригинальный опыт систематического разбора условий формирования и принципиальных особенностей строения метасоматических пород с позиций прямого экспериментального моделирования метасоматических процессов. Экспериментально воспроизведены и изучены все главные типы околорудных метасоматитов, построены количественные физико-химические диаграммы, характеризующие условия их образования. Полученные результаты использованы для интерпретации условий метасоматизма на рудных месторождениях.

Для геологов, минералогов, петрографов, геохимиков.

Добровольская М. Г.
Свинцово-цинковое оруднение
15 л. 3 р.

На примере советских и зарубежных свинцово-цинковых месторождений рассматриваются минеральные ассоциации и условия их образования в интрузивных, эффузивных, карбонатных породах и скарнах. Типизация месторождений проведена на рудно-формационной основе, что позволило выявить сходство и различия минерального состава, текстур и структур руд, сформированных в разных геологических условиях. Минералого-геохимические особенности руд используются для прогноза и оценки скрытого оруденения в месторождении свинца и цинка различных рудных формаций.

Для геологов, минералогов, петрологов.

Добржинецкая Л. Ф.
Деформация магматических горных пород в условиях глубинного тектогенеза.
20 л. 3 р.

Монография посвящена особенностям деформации магматических горных пород—гранитоидов, базитов и ультрабазитов, которые являются наиболее распространенными образованиями, слагающими литосферу. Рассмотрены вопросы специфики твердопластического течения на разных глубинных уровнях — в верхней мантии и коре. В качестве региональных примеров приводятся материалы по деформациям базит-ультрабазитовых ассоциаций офилитовых зон фанерозоя Северо-Востока СССР, зеленокаменных поясов докембрия Восточной Сибири и тоналит-трондъемитовых, гранитоидных пород докембрия Балтийского щита.

Для геологов, тектонистов, минералогов и геохимиков.

Годовиков А. А.
О связи свойств элементов со структурой и свойствами минералов.
8 л. 1 р. 60 к.

В монографии рассматриваются зависимость свойств элементов от их электронного строения, сходство и различие между ними. Особое внимание уделено анализу кристаллохимической роли отдельных элементов, физико-химических параметров системы. Разработана детальная химико-структурная система минералов, даны определения отдельных ее таксонов. Приведены классификационные таблицы, охватывающие более 500 минеральных видов.

Для минералогов, кристаллохимиков.

Горбачев Н. С.
Флюидно-магматическое взаимодействие в сульфидно-силикатных системах.
10 л. 2 р.

Монография содержит большой экспериментальный материал автора по растворимости серы, хлора, фосфора в магмах, влиянию летучих на состав первичных жидкостей при частичном плавлении перидотитов мантии, дифференциации расплавов при растворении летучих, распределению компонентов между минералами, силикатными и солевыми расплавами и флюидом. С позиций теории флюидно-магматического взаимодействия рассмотрены генетические модели формирования рудоносных дифференцированных базитовых серий.

Для геологов, петрографов, геохимиков.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов «Книга—почтой» «Академкнига»:

Магазины «Книга—почтой»:
252030 Киев, ул. Пирогова, 4
197345 Ленинград, Петрозаводская, 7
117192 Москва, Мичуринский пр-т, 12

Магазины «Академкнига» с указанием отделов «Книга—почтой»:
480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 («Книга—почтой»)
370005 Баку, ул. Коммунистическая, 51 («Книга—почтой»)
232600 Вильнюс, ул. Университето, 4
690088 Владивосток, Океанский пр-т, 140 («Книга — почтой»)
320093 Днепропетровск, пр-т Гагарина, 24 («Книга—почтой»)
734001 Душанбе, пр-т Ленина, 95 («Книга—почтой»)
375002 Ереван, ул. Туманяна, 31
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 («Книга—почтой»)
420043 Казань, ул. Достоевского, 53 («Книга—почтой»)
252030 Киев, ул. Ленина, 42
252142 Киев, пр-т Вернадского, 79
252030 Киев, ул. Пирогова, 2
277012 Кишинев, пр-т Ленина, 148 («Книга—почтой»)
343900 Краматорск, Донецкой обл., ул. Марата, 1 («Книга—почтой»)

660049 Красноярск, пр-т Мира, 84
443002 Куйбышев, пр-т Ленина, 2 («Книга—почтой»)
191104 Ленинград, Литейный пр-т, 57
199164 Ленинград, Таможенный пер., 2
196034 Ленинград, В/О, 9-я линия, 16
220012 Минск, Ленинский пр-т, 72 («Книга—почтой»)
103009 Москва, ул. Горького, 19-а
117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7
630076 Новосибирск, Красный пр-т, 51
630090 Новосибирск, Морской пр-т, 22 («Книга—почтой»)
142284 Протвино, Московской обл., ул. Победы, 8
142292 Пущино, Московской обл., МР, «В», 1
620161 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 («Книга—почтой»)
700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1
700029 Ташкент, ул. Ленина, 73
700070 Ташкент, ул. Ш. Руставели, 43
700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 («Книга—почтой»)
634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18
634050 Томск, Академический пр-т, 5
450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 («Книга—почтой»)
450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49
720000 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 («Книга—почтой»)
310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 («Книга—почтой»)

4 р. 30 к.