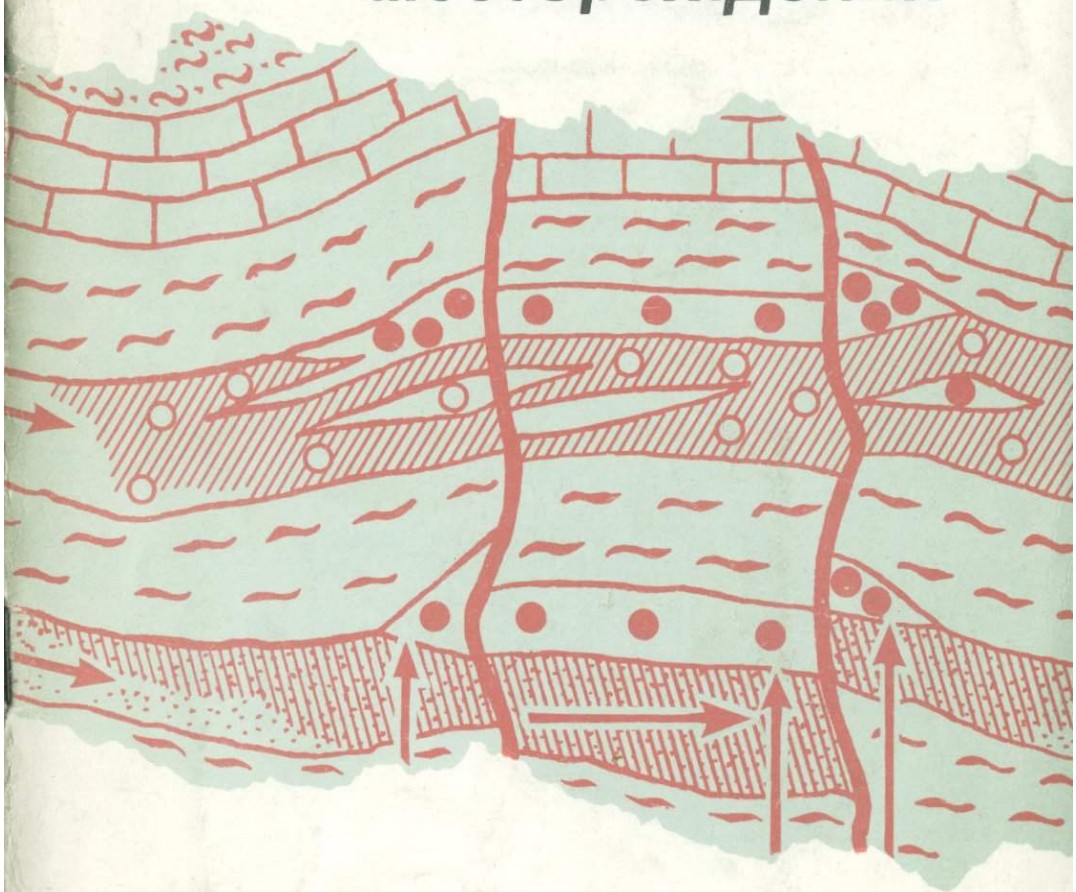


Н. В. Губкин, А. А. Смирнов

**Поисковые
критерии
и основы
прогноза
гидрогенных
урановых
месторождений**



Поисковые критерии и основы прогноза водородных урановых месторождений

3392



МОСКВА · АТОМИЗДАТ · 1981



УДК 553.061.546.79

Губкин Н.В., Смирнов А.А. Поисковые критерии и основы прогноза гидрогенных урановых месторождений. — М.: Атомиздат, 1981. — 56 с.

В книге приведены сведения о подземных водах, условиях миграции в них урана, условиях и процессах формирования, переформирования и разрушения гидрогенных урановых месторождений.

С учетом новых данных по известным месторождениям разработаны геологические и радиогидрогеохимические поисковые критерии гидрогенных урановых месторождений. Рассмотрены особенности размещения оруденения. Даны методические указания по прогнозу и оценке масштабов прогнозируемых гидрогенных месторождений.

Для геологов и гидрогеологов, занимающихся прогнозированием и поисками гидрогенных урановых месторождений. Может быть полезна аспирантам и студентам геологических вузов.

Табл. 2. Ил. 14. Библиогр. 19.

Г 20803 — 071
034 (01) — 81 77 81 · 1904050000

© Атомиздат, 1981

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

В природных условиях уран, как и другие рудообразующие металлы, находится не только в горных породах, но и в водных растворах — в поверхностных и подземных водах (холодных и термальных), которые получают его из омываемых пород. Из подземных вод уран может выпадать в соответствующих геологоструктурных и геохимических условиях, образуя при этом месторождения.

Эти месторождения, по предложению П.Я.Антропова, получили название "гидрогенных". Сведения о геологоструктурных и геохимических условиях формирования гидрогенных месторождений приводятся ниже. Первичная урановая минерализация представлена в основном настураном, чернью и местами тухолитом. Соотношение настурановой и черниевой минерализаций зависит от контрастности восстановительной обстановки на месте формирования месторождения или от степени окисленности руд в случаях последующего внедрения в них окислительных процессов.

На урано-битумных и урано-угольных месторождениях возможно образование уран-органических соединений, а на уран-фосфорных месторождениях и в скоплениях костных остатков рыб часть урана входит в фосфориты.

В первичных рудах обычно присутствуют сульфиды металлов. Типы сульфидов и их количественные соотношения зависят от общих геохимических условий района месторождения и контрастности сероводородной обстановки при рудообразовании.

Как правило, в первичных рудах присутствуют вторичные карбонаты кальция или магния; встречаются флюорит, кремнекислые образования и некоторые другие минералы.

В процессе движения подземные воды находятся в различное время в областях питания, транзита и разгрузки. Области питания являются горноскладчатые сооружения и локальные поднятия. Именно здесь образуются основные массы подземных вод коренных отложений за счет атмосферных осадков и начинается формирование их минерального и газового состава. При этом в раствор (в воду) переходят в тех или иных концентрациях все химические элементы, которые находятся в горных породах и органических веществах и способны растворяться в холодных водах при окислительной обстановке или переходить в раствор в результате ионного обмена. В водах растворяются газы, поступающие из атмосферы и зоны окислительных процессов, в частности кислород, который расходуется на окисление горных пород и органического вещества. В процессе аэробного окисления органического вещества образуется углекислота, которая в природной обстановке обуславливает растворение, например, карбонатов с образованием легко растворимых в воде бикарбонатов соответствующих металлов, разрушение полевых шпатов и пр.

Кислород, углекислота и бикарбонаты, находящиеся в водах в растворенном состоянии, обуславливают благоприятную обстановку для пе-

рехода в водный раствор из горных пород урана и для водной миграции его в шестивалентной форме в виде карбонатных соединений — $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)^{-4}$. Образующиеся при этом в воде концентрации урана зависят не только от ее газового состава, но и от содержания металла в горных породах, их проницаемости, степени динамичности вод и составляют от $n \cdot 10^{-7}$ до $n \cdot 10^{-4}$ г/л. Наибольшие концентрации урана отмечены в водах гранитоидов и некоторых разновидностей сланцев, а наименьшие — в водах известняков, доломитов, мергелей, чистых кварцевых песков и песчаников.

Для процесса рудообразования решающее значение имеет наличие в подземных водах не только рудообразующих металлов (в частности, урана), но и значительных концентраций сульфатов (в виде сульфат-ионов SO_4^{2-}). Как известно, сульфат-ионы у скоплений жидких или газообразных углеводородов в процессе сульфатредукции обуславливают образование H_2S и HS^- , необходимых для восстановления и осаждения рудообразующих металлов. Ионы SO_4^{2-} непосредственно не восстанавливают металлы и совместно с ними мигрируют в водах при соответствующих геохимических обстановках на любые расстояния (за исключением радия, бария и некоторых других металлов, с которыми ионы SO_4^{2-} образуют нерастворимые или труднорастворимые соединения).

Сульфат-ионы поступают в раствор, т.е. в подземные воды, из растворяющихся минералов, в частности из гипса, находящегося в горных породах (часто даже в четвертичных отложениях), а также из окисляющихся сульфидов и ангидрита.

При движении подземных вод в пределах горных сооружений и локальных поднятий, где наблюдается окислительная обстановка, образуются повышенные и относительно большие концентрации урана (до $n \cdot 10^{-4}$ г/л). В тектонических депрессиях сохраняются такие же или несколько меньшие концентрации урана, чем в соответствующих областях питания, лишь в тех водах, движение которых происходит по первично или эпигенетически окисленным горным породам и по тектоническим зонам, секущим горные породы нижнего структурного этажа в пределах предгорий. Эпигенетически окисленными часто оказываются горные породы верхней зоны нижнего структурного этажа, окисление которых произошло в соответствующие длительные периоды континентального режима. Основными рудоформирующими водами (при формировании гидrogenных урановых месторождений) являются именно те, движение которых происходит по первично или эпигенетически окисленным горным породам (если они поступают в геологические структуры с резко восстановительной сероводородной обстановкой).

Породы горных сооружений и локальных не крупных поднятий, как известно, подвергаются разрушению, продукты которого уносятся поверхностными водами в примыкающие к ним водные бассейны или на равнины. В процессе денудации обнажаются не только новые массы одних и тех же горных пород, но и низелегающие горные породы иного минерального или вещественного состава. В соответствии с этим на разных этапах в воды одной и той же области питания переходят различные химические элементы, что обуславливает поступление с подземными водами в рудоформирующие геологические структуры также различных рудообразующих элементов. В свою очередь, эти явления обуславливают многоэтапность рудообразования и зональность оруденения одних и тех же месторождений (наложение на руду одного вещественного сос-

тава других рудообразующих элементов, особенно в крупных трещинах тектонических разломов, секущих плотные горные породы скального типа).

Из областей питания подземные воды устремляются в области транзита, в примыкающие к ним депрессии, и совершают движение в них по горизонтам водопроницаемых горных пород или по тектоническим зонам, в том числе секущим горные породы нижнего структурного этажа. При этом воды омывают и рудоформирующие геологические структуры. В депрессиях воды становятся напорными и термальными, или горячими (до 200 — 300° С и более). При движении вод в этих условиях происходит изменение их минерального и газового состава, а также и общей минерализации в связи с уходом свободного кислорода на окислительные реакции сульфат-ионов в процессе сульфатредукции и поступлением дополнительных количеств элементов, в том числе не мигрирующих в окислительной обстановке (например, железа), кремниевой кислоты (до сотен миллиграмм на литр) и др. Происходит также обмен ионами вод и пород. В водах растворяются газы биохимического происхождения (углеводороды, азот, а при сульфатредукции сероводород) и образующиеся в результате радиоактивного распада (радон, гелий). Изменение химического состава и минерализации вод происходит также за счет трансляционного движения их молекул и ионов, сопровождающегося явлениями бародиффузии, и в связи с гравитационным распределением растворенных ионов в малодинамичных водах геологического разреза платформенных депрессий. При этом общая минерализация вод глубоких горизонтов платформенных тектонических депрессий увеличивается до 250 — 300 г/л (и до 400 — 450 г/л при наличии в геологическом разрезе соленосных толщ, например в Припятской впадине). По составу воды становятся в основном хлоридно-натриевыми или натриево-кальциевыми (магниевыми). При этом главным образом за счет бародиффузии при трансляционном движении ионов и их гравитационной дифференциации в водах глубоких горизонтов накапливаются относительно большие количества тяжелых элементов, в том числе различных металлов. В результате этих процессов формируется прямая гидрохимическая зональность.

В тектонических депрессиях, примыкающих к высоким горным сооружениям, наблюдается двойная гидрохимическая зональность. Обусловлено это тем, что в этих случаях области питания подземных вод неглубоких горизонтов занимают относительно невысокое, а глубоких горизонтов, наоборот, высокое гипсометрическое положение. В соответствии с отмеченным обычно наблюдается значительно повышенная динамичность вод глубоких горизонтов по сравнению с динамичностью вод неглубоких горизонтов. Двойная гидрохимическая зональность характеризуется постепенным повышением минерализации (до 250 г/л) подземных вод неглубоких горизонтов в направлении сверху вниз, а затем уменьшением минерализации вод в глубоких горизонтах (до нескольких граммов на литр воды) также в направлении сверху вниз.

Разгрузка подземных вод происходит в основном на склонах долин, ущелий, овражно-балочной сети в аллювий и пролювий, мощность которых составляет от нескольких метров до 200 м и более, а также по проницаемым тектоническим зонам с переливом в вышележащие горизонты, на дневную поверхность или в водные бассейны, в том числе и в морские. Под морскими водами выявлены горные сооружения, где обнажены водовыводящие горные породы различного возраста (до древнейших

включительно). В пределах морских бассейнов существуют наиболее благоприятные условия для разгрузки подземных вод, так как уровень этих бассейнов гипсометрически ниже дневной поверхности почти всей площади суши и плотность морской воды в 1,13 — 1,2 раза меньше плотности подземных вод с минерализацией около 200 — 300 г/л. По мере погружения горных пород в депрессиях пластовые воды приобретают соответствующую напорность, поэтому они движутся не только в горизонтальном направлении, но и снизу вверх и не только по тектоническим разломам, но и через ненарушенные глинистые породы, имеющие небольшую пластичность. Кроме плотных или весьма пластичных глин практическими водоупорами являются толщи солей (при отсутствии тектонических зон) и толщи эффузивов (при отсутствии трещиноватости), хотя эффузивы в большинстве случаев трещиноватые.

Как известно, многие депрессионные зоны земной коры в дальнейшем превратились в горноскладчатые сооружения с соответствующим изменением гидродинамического и гидрохимического режимов (со сменой минерализованных вод на маломинерализованные с другим газовым составом).

1. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ, ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОРЕННЫХ И ПЕРЕОТЛОЖЕННЫХ РУД ГИДРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выше показано, что почти все подземные воды содержат уран в тех или иных концентрациях. Однако наиболее благоприятны для его водной миграции водоносные горизонты, приуроченные к первично или эпигенетически окисленным горным породам, а также тектонические зоны, секущие такие горные породы. Эпигенетически окисленными являются не только те части водоносных горизонтов, которые примыкают или примыкали к областям питания подземных вод, но и в большинстве случаев верхняя зона горных пород нижнего структурного этажа, которая длительное время находилась в контакте с атмосферой. Эпигенетическому окислению подвергались также многие осадочные и вулканогенно-осадочные комплексы горных пород средних и верхних структурных этажей, накапливавшихся в континентальных условиях.

По первично или эпигенетически окисленным горным породам подземные воды обычно несут повышенные и относительно высокие концентрации урана (от 10^{-6} до 10^{-4} г/л воды).

При повышенных кларках содержания урана в горных породах областей питания подземных вод наблюдается существенная водная миграция урана и по водопроницаемым неокисленным горным породам с практическим отсутствием твердых, жидких и газообразных углеводородов, лигнитов, углестого вещества или ископаемых углей. Следовательно, водоносные горизонты (зоны), представленные такими горными породами и породами, первично или эпигенетически окисленными, могут быть горизонтами (зонами) рудоформирующих вод.

Во всех других случаях подземные воды несут в себе малые концентрации урана (10^{-6} — 10^{-7} г/л воды).

Однако из сказанного не следует, что урановые месторождения могут формироваться лишь в горизонтах или зонах рудоформирующих вод. Известно, что нередко напорные подземные воды (в том числе и рудоформирующие) перетекают по тектоническим разрывным нарушениям в вышезалегающие водоносные горизонты, приуроченные к неокисленным угленосным или газонефтеносным горным породам, в водах которых уран находится лишь в незначительных концентрациях (часто миграция

его в таких породах практически прекращается). Следовательно, месторождения могут формироваться только в перспективных водоносных горизонтах или зонах, о которых будет сказано ниже.

В природе наблюдаются гидрогенные месторождения с рудами коренными, находящимися в рудоформировавшей геологической структуре (без перемещения рудных концентраций), и переотложенными. Последние могут формироваться лишь из коренных руд, разрушающихся под воздействием окислительной обстановки, привносимой подземными водами после эрозионного раскрытия структуры, когда в отдельных случаях происходит частичное переотложение уранового и сульфидного оруденения в направлении движения этих вод. Переотложенные руды могут находиться и нередко находятся в значительном отрыве (от нескольких метров до десятков километров) от коренных руд или их остатков и рудоформировавших геологических структур.

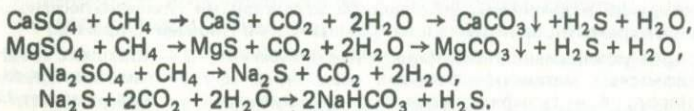
Изложенное ниже будет относиться к коренным месторождениям и условиям их формирования, переформирования и разрушения.

Наличие сульфидов тех или иных металлов в урановых рудах почти всех месторождений, положение месторождений в геологических структурах, где существует или могла существовать ранее сероводородная обстановка, а также результаты специальных лабораторных исследований, проведенных под руководством авторов в 1951 — 1960 гг., свидетельствуют о том, что в природных условиях на участках формирования месторождений промышленного значения основным восстановителем и осадителем урана из подземных вод, как и других металлов, образующих сульфиды, является сероводород (на участках с восстановительной сероводородной геохимической обстановкой).

Образующиеся в восстановительной сероводородной геохимической обстановке сульфиды урана, как и сульфиды некоторых других металлов, например натрия, кальция, магния, в природных условиях неустойчивы. При их распаде быстро образуются окислы урана. Осаждение из раствора сероводородом сульфидов уранила рассмотрено, в частности, в работе [6].

Гидрогенные урановые месторождения формируются в течение сотен тысяч и миллионов лет (см. ниже). В подземных водах образование значительных концентраций сероводорода (до 1500 мг/л и, возможно, более) в течение таких длительных периодов происходит только при взаимодействии сульфат-ионов этих вод (в процессе их движения) с жидкими или газообразными углеводородами достаточно крупных залежей или разобщенных скоплений с участием десульфатирующих бактерий (процесс сульфатредукции).

Процесс сульфатредукции протекает следующим образом:



Из приведенных схем видно, что на первом этапе сульфатредукции образуются сульфиды кальция, магния или натрия, а также свободная углекислота и вода. Однако сульфиды этих металлов в природной обстановке неустойчивы и быстро распадаются, а металлы переходят в углекислые соединения. Сера этих сульфидов образует сероводород, а свободная углекислота связывается в карбонатные соединения. На участках, где протекает процесс сульфатредукции, свободная углекислота в воде не накапливается и нарзаны не образуются.

В связи с рассматриваемыми вопросами представляет большой интерес совместная миграция в подземных водах урана и других металлов с сульфат-ионами (без взаимодействия металлов с серой). Коренные гидrogenные первичные урановые и сульфидные руды образуются лишь вблизи скоплений газа или нефти, т.е. там, где сульфат-ионы и углеводороды образуют сероводород. Следует отметить, что в теории эндогенного гидротермального рудообразования до сих пор по существу не решены вопросы об источнике серы или о совместной миграции металлов и серы.

Сами по себе жидкие, газообразные и твердые битумы, за исключением, может быть, некоторых их разновидностей, растворяющихся в воде, и тем более растительные остатки, углистое вещество и ископаемые угли не восстанавливают металлы и в том числе уран. Об этом можно судить по низким содержаниям урана в нефтях и по наличию очень редких месторождений с сульфидно-урановым оруденением в пределах известных весьма многочисленных и обширных угленосных бассейнов и месторождений. Урано-угольные месторождения промышленного значения находятся лишь в таких геологических структурах, которые являлись (до их эрозионного раскрытия) благоприятными для накопления и длительного удержания образующихся углеводородов. Это структуры, показанные на рис. 1 — 4, а также антиклинали с существующим или существовавшим ранее экраном над угленосными горизонтами и верховья или излучины древних

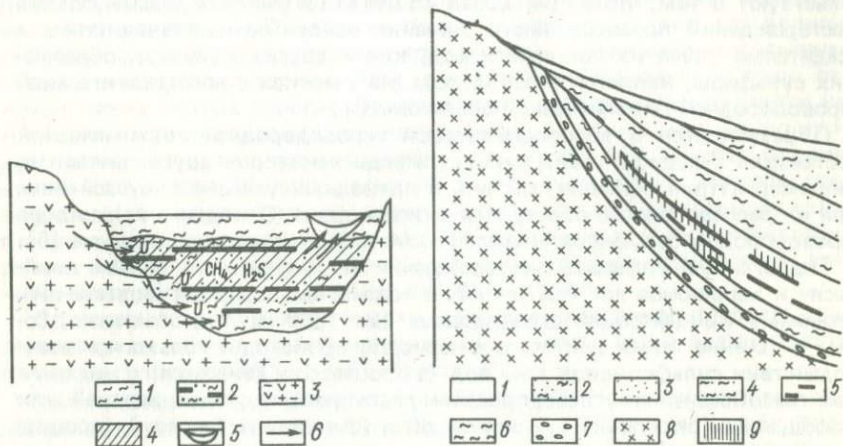


Рис. 1. Схема геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенных урановых месторождений в депрессии, заполненной угленосными глинисто-песчаными отложениями, перекрытыми практически непроницаемыми глинами (экраном):

1 — глины; 2 — угленосные глинисто-песчаные отложения; 3 — комплекс трещиноватых и водоносных метаморфизованных осадочных, эффузивных и интрузивных горных пород; 4 — сульфидно-урановое оруденение; 5 — река и аллювий; 6 — направление движения подземных вод

Рис. 2. Схема геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенных месторождений в угленосных песчаных отложениях, сверху и снизу экранированных практически непроницаемыми отложениями:

1 — насосы; 2 — глинисто-песчаные отложения; 3 — песчаные отложения; 4 — глины, алевролиты; 5 — угленосные песчаные отложения; движение подземных вод происходит в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа; 6 — аргиллиты; 7 — песчаники, гравелиты; 8 — метаморфизованные осадочные и изверженные горные породы; 9 — оруденение

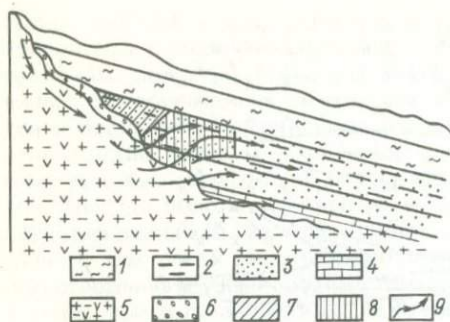


Рис. 3. Схема геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенного уранового месторождения в углистых песках, перекрытых ("запечатанных") непроницаемыми глинами, в пределах моноклинали (скопления углеводородов к настоящему времени могут оказаться разрушенными):

1 — глины; 2 — углистые пески; 3 — пески; 4 — известняки; 5 — комплекс древних метаморфизованных осадочных и изверженных пород; 6 — остатки практически непроницаемой древней коры выветривания; 7 — скопление газообразных углеводородов; 8 — сульфидно-урановое оруденение; 9 — направление движения подземных вод

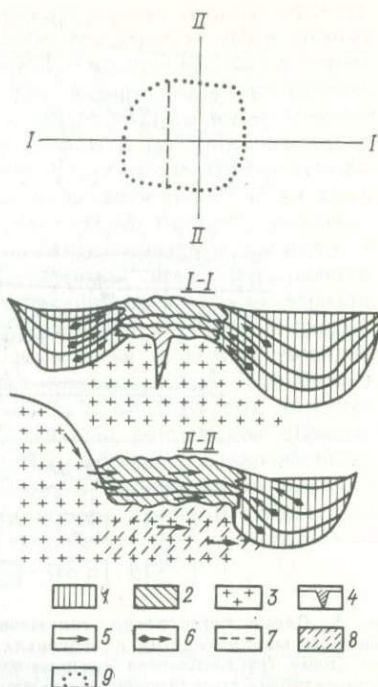


Рис. 4. Схема геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенного урана в породах с углеводородами и углистым веществом:

1 — угленосные глинисто-песчаные отложения, газоносные; 2 — рудносные переслаивающиеся глинисто-песчаные и эффузивные отложения (ранее газоносные, что обусловило развитие резко восстановительной сероводородной обстановки и выпадение металлов из протекавших подземных вод); 3 — граниты; 4 — рудный тектонический разлом; 5 — направление движения ураноносных подземных вод; 6 — направление движения газов, продуцируемых углями; 7 — тектонический разлом в плане; 8 — проекция рудного тектонического разлома на плоскость разреза; 9 — рудное поле

погребенных долин и их отвержков (рис. 5), в которых на более древних горных породах залегают углистые песчаные отложения, перекрытые практически непроницаемыми глинами или мергелями. Во всех этих случаях основным восстановителем и осадителем тяжелых металлов был также сероводород, образующийся при взаимодействии сульфат-ионов подземных вод с углеводородами — продуктом метаморфизма углистого вещества.

Растительные остатки, углистое вещество и ископаемые угли непосредственно не могут обусловить и сульфатредукцию. Объясняется это тем, что сульфатредукция с этими веществами — процесс эндотермический, требующий тепла извне, поэтому в природных экзогенных условиях невозможен, а сульфатредукция с жидкими, вязкими и газообразными углеводородами представляет собой процесс экзотермический, протекающий с выделением тепла [7].

Растительные остатки, углистое вещество и ископаемые угли, как и нефть, в той или иной мере сорбируют уран, однако прочная сорбция

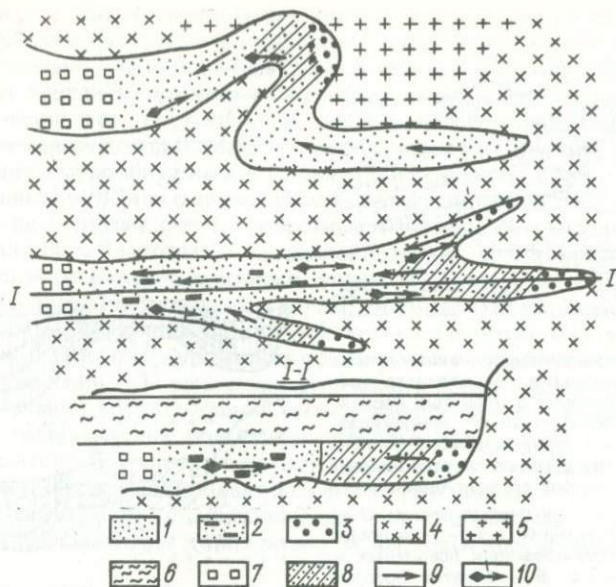


Рис. 5. Схема геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенных урановых месторождений в верховьях, излучинах и отвержках древних погребенных долин (геологическая карта на уровне верхней части рудоносных песчаных и песчано-гравелистых отложений и гидрогеологического разреза):

1 — пески; 2 — углистые пески; 3 — углеводородные газы, продуцируемые бурными углями и углистым веществом (в песках) в процессе их метаморфизма; 4 — комплекс метаморфизованных осадочных и изверженных горных пород; 5 — граниты; 6 — глины; 7 — бурые угли; 8 — сульфидно-урановое оруденение; 9 — направление движения подземных вод; 10 — направление движения углеводородных газов, продуцируемых углистым веществом в процессе метаморфизма растительных остатков

его этими веществами небольшая и не может обусловить формирование месторождений промышленного значения.

Свободный водород встречается в экзогенных условиях земной коры в незначительных концентрациях (в основном в залежах углеводородов и на угольных месторождениях). Растворимость водорода в подземных водах ничтожная (приблизительно в 2,5 тыс. раз меньше растворимости сероводорода), поэтому он не может иметь существенного значения в формировании месторождений урана промышленного значения. К тому же в формировании сульфидной и, возможно, урановой минерализации он вообще не принимает участия.

Газообразные углеводороды, в том числе и растворенные в подземных водах, не только не восстанавливают, но и не сорбируют металлы. Однако некоторые растворяющиеся их разновидности входят в состав таких урановых минералов, как тухолит.

Некоторые исследователи [4] называют в качестве восстановителей урана имеющиеся в горных породах сингенетически-диагенетические сульфиды металлов. В действительности сульфиды непосредственно не оказывают и не могут оказывать какое-либо влияние на уран, находящийся в подземных водах. Однако на окисляющихся сульфидно-урановых месторождениях при окислении сульфидов, как известно, образуется

серная кислота и двухвалентное сернокислородное железо. Серная кислота, продвигаясь с подземными водами, воздействует на другие неокисленные сульфиды, при этом образуется сероводород, который вновь восстанавливает растворимый уран и другие металлы с образованием сульфидов в постепенно передвигающейся зоне цементации. Для переотложения относительно больших масс урана в этом процессе требуется наличие в окисляющемся оруденении относительно больших концентраций сульфидов. Именно поэтому указанные явления наблюдаются только на ранее сформировавшихся месторождениях. И как только процесс окисления охватит все ранее сформировавшееся сульфидно-урановое оруденение, переотложение сульфидно-урановых концентраций резко сокращается, а затем, при дальнейшем продвижении окисления по этому же горизонту, практически полностью прекращается, оруденение разрушается (рис.6). Переотложение оруденения обуславливает также сохранившаяся на отдельных участках восстановительная сероводородная обстановка, возникающая при воздействии сульфат-ионов подземных вод на остатки жидких и вязких битумов или газообразных углеводородов, образующихся при метаморфизме углистого вещества. Сероводородная обстановка, возникающая в таких условиях, нередко внешне почти не проявляется, однако и такие малые концентрации сероводорода бывают достаточны для частичного извлечения урана из подземных вод, получающих от-

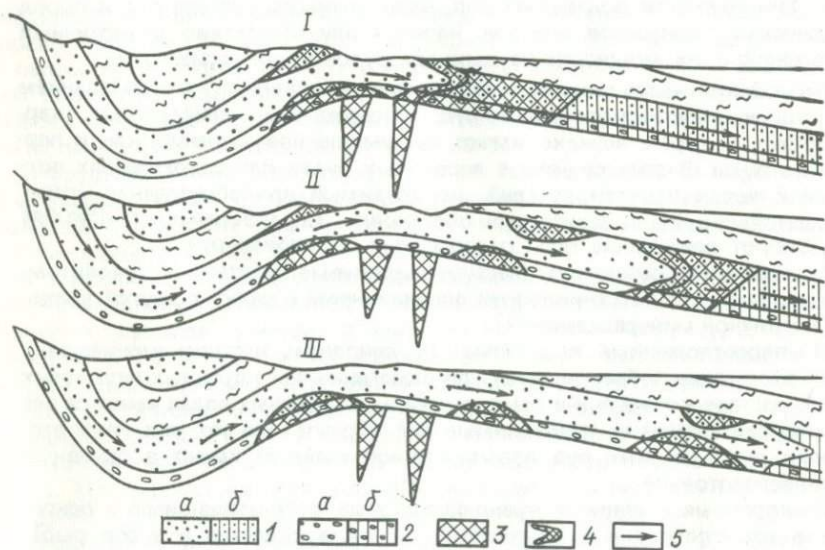


Рис. 6. Схемы рудоносного горизонта (см. рис. 7) на разных стадиях разрушения сульфидно-уранового оруденения с частичным и временным переотложением рудных концентраций:

1 — пески (а — окисленные, на участках положения бывших руд лимонитизированные или гематитизированные; б — неокисленные серые и темно-серые); 2 — базальный конгломерат (а — окисленный, светлый; б — неокисленный); 3 — сульфидно-урановое (сульфидное или урановое) оруденение; 4 — зона цементации окисляющегося сульфидно-уранового или сульфидного оруденения; 5 — направление движения вод

носителем большие его концентрации ($n \cdot 10^4 - n \cdot 10^3$ г/л) при движении по окисляющемуся оруденению.

При отсутствии или недостатке в горных породах органических веществ и сульфидов уран окисляющегося оруденения может переотлагаться лишь частично, в связи с чем оруденение начинает прогрессивно разрушаться с начала продвижения по нему процесса окисления.

Следовательно, развивающиеся зоны окисления по водоносным горизонтам, выходящим на дневную поверхность или под четвертичные отложения, не обуславливают формирования уранового и тем более сульфидного оруденения. В то же время окислительная обстановка, наступающая с подземными водами на ранее сформировавшееся сульфидно-урановое оруденение любого генезиса, обуславливает явления двух видов.

Первый вид — это разрушение оруденения с частичным и временно продолжающимся переотложением рудных концентраций (см. рис. 6). Это явление свойственно месторождениям, в рудах которых и в протекающих по ним водах нет тех или иных химических элементов, необходимых для формирования вторичных руд, например урано-ванадатов. Постепенно убывающие рудные концентрации перемещаются от места коренного залегания руд ранее сформировавшегося месторождения на расстоянии от нескольких метров до нескольких десятков километров. Известны также и практически разрушенные месторождения. Все это зависит от фильтрационных свойств рудоносных горизонтов или зон, степени динамичности подземных вод, вещественного состава руд и пород рудоносных горизонтов или зон, наличия или отсутствия четвертичных отложений и их мощности на выходах рудоносных горизонтов,

Второй вид — это окисление первичных урановых руд с образованием на этих же участках вторичных руд, например урано-ванадатовых (карнотитов), которые нередко имеют промышленное значение, как и первичные руды. В этих случаях в первичных рудах или современных подземных водах имеется ванадий, необходимый для образования урано-ванадатовых руд в окислительной обстановке. Следовательно, в природе существуют следующие типы гидрогенных урановых руд:

1) коренные первичные (настуран-черниевые, местами с тухолитом, возможными уран-органическими соединениями и редко с другой урановой первичной минерализацией);

2) переотложенные первичные (в основном настуран-черниевые);

3) вторичные (образующиеся при окислении тех коренных первичных руд, в составе которых и в омывающих их подземных водах имеются все химические элементы, необходимые для образования тех или иных вторичных руд; из этих руд промышленное значение имеют в основном урано-ванадатовые);

4) коренные первичные урано-фосфорные (образовавшиеся в основном в известняках и в скоплениях остатков скелетов и зубов рыб).

В соответствии с приведенной классификацией руд можно выделить следующие гидрогенные месторождения:

1) месторождения коренных первичных в основном настуран-черниевых или урано-битумных руд;

2) месторождения коренных первичных и вторичных руд;

3) месторождения коренных и переотложенных первичных, в основном черниевых руд;

4) месторождения вторичных руд;

5) месторождения переотложенных первичных руд;

6) месторождения коренных первичных урано-фосфорных руд.

Из приведенных классификаций следует, что перспективными на гидrogenные урановые месторождения следует считать горизонты (зоны) горных пород любого происхождения, которые были или сейчас являются водопроницаемыми, водоносными и газонефтеносными. Однако и такие горизонты и зоны перспективны на коренные урановые месторождения лишь на участках геологических структур тектонического (антиклиналей, купола, горст-антиклиналей, флексуры, некоторые участки моноклиналей) и эрозионно-аккумулятивного (палеодолины, палеодепрессии) происхождения или антиклиналей, образовавшихся над интрузиями (т.е. на участках и в районах структурных ловушек, необходимых для накопления углеводородов и образования сероводорода). В некоторых регионах гидrogenные месторождения формировались в малодисциplinированных отложениях мезокайнозоя над газоносными породами палеозоя, слагающими купола, антиклиналей и горст-антиклиналей с разрывными нарушениями — путями перетока газов в выше залегающие слои.

Переотложенные руды могут быть в таких структурах и за их пределами в направлении движения подземных вод.

Следовательно, одним из необходимых условий формирования коренных гидrogenных урановых месторождений является присутствие газобразных или жидких углеводородов, которые в экзогенных условиях, как известно, образуются из органических веществ при их метаморфизме. В свою очередь большие количества органических веществ, продуцирующих большие количества углеводородов, находились и находятся в горных породах тектонических и эрозионно-аккумулятивных депрессий. В палеодолинах образующиеся углеводороды накапливаются в водоносных горизонтах, содержащих органические вещества и перекрытых практически непроницаемыми породами, в основном в верховьях и излучинах таких палеодолин и их отвержков (см. рис. 5).

В пределах эрозионно-аккумулятивных палеодепрессий и палеозаливов бывших морей оруденение обнаруживается в углистых глинисто-песчаных отложениях под практически непроницаемым экраном, в основном в замковых частях таких структур.

В тектонических депрессиях образующиеся углеводороды накапливаются в водоносных горизонтах в основном в присводовых частях антиклиналей, куполов, флексур и некрupных горстов — структур второго порядка, в головных частях водоносных горизонтов, находящихся в разрезе моноклиналино залегающих горных пород, перекрытых несогласно практически непроницаемыми горными породами, ниже пересекающихся дизъюнктивных нарушений по падению пород в пределах крыльев депрессий и в некоторых других геологоструктурных условиях (табл. 1). В таких же условиях обнаруживаются и гидrogenные месторождения (до значительного последующего перемещения оруденения наступающей окислительной обстановкой). Следовательно, депрессии в целом являются необходимым условием для формирования углеводородов, их скоплений, сероводорода и гидrogenных месторождений. На положительные перспективы ураноносности депрессионных зон указывал, в частности, П.Я. Антропов [1 — 3]. Однако нельзя забывать, что некоторые тектонические депрессии в последующем превратились в горноскладчатые сооружения, где отдельные ранее сформировавшиеся гидrogenные месторождения могли сохраниться до настоящего времени.

Ниже приведены некоторые схемы геологоструктурных и радиогидрогеохимических условий формирования гидrogenных месторождений с урановым или сульфидно-урановым оруденением (рис. 7 и 8).

Геологические структуры известных экзогенных урановых месторождений и крупных рудопроявлений (по состоянию на 1972 г.)

Геологическая структура	Доля месторождений и рудопроявлений, % общего количества	Доля месторождений с органическими веществами в рудоносных горизонтах, % общего количества		
		газообразных, жидких, вязких или твердых битумов	ископаемых углей, углистого вещества, углефицированных растительных остатков или других органических веществ, продуцирующих углеводороды	отсутствие сведений
Антиклинали и купола, находящиеся на крыльях крупных поднятий или тектонических депрессий и в срединных частях таких депрессий, а также в пределах тех горноскладчатых областей, которые ранее являлись тектоническими депрессиями; отдельные части антиклинелей, опущенные пострудной тектоникой; периклинальные окончания ответвлений от крупных поднятий или горных сооружений ("структурные носы"); некрупные горсты; валы, соединяющие крупные поднятия, флексуры. Руды формировались в перечисленных структурах или над ними на отдельных участках напорных водоносных горизонтов малодиспозированного осадочного чехла (в случае длительного перетока газов)	91,0	58,0	14,6	18,0
Участки антиклиналей и куполов с наличием на их крыльях в толще глинистых пород проницаемых (в настоящее время или в прошлом) отложений:	1,5	—	1,5	—
русловых относительно прямых и зигзагообразных потоков (в основном их верховья) грубозернистого материала, отсортированного водными течениями на дне бывшего морского бассейна (в пределах полос различных очертаний)				
Итого в пределах антиклиналей, куполов, некрупных горстов	92,5	58,0	16,1	18,0
Замковые части нешироких синклиналей, зажатых между поднятиями, находящимися на небольшом расстоянии друг от друга, и участки синклиналей со складчатостью второго порядка	1,5	1,5	—	—
Замковые части заливообразных ответвлений от межгорных впадин и другие участки таких впадин с выступами в рельефе горных пород нижнего структурного этажа, перекрытыми (или полностью перекрывавшимися ранее) более молодыми водоносными, а выше практически непроницаемыми породами любого состава и происхождения (непроницаемыми в отдельных случаях являются водоносные рыхлые породы, скованные многолетней мерзлотой)	0,55	—	0,55	—
Некоторые участки крупных моноклиналей с наличием:				
флексур	3,85	0,85	3,0	—
пересекающихся дизъюнктивных нарушений, в плоскости которых в результате тектонического смещения водонепроницаемые породы находятся на одном уровне с водонепроницаемыми породами (оруденение находится ниже нарушений по падению пород)				

Геологическая структура

Доля месторождений и рудопроявлений, % общего количества	Доля месторождений с органическими веществами в рудоносных горизонтах, % общего количества		
	газообразных, жидких, вязких или твердых битумов	ископаемых углей, углестого вещества, углефицированных растительных остатков или других органических веществ, продуцирующих углеводороды	отсутствие сведений

несогласного перекрытия (с угловым несогласием) монотонально залегающих межпластовых водоносных и угленосных горизонтов (в их головах или на их выклинивании) более молодыми отложениями (руды находятся в угленосных горизонтах ниже по падению пород)

выступов в рельефе практически водонепроницаемых пород, перекрытых (перекрывавшихся ранее) более молодыми отложениями (оруденение обнаруживается между выступами и местами над выступами в перекрывающих водоносных отложениях и в отдельных случаях в тектонических зонах, секущих выступы практически непроницаемых горных пород)

замковых частей мелководных небольших заливов бывших морей, заполненных углистыми глинисто-песчаными отложениями, перекрытыми практически непроницаемыми породами

3392

Древние погребенные долины тектонически-эрозионного происхождения (в их верховьях, излучинах, в отвержках и на участках с выступами в рельефе "фундамента" таких долин), где водопроницаемые породы (находящиеся в долинах) сверху перекрыты (как бы запечатаны) водонепроницаемыми, развитыми по всей ширине погребенной долины

1,5

0,5

1,0

—

Итого

100,0

61,0

20,65

18,0

Замкнутая в плане депрессия, в которой на породах фундамента залегают угленосные отложения, продуцирующие углеводороды и несогласно перекрытые (как бы запечатанные) мощными глинами (основное оруденение отмечается в верхней части угленосных отложений, где концентрировались углеводороды и развивалась сероводородная обстановка)

1

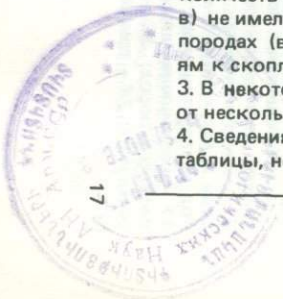
—

1

—

Примечания:

1. В геологических структурах перечисленных разновидностей обнаруживаются рудные залежи (часто весьма сложных конфигураций) в пластах разнообразных водопроницаемых пород или тектонических зонах, перекрытых или перекрывавшихся ранее практически водонепроницаемыми отложениями.
2. Аналогичные геологические структуры не являются рудоносными при следующих условиях:
 - а) сложены лишь проницаемыми или практически непроницаемыми породами;
 - б) не являются и не являлись газоносными или нефтеносными и в их геологическом разрезе нет бурых углей или существенных количеств углистых веществ, которые при метаморфизме продуцируют углеводороды;
 - в) не имели рудоформирующих вод в перспективных горизонтах и нижележащих первично или эпигенетически окисленных горных породах (в том числе нижнего структурного этажа), откуда могли перетекать такие воды по тектоническим разрывным нарушениям к скоплениям углеводородов, находящимся или находившимся в перспективных горизонтах.
3. В некоторых случаях развивающиеся зоны пластового окисления переместили оруденение в той или иной мере на расстоянии от нескольких метров до десятков километров от места его формирования.
4. Сведения по месторождениям и рудопроявлениям, открытым в последние годы, за исключением одного, приведенного в конце таблицы, не изменяют основное ее содержание.



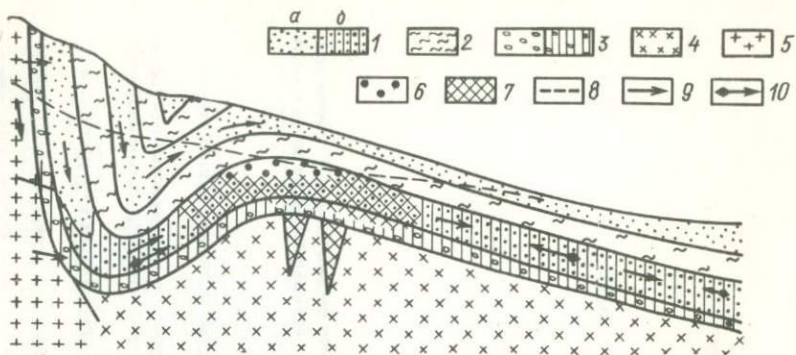


Рис. 7. Схема типичных геологигидрогеохимических условий формирования гидрогенного месторождения с коренным сульфидным и урановым оруденением:

1 — песок (*a* — окисленный; *b* — неокисленный); 2 — серые глины; 3 — базальный конгломерат (*a* — окисленный; *b* — неокисленный); 4 — метаморфизованные осадочные и эффузивные горные породы; 5 — граниты; 6 — залежи углеводородных газов или нефти; 7 — коренное сульфидное и урановое оруденение; 8 — линия, соответствующая поверхности земли (после эрозии горных пород предгорий) в начале разрушения залежи углеводородов и оруденения с частичным временным перетолжением рудных концентраций; 9 — направление движения подземных вод; 10 — направление движения газообразных и жидких углеводородов (газа и нефти)

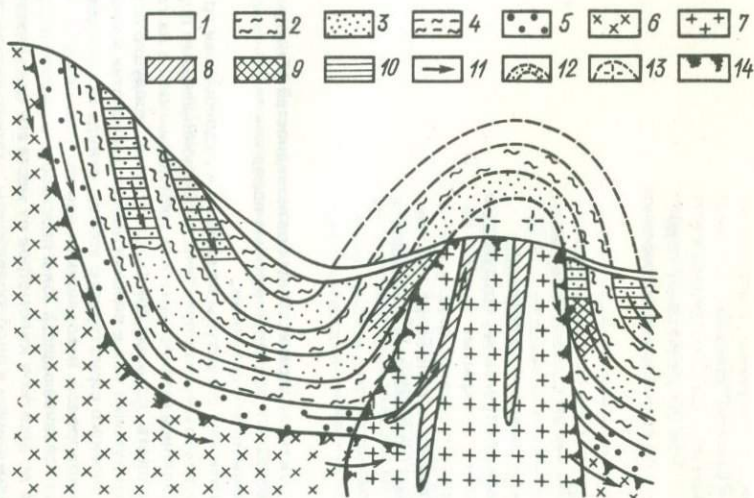


Рис. 8. Схема геологигидрогеохимических условий формирования месторождений (движение вод по тектоническим зонам в гранитах происходит в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка):

1 — наносы; 2 — глины; 3 — песчаники слабосцементированные первичноокисленные красноцветные (горизонт рудоформирующих вод); 4 — аргиллиты; 5 — гравелиты первичноокисленные красноцветные (горизонт рудоформирующих вод); 6 — кристаллические породы с рудоформирующими водами; 7 — граниты; 8 — руда в пластах песчаных пород и тектонических зонах; 9 — то же, перетолженная под воздействием наступающей окислительной обстановки; 10 — окисленная зона; 11 — направление движения подземных вод; 12 — положение размытых газоносных песчаных пород; 13 — положение существовавших ранее гранитов, в последующем размытых; 14 — трещины коры выветривания

На рис. 9 и 10 приведены схемы условий формирования урановых месторождений в горизонтах дислоцированных первично или эпигенетически окисленных и недислоцированных неокисленных песчаных и песчано-гравелистых водоносных горизонтов в пределах антиклиналей и куполов, или над ними при условии перетока в такие горизонты по тектоническим разрывным нарушениям углеводородных газов или нефти из неокисляющих залежей углеводородов (в отдельных случаях и из горных пород нижнего структурного этажа). Ураноносные и сульфатсодержащие подземные воды в этих случаях подтекают к переместившимся газам или нефти непосредственно по рудоносным горизонтам от областей питания вод этих горизонтов.

На рис. 11 приведена схема условий формирования урановых месторождений в газо-нефтеносных горизонтах, представленных всюду водоносными сероцветными глинисто-песчаными отложениями. Месторождения формируются в пределах антиклиналей и куполов с тектоническими разрывными нарушениями и залежами углеводородов при восходящем подтоке к этим залежам по нарушениям ураноносных и сульфатсодержащих подземных вод из горных пород нижнего структурного этажа, окисленных в соответствующую эпоху существования континентального режима. В нарушениях воды поступают из области их питания.

На рис. 12 показаны схемы условий формирования урановых месторождений в газо-нефтеносных горизонтах у залежей углеводородов при подтоке ураноносных и сульфатсодержащих подземных вод от областей

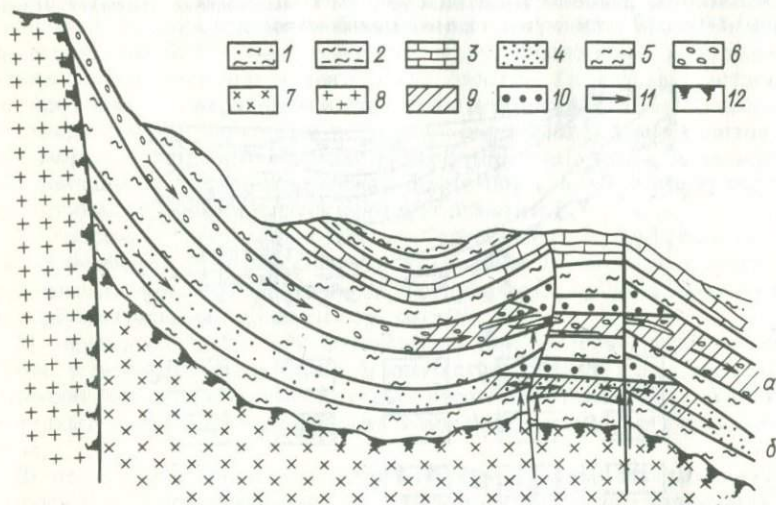


Рис. 9. Схема геологического гидрогеохимического формирования месторождения с сульфидно-урано-битумным (а) и сульфидно-урановым (б) оруденением:

1 — песчано-глинистые отложения; 2 — алевролиты; 3 — известняки; 4 — песчано-гравелистые сероцветные отложения (перспективный горизонт); 5 — глины; 6 — песчано-гравелистые первичноокисленные отложения (горизонт перспективный и с рудоформирующими водами); 7 — древние кристаллические породы (горизонт окисленных пород с рудоформирующими водами); 8 — граниты; 9 — восстановленные отложения с сульфидно-урановым и урано-битумным оруденением; 10 — нефть, твердые битумы; 11 — направление движения подземных вод; 12 — трещины в коре выветривания пород

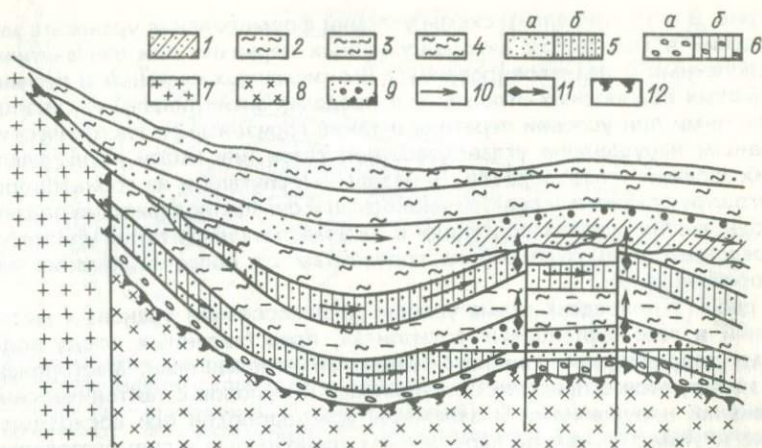


Рис. 10. Схема геологического гидрогеохимических условий формирования уранового месторождения в мало дислоцированных первичноокисленных гравелисто-песчаных отложениях при перетоке в них преимущественно углеводородных газов из ниже-залегающей залежи:

1 — коренное оруденение; 2 — песчано-глинистые отложения; 3 — аргиллиты; 4 — глины; 5 — пески (а — окисленные; б — неокисленные); 6 — конгломераты (а — окисленные; б — неокисленные); 7 — граниты; 8 — древние кристаллические породы; 9 — залежь или скопления преимущественно углеводородных газов; 10 — направление движения подземных вод; 11 — направление движения углеводородных газов; 12 — трещины в коре выветривания пород

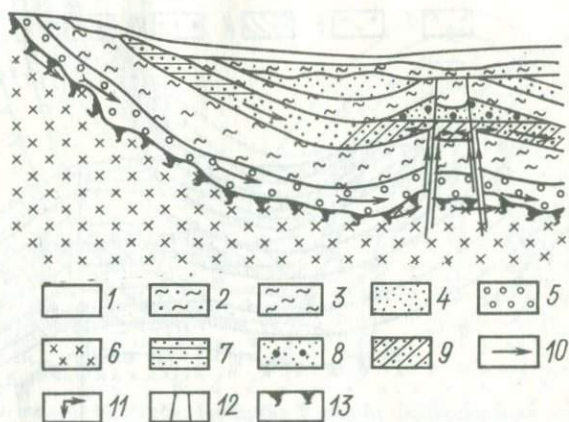
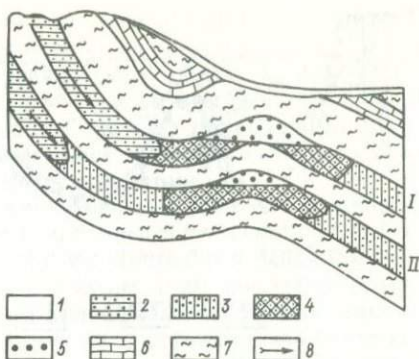


Рис. 11. Схема геологического гидрогеохимических условий формирования месторождений в сероцветных породах (поток вод рудоносного горизонта обходит залежь нефти и поступающие к ней высоконапорные ураноносные воды из нижнего водоносного горизонта):

1 — наносы; 2 — глины песчаные; 3 — глины; 4 — пески сероцветные (перспективный горизонт); 5 — гравеллиты первичноокисленные красноцветные (горизонт с рудоформирующими водами); 6 — древние кристаллические породы (горизонт с рудоформирующими водами); 7 — эпигенетическое окисление пород; 8 — нефть и углеводородные газы; 9 — руды; 10 — направление движения подземных вод; 11 — то же, восходящее по тектоническим разломам (вода с рудообразующими элементами); 12 — тектонические разломы; 13 — трещины коры выветривания

Рис. 12. Схема геологогидрогеохимических условий формирования месторождений у зон пластового окисления (I) и на некотором расстоянии от них (II):

1 — наносы; 2 — пески желтоцветные, эпигенетически окисленные (горизонт перспективный и рудоформирующих вод); 3 — пески сероцветные (горизонт перспективный и рудоформирующих вод); 4 — пески темноцветные с оруденением; 5 — углеводородные газы и нефть; 6 — известняки; 7 — глины; 8 — направление движения пластовых вод



их питания непосредственно по этим же горизонтам (при наличии зоны пластового окисления, примыкающей к залежи углеводородов, — в первом случае и находящейся на существенном расстоянии от газонефтяной залежи — во втором).

На приведенных рисунках и в табл. 1 охарактеризованы и другие условия формирования месторождений с урановой и сульфидной минерализацией. Число сульфидов и их концентрации определяются привнесом металлов подземными водами (т.е. общей геохимией пород региона) и контрастностью сероводородной обстановки. Табл. 1 содержит данные об отечественных и зарубежных экзогенных урановых месторождениях и крупных рудопроявлениях. Приведенные результаты исследования показывают, что 92,5% месторождений и рудопроявлений приурочены к антиклиналям, куполам и не крупным горстам. Остальные месторождения приурочены к верховьям и излучинам древних погребенных долин и к их отвержкам или верховьям погребенных долинообразных заливов бывших морей, к замковым частям нешироких синклиналей, к нешироким синклиналям, находящимся между поднятиями, к некоторым участкам моноклиналей. Среди последних следует отметить:

1) головные части моноклинально залегающих водоносных горизонтов (в особенности угленосных) в комплексе других пород, несогласно перекрытых (как бы запечатанных) практически непроницаемыми более молодыми горными породами (см. рис. 2);

2) неширокие депрессии эрозионного или тектонического происхождения в рельефе горных пород нижнего структурного этажа, заполненные угленосными отложениями, которые несогласно перекрыты (как бы запечатаны) практически непроницаемыми более молодыми горными породами;

3) водоносные горизонты, экранированные по их восстанию глинами в плоскостях пересекающихся тектонических разрывных нарушений сбросового или взбросового характера;

4) участки с выступами в рельефе скальных пород или глин нижнего структурного этажа, перекрытых базальным горизонтом, а выше — практически непроницаемыми породами (рис. 13 и 14).

Во всех перечисленных разновидностях геологических структур на участках месторождений или рудопроявлений имеются газообразные, жидкие, твердые битумы или разбщенные малозаметные их остатки, углистое вещество и бурые угли, при метаморфизме которых образуются газообразные или жидкие углеводороды.

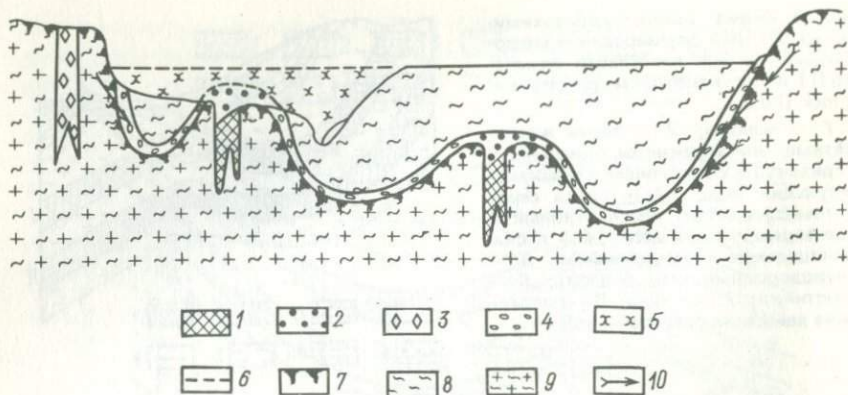


Рис. 13. Схема геологигдрогеохимических условий формирования месторождений в погребенных депрессиях эрозионного происхождения:

1 — руда; 2 — скопление углеводородов; 3 — нерудоносная зона тектонического разлома (не перекрывалась практически непроницаемыми породами); 4 — песчано-гравелистые водоносные отложения (горизонт рудоформирующих вод); 5 — положение глин, существовавших ранее (до размыва); 6 — бывшая поверхность земли; 7 — трещины в древних породах; 8 — глины; 9 — древние горные породы с рудоформирующими водами; 10 — направление движения подземных вод

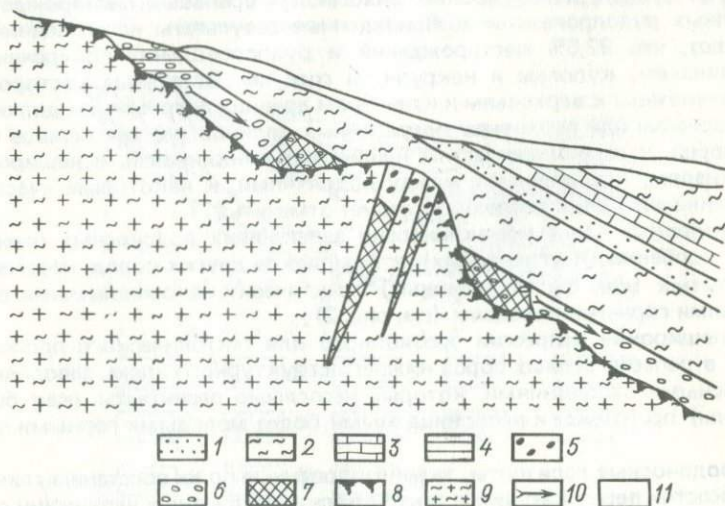


Рис. 14. Схема геологигдрогеохимических условий формирования месторождений на участках выступов в рельефе крепких пород нижнего структурного этажа в пределах моноклинали (движение вод по тектоническим зонам происходит в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка):

1 — пески; 2 — глины; 3 — известняки; 4 — окисленная зона; 5 — углеводородные газы; 6 — песчано-гравелистые отложения, горизонт рудоформирующих вод; 7 — рудные залежи пластового типа и в зонах тектонических разломов; 8 — трещины в древних породах; 9 — древние кристаллические породы с рудоформирующими водами; 10 — направление движения подземных вод; 11 — наносы

В пределах геологических структур тех разновидностей, которые отмечены в табл. 1, оруденение обнаруживается не только в горизонтах водоносных осадочных или осадочно-вулканогенных пород, но и в тектонических зонах, секущих горные породы скального типа различного состава и происхождения, входящих в состав нижнего структурного этажа.

На многих месторождениях рудоносными являются несколько водоносных и газо-нефтеносных (в прошлом) горизонтов.

Физико-химические процессы формирования оруденения в разнообразных водоносных горных породах и тектонических зонах в результате выпадения урана из подземных вод под воздействием в основном сероводорода в принципе однотипны. Однако существуют некоторые особенности формирования урано-битумных, урано-угольных и урано-фосфорных гидрогенных месторождений. Кроме того, формирование месторождений происходит в различных гидродинамических условиях. Это различие заключается в следующем:

1) в одних случаях месторождения формируются при нисходящем и частично восходящем (на крыльях поднятий, выступов) движении холодных и субтермальных ураноносных и сульфатсодержащих подземных вод от областей их питания к скоплениям газов или нефти по водоносным горизонтам или зонам (см. рис. 7 и 8);

2) в других случаях напорные ураноносные и сульфатсодержащие подземные воды, формирующие месторождения, поступали к скоплениям газов или нефти по тектоническим разломам из нижезалегающих горизонтов первично окисленных пород или горных пород нижнего структурного этажа, окисленных в эпохи с континентальным режимом (см. рис. 11).

Металлы, входящие в состав сульфидов, присутствующих в рудах урановых месторождений, переходят в подземные воды так же, как уран, из постепенно обнажающихся эрозией различных горных пород областей питания этих вод (горных сооружений и отдельных поднятий) и по пути их движения по тем или иным горизонтам или тектоническим зонам. При этом одни металлы переходят из горных пород в воды в окислительной обстановке областей их питания и движения по первично и эпигенетически окисленным горным породам, а также по тектоническим зонам, секущим горные породы нижнего структурного этажа, окисленным в соответствующие эпохи с континентальным режимом. Выше отмечалось, что эти воды, являясь напорными, во многих случаях переливаются по тектоническим разрывным нарушениям в различные вышезалегающие водоносные горизонты. Другие металлы, например железо, в окислительной природной обстановке не мигрируют и переходят из горных пород в подземные воды лишь в нейтральной геохимической обстановке в отсутствие в этих водах свободного кислорода и таких эффективных восстановителей металлов, как сероводород.

Нередко у исследователей возникает вопрос о степени реальности формирования урановых месторождений промышленного значения в результате выпадения урана именно из подземных вод при наблюдающихся в них относительно небольших содержаниях этого элемента. Выше отмечено, что все или почти все подземные воды являются в той или иной мере ураноносными и что в рудоформирующих подземных водах содержание урана составляет от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ г/л (в большинстве случаев от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ г/л). В табл. 2 приведены ориентировочные данные о продолжительности формирования уранового оруденения с содержанием урана 0,01% в рудоносном горизонте той или иной мощности и на фронте любой протяженности при условной ширине рудной залежи 10 м.

Продолжительность (лет) гидрогенного формирования оруденения со средним содержанием различной протяженности перпендикулярно ему

Условия	Коэффициент фильтрации пород			
	0,01	0,05	0,1	0,5
Содержание U в воде $1 \cdot 10^{-4}$ г/л, уклон:				
0,001	$5,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$0,55 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$
0,005	$1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,11 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$
0,01	$0,5 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$	$0,55 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$
0,05	$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^3$
Содержание U в воде $5 \cdot 10^{-5}$ г/л, уклон:				
0,001	$1,1 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$
0,005	$0,2 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^4$
0,01	$0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$
0,05	$0,2 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$	$0,4 \cdot 10^3$
Содержание U в воде $1 \cdot 10^{-5}$ г/л, уклон:				
0,001	$5,5 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$
0,005	$1,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^5$
0,01	$0,5 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$
0,05	$0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$
Содержание U в воде $5 \cdot 10^{-6}$ г/л, уклон:				
0,001	$1,1 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$
0,005	$0,2 \cdot 10^7$	$0,4 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^5$
0,01	$0,1 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^5$
0,05	$0,2 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^4$
Содержание U в воде $1 \cdot 10^{-6}$ г/л, уклон:				
0,001	$5,5 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
0,005	$1,1 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$
0,01	$0,5 \cdot 10^7$	$0,1 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$
0,05	$0,1 \cdot 10^7$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^5$

По данным табл. 2, такая рудная залежь могла сформироваться:

1) при неблагоприятных условиях, т.е. при содержании урана в воде $5 \cdot 10^6$ г/л, коэффициенте фильтрации рудоносных пород 0,1 м/сут и уклоне потока подземных вод 0,005, за $2 \cdot 10^5$ лет;

2) при таком же содержании урана в воде ($5 \cdot 10^6$ г/л), но при повышенной динамичности подземных вод, т.е. при коэффициенте фильтрации 5 м/сут и уклоне потока подземных вод 0,01, за $2 \cdot 10^3$ лет;

3) при средних условиях, т.е. при содержании урана в воде около $5 \cdot 10^5$ г/л, коэффициенте фильтрации пород 5 м/сут и уклоне потока подземных вод 0,01, за $0,2 \cdot 10^3$ лет;

жанием урана 0,01%, шириной 10 м в направлении потока вод и

рудноносного горизонта (зоны), м/сут					
1,0	5,0	10,0	20,0	50,0	100,0
$0,5 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10$
$0,1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10$
$0,5 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^2$	$0,25 \cdot 10^2$	$0,1 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10$
$0,1 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^2$	$0,1 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10$	$0,2 \cdot 10$	$0,1 \cdot 10$
$1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
$0,2 \cdot 10^4$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2$	$0,4 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10$
$0,1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10$
$0,2 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^2$	$0,1 \cdot 10^2$	$0,4 \cdot 10$	$0,2 \cdot 10$
$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$
$1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^2$
$0,5 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^3$	$0,25 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^2$
$0,1 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,05 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^2$	$0,1 \cdot 10^2$
$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
$0,2 \cdot 10^5$	$0,4 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$
$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$	$0,25 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$
$0,2 \cdot 10^4$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,05 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^2$	$0,4 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^2$
$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$
$0,5 \cdot 10^5$	$0,1 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^4$	$0,25 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^3$
$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^4$	$0,1 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$

4) при благоприятных условиях, т.е. при содержании урана в воде около $1 \cdot 10^{-4}$ г/л, коэффициенте фильтрации 10 м/сут и уклоне потока 0,01, за 50 лет.

В предгорьях, горноскладчатых областях и межгорных депрессиях тектонических или эрозивно-аккумулятивного происхождения уклон потока подземных вод, а часто и коэффициент фильтрации пород рудоносных горизонтов или зон бывают относительно большими (иногда больше отмеченных максимальных).

Для формирования такой же рудной залежи при ширине ее более 10 м необходим соответственно более длительный срок.

2. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОГЕННЫХ УРАНО-БИТУМНЫХ, УРАН-УГОЛЬНЫХ И УРАНО-ФОСФОРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Урано-битумные месторождения формировались в пределах куполов и антиклиналей в горизонтах первично окисленных красноцветных песчано-гравелистых пород или известняках и доломитах (см. рис. 9). В этих условиях в первично окисленные песчано-гравелистые или в карбонатные породы нефть поступала по тектоническим разломам из нижезалегающих залежей углеводородов. Ураноносные и сульфатсодержащие воды поступали из областей питания к залежам углеводородов, находящимся в пределах куполов и антиклиналей, непосредственно по горизонтам первично окисленных или карбонатных пород, в которые перетекали углеводороды. Во многих случаях нефть поступала постепенно, в течение длительного времени и растекалась по трещинам или наиболее проницаемым зонам. При этом она, взаимодействуя с сульфат-ионами подземных вод, подвергалась анаэробному окислению при сульфатредукции с образованием сероводорода и превращалась в твердые битумы. Под воздействием сероводорода на металлы подземных вод на окисляющиеся битумы накладывалась сульфидная и урановая минерализация. В связи с постепенным перетоком нефти из нижезалегающей залежи в рудоформирующий горизонт масса твердеющих рудоносных битумов также постепенно увеличивалась (до прекращения перетока нефти). В связи с неравномерной проницаемостью пород перетекающие углеводороды распределялись в них неравномерно, что обусловило неравномерность распределения и оруденения. При этом оруденение (настуран, черни, тухолит, уран-органические соединения, сульфиды) наблюдается не только в битумах, но и в небитуминовых породах. Местами битумы нерудоносны. Представляют интерес разновидности таких месторождений. Так, на одном из них сульфидно-урановое оруденение сформировалось в горизонте карбонатных пород вдоль контура нефтяной залежи. Затем, в связи с образованием эрозий оврага вкрест простирания рудоносной антиклинали и вскрытием им нефтеносного горизонта, началась разгрузка напорных приконтурных подземных вод и частично нефти, которые оттекали от месторождения по образовавшемуся оврагу. Разгрузка нефти и напорных приконтурных подземных вод обусловила снижение уровня (напора) последних и перемещение нефти по падению горизонта карбонатных пород на оруденение, сформировавшееся ранее. При этом подземное анаэробное окисление нефти усилилось.

Переток преимущественно углеводородных газов из нижезалегающих газоносных геологических структур нижнего структурного этажа в вышезалегающие горизонты (в том числе и в слабодислоцированные, особенно в первично красноцветные) может обусловить и во многих случаях обуславливал в них сульфатредукцию и формирование сульфидно-уранового оруденения в пределах некоторых тектонических депрессий, где дислоцированы породы палеозоя, но слабо дислоцированы мезокайнозойские отложения (см. рис. 10).

Особенность формирования урано-угольных месторождений заключается в том, что восстановление урана и других металлов и осаждение их на бурые угли, углистое вещество и другие водоносные породы (в большинстве случаев песчаные и песчано-глинистые) происходили под воздействием сероводорода, образовавшегося в результате взаимодействия сульфат-ионов подземных вод с газообразными углеводородами, продуцируемыми углями или рассредоточенным углистым веществом и накап-

ливающимися (длительно сохраняясь) в благоприятных для этого геологических структурах. При этом в тех случаях, когда на участке образования оруденения геологоструктурные условия неблагоприятны или мало благоприятны для формирования и длительного сохранения залежей или существенных скоплений газов, оруденение оказывается малоцентрированным и рассредоточенным. Неблагоприятность геологической структуры может быть обусловлена, например, отсутствием над перспективным горизонтом (углистыми отложениями) практически непроницаемых пород (экрана) непрерывного регионального распространения. Поэтому не случайно, что именно из-за отсутствия такого экрана над углистыми глинисто-песчаными отложениями, заполняющими заливы бывшего морского бассейна, примыкавшие к складчатому сооружению одного из регионов, выявляемые в них рудопроявления представляют собой рассредоточенные сульфидно-урановые концентрации, не имеющие промышленного значения. Эти концентрации обнаруживаются в верховьях (замковых частях) бывших заливов и по крыльям выступов в рельефе их фундамента в основном у значительных скоплений углистого вещества, продуцировавшего газообразные углеводороды, а также около линз глинистых пород, задерживающих углеводороды (в некоторых случаях с проникающими рудными концентрациями и в приповерхностные части линз глинистых пород, не являющихся плотными). В этих случаях на углистых глинисто-песчаных отложениях залегают пески или трещиноватые мергели, которые не могут служить непроницаемым экраном.

В других случаях, в благоприятных геологоструктурных условиях, в глинисто-песчаных угленосных отложениях найдены месторождения с сульфидно-урановым оруденением различных масштабов. Так, в одном из регионов угленосные мульды, обрамленные приподнятыми палеозойскими породами, простираются на десятки километров, а месторождения приурочены только к участкам, где угленосные отложения дополнительно смяты в складки, в геологическом разрезе которых над горизонтами угленосных отложений залегают (или залежали до размыва) толщи практически непроницаемых глинистых пород. Оруденение приурочено к угленосным горизонтам антиклиналей и в отдельных случаях к прогибам между антиклиналями, находящимися на небольших расстояниях одна от другой.

Характерно, что в угленосных горизонтах, представленных песчано-глинистыми отложениями с пластами углей, рудоносны не только угли, но и песчаные породы, а оруденение в углях наблюдается лишь на тех участках, где они подстилаются или перекрываются водоносными песчаными породами, а не глинистыми, и что сами по себе пласты углей, залегающие не в таких условиях, практически нерудоносны, как и типичные пластичные глины. Уран приносился к антиклиналям подземными водами по песчаным отложениям из областей питания этих вод с обрамлений мульд.

На другом месторождении угленосные и рудоносные песчано-глинистые отложения, выклинивающиеся в предгорьях, перекрываются несогласно (с меньшим углом падения) практически непроницаемыми нерудоносными отложениями, которые ранее (до их размыва в предгорьях) полностью перекрывали (экранировали) выклинивающиеся части отложений, являющихся рудоносными. В этих условиях в отложениях, находящихся под экраном, в месте их выклинивания могли накапливаться углеводородные газы, образующиеся при метаморфизме углей, и развиваться сероводородная обстановка, которая и обусловила формирование

оруденения. В частности, углеводородные газы, образующиеся при метаморфизме мощного угольного пласта, в первую очередь мигрировали в верхнюю часть этого пласта и в непосредственно перекрывающие ее водоносные песчаные отложения, поэтому наиболее контрастная сероводородная обстановка и наиболее эффективный процесс рудообразования развивались именно здесь. Уран приносился подземными водами по песчаным породам из области их питания, находящейся в примыкающем горном сооружении. После размыва экраном на выходах угленосных отложений по этим отложениям началось развитие окислительных процессов, которые к настоящему времени в значительной мере разрушили и частично переместили рудные концентрации, находившиеся в песчаных отложениях нижних циклов осадконакопления с небольшим количеством углистого вещества.

Ниже рассмотрены другие природные условия формирования урановых месторождений в угленосных отложениях. Так, известно месторождение в угленосных отложениях, выполняющих депрессию в рельефе пород палеозоя и несогласно перекрытых широко распространенными глинами (см. рис. 1). По наблюдающимся природным условиям можно полагать, что через угленосные отложения протекали и протекают воды, поступающие из палеозойских пород горного обрамления и несущие с собой уран и многие другие химические элементы. В охарактеризованных условиях углеводородные газы, образующиеся на первом этапе метаморфизма бурых углей, взаимодействовали с сульфат-ионами с формированием сероводородной обстановки, которая, в свою очередь, обусловила формирование уранового оруденения. Основное оруденение приурочено к верхней части угленосных отложений. По-видимому, это вызвано обычной миграцией углеводородных газов в направлении снизу вверх и накоплением их в верхней части разреза угленосных отложений.

По мере прекращения выделения углеводородных газов из метаморфизующихся бурых углей подземные воды, подтекающие из пород палеозоя и содержащие свободный кислород и сульфат-ионы, создают вместо восстановительной окислительную обстановку и окисляют рудоносные породы с перемещением рудных концентраций в другие углефицированные глинисто-песчаные породы.

Широко известно оруденение в угленосных, в основном песчаных, отложениях, перекрытых глинами или непроницаемыми мергелями, в верховьях, излучинах и отвержках древних погребенных долин (см. рис. 5).

Известно урановое месторождение, приуроченное к песчано-гравелистым отложениям с углистым веществом, перекрытым практически непроницаемыми породами в связи с положением их в зоне многолетней мерзлоты в пределах заливообразного ответвления от межгорной тектонической депрессии.

Для окончательного определения условий формирования уранового оруденения в угленосных отложениях и роли в этом процессе углей или углистого вещества целесообразно учитывать, что на земном шаре имеется много мелких и крупных угольных месторождений и бассейнов, где обнаружено лишь небольшое число месторождений с урановым или сульфидно-урановым оруденением. Причем эти редкие месторождения локализованы определенными геологоструктурными условиями, в той или иной мере благоприятными для накопления и длительного сохранения углеводородов, поступления к ним подземных вод с повышенным содержанием урана и сульфат-ионов, развития сероводородной обстановки и осаждения из вод металлов. Огромные масштабы привноса подземными водами урана и сульфат-ионов к угольным месторождениям бассейнам

(в связи с огромной протяженностью их границ) и, несмотря на это, весьма редкие случаи обнаружения урано-угольных месторождений свидетельствуют о том, что бурые и каменные угли непосредственно не обуславливают существенную устойчивую сорбцию металлов или восстановление и осаждение их из протекающих подземных вод.

Известны рудопроявления в современных болотах и лигнитах. При рассмотрении таких рудопроявлений не следует забывать, что торф и лигниты также продуцируют углеводородные газы и что через них протекают подземные воды, содержащие уран и сульфат-ионы.

Нельзя не остановиться на урано-фосфорных месторождениях. Известные урано-фосфорные месторождения одни геологи относят к типу осадочных сингенетических, другие — к типу гидротермальных. Основанием для последнего служит явно эпигенетический характер расположения рудных концентраций во вмещающих породах. Известные урано-фосфорные оруденения приурочены к известнякам, в которых рудные концентрации находятся в основном в трещинах, кавернах, стилолитовых и сутуровых швах или в тех частях горных пород, которые в период рудообразования были пористыми. Показательно то, что во всех этих случаях известняки рудоносны только в пределах антиклиналей или отдельных крыльев антиклиналей и что за пределами таких геологических структур известняки тех же стратиграфических горизонтов оруденения не содержат. Характерно наличие в трещинах среди аргиллитов и песчаников, перекрывающих известняки, затвердевшей буровато-черной глинки, рассыпающейся на пластинки, в которой установлено наличие 7 — 10% битумов нефтяного ряда. Такая же глина, но не в затвердевшем состоянии, обнаруживается обычно по трещинам в кровле современных нефтяных залежей. Следовательно, антиклинали, в пределах которых выявлены урано-фосфорные месторождения, могли быть газо-нефтеносными. В настоящее время в присводовых частях этих антиклиналей рудоносные горизонты раскрыты эрозийными процессами, в связи с чем залежи газов и нефти не могли сохраниться до наших дней.

Л.Л.Эймс [19] на основании данных экспериментальных исследований показал, что ураноносный фосфорит образуется при воздействии водного раствора с ураном и PO_4^{3-} на кальцит или известняк. При этом кальций замещается ураном, стронцием и некоторыми другими микрокомпонентами, а вместо CO_3^{2-} поступает PO_4^{3-} . По выводам Альтшулера и др. [19], до вхождения в фосфорит шестивалентный уран раствора должен перейти в четырехвалентную форму. Л.Л.Эймс, ссылаясь на то, что в природных условиях уран мигрирует в шестивалентной форме, высказал недоумение по поводу упомянутого вывода Альтшулера. При этом он отметил, что не исключена возможность замены кальция шестивалентным ураном. Однако, по-видимому, правы Альтшулер и его соавторы. Об этом можно судить хотя бы по тому, что за пределами антиклиналей однотипные карбонатные породы не являются фосфатизированными ураноносными. Можно полагать, что в действительности в пределах газоненосных антиклиналей шестивалентный уран подземных вод, протекавших по известнякам, переходил в четырехвалентный под воздействием сероводорода, возникавшего в результате взаимодействия сульфат-ионов этих же вод с углеводородами, имевшимися в присводовых частях упоминаемых геологических структур. Поскольку фосфатизация известняков произошла в пределах антиклиналей, можно полагать, что и замещение CO_3^{2-} ионами PO_4^{3-} происходило в восстановительной сероводородной обстановке.

Все вышесказанное позволяет полагать, что и урано-фосфорные руды, представляющие собой ураноносные фосфатизированные известняки, могут оказаться гидrogenными, сформировавшимися в тех же условиях, что и другие гидrogenные месторождения, но с некоторыми рассмотренными выше особенностями. По данным радиогидрохимических исследований, в подземных водах районов известных урано-фосфорных месторождений наблюдаются относительно большие концентрации фосфора и урана. Не исключено, что такие месторождения могут формироваться лишь в резко восстановительной сероводородной обстановке и только в районах с наличием в их геологическом разрезе известняков, по которым протекают подземные воды с относительно большими концентрациями фосфора и урана. Для окончательного выяснения генезиса таких месторождений необходимы исследования.

Месторождения с урано-сульфидным оруденением, приуроченные к скоплениям рыбных костных остатков, некоторые исследователи относят к типу осадочных сорбо-биогенных. Следовательно, в этих случаях при рассмотрении условий и процесса формирования оруденения исследователи придают основное значение процессу сорбции. В подтверждение осадочного происхождения этих месторождений приводится то обстоятельство, что рудоносные скопления рыбных костных остатков не водоносные. Однако при обсуждении этого вопроса необходимо учитывать, что в составе рудоносных образований имеются сульфиды с содержанием мельниковита до 35% и более. Кроме того, имеется другая минерализация и значительные концентрации вторичных карбонатов. Отмечается также битуминозность. Эти обстоятельства свидетельствуют о том, что ранее скопления костных остатков имели большую пористость и были водоносны.

Показательно наличие в рудоносных образованиях прослоев глин, которые практически не содержат рудных концентраций. Это может свидетельствовать о том, что образование рудных концентраций, в том числе и сульфидов, происходило уже после того, как илы превратились в горную породу, представленную скоплениями рыбных костных остатков, сконцентрированных морскими течениями, с прослоями плотных глин мощностью от первых миллиметров до 1 м и более. Известно, что глины образуются из илов, пористость которых в стадию сингенеза и раннего диагенеза достигает 90% и более.

Наличие сульфидов в рассматриваемых рудоносных породах указывает на то, что при формировании руд существовала восстановительная сероводородная обстановка. Нет сомнения, что, если бы формирование рудной минерализации происходило в стадию сингенеза и даже раннего диагенеза, рудные концентрации отмечались бы не только в скоплениях рыбных остатков, но и в прослоях глин небольшой мощности (т.е. бывших илах с большой пористостью), через которые происходила бы миграция (диффузия) сероводорода из скоплений костных остатков в воды моря, а металлов из этих вод — в воды скоплений костных остатков. К тому же в водах моря в данном случае и в водах других морей и океанов содержание урана, по-видимому, было ничтожным и, по элементарным расчетам, не могло обусловить формирование месторождения промышленного значения за короткий срок накопления костных остатков и их захоронения под лежащими выше глинами. В исследовании генезиса этих месторождений решающими являются факты приуроченности их к антиклиналям, отсутствия вышекларковых рудных концентраций в рыбных костных остатках в других случаях (не в антиклиналях) и приу-

роченность урановой минерализации в основном лишь к приповерхностной части костей.

Кости живых организмов, как известно, состоят в основном из соединения кальция, фосфора, углерода и кислорода (фосфат и карбонат кальция). Следовательно, и в этих случаях резко восстановительной сероводородной обстановки нельзя исключать возможность привноса урана в карбонат и фосфат кальция в результате того же физико-химического процесса, который определяет ураноносность и фосфатизацию в известняках и который рассмотрел Л.Л.Эймс [19]. Приуроченность месторождений к антиклиналям, наличие на месторождениях остатков углеводов и сульфидов могут свидетельствовать об однотипности условий формирования урановой минерализации в фосфоритах и фосфатизированных рыбных костных остатках. Выходы на дневную поверхность скопленных рыбных костных остатков в котловине значительных размеров эрозионного и, возможно, эрозионно-золотого происхождения на сводовой части рудоносной антиклинали могут свидетельствовать о благоприятных условиях поступления поверхностных вод в эти скопления в прошлом.

С учетом охарактеризованной сущности процесса формирования таких месторождений их можно называть гидрогенно-метасоматическими. Однако вопрос об их генезисе окончательно не решен.

Таким образом, пока невозможно определенно назвать среди экзогенных месторождения осадочного или многостадийного происхождения.

Глава 2

ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ ГИДРОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Для повышения эффективности прогнозных и поисковых работ поисковые критерии целесообразно разделять на следующие группы:

1) обязательные (при отсутствии проявленности на рассматриваемой территории хотя бы одного из них наличие гидрогенных месторождений промышленного значения исключается);

2) уточняющие (которые уточняют обязательные критерии и отражают условия размещения оруденения в пределах перспективных геологических структур и в районе таких структур, с учетом деталей тектонических условий, литологии перспективных горизонтов, переформирования, перемещения и разрушения рудных концентраций под воздействием наступающей окислительной обстановки);

3) критерии — индикаторы оруденения (которые обусловлены существующим оруденением или продуктами его разрушения).

В составе перечисленных групп учитываются геологические, гидрогеологические, геохимические, радиогидрохимические и орогидрографические поисковые критерии. Кроме того, имея в виду сложность размещения оруденения на гидрогенных месторождениях, для выявления руд в пределах перспективных геологических структур необходимо учитывать условия размещения руд в перспективных геологических структурах и около них (с учетом литологического состава и характера проницаемости перспективных горизонтов или зон, наличия и условий распределения в них органических веществ, дорудной и пострудной тектоники и воздействия на оруденение наступающей окислительной обстановки). При этом почти все выделяемые поисковые критерии должны рас-

смагиваться во времени, так как, в частности, тектонические, геохимические и гидродинамические условия могли измениться.

Можно считать, что рекомендуемые поисковые критерии гидрогенных урановых месторождений стабильны и достаточно конкретны.

1. ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ :

Наличие в пределах того или иного района гидрогенных урановых месторождений с коренным залеганием первичных руд или с перемещенными рудными концентрациями (наступающей окислительной обстановкой), имеющих промышленное значение, возможно лишь при сочетании перечисленных ниже природных условий (с учетом возможного последующего изменения их в геологической истории). Эти природные условия следует считать в качестве обязательных поисковых критериев.

1. Депрессионные зоны — тектонические депрессии (современные или бывшие, а в настоящее время находящиеся в пределах горных сооружений) или древние погребенные депрессии эрозионно-аккумулятивного и тектонически-эрозионного происхождения.

2. Локальные геологические структуры тектонического, эрозионно-аккумулятивного происхождения или образовавшиеся в результате магматической деятельности над интрузиями и массивами эффузивов, в пределах которых в водоносных горизонтах могли сформироваться и длительно сохраняться залежи или разобщенные скопления углеводородных газов или нефти.

Разновидности геологических структур, в которых могли сформироваться и известны скопления углеводородов и сульфидно-урановое оруденение, приведены в табл. 1 и на рис. 1 — 14. К настоящему времени ураноносные геологические структуры могли видоизмениться, а залежи углеводородов и рудные залежи не сохраниться, особенно в пределах горных сооружений, которые ранее представляли собой тектонические депрессии с имевшимися разобщенными поднятиями (антиклиналями, куполами).

В некоторых тектонических депрессиях газоносными являются или являлись ранее геологические структуры перечисленных разновидностей, сложенные палеозойскими породами, на которых развит комплекс малодислоцированных отложений мезокайнозоя. В связи с происходившим перетоком газов по разрывным нарушениям из пород палеозоя сульфидно-урановое оруденение сформировалось в некоторых водоносных горизонтах, приуроченных к отложениям мезокайнозоя, над палеозойскими газоносными геологическими структурами или на площадях перетока газов.

Однако в процессе окисления первичных урановых руд, не переходящих во вторичные окисленные руды, в протекающие по ним подземные воды со свободным кислородом переходят относительно большие концентрации урана ($n \cdot 10^5$ — $n \cdot 10^3$ г/л), что обуславливает частичное переотложение рудных концентраций в направлении движения этих вод не только в пределах рудоформирующих геологических структур, но и за их пределы (на расстояния от нескольких метров до десятков километров по мере продвижения окислительной обстановки). При этом частичная разгрузка подземных вод от относительно больших концентраций урана (с осаждением его в поры и трещины пород) происходит даже в малококонтрастной восстановительной сероводородной геохимической обстановке (в перемещающейся зоне цементации и на участках с сохранившимися газообразными, жидкими, вязкими битумами или с углс-

тым веществом, продуцирующим углеводороды, обуславливающие образование сероводорода).

При наличии многочисленных газоносных структур, находящихся на небольших расстояниях одна от другой, в частности, среди геологических структур фундамента, переток углеводородных газов в водоносные горизонты отложений мезокайнозоя, формирование в них восстановительной обстановки и коренного сульфидно-уранового оруденения происходили на широком фронте. В дальнейшем, с постепенным уменьшением перетока газов подземные воды с окислительными свойствами разрушали коренное оруденение и переносили концентрации элементов к перемещающейся границе сероцветных и окисленных пород, где и формировалось переотложенное оруденение с небольшим содержанием металла, но большой протяженности.

В некоторых случаях перемещающиеся рудные концентрации по мере продвижения окислительной обстановки по водоносным горизонтам относительно большой мощности отлагались у отдельных разобщенных прослоев и линз малопроницаемых горных пород (мелкозернистых глинистых песков, алевролитов, песчаных глин) с сохранившимися битумами или углистым веществом, обуславливавшими проявление мало-контрастной сероводородной обстановки.

Такое переотложенное оруденение может находиться на больших расстояниях от рудообразующих геологических структур, в которых нередко сохраняются лишь остатки коренного оруденения. Несмотря на это, поиски месторождений целесообразно начинать с выявления и опознания геологических структур, в которых или над которыми было возможно формирование коренного оруденения, по причинам, указанным ниже.

Отмечалось, что при наличии в коренных первичных рудах или в протекающих по ним подземных водах элементов, необходимых для перехода этих руд при их окислении во вторичные (урано-ванадатовые и др.), переотложение урановой минерализации на заметные расстояния не происходит. В таких случаях коренные первичные и вторичные руды промышленного значения следует искать лишь в пределах рудоформирующих геологических структур. Если не учитывать эту закономерность, можно не обнаружить месторождения, находящиеся среди широко развитых зон пластового окисления.

При отсутствии в пределах рассматриваемой территории геологических структур, в которых могли бы сформироваться месторождения, нельзя ожидать здесь руд как в коренном залегании, так и переотложенных.

Известно, что, пользуясь генетическими представлениями о формировании гидрогенных урановых месторождений у перемещающейся границы между неокисленными водоносными горными породами и зонами пластового окисления [4], выявление месторождений начинают с определения при помощи буровых скважин пространственного положения этой границы по каждому водоносному горизонту. Затем также путем бурения многочисленных скважин прослеживают простирающие этих границ с одновременной фиксацией наличия или отсутствия около них оруденения. Бурение всех скважин в таких случаях сопровождается отбором керна, что необходимо для расчленения горных пород по их цветности на окисленные и неокисленные.

В связи с весьма сложными конфигурациями упомянутой границы по каждому водоносному горизонту, несовпадением положения в плане и

большой общей протяженностью по крыльям всех тектонических депрессий первого, второго и более высоких порядков поисковые работы в соответствии с этими генетическими представлениями требуют бурения (с отбором керна) огромного числа скважин. При этом в некоторых случаях все эти работы или значительная их часть могут оказаться напрасными из-за отсутствия месторождений у границ зон окисления.

При таких поисковых работах могут быть пропущены месторождения:

а) вторичных или вторичных и коренных первичных руд (особенно урано-битумных) в пределах рудоформирующих геологических структур (см. табл. 1), которые могут оказаться среди широко развитых зон пластового окисления, вдали от границ между последними и неокисленными горными породами;

б) многочисленных разобщенных рудных залежей различных масштабов — реликтов бывшего сплошного оруденения, оставшихся далеко от указанных границ в малопроницаемых отложениях у кровли и почвы рудоносных горизонтов (у границ с глинами), а местами и в средних их частях;

в) возможных крупных урано-битумных руд в горизонтах или толщах дорудно окисленных (первично или эпигенетически) песчано-гравелистых или карбонатных пород, находящихся в пределах антиклиналей или куполов (с разрывными нарушениями) значительно выше или ниже по потоку подземных вод от упоминаемых границ и не имеющих (как и не имевших ранее) никакого отношения к этим границам.

Пропуска месторождений можно избежать проведением поисковых работ начиная с выявления и опоскования рудоформирующих геологических структур, типа перечисленных в табл. 1.

Выявив месторождения или места бывшего залегания коренных первичных руд и зная, что при окислении месторождений в одних случаях первичные руды превращаются во вторичные без существенных перемещений рудных концентраций, а в других случаях разрушаются и частично переотлагаются на различные расстояния, можно целенаправленно выявлять и переотложенные руды, находящиеся в сероцветных породах у границ с зонами пластового окисления. Так как переотложение рудных концентраций происходит с подземными водами только в направлении их движения, для выявления переотложенного оруденения единственно правильным является бурение поисковых скважин только вниз по потоку подземных вод от выявленных и опоскованных геологических структур, которые могли оказаться рудоформировавшими, например антиклиналей, куполов, горстов и т.д. (см. табл. 1). При этом отпадает необходимость бурить поисковые скважины с отбором керна для прослеживания простираания упоминаемых границ по всем водоносным горизонтам всюду по простираанию крыльев всех артезианских бассейнов различного порядка. Кроме того, это позволит при поисках избежать пропуска месторождений различных масштабов, о чем было сказано выше.

Таким образом, в качестве одного из основных обязательных поисковых критериев можно назвать характер геологических структур, в которых формировались и формируются гидрогенные месторождения и с ориентацией на которые можно выявлять оруденение не только в коренном залегании, но и переотложенное.

При прогнозе гидрогенных месторождений требуется в первую очередь определить, имеются ли в пределах рассматриваемой территории геологические структуры, в которых могут формироваться такие месторождения.

Обязательным поисковым критерием коренных урановых (в том числе урано-битумных) месторождений в горизонтах окисленных дорудно (первично или эпигенетически) песчаных, песчано-гравелистых, песчано-глинистых пород и в карбонатных породах являются антиклинали, купола или относительно небольшие горсты с наличием разрывных нарушений. При этом требуется, чтобы такие нарушения пересекали горные породы, залегающие ниже горизонтов упомянутых пород и содержащие залежь (залежи) нефти или углеводородных газов, перетекавших ранее по разломам в верхние перспективные горизонты.

3. Перспективные водоносные горизонты или тектонические зоны. В данном случае имеются в виду горизонты или тектонические зоны, представленные водопроницаемыми и водоносными (в настоящее время или в прошлом) горными породами, являющиеся или являвшиеся ранее в пределах соответствующих геологических структур (см. табл. 1) в какой-то мере нефтеносными или газоносными.

Повышенные содержания в водах этих горизонтов урана и сульфат-ионов весьма благоприятны для рудообразования, но не обязательны при наличии в пределах рудообразующих газонефтеносных геологических структур дизъюнктивных нарушений и перетока по ним в перспективные горизонты ураносных и сульфатсодержащих подземных вод из нижезалегающих горизонтов первично или эпигенетически окисленных горных пород.

4. Пласты, толщи, горизонты практически непроницаемых горных пород (экраны). Такие горизонты должны иметь широкое площадное непрерывное распространение в районах геологических структур вышеотмеченного характера над перспективными водоносными горизонтами или зонами, без чего невозможно формирование и длительное сохранение в них залежей или скоплений углеводородов, резко восстановительной сероводородной обстановки и концентрированного уранового оруденения промышленного значения (в особенности кондиционного для отработки горным способом).

Выше отмечено, что в некоторых случаях в процессе переотложения рудных концентраций при наступающей на оруденение окислительной обстановке накопление в основном малоцентрированного оруденения наблюдалось в неконтрастной восстановительной обстановке у разобленных линз и прослоев малопроницаемых горных пород, находящихся в толщах гравелисто-песчаных отложений большой мощности, где нет выдержанных по площади горизонтов практически непроницаемых горных пород (экранов).

В относительно редких случаях в толщах желто-бурых глинисто-песчаных отложений большой мощности с наличием значительно разобленных углефицированных крупных остатков растений (корневищ, стволов и их обломков, продуцировавших газообразные углеводороды) наблюдаются разобленные небольшие ореолы восстановленных сероцветных или почти черных пород с сульфидной и урановой минерализацией.

Однако это случаи в основном малоцентрированного оруденения в коренном или переотложенном залегании. Между тем, как было показано ранее, формирование месторождений с кондиционным содержанием урана происходило в течение длительных периодов в сфере влияния длительно существовавших скоплений газообразных или жидких углеводородов, что было возможно в геологических структурах определенных разновидностей при обязательном наличии над скоплениями углеводородов широко распространенных по площади горизонтов (слоев) прак-

тически непроницаемых пород. К настоящему времени непосредственно на месторождениях они могли не сохраниться. В соответствии с изложенным такие "экраны" рассматриваются в данном случае в качестве обязательного поискового критерия месторождений промышленного значения. В первую очередь это имеет отношение к первичным или вторичным рудам в коренном залегании и переотложенным лишь в пределах рудоформирующих геологических структур. В то же время рациональные поиски руд, переотложенных на большие расстояния от таких структур, возможны также лишь с ориентацией на рудоформирующие геологические структуры с наличием над перспективными горизонтами надежных экранов (в направлении движения подземных вод от таких структур).

5. Горизонты или зоны рудообразующих подземных вод. Говоря о рудообразующих подземных водах, имеют в виду те ураносные (урана $1 \cdot 10^6$ г/л и более) и сульфатсодержащие (сульфат-ионов 10 – 50 мг/л и более) холодные или термальные подземные воды, которые омывали залежи или скопления углеводородов в течение сотен тысяч и миллионов лет и поступали к этим залежам и скоплениям из различных источников:

а) из области питания водоносных горизонтов непосредственно по перспективным водоносным и газонефтеносным горизонтам или по тектоническим зонам (имеются в виду перспективные водоносные горизонты, в которых между областями питания вод и рудоформирующими структурами наблюдается незначительное количество сингенетических органических веществ, продуцирующих углеводороды, или представленные первично или эпигенетически окисленными горными породами, в которые углеводороды перетекали из нижезалегающих залежей нефти или газов);

б) из нижезалегающих водоносных горизонтов, представленных первично или эпигенетически окисленными породами, или из горных пород нижнего структурного этажа, которые оказались окисленными в период существования длительных континентальных условий (в последнем случае имеются в виду не только комплексы горных пород, но и тектонические зоны, секущие эти породы).

6. Горные породы с повышенным кларком урана в областях питания подземных вод. Это обуславливало наличие в рудоформирующих водах его концентраций от $(1 \div 5) \cdot 10^6$ г/л и более.

7. Относительно небольшая эродированность региона в целом и отдельных положительных геологических структур.

При прогнозе и поисках месторождений необходимо учитывать не только условия формирования, но и разрушения месторождений, так как в значительно эродированных регионах (в частности, в некоторых горноскладчатых областях) месторождения могли не сохраниться. Подробно это рассмотрено ниже, в разделе "Основы прогноза месторождений".

2. УТОЧНЯЮЩИЕ ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ

Руды промышленного значения известны в таких горных породах, как пески, алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, известняки, доломиты, бурые угли, лигниты. По трещинам (особенно в тектонических зонах) гидрогенное оруделение встречается также в сланцах, гнейсах и разнообразных изверженных горных породах.

В качестве практически непроницаемых экранов для залежей или скоплений углеводородов и для напорных подземных вод обычно служат разнообразные глины, но могут служить также соленосные или эффузив-

ные образования и практически непроницаемые другие породы, в том числе и рыхлые образования, скованные многолетней мерзлотой.

В случае современной или бывшей газо-нефтеносности нижнего горизонта осадочного чехла рудоносность наблюдается или может наблюдаться (при наличии других необходимых условий) не только в этом горизонте, но и в тектонических зонах, секущих породы скального типа (любого состава и происхождения) нижнего структурного этажа. Эти тектонические зоны на значительных расстояниях от геологической структуры с современными или бывшими скоплениями углеводородов и другие тектонические зоны, не секущие такие геологические структуры, обычно не содержат уранового и сульфидного оруденения (см. рис. 13).

Известно, что газо-нефтеносными являются в основном антиклинали и купола и что образование многих из них обусловили интрузии. Следовательно, гидрогенное оруденение может обнаруживаться и в тектонических зонах, секущих гранитоиды (но также лишь в пределах структуры, удерживавшей накапливающиеся из примыкающих осадочных пород жидкие или газообразные углеводороды, и недалеко от нее).

В пределах крупных поднятий оруденение известно и наиболее вероятно на их окончаниях, на участках наиболее приподнятых пород, но еще не эродированных, на ответвлениях от поднятий ("структурных носах") и на следующих участках:

а) с наличием складчатости более высокого порядка;

б) со значительной выпуклостью (древнего эрозионного происхождения) в рельефе пород нижнего структурного этажа (особенно гранитоидов), перекрытых или перекрывавшихся газоносными или нефтеносными, а выше непроницаемыми породами (в этих условиях могут быть "богатые" руды в тектонических зонах, секущих древние породы скального типа);

в) с наличием в пределах крыльев поднятия пересекающихся дизъюнктивных нарушений, в плоскости которых водопроницаемые породы приводятся к одному уровню с водонепроницаемыми (оруденение известно в породах перспективных горизонтов, находящихся ниже тектонических нарушений по падению этих пород, а в отдельных случаях и в самих тектонических зонах);

г) в верховьях и излучинах погребенных палеодолин и палеозаливов с наличием водоносных углистых отложений, перекрытых водупорными.

Весьма благоприятными поисковыми критериями также являются:

а) наличие в геологическом разрезе оцениваемой территории горизонта (горизонтов) первично окисленных пород (песчаных, песчано-гравелистых), являющихся или являвшихся ранее водоносными и перекрытых глинами или соленосными толщами непрерывного широкого распространения (условия их рудоносности охарактеризованы выше);

б) отсутствие дорудной или одновременной с процессом рудообразования интенсивной тектонической раздробленности экрана, располагающегося над современными или бывшими скоплениями углеводородов и представленного недостаточно пластичными породами (непластичными глинами и некаменной солью);

в) отсутствие в пределах геологических структур дорудных или одновременных с рудообразованием крупноплитудных дизъюнктивных нарушений, выводящих перспективные горизонты на дневную поверхность или на уровень мощных проницаемых горных пород (так как в этих случаях залежи углеводородов могут быстро разрушаться).

Рассмотрим основные особенности размещения руд в перспективных геологических структурах различной разновидности и около них. Материалы разведки урановых месторождений показывают, что рудные концентрации на этих месторождениях распределились вполне закономерно, но неравномерно, в зависимости от литологического состава перспективных горизонтов или зон, проницаемости пород, характера геологической структуры, дорудной и пострудной тектоники, размещения современных или бывших скоплений углеводородов или углистого вещества, от воздействия на оруденение окислительной обстановки. Поисковые работы без учета этих обстоятельств могут закончиться неудачей. Накопившиеся данные по разведке месторождений позволяют судить о закономерностях распределения оруденения в многообразных условиях.

Так, при небольшой мощности горизонтов с скоплениями углеводородов коренное оруденение формируется на флангах этих скоплений. В горизонтах значительной мощности залежи углеводородов во многих случаях занимают или занимали в соответствующих геологических структурах (например, в присводовых частях антиклиналей или куполов) лишь верхнюю часть таких горизонтов. Это залежи так называемого массивного типа. Под такими залежами протекали и протекают подошвенные подземные воды. В этих случаях могло формироваться оруденение не только на периферии залежей углеводородов, но и под ними. Кроме того, в процессе сульфатредукции с образованием сероводорода происходит разрушение углеводородов и размеры их залежей со временем уменьшаются. При этом контакт нефть (газ) — вода гипсометрически повышается. В таких условиях оруденение формируется и в тех частях газонефтеносного и водоносного горизонта, которые ранее были заняты углеводородами. Однако это оруденение может оказаться менее концентрированным по металлу, чем оруденение, формирование которого началось значительно раньше в других частях месторождения.

Как известно, в песчано-глинистых горизонтах залежи и скопления нефти и газов нередко имеют весьма сложное расположение в зависимости от характера проницаемости отдельных литологических разностей. В газонефтеносных горизонтах некоторых антиклиналей в разобленном виде скопления углеводородов обнаруживаются не только в присводовых частях таких геологических структур, но и вдали от их сводов по падению пород.

Проницаемость горных пород определяет и пути движения подземных вод как рудообразующих растворов. Многочисленные натурные наблюдения свидетельствуют о том, что движение вод происходит в основном по наиболее проницаемым частям рыхлых или крепких скальных трещиноватых горных пород. Можно полагать, что в соответствии с этим во время формирования месторождения рудные концентрации накапливаются значительно быстрее в наиболее проницаемых горных породах. И, наоборот, после эрозионного раскрытия рудоносной геологической структуры по наиболее проницаемым частям рудоносных горных пород, особенно по крупным трещинам, наиболее интенсивно продвигается окислительная обстановка, прекращающая процесс формирования месторождения и увеличения общих запасов урана. Окислительная обстановка, наступающая на месторождение, обуславливает значительные изменения в характере и размещении оруденения. Так, выше отмечалось, что в одних случаях она обуславливает переформирование первичных руд во вторичные без заметного перемещения рудных концентраций, а в других — разрушение оруденения с частичным и временным переотложением рудных

концентраций в перемещающихся зонах цементации, в неокисленных рудах и горных породах с сохраняющейся восстановительной обстановкой. При этом рудные концентрации перемещаются (с уменьшающимися запасами металла).

Выше отмечалось, что в пределах антиклиналей и куполов в горизонты первичноокисленных песчаных и песчано-гравелистых отложений нефть или газы часто поступали и поступают по тектоническим разрывным нарушениям из нижезалегающих залежей углеводородов в наиболее проницаемые части принимающих их горизонтов. Следовательно, и в этих случаях оруденение является рассредоточенным.

Известны месторождения, где на крыльях антиклиналей нефть опустилась из сводовых частей этих геологических структур по нефтеносным, рудоносным и водоносным горизонтам карбонатных пород небольшой мощности (9 — 12 м) на сульфидно-урановое оруденение, сформировавшееся по периферии залежей нефти в первоначальном их положении.

В угленосных отложениях оруденение промышленного значения формировалось и формируется лишь в тех геологоструктурных условиях, которые указаны в табл. 1. Однако и в этих случаях оно могло переместиться по песчаным водоносным горизонтам на значительные расстояния под воздействием наступающих окислительных условий. В пластах углей (в основном бурых) оруденение обнаруживается лишь в водопроницаемых их частях, примыкающих к выше- или нижезалегающим водоносным песчаным или карбонатным породам, которые нередко также являются рудоносными (особенно водоносные породы, залегающие на пластах углей, так как именно в эти породы в основном поступали и поступают углеводородные газы, образующиеся в процессе метаморфизма углей).

Охарактеризованные явления необходимо учитывать при прогнозировании и особенно при поисках месторождений.

При проведении поискового бурения в тектонических депрессиях с широким развитием окисленных зон и наличием горизонтов первично окисленных пород и газо-нефтеносных или угленосных геологических структур необходимо учитывать возможное наличие:

1) месторождений вторичных или вторичных и первичных руд в пределах антиклиналей и куполов, находящихся на площадях широкого развития зон пластового окисления;

2) линз настуран-черниевых руд, сохранившихся от разрушавшегося оруденения в малопроницаемых сероцветных глинисто-песчаных отложениях, имеющих в окисленных песчаных рудоносных горизонтах, в основном в их кровле и почве (у контакта с глинами, залегающими выше и ниже этих горизонтов);

3) настуран-черниевое оруденение (в виде роллов или только крыльев роллов, в случаях разрушенных роллов наступающей окислительной обстановкой) у границ зон пластового окисления с неокисленными породами;

4) урано-битумных месторождений в горизонтах первично окисленных пород антиклиналей и куполов с тектоническими разломами, на площадях развития зон пластового окисления и на площадях с отсутствием таких зон;

5) урановых месторождений, находящихся в неокисленных перспективных горизонтах в пределах антиклиналей и куполов недалеко от области питания подземных вод;

6) урановых месторождений в древних погребенных долинах или в палеозаливах бывших морских бассейнов, заполненных песчаными уг-

листыми отложениями, перекрытыми практически непроницаемыми породами и, возможно, находящимися в пределах окраинной полосы тектонической депрессии.

3. ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ – ИНДИКАТОРЫ ОРУДЕНЕНИЯ (ОСНОВНЫЕ РАДИОГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ)

Индикатором бывшего оруденения является повышенная лимонитизация и гематитизация пород с повышенной радиоактивностью в окисленных частях перспективных водоносных горизонтов или тектонических зон.

Это может свидетельствовать о возможном наличии в таких частях перспективных горизонтов – линз сохранившихся (в малопроницаемых частях горизонтов) первичных руд в коренном их залегании, а ниже по потоку вод, у границы зон пластового окисления с неокисленными породами, – настуран-чернивего оруденения, переотложенного в связи с наступающей на руды окислительной обстановкой (если оно не подвергалось полному разрушению).

Благоприятно для рудообразования наличие зон эпигенетического пластового окисления (и без лимонитизации и гематитизации) между областью питания подземных вод и газо-нефтеносными или угленосными рудоформирующими геологическими структурами. Такие зоны благоприятны для привноса урана с подземными водами к рудоформирующим геологическим структурам, однако сами по себе (без газо-нефтеносных или угленосных геологических структур) они не обуславливают формирование месторождений. Следовательно, зона пластового окисления водоносных горизонтов без значительной лимонитизации, гематитизации и повышенной радиоактивности не может рассматриваться в качестве поискового критерия.

При рассмотрении вопроса о наличии или отсутствии зон пластового окисления в водоносных горизонтах артезианских бассейнов или тектонических депрессий необходимо учитывать многократные изменения уровня воды морей и океанов в минувшие периоды геологической истории. Значительные снижения уровня воды морей и океанов были весьма благоприятны для развития зон пластового окисления. К настоящему времени известно, что уровень воды океанов и морей, связанных с океанами, был ниже современного их уровня, например, в плиоцене на 260 м (в связи с расширением объема океанов и морей), а в четвертичный период при оледенении – на 119 м. Оледенения наблюдались также в докембрийское время, в кембрии, ордовике, пермокарбоне и, возможно, в другие периоды. В неогене почти полностью пересыхало Средиземное море (в связи с изоляцией его от океана на месте Гибралтарского пролива). Последующее повышение уровня воды морей и океанов обуславливало подпор подземных вод с соответствующим уменьшением их уклона и скорости движения. При этом породы зон пластового окисления могли вновь восстанавливаться.

Индикатором оруденения, существующего окисляющегося или существовавшего ранее, являются положительные (по урану) радиогидрогеологические аномалии (положительные по отношению к фоновому содержанию урана в подземных водах). Перспективными на оруденение являются аномалии, находящиеся в пределах геологических структур с возможным рудообразованием (см. табл. 1) и на площадях возможного перемещения оруденения при воздействии на него продвигающейся окис-

лительной обстановки в направлении движения подземных вод. Детальную оценку радиогидрогеологических аномалий следует производить по специальным методическим указаниям [8, 12, 15, 16, 18]. Однако необходимо учитывать при этом следующие основные оценочные критерии:

1) все положительные радиогидрогеологические аномалии по урану, находящиеся за пределами геологических структур, которые являются или могли быть газо-нефтеносными, и площадей возможного переотложения оруденения, обусловлены мелкими проявлениями минерализации или породами повышенного кларкового содержания урана, поэтому не представляют поискового интереса;

2) кроме положительных имеются отрицательные урановые радиогидрогеологические аномалии (по отношению к фоновым содержаниям этого элемента в водах однотипных горных пород района), которые нередко обнаруживаются в водах наиболее богатых первичных урановых руд с сохранившейся восстановительной обстановкой в пределах геологических структур тех или иных разновидностей из числа перечисленных в табл. 1. Однако положительно аномальными эти воды могут быть по радону и радону;

3) на окисляющихся и разрушающихся месторождениях с переотлагающимся оруденением положительная радиогидрогеологическая аномалия по урану свойственна водам всех окисленных горных пород, являющихся ранее рудоносными, и может быть выявлена по источникам или буровым скважинам выше по потоку подземных вод сохранившегося оруденения в кровле или почве рудоносного горизонта (в виде разобщенных линз) или у границы выклинивания окислительной зоны (в пласте или в окисляющейся рудоносной тектонической зоне);

4) для выявления оруденения по положительной по урану радиогидрогеологической аномалии прежде всего надо выяснить, окисленными (с лимонитизацией и гематитизацией) или неокисленными являются горные породы, в водах которых проявляется эта аномалия. В случае окисленных лимонитизированных и гематитизированных пород в водоносном горизонте пластового типа или в тектонической зоне основное оруденение надо искать вниз по потоку подземных вод от выявленной аномалии. Однако при этом не следует забывать и то обстоятельство, что в малопроницаемых горных породах (в частности, местами в верхней или нижней части разреза рудоносного горизонта) и на участках с сохранившейся органикой часть оруденения (в виде разобщенных линз) может сохраниться и в противоположном направлении (т.е. не вниз, а вверх по потоку подземных вод). В случае окисления первичных руд только по флангам и наиболее проницаемым зонам или только в верхней части рудоносной тектонической зоны радиогидрогеологические аномалии могут располагаться ниже оруденения по потоку подземных вод. В таких случаях первичные руды будут находиться вверх по потоку подземных вод от выявленных радиогидрогеологических аномалий;

5) на месторождениях с полностью переформировавшимися первичными рудами во вторичные окисленные положение радиогидрогеологических аномалий по урану совпадает с положением самих вторичных руд и прослеживается ниже по потоку подземных вод, особенно в тех случаях, когда здесь водосодержащие нерудоносные породы являются также окисленными. По аномалии, выявленной в условиях последнего случая, вторичные руды надо искать вверх по потоку подземных вод;

6) в нередких случаях напорные подземные воды с аномальным содержанием радиоактивных элементов из перспективных горизонтов переливаются по тектоническим разломам в верхние нерудоносные с ненапорными водами или на дневную поверхность.

Кроме того, радиогидрогеологические аномалии проявляются в водах четвертичных отложений, залегающих непосредственно на коренных рудоносных горных породах.

При оценке таких привнесенных радиогидрогеологических аномалий необходимо учитывать все сказанное о радиогидрогеологических аномалиях, проявляющихся в перспективных горизонтах, а также особенность привнесенных радиевых радиогидрогеологических аномалий, заключающуюся в том, что при большой минерализации переливающихся хлоридно-натриевых или натриево-кальциевых (магниевых) вод, даже весьма контрастно аномальных по радию и нерадиоактивным микрокомпонентам, однозначная оценка таких аномалий невозможна; объясняется это тем, что минерализованные хлоридно-натриевые или хлоридно-натриево-кальциевые (магниевые) воды в большинстве случаев содержат большие концентрации радия вне связи с урановым оруденением.

Радиометрические аномалии являются также индикаторами оруденения или его остатков. Они могут находиться или в рудоносном горизонте на месте оруденения и его остатков, или в четвертичных элювиальных, аллювиальных, пролювиальных отложениях — продуктах разрушения рудоносных горизонтов.

Глава 3

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Прогнозирование месторождений можно проводить с различной детальностью и обоснованностью. Так, можно давать лишь общую оценку перспектив рудоносности отдельных районов по имеющимся материалам. Для этого можно пользоваться только обязательными поисковыми критериями.

Для выделения локальных площадей и геологических структур необходимо пользоваться всеми поисковыми критериями. При этом степень детальности и обоснованности карт прогноза будет определяться степенью изученности тех или иных регионов в геологическом, гидрогеологическом и радиогидрогеохимическом отношении. Особые затруднения могут возникнуть при прогнозировании по малоизученным регионам с широким развитием чехла четвертичных отложений значительной мощности. Часто для таких регионов нет карт пликативных и дизъюнктивных тектонических структур. Поэтому целесообразно сначала составить геологоструктурную карту с использованием соответствующих геофизических исследований.

Для выполнения достаточно полного и обоснованного прогноза месторождений по тому или иному региону требуются следующие карты: рельефных и гидрографических условий; геологическая с отражением пликативных и дизъюнктивных геологических структур, эрозивно-аккумулятивных палеодолин и палеодепрессий и с геологическими разрезами; литолого-фациальных по перспективным и перекрывающим их горизонтам; полезных ископаемых с отражением известных залежей углеводородных газов, нефти, вязких и твердых битумов, ископаемых

углей, сульфидного и уранового оруденения; гидрогеологическая с характеристикой различных водоносных горизонтов и обводненных зон (желательно с данными о гидрогеологических параметрах по отдельным водоносным горизонтам и зонам); радиогидрогеохимические по отдельным водоносным горизонтам и комплексам с отражением геохимической обстановки в различных их частях; рельефа пород нижнего структурного этажа на глубины до 800 м и зон дизъюнктивных нарушений, секущих значительные выступы в рельефе этих пород. Минимально необходимы являются первые три и последняя карты.

В дополнение к картам должны быть пояснительные записки с достаточно детальным рассмотрением перечисленных вопросов. При этом требуется точная и достаточно подробная характеристика литологического состава отдельных горизонтов осадочных отложений и их цветности с выделением горизонтов первичноокисленных пород, зон эпигенетического окисления и горизонтов с наличием органических веществ. Характеристика эффузивных и интрузивных пород может быть в обобщенном виде, но с указанием характера их проницаемости и водоносности.

Детальность и обоснованность прогноза месторождений определяется масштабом и обоснованностью упомянутых карт и детальностью пояснительных записок. Все явления рассматриваются с учетом истории их развития.

1. ПРОЯВЛЕННОСТЬ ПОИСКОВЫХ КРИТЕРИЕВ

При прогнозировании месторождений в первую очередь надо выяснить проявленность обязательных поисковых критериев в пределах отдельных частей рассматриваемой территории. При этом отсутствие проявленности хотя бы одного из этих критериев свидетельствует об отсутствии месторождений промышленного значения.

В некоторых случаях при съемочных или других геологических работах сначала обнаруживаются не коренные, а переотложенные урановые руды, находящиеся вдали от рудоформирующих геологических структур в толщах водопроницаемых горных пород, не перекрытых водоупорными породами (экранами). При этом не следует думать, что такие случаи противоречат предусмотренным в перечне обязательным поисковым критериям. В гл. 2 было показано, что источником всех переотложенных руд являются соответствующие коренные месторождения, формирование которых происходило в условиях, отраженных в комплексе обязательных поисковых критериев. Следовательно, если бы в рассматриваемом районе не было хотя бы одного из обязательных условий (названных обязательными критериями), то не было бы и коренных месторождений, а тем более месторождений переотложенных руд (а также месторождений вторичных и первичных руд).

Отмеченное не относится к некоторым мелким рудопроявлениям, находящимся, в частности, среди некоторых участков болот, где торфа продуцируют метан и некоторые другие углеводородные газы и куда поступали ураноносные подземные воды.

Не относится отмеченное также к известным рудопроявлениям, приуроченным к пролювиально-аллювиальным и элювиальным отложениям долин рек в пределах одного горного сооружения. Здесь в одних случаях рудоносные четвертичные отложения являются продуктом эрозионного разрушения и переотложения оруденения, приуроченного к тектоническим зонам, пересекаемым долинами рек выше по пото-

ку поверхностных вод, а в других случаях оруденение отмечено в элювии рудоносных пород палеозоя, перекрытых аллювием.

Прогнозирование целесообразно начать с выяснения (по имеющимся данным) наличия в пределах рассматриваемой территории существующих и существовавших ранее (на месте современных горноскладчатых областей) тектонических депрессий и палеодепрессий эрозионно-аккумулятивного происхождения, а также степени эродированности горноскладчатых сооружений и положительных геологических структур в существующих тектонических депрессиях. Последнее необходимо для прогнозирования сохранности возможных месторождений. Подробно этот вопрос рассмотрен ниже.

Затем целесообразно выяснить наличие в тектонических депрессиях и в пределах современных горноскладчатых областей локальных геологических структур тектонического, эрозионно-аккумулятивного происхождения и образовавшихся антиклиналей (куполов) в результате магматической деятельности (см. табл. 1), в которых имеются или могли быть скопления углеводородов. При этом следует учитывать особенности урано-угольных месторождений и их геологоструктурных позиций, что охарактеризовано в гл. 1.

Выше отмечалось, что в некоторых тектонических депрессиях газоносными являются или были ранее антиклинали и купола, сложенные палеозойскими породами, из которых газ перетекал по разрывным нарушениям в водоносные горизонты залегающих выше слабодислоцированных мезокайнозойских отложений. В этих водоносных горизонтах на площадях перетока углеводородных газов развивалась восстановительная сероводородная обстановка, которая обусловила формирование коренного оруденения. Однако в дальнейшем, в связи с затуханием процесса перетока углеводородных газов, в водоносных горизонтах широкое развитие получила окислительная обстановка, обусловившая разрушение коренного оруденения и широкий разнос подземными водами рудных концентраций, которые переотлагаются и в настоящее время по мере перемещения границ между зонами пластового окисления и неокисленными горными породами мезокайнозоя. При прогнозировании месторождений на эти явления необходимо обратить особое внимание. В частности, необходимо учитывать, что оруденение могло сохраниться и в пределах площадей окисленных зон на участках малопроницаемых частей водоносных горизонтов (особенно в их верхних и нижних частях) или на участках существенного скопления органических веществ (битумов, углисто-гущества).

Выявив геологические структуры отмеченных разновидностей, целесообразно с возможной детальностью рассмотреть их морфологию, наличие перспективных водоносных горизонтов и тектонических зон, наличие над ними надежных и широко распространенных экранов, литологический состав перспективных горизонтов, химический и газовый состав вод этих горизонтов в районе рассматриваемых структур, имеющиеся сведения о бурении в их пределах и о результатах радиометрического и радиогидрогеологического опробования различных водоносных горизонтов (в том числе вод четвертичных отложений). Целесообразно также оценить возможность длительного существования скоплений углеводородов с учетом имеющейся дизъюнктивной тектоники и литологии экранов перспективных горизонтов.

При рассмотрении геологических структур необходимо учитывать историю их формирования и возможного переформирования. Известны

Гидрогенные месторождения, где урановое оруденение, сформировавшееся на крыльях нефтеносных антиклиналей, в настоящее время находится в опущенных частях этих антиклиналей, называемых исследователями синклиналями.

В районах с геологическими структурами, которые являются или могли быть в какой-то мере нефтеносными или газоносными, необходимо определить все перспективные горизонты на урановое оруденение.

При определении перспективных горизонтов необходимо учитывать, что некоторые горные породы, в настоящее время практически непроницаемые, ранее были хорошо проницаемыми и водоносными. В частности, так называемые углеродистые и углистые кремнисто-глинистые сланцы в некоторых регионах в настоящее время практически безводны, однако ранее они представляли собой комплекс переслаивающихся глинистых и водоносных песчаных отложений, в дальнейшем подвергавшихся окремнению. Первичное сульфидно-урановое оруденение или вторичное карнотитовое оруденение обнаруживаются в таких сланцах обычно на участках складчатости второго порядка. В некоторых случаях комплекс отложений, являвшийся ранее водоносным, оказался сдвигнутым и практически безводным в связи с развитием глубоковрезанной эрозионной сети (глубоких ущелий, долин, оврагов и саев).

Перспективными следует считать также тектонические зоны, секущие скальные и полускальные горные породы любого состава и происхождения и перекрывающиеся или перекрывавшиеся ранее практически непроницаемыми горными породами. Однако следует иметь в виду, что тектонические зоны перспективны лишь в пределах геологических структур (см. табл. 1), являющихся или являвшихся ранее в какой-то мере газонфтеносными, и около таких структур (при наличии других необходимых условий).

К числу неперспективных следует отнести все водоносные горизонты и зоны, которые не являлись газонфтеносными (в том числе и в геологических структурах, отмеченных в табл. 1) или газонфтеносность которых была незначительной, а также все водоносные угленосные или с наличием углистого вещества горизонты, если они не перекрыты непосредственно широко и непрерывно распространенными по площади горизонтами (толщами) практически непроницаемых или скованных многолетней мерзлотой горных пород того или иного происхождения (экранами); в таких горизонтах в пределах геологических структур типа перечисленных в табл. 1, но без отмеченных необходимых условий могут быть лишь рудопроявления, не имеющие промышленного значения.

Особое внимание должно быть уделено выяснению наличия или отсутствия горизонтов и тектонических зон рудоформирующих подземных вод.

Выше отмечалось, что рудоформирующими являются холодные или термальные подземные воды, омывающие залежи и рассредоточенные скопления углеводородов или переливающиеся к ним из нижних горизонтов и несущие в себе одновременно повышенные концентрации урана и сульфат-ионов [не менее $(1 \div 5) \cdot 10^{-6}$ г/л и десятков миллиграмм на литр соответственно]. В соответствии с этим рудоформирующими могут быть воды, находящиеся в следующих условиях:

1) воды перспективных горизонтов, представленных первичноокисленными водопроницаемыми породами;

2) воды перспективных горизонтов, представленных неокисленными водопроницаемыми породами при наличии в них между областями пита-

ния этих вод и рудоформирующими геологическими структурами незначительных концентраций органических веществ;

3) воды перспективных горизонтов при небольших расстояниях от рудоформирующих геологических структур до областей питания этих вод;

4) воды перспективных горизонтов, представленных эпигенетически окисленными породами между областями питания этих вод и рудоформирующими геологическими структурами;

5) воды первично или эпигенетически окисленных горизонтов или комплексов пород, залегающих ниже перспективного горизонта, переливающиеся по дизъюнктивным нарушениям в последний к залежам или разобленным скоплениям углеводородов;

6) воды окисленных в соответствующие периоды с континентальным режимом горных пород нижнего структурного этажа, переливающиеся в перспективные горизонты к скоплениям углеводородов по разрывным нарушениям.

В настоящее время большую актуальность приобретает выявление глубокозалегающих урановых месторождений. Такие месторождения можно прогнозировать. Однако в нередких случаях для уверенного прогноза имеющихся геологических данных недостаточно. Этот пробел в значительной мере могут восполнять данные по радиогидрогеологии.

Кроме того, для достаточно обоснованного прогнозирования месторождений необходимы сведения о радиоактивности подземных вод и геохимической обстановке в различных частях всех перспективных горизонтов и нижезалегающих горизонтов и комплексов первично или эпигенетически окисленных пород, из которых могут поступать в перспективные горизонты по разрывным нарушениям ураноносные и сульфатсодержащие рудоформирующие воды. Эти сведения могут быть получены лишь в процессе предварительного проведения радиогидрогеохимических исследований. При этом следует учитывать, что любая поисковая скважина без соответствующего радиогидрогеологического опробования позволяет получить данные о наличии или отсутствии ураноносности лишь непосредственно в ее пристволовой части. В то же время соответствующее радиогидрогеологическое опробование вод перспективных горизонтов по любой поисковой скважине обуславливает получение сведений о наличии или отсутствии ураноносности этих горизонтов в пределах значительной площади. Следовательно, радиогидрогеологическое опробование поисковых скважин по перспективным водоносным горизонтам и тектоническим зонам может резко повысить эффективность проведения поискового бурения. Однако в последние годы в большинстве случаев не осуществляется соответствующее качественное радиогидрогеологическое опробование поисковых скважин. Объясняется это, по-видимому, тем, что для соответствующего качественного радиогидрогеологического опробования поисковых скважин старыми методами требуется изоляция опробуемых водоносных горизонтов от других подземных вод и предварительная прокачка скважин. Между тем в последние годы во Всесоюзном институте гидрогеологии и инженерной геологии разработан специальный комплект оборудования для опережающего опробования водоносных горизонтов при бурении скважин без их обсадки, без удаления из них глинистого раствора и без проведения работ по разглинизации водовмещающих песков и фильтра [5]. Такой комплект выпускается Геологическим управлением центральных районов.

При оценке радоновых водных аномалий, чтобы избежать ошибочных выводов, необходимо учитывать обстоятельство, заключающееся в том, что в радоновых водах трещин тектонических разломов, секущих горные породы скального типа в пределах горноскладчатых областей с расчлененным рельефом или отдельных возвышенностей, где такие воды находятся на значительных глубинах, концентрация радона изменяется в зависимости от изменений температуры воздуха. Резкое увеличение (в несколько раз) содержания радона (тяжелого газа) над водой и в воде трещин тектонических разломов наблюдается в теплые периоды года, при длительно удерживающихся значительных положительных температурах воздуха, а резкое снижение его концентраций над водой и в воде — при длительных относительно устойчивых отрицательных температурах воздуха. Такие явления бывают обусловлены процессом термодиффузионного разделения смеси газов в определенных условиях. Для природных условий (в трещинах тектонических разломов и субвертикальных карстовых каналах горноскладчатых областей) явления 10 — 15-кратного изменения содержания CO_2 в нарзанх впервые были установлены А.А.Смирновым [11] при изучении углекислых подземных вод. В дальнейшем аналогичные явления были отмечены М.А.Шуршалиной при длительных наблюдениях за радоновыми водами, приуроченными к тектоническим разломам горноскладчатой области [17].

При прогнозе и поисках месторождений необходимо учитывать фактическое соотношение радиогидрогеологических аномалий, представляющих поисковый интерес, и первичных (вторичных) руд или концентраций урана, сорбированных лимонитом и гематитом в окисленных зонах рудоносных горизонтов и тектонических зон после разрушения и частичного переротложения оруденения. (Об этом подробно сказано выше, при рассмотрении поисковых критериев месторождений).

Вопрос о степени эродированности региона в целом и отдельных геологических структур представляет большой интерес при прогнозировании месторождений в связи с тем, что в нередких случаях оруденение в значительной мере или полностью может оказаться разрушенным. Опыт поисковых работ показывает, что в областях, являвшихся ранее тектоническими депрессиями со складчатостью второго порядка, затем превратившихся в горные сооружения и в значительной мере разрушенных последующей эрозией и другими процессами, урановые месторождения, за редкими исключениями, отсутствуют (по-видимому, в связи с их разрушенностью). Однако и в этих условиях, особенно в мало- или средне-разрушенных частях горноскладчатых сооружений, могло сохраниться оруденение промышленного значения в горизонтах горных пород, водопроницаемых в настоящее время или в прошлом и входящих в геологический разрез крыльев антиклиналей, сохранившихся или пострудно превратившихся в синклинали и грабены. В последних случаях рудоносные горизонты могут не выходить на поверхность земли, и составить представление о наличии руд в таких условиях можно лишь при рассмотрении истории развития геологических и радиогидрогеохимических условий изучаемой площади.

В отдельных случаях в значительной степени разрушенные горные сооружения вновь опускались частично или полностью и впадины заполнялись морской водой или поверхностными водоотоками с отложением водонепроницаемых и практически водонепроницаемых осадков. Эти осадки перекрывали более древние геологические структуры с неровным рельефом, в том числе тектонические зоны, секущие значительные выс-

тупы в рельефе дна морских бассейнов. В дальнейшем некоторые из таких территорий вновь поднимались и при этом в отдельных случаях позднейшие морские осадки могли оказаться смятыми в складки.

В охарактеризованных условиях могли формироваться новые гидрогенные урановые месторождения: в верховьях и излучинах палеодолин и их отвержков, в замковых частях заливов бывших морей, в пределах локальных поднятий (особенно в их переклиналильных окончаниях и крыльях), по крыльям значительных выступов в рельефе фундамента, в тектонических зонах, секущих плотные породы значительных выступов в рельефе фундамента.

Однако в тех существенно денудированных горных сооружениях, где не наблюдались охарактеризованные выше явления, древние месторождения могли не сохраниться, а для формирования новых не было необходимых условий.

Отдельные рудоносные поднятия в современных тектонических депрессиях также могут быть широко и глубоко эродированы. После эрозийного раскрытия рудоносных горизонтов обычно по ним начинается продвижение окислительной обстановки. Выше отмечалось, что при окислении коренных первичных руд в одних случаях они переформировываются во вторичные руды (без территориального перемещения), а в других — разрушаются с частичным временным переотложением рудных концентраций. В первом случае эрозия может полностью или почти полностью разрушать оруденение, а во втором случае это может произойти тогда, когда скорость разрушения горных пород и рудоносных горизонтов превышает скорость продвижения по ним окислительной обстановки и перемещения рудных концентраций.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБНОСТИ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

При прогнозировании месторождений и оценке перспектив отдельных геологических структур, представляющих поисковый интерес, неизбежно возникает вопрос о масштабах возможного оруденения в оцениваемой структуре.

Решение этих вопросов зависит от имеющихся геологических, гидрогеологических и радиогидрогеохимических данных (и их точности) по району перспективной структуры и по самой структуре, а также от сведений по газо-нефтеносности, угленосности перспективных горизонтов и по истории развития геологических и радиогидрогеохимических условий района.

Прежде всего надо определить с максимальной точностью характер перспективной геологической структуры и ее размеры. Затем следует определить имеющиеся в пределах перспективной геологической структуры перспективные горизонты и тектонические зоны, секущие горные породы нижнего структурного этажа, и их ориентировку по отношению к направлению движения подземных вод. При этом требуется определить характер пород перспективных горизонтов или зон, их распространение и мощность, отсутствие или наличие (с примерной количественной оценкой) органических веществ (углеводородов, ископаемых углей, углестога вещества, растительных остатков). Особо учитываются перспективные горизонты первичноокисленных или эпигенетически окисленных пород.

В соответствии с имеющимися данными следует определить, могли ли подземные воды перспективных горизонтов приносить к перспектив-

ной геологической структуре достаточные концентрации урана и сульфат-ионов [не менее соответственно $(1 \div 5) \cdot 10^6$ г/л и нескольких десятков миллиграммов на литр]. При этом следует учитывать, что воды первично или эпигенетически окисленных пород переносят достаточные для рудообразования концентрации урана почти во всех случаях. При отсутствии таких горизонтов надо попытаться выявить другие горизонты или тектонические зоны (в частности, секущие горные породы нижнего структурного этажа) с напорными рудоформирующими водами, которые переливаются в перспективные горизонты по тектоническим разрывным нарушениям. В палеодолины и палеодепрессии, заполненные углистыми отложениями, рудоформирующие воды обычно подтекают на границах таких геологических структур из пород, являющихся их основанием и примыкающих к ним.

При наличии условий, необходимых для рудообразования в рассматриваемой структуре, оцениваются масштабы возможного оруденения. Выбор методики такой оценки зависит от конкретных условий поступления ураноносных вод в рудоформирующую структуру.

Когда перспективный горизонт одновременно является горизонтом рудоформирующих вод, приближенно определяется длина участка существующих или бывших залежей (скоплений) углеводородов в плоскости, перпендикулярной направлению движения подземных вод по перспективной геологической структуре. При этом, имея в виду, что резковосстановительная сероводородная обстановка обычно развивается не только на переднем фронте залежей или скоплений углеводородов (по отношению к подтекающим водам), но и вокруг них, рассчитанную длину упомянутого фронта необходимо увеличить на 500 — 1000 м (по 250 — 500 м на правом и левом флангах упомянутой плоскости). На основании этих данных и сведений о мощности перспективного горизонта определяется площадь сечения участка, через который привносился с водой уран к участку существующей или существовавшей ранее восстановительной сероводородной обстановки. В данном случае имеются в виду также скопления газообразных углеводородов или непрерывно образующихся их потоков, продуцируемых углистым веществом и сохраняющихся под экранами в благоприятных для этого структурных условиях.

Затем рассчитывается количество урана, привнесенного к участку сероводородной обстановки за весь период ее существования (или скопления углеводородов). Для упрощения при расчете привноса урана целесообразно использовать значение единичного расхода потока подземных вод перспективного горизонта (отнесенного к 1 м^2 сечения упомянутой плоскости водоносного горизонта). Для определения общего количества урана, привнесенного по перспективному горизонту к участку рудообразования, достаточно количество урана, привнесенного единичным расходом потока вод, умножить на размер всей упоминаемой плоскости (см. табл. 2).

Как известно, расход потока подземных вод определяется по формуле Дарси: $Q = FKl$, где F — площадь сечения потока вод, в данном случае составляющая 1 м^2 ; K — коэффициент фильтрации пород (по воде), м/сут; l — уклон потока вод (безразмерная величина). При этом коэффициент фильтрации следует принимать с ориентировочным учетом его начального значения, примерно в два раза превышающего современные значения. При определении уклона потока подземных вод необходимо учитывать начальное гипсометрическое положение соответствующих водо-

Посных горизонтов в областях питания подземных вод (в горноскладчатых областях или присводовых частях отдельных поднятий до современного эрозионного разрушения пород). Значения современных уклонов потока вод и коэффициентов фильтрации пород получают при гидрогеологических исследованиях или принимают по аналогии с изученными для других участков.

Кроме того, при определении размера уклона и расхода потока подземных вод в минувшие геологические периоды, необходимо учитывать отмеченные при рассмотрении критериев индикаторов многократные значительные (до 260 м и, возможно, более) понижения уровня воды морей и океанов, что соответственно отражалось на этих величинах. Значительное снижение уровня воды могло обусловить относительно большое увеличение уклона и скорости потоков подземных вод и соответственное увеличение скорости накопления рудных концентраций в рудоформирующих геологических структурах.

Продолжительность периодов формирования оруденения, имеющего среднее содержание металла 0,01%, любую протяженность этого оруденения в направлении, перпендикулярном направлению движения подземных вод (в соответствии с шириной скоплений углеводородов и области развития сероводородных вод), при ширине оруденения 10 м по направлению движения вод приведена в табл. 2. Эти периоды рассчитаны для различных природных условий по содержанию в водах урана, уклону потока вод и коэффициенту фильтрации пород. По данным этой таблицы можно ориентировочно оценивать масштабы прогнозируемого оруденения и запасы в нем урана по каждому перспективному горизонту и по предполагаемому месторождению в целом.

Если рудоформирующие воды поступают в перспективный горизонт к залежи или скоплениям углеводородов по тектоническим разрывным нарушениям из нижезалегающих водоносных горизонтов или тектонических зон, секущих горные породы нижнего структурного этажа, принимают другой метод расчета. В этом случае протяженность тектонического нарушения (или нарушений) в пределах рудоформирующей геологической структуры или участка сероводородных вод надо рассматривать как протяженность водозабора, а разность напоров вод рудоформирующих и вод перспективного водоносного горизонта — как величину понижения уровня воды при ее откачке по водозаборным скважинам или при самоизливе воды по ним. При этом надо учитывать граничные условия горизонтов или тектонических зон с рудоформирующими водами. В расчет принимаются гидрогеологические параметры горизонта или зоны переливающихся рудоформирующих вод и содержание в них урана.

Приближенный расчет можно провести также методом "большого колодца" для напорных вод. При этом сначала определяют количество перетекающей воды в перспективный горизонт [в м³/сут, м³/год и м³ за период существования тектонического разлома (разломов)], а затем и количество привнесенного урана, исходя из содержания его в перетекающей рудоформирующей воде.

Формула дебита "большого колодца" для напорных вод

$$Q = \frac{2,73 KMS}{\lg R + \lg r}, \text{ где } K - \text{коэффициент фильтрации горизонта рудоформирующих вод, м/сут; } M - \text{мощность того же горизонта, м; } S - \text{снижение уровня воды при ее переливе в перспективный горизонт, м (раз-$$

ность напоров вод рудоформирующих и вод перспективного горизонта); R — радиус сферы влияния перетока воды, м; r — приведенный радиус зоны тектонического разрывного нарушения (или нарушений) в пределах площади распространения наблюдающегося (или наблюдавшегося) сероводородного заражения на рассматриваемом участке перспективного горизонта, м.

Эти расчеты проводятся также по всем перспективным горизонтам в отдельности, результаты расчетов суммируются.

Следует иметь в виду, что результаты рекомендуемых расчетов в большинстве случаев будут в какой-то мере условными в связи с отсутствием результатов специальных гидрогеологических исследований по определению гидрогеологических параметров.

С учетом сказанного для большей надежности расчет целесообразно проводить по наименьшим, средним и максимальным исходным данным. И если даже по наименьшим исходным данным прогнозируемое месторождение будет представляться достаточно крупным, то, следовательно, оно может иметь промышленное значение. И, наоборот: если расчет даже по наиболее благоприятным исходным данным покажет, что предполагаемое оруденение не может иметь промышленного значения, осуществлять поисковое и тем более разведочное бурение в пределах оцениваемой геологической структуры нецелесообразно.

Промышленное значение месторождения необходимо оценивать с учетом отработки его не только горным способом, но и методом подземного выщелачивания.

Кроме того, при решении этих вопросов необходимо учитывать возможное окисление руд месторождения с соответствующим их переформированием во вторичные окисленные или разрушением с частичным и временным переотложением рудных концентраций. Необходимо учитывать также степень разрушенности месторождений эрозией.

3. ОЦЕНКА ПРОГНОЗИРУЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО УСЛОВИЯМ ИХ ОСВОЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

При составлении карт прогноза месторождений целесообразно давать по имеющимся материалам предварительную приблизительную оценку гидрогеологических условий отработки предполагаемых оруденений открытым и подземным горным способом или методом подземного выщелачивания. При этом необходимо учитывать следующее: возможна ли связь вод рудоносных горизонтов или зон с значительными и крупными поверхностными водотоками и водоемами; не находятся ли в геологическом разрезе над (и под) рудоносными горизонтами и зонами мощные и высоконапорные водоносные горизонты, к тому же связанные с поверхностными водотоками и водоемами; какова степень обводненности самих рудоносных горизонтов и зон и каков напор этих вод, устойчивость обводненных рудоносных и вышезалегающих пород (особенно в тектонических зонах); не потребуются ли сложные и дорогостоящие мероприятия по предварительному водопонижению; какова возможная эффективность водопонижения; каковы возможность и целесообразность отработки предполагаемого месторождения методом подземного выщелачивания; существуют ли источники водоснабжения. Перечисленные сведения необходимы, чтобы сделать вывод о целесообразности детальных поисковых, а затем и разведочных работ в пределах оцениваемой геологической структуры и определить принципы выполнения этих работ

применительно к намечаемому рациональному способу отработки возможного месторождения.

Учитываются также другие сложные моменты освоения предполагаемого месторождения: положение участка в сильно расчлененном районе горного сооружения, вдали от путей сообщения; положение участка за крупными реками; высокие абсолютные отметки поверхности участка; крутые подходы к участку; трудности организации водоснабжения при отработке месторождения.

Результаты прогнозирования месторождений по имеющимся данным отражаются на соответствующих картах с выделением площадей, не представляющих интереса для поисков, площадей, степень изученности которых не позволяет прогнозировать их ураноносность, площадей возможного прогнозирования ураноносности с той или иной обоснованностью.

В пределах последних площадей выделяются геологические структуры:

- 1) с известным оруденением промышленного значения;
- 2) с известным, но не изученным оруденением;
- 3) с разведанными рудопроявлениями;
- 4) с возможным оруденением промышленного значения;
- 5) с возможным оруденением промышленного значения, разработка которого по горнотехническим и гидрогеологическим условиям целесообразна лишь методом подземного выщелачивания;
- 6) с возможным наличием малоконцентрированных и разобщенных рудопроявлений, разработка которых целесообразна лишь методом подземного выщелачивания;
- 7) геологические структуры с возможным оруденением промышленного значения, разработка которого любым способом существенно затрудняется (по горнотехническим, гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям или по другим условиям его освоения);
- 8) с возможным оруденением неопределенных масштабов и концентраций, а также радиогидрогеологические аномалии, представляющие поисковый интерес (по возможной их связи с оруденением в том или ином водоносном горизонте или тектонической зоне);
- 9) радиометрические аномалии, связанные с породами того или иного горизонта или тектонической зоны.

Перспективы ураноносности необходимо оценивать по данным о всех отмечаемых выше явлениях.

К прогнозной карте необходимо прилагать соответствующую пояснительную записку, где рассматриваются все вопросы, имеющие отношение к оценке перспектив ураноносности картируемой площади, и приводятся рекомендации по дальнейшим исследованиям с целью выявления или более детального изучения выявленного оруденения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропов П.Я. Перспективы поисков промышленных месторождений урана в депрессионных зонах земной коры. — Геол. журн., т. 29, 1969, с. 75 — 82.
2. Антропов П.Я. О некоторых геологических концепциях в связи с топливно-энергетическим потенциалом Земли. — Геол. журн., 1975, № 3, с. 139 — 143.
3. Антропов П.Я., Евсеева Л.С., Полуаршинов Г.П. Месторождения урана в осадочных породах депрессий. — Сов. геол., 1977, № 9, с. 32 — 36.
4. Батулин С.Г., Головин Е.А., Зеленова О.И., Каширцева М.Ф., Комарова Г.В., Кондратьева И.А., Лисицин А.К., Перельман А.И., Сидельникова В.Д., Черников А.А., Шмариович Е.М. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования. М., Атомиздат, 1965.
5. Башкатов Д.Н., Тесля А.Г. Гидрогеологические наблюдения при бурении и опробовании скважин на воду. М., Недра, 1970.
6. Казаков В.М. Аналитическая химия урана и тория. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
7. Козлов А.Л. Проблемы геохимии природных газов. М., Гостоптехиздат, 1950.
8. Куцель Е.Н. Временные методические указания по проведению радиогидрогеологических исследований при массовых поисках месторождений урана. Ротапринт ВСЕГИНГЕО, 1966.
9. Смирнов А.А. Роль подземных вод в режиме залежей нефти и газов. — Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии, 1956, № 14, с. 36 — 53.
10. Смирнов А.А. К вопросу о роли подземных вод в формировании, сохранении и разрушении залежей газов преимущественно углеводородного, гелиево-азотного и углекислого состава. — Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии, 1956, № 14, с. 78 — 91.
11. Смирнов А.А. О формировании углекислых подземных вод. — Советская геология, 1955, № 44, с. 87 — 99.
12. Смирнов А.А., Щербаков А.В. Методические указания по интерпретации и проверке радиогидрогеологических аномалий с целью поисков урановых месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1957.
13. Смирнов А.А. Условия формирования экзогенных инфильтрационных рудных месторождений и элементы тождества их с гидротермальными месторождениями. Международный геохимический конгресс 1971 г. Тезисы докладов. Т. 2. М., ВИНТИ, 1971, с. 893, 894.
14. Смирнов А.А. Условия формирования, переформирования, разрушения и поисковые критерии экзогенных инфильтрационных месторождений с сульфидно-урановой минерализацией. Под ред. Н.В. Губкина. М., Недра, 1973.
15. Токарев А.Н., Щербаков А.В. Радиогидрогеология. М., Госгеолтехиздат, 1956.
16. Токарев А.Н., Куцель Е.Н., Попова Т.П. Радиогидрогеологический метод поисков месторождений урана. М., Недра, 1975.
17. Шуршалина М.А. О роли термодиффузии в процессе преобразования радоновых вод. — Сов. геология, 1961, № 12, с. 128 — 131.
18. Щербаков А.В. Геохимия термальных вод. М., Наука, 1968.
19. Эймс Л.Л. Катионные замещения в процессе образования фосфорита из кальцита. — Эконом. геология, 1960, т. 55, № 2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1.	Основные сведения о гидрогенных урановых месторождениях . . .	3
	1. Условия формирования, переформирования и разрушения коренных и переотложенных руд гидрогенных месторож- дений	6
	2. Особенности формирования гидрогенных урано-битумных, урано-угольных и урано-фосфорных месторождений	26
Глава 2.	Поисковые критерии гидрогенных урановых месторождений . . .	31
	1. Обязательные поисковые критерии	32
	2. Уточняющие поисковые критерии	36
	3. Поисковые критерии — индикаторы оруденения (основные радиогеохимические поисковые критерии)	40
Глава 3.	Методические указания по прогнозированию месторождений	42
	1. Проявленность поисковых критериев	43
	2. Определение масштабности прогнозируемых месторождений .	48
	3. Оценка прогнозируемых месторождений по условиям их освоения и эксплуатации	51
	Список литературы	53

ИБ № 1003

**Николай Васильевич Губкин
Александр Александрович Смирнов**

**ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА
ГИДРОГЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Редактор *Г.М.Пчелинцева*
Художественный редактор *А.Т.Кирьянов*
Обложка художника *М.В.Носова*
Технический редактор *О.С.Быкова*
Корректор *С.А.Леонова*
Оператор *О.В.Канатникова*

Набрано в Атомиздате на композере ИБМ 82

Подписано к печати 29.11.80Т-07798 Формат 60 x 90 1/16
Бумага офс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,5 Уч.-изд. л. 4,37
Тираж 1000 экз. Зак. изд. 78011. Зак. тип. 4965. Цена 65 к.

Атомиздат, 103031 Москва К-31, ул. Жданова, 5

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома
Государственного комитета СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли
109033 Москва, Волочаевская ул., 40

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Предлагаем Вашему вниманию книгу

ШУКОЛЮКОВ Ю.А., ЛЕВСКИЙ Л.К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М., Атомиздат, 1972, 336 с., 2 р. 04 к.

Книга представляет собой первую обобщенную работу по геохимии и космохимии изотопов благородных газов. В ней рассмотрены ядерные реакции, приводящие к образованию изотопов благородных газов в литосфере, изотопные аномалии в различных средах, миграция изотопных газов в литосфере, гидросфере и атмосфере. Изложены представления об истории изотопов благородных газов при эволюции литосферы, гидросферы и атмосферы Земли. Освещено современное состояние проблемы космохимии изотопов благородных газов: рассмотрены их космогенные, радиогенные и первичные изотопы, содержащиеся в веществе метеоритов и Луны. Показаны возможности использования изотопов благородных газов в решении ряда вопросов космологии.

Книга предназначена для научных работников — геохимиков, радиохимиков, геологов, физиков, а также преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей, интересующихся возможностями применения стабильных изотопов в геохимических и космохимических исследованиях.

Заказы на книгу просим направлять по адресу:
103031 Москва К-31, ул. Жданова, 5, Атомиздат

3392

2

