

УДК 550.461

К. Ф. ОРФАНИДИ

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ПЛАСТОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Развитие учения о природных водах все шире и полнее раскрывает огромную роль их в геологических и геохимических процессах, протекающих в земной коре и ее поверхности. Геохимическая деятельность подземных вод обусловлена постоянным противоречием (несоответствием) между химизмом вод и вещественным составом вмещающих пород и связанными с ними физико-химическими и термодинамическими условиями. Суть этого явления есть ничто иное, как проявление диалектических противоречий в геологических процессах. Под действием подземных вод в одних условиях происходит разрушение ранее созданных, а в других—образование новых месторождений.

Динамичность подземных вод, их свойство находиться в постоянном движении и тем самым нарушать создающиеся равновесия в физико-химических системах воды—порода является первопричиной нестабильности системы (вода—порода). Следовательно, различные преобразования химического состава подземных вод в земной коре возникают благодаря перемещению их из одной обстановки, находящейся под влиянием одной группы факторов, например, атмосферных или экзогенных, в другую, где влияние первых затухает, а других—эндогенных—возрастает и наоборот.

Геохимическая деятельность подземных вод и связанная с ней миграция химических элементов в земной коре происходит в огромных масштабах. Возникновение на путях движения воды резких несоответствий (противоречий) между их химизмом и составом вмещающих пород, т. е. различных геохимических «барьеров», обусловленных разнообразными факторами, приводит к фиксации из воды химических элементов и их соединений.

В частности, в условиях артезианских бассейнов и особенно их крайних частей, где проницаемые породы находятся под постоянным воздействием все новых и новых порций континентальных вод, насыщенных реакционно способным кислородом и ионами различных рудных элементов, создается обстановка для резких изменений состава пород и подземных вод, что благоприятствует концентрации некоторых рудных элементов, подвижных в окислительных условиях.

Так, например, уран—типичный литофильный элемент, в зависимости от геохимической обстановки, резко меняет миграционные свойства. В окислительных условиях он, находясь в шестивалентной форме, образует хорошо растворимые в воде соединения, а в восстановительных

—он восстанавливается до четырехвалентного состояния и образует соединения, практически нерастворимые в воде. Резкое различие свойств шести- и четырехвалентного урана является основной причиной фиксации (выпадения) его из растворов при резком снижении окислительно-восстановительного потенциала (Eh)—на так называемом геохимическом (восстановительном) «барьере». Следовательно, подземные воды в определенных физико-химических условиях могут служить источником, доставляющим рудный материал для формирования промышленных скоплений урана.

Месторождения, образовавшиеся в результате геохимической деятельности подземных вод континентального происхождения, получили название инфильтрационных или эпигенетических по отношению к вмещающим породам.

В результате многочисленных исследований, выполненных советскими учеными [1, 2, 3, 4, 5], об условиях, благоприятствующих локализации уранового оруденения, установились определенные представления. Эти представления сложились на основании изучения объектов, образовавшихся в недавнем прошлом или продолжающих свое формирование в настоящее время. Значительно сложнее прогнозирование месторождений, связанных с древней инфильтрацией. При этом необходимо исходить из положения, что внедрение континентальных вод в толщу проницаемых пород и образование эпигенетических (инфильтрационных) концентраций являются неотъемлемой частью геологического развития земной коры и результатом различных геохимических процессов, протекающих в земной коре в течение всей ее истории.

Исходя из этого и руководствуясь общеизвестным принципом актуализма, есть основание полагать, что в минувшие этапы геологической истории Земли могли существовать условия, благоприятные для образования инфильтрационных месторождений. Следовательно, на основании всестороннего анализа истории геологического развития конкретной территории можно вести направленные поиски концентрации различных металлов, образовавшихся в процессе древней инфильтрации. Для решения этой задачи требуется реконструкция палеогеографических, геологических, литолого-фациальных, палеогидрогеологических, палеоландшафтно-геохимических и других условий.

Оценивая процессы инфильтрации, в частности, для целей прогнозирования урановых месторождений, хотелось бы еще раз подчеркнуть роль некоторых факторов, имеющих важное значение как для проявления процессов инфильтрации, так и локализации уранового оруденения.

Основные из них следующие.

Х а р а к т е р о с а д к о в. Для инфильтрационного накопления минеральных образований (оруденения) благоприятными являются породы молассовых и других грубозернистых формаций. Эти осадки обладают хорошими коллекторскими свойствами и в условиях суши служат областями активной инфильтрации континентальных вод и различных соединений химических элементов [8].

Вещественный состав пород. В локализации оруденения важную роль играет вещественный состав водопроницаемых толщ—наличие в них достаточного количества легко окисляющихся минералов—сульфидов и других активных восстановителей, а также органического вещества. Неблагоприятными являются породы, сложенные относительно инертными в химическом отношении минералами. Влияние вещественного состава пород на формирование эпигенетических концентраций урана подробно освещено в работе М. Ф. Каширцевой [4].

Климатические условия. Значительный интерес представляет вопрос о миграции свободного (от пород) урана и условиях его локализации. В период активного химического выветривания, происходящего при значительных радиационных коэффициентах, высокой степени аридного климата и слабой увлажненности суши, поверхностный сток развит слабо, а стало быть свободного урана в морские бассейны будет поступать мало. Основная масса его будет задерживаться на суше.

Тектонический режим. Платформы, как стабильные, медленно поднимающиеся и опускающиеся структуры, или, иначе говоря, платформенный режим суши является более благоприятным для развития процессов химического выветривания материнских пород, что является необходимым условием для формирования повышенных содержаний урана в водах инфильтрации.

Геосинклинальные же области, которым свойственны резкие (активные) поднятия суши и опускания депрессий, характеризуются интенсивным механическим разрушением пород и накоплением грубообломочных осадков. В этих условиях образуется небольшая масса свободного урана и поэтому в водах инфильтрации не могут образоваться повышенные его концентрации.

Гидродинамический режим. Строгая количественная оценка этого фактора связана с большими трудностями. Сложность учета гидродинамического фактора (под которым следует понимать совокупность явлений, связанных с изменением напоров вод, их скорости и направления движения), обуславливается тем, что этот параметр довольно сильно изменяется во времени и пространстве, а на основе анализа региональных гидрогеологических, гидрохимических и других данных можно получить лишь некоторое представление об этих условиях.

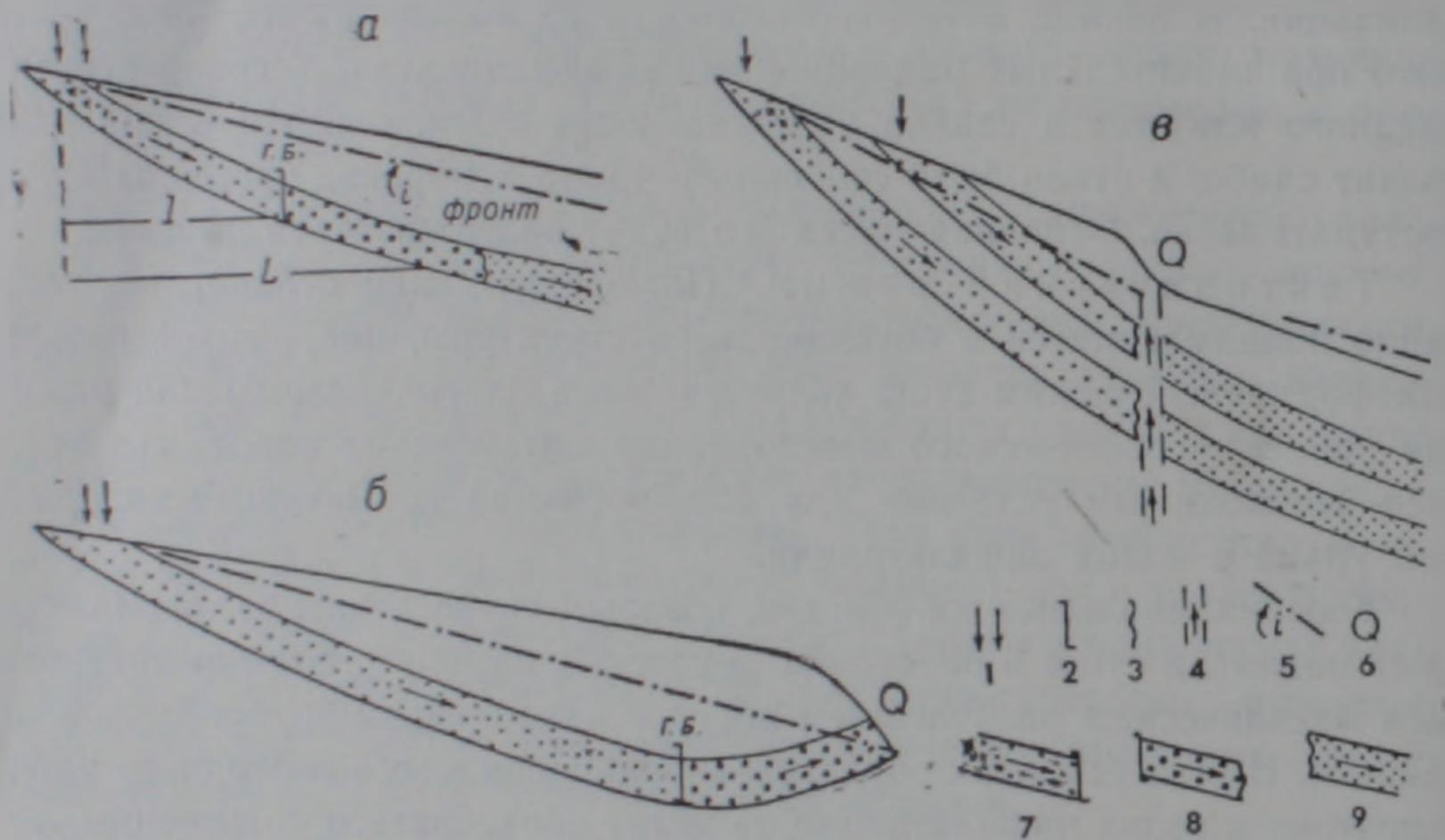
Все разнообразие гидродинамических систем или бассейнов напорных вод автором разделено на три группы или типа.

К первой относятся крупные артезианские бассейны или водонапорные системы, ненарушенные тектоническими разломами, по которым возможна разгрузка напорных вод. Бассейны этого типа характеризуются нормальным развитием процесса вытеснения седиментационных вод континентальными и переживают первый цикл водообмена, когда седиментационные воды еще неполностью замещены инфильтрационными (фиг. 1а).

Ко второй группе относятся артезианские бассейны, средние по своим размерам, для которых характерно полное замещение седимента-

ционных вод инфильтрационными и даже наличие нескольких циклов водообмена. Это обычно достаточно хорошо промывающиеся структуры (фиг. 1б).

К третьей группе относятся мелкие артезианские бассейны и отдельные части более крупных бассейнов, разобщенные тектоническими разломами, служащими очагами разгрузки напорных вод. Бассейны этого типа характеризуются более активным гидродинамическим режимом и усиленным водообменом, т. е. в общем благоприятными гидродинамическими условиями (фиг. 1в).



Фиг. 1. Типы артезианских бассейнов (составил К. Ф. Орфаниди). 1—область инфильтрации; 2—геохимический барьер (Г. Б.); 3—граница континентальных и седиментационных вод (фронт); 4—тектонические нарушения (разломы), по которым поднимаются воды с различными восстановителями (CH_4 , H_2S и др.); 5—пъезометрический уровень подземных вод и его уклон; 6—естественные выходы (разгрузка) подземных вод; 7—континентальные воды, содержащие свободный кислород; 8—то же бескислородные; 9—седиментационные воды.

Масштабы возможного оруденения в общем случае находятся в зависимости от сочетания большого числа факторов и определяются выражением $M = \frac{Ki}{P} F \cdot T \cdot C$, где M —размер оруденения; K —коэффициент фильтрации пород; i —пъезометрический уклон; P —пористость водоносных пород; F —площадь сечения водного потока; C —концентрация урана в водах; T —продолжительность процесса инфильтрации.

Перспективность артезианских бассейнов первой группы, при наличии данных о положении границы (фронта) седиментационных и инфильтрационных вод, может быть определена сравнительно легко, так как длина пути фильтрации континентальных вод в этом случае будет равна расстоянию от области инфильтрации до «фронта»—переднего края континентальных вод.

Расстояние (l) от области инфильтрации до геохимического «барьера» (фиг. 1а) зависит от соотношения количества кислорода в воде и восстановителей в породе: чем больше восстановителей в породе, тем геохимический барьер будет ближе к области инфильтрации.

Перспективность водоносного комплекса будет тем выше, чем дальше от области питания (инфильтрации) находится «фронт» — передний край континентальных вод и чем ближе к области инфильтрации геохимический барьер. Размер оруденения находится в прямой связи с объемом вод, прошедших через геохимический «барьер» и будет находиться в следующей зависимости $M = (L - l) \rho \cdot C$. Характер распределения континентальных вод в контуре инфильтрации по степени минерализации и химическому составу позволяет судить об условиях инфильтрации и различных изменениях, происходивших на суше, начиная с момента вторжения континентальных вод. Артезианские бассейны, переживающие первый цикл водообмена, сохраняют характерные черты, по которым можно представить себе суммарные размеры и динамику инфильтрации и рудонакопления, а также возможности развития процессов их разрушения.

Значительно сложнее оценка возможных перспектив артезианских бассейнов второй и третьей групп, для которых отсутствуют данные о количестве циклов водообмена.

Сложности эти возникают потому, что в течение длительных континентальных режимов гидродинамические и гидрохимические условия могут претерпевать существенные изменения, они могут изменяться настолько сильно, что по современным гидродинамическим и гидрохимическим условиям нельзя судить о процессах древней инфильтрации. В этих сложных случаях для определения направления движения и объема инфильтрационных вод следует руководствоваться геотектоническим режимом развития района, а для оценки масштабов возможного оруденения можно пользоваться ориентировочными расчетами, исходя из возможных значений параметров.

Артезианские бассейны второго и третьего типов (фиг. 1б, в), обладающие активным водообменом, являются более перспективными для формирования крупных месторождений. На гидродинамический режим вод артезианских бассейнов существенное влияние оказывают геолого-структурные и гидрогеологические условия и, в частности, наличие мощных очагов разгрузки подземных вод.

Разгрузка пластовых напорных вод, как известно, может происходить как в результате нормального стока подземных вод, свойственного почти всем артезианским бассейнам, так и по крупным разрывным нарушениям, пересекающим напорные водоносные горизонты. Наличие крупных тектонических разрывов, расположенных поперек направления движения вод инфильтрации, создает весьма благоприятную обстановку для активной разгрузки вод инфильтрации, тем самым активизирует рудный процесс.

Геохимическая роль разрывных нарушений как геохими-

ческого фактора, очень велика, если они пересекают водоносные породы в зонах пластового окисления, т. е. где воды содержат свободный кислород. Известно, что в тектонических разломах, ввиду наличия градиента гидродинамического напора [8], т. е. увеличения напора вод с глубиной, создаются условия для подъема из глубин вод с восстановительными свойствами и вместе с ними и различных углеводородов (восстановителей), обуславливающих контрастные геохимические «барьеры», благоприятствующие восстановлению урана и образованию оруденения.

Поскольку глубинным разломам некоторыми исследователями отводится не только роль структур, подводящих различные восстановители, но и роль рудоподводящих структур, уместно остановиться на этом вопросе. Предварительно заметим, что для локализации уранового оруденения нужны процессы вторичного восстановления пород только в том случае, если проницаемые породы не содержат необходимого количества и качества восстановителей. Такие случаи могут иметь место, когда разломы пересекают комплекс водопроницаемых пород в зонах пластового окисления.

Нетрудно видеть, что при наложении тектонических разломов, несущих восстановители, на проницаемые породы, обогащенные достаточным количеством восстановителей, эти разломы уже не могут быть рудоконтролирующими, поскольку они располагаются за геохимическим барьером, в восстановительной обстановке, где воды уже не несут урана.

Могут ли тектонические нарушения одновременно служить путями и для поступления растворов, несущих уран в повышенных количествах?

В свете современных представлений о геохимии урана, основанных на многочисленных экспериментальных исследованиях [6, 9], в восстановительной обстановке уран находится в четырехвалентной форме, т. е. в состоянии, в котором он не может быть в растворе и мигрировать в количествах, оптимальных для рудообразования.

Сказанное подтверждается и многочисленными фактами, указывающими на то, что даже эндогенное урановое оруденение образуется в одной из последних стадий гидротермального процесса, когда наступают условия для насыщения рудных растворов кислородными соединениями (ионами карбонатов и сульфатов).

Источником урана и других элементов для образования инфильтрационных (эпигенетических) месторождений служат различные концентрации этих элементов в породах и водах. Основными из них являются: концентрации в породах, слагающих сушу на площадях инфильтрации вод, и концентрации, содержащиеся в самих водопроницаемых породах.

Поскольку главными, как нам представляется, являются первые, то на них хотелось бы остановиться подробнее.

По мнению одних исследователей, источником урана могут служить только породы, обладающие повышенным кларком этого элемента; другие же полагают, что для обогащения вод инфильтрации ураном в по-

вышенных количествах важной предпосылкой является наличие аридного климата в период инфильтрации континентальных вод.

Рассмотрим сущность этого вопроса с геохимической стороны. Миграция урана, а равно и других химических элементов в различных геохимических обстановках происходит неодинаково и в разных масштабах, поскольку сама миграция зависит как от состояния урана в породах, так и от химической формы нахождения его в подземных водах.

В литературе [7, 11] различают несколько форм нахождения урана в породах: в виде урановых минералов; уран может входить в структуры породообразующих минералов; находиться в адсорбированном состоянии на поверхности кристаллов и в трещинах внутри кристаллов и др.

Различные формы урана неодинаково воспринимают действие геохимических агентов, воздействующих на горные породы. Основная масса урана, выщелачиваемая из горных пород, освобождается в результате их выветривания и химического разложения. По степени устойчивости В. В. Щербина [12] выделяет следующие минеральные ассоциации: минералы, совершенно не изменяющиеся при выветривании (самородные элементы, касситерит и др.); минералы, очень трудно разлагающиеся (кварц, рутил, циркон, монацит и др.); минералы, относительно медленно выветривающиеся (полевые шпаты, слюды, пироксены и др.) и минералы, легко разрушающиеся (нефелин, оливин, сульфиды, карбонаты и др.).

Распределение урана в различных минералах, по данным исследований мономинеральных фракций гранитоидов верхнего палеозоя Б. Кавказа, составляет: в акцессорных минералах (цирконе)—45%, в полевых шпатах—27%, в слюдах—18% и в кварце—10% от валового, т. е. кларкового содержания его в породе.

Исключительно важное геохимическое значение имеет и форма нахождения урана в подземных водах. Шестивалентная (подвижная) форма урана (UO_2^{2+}) в природных водах может образовать более 10 различных химических соединений, каждая из которых устойчива и миграционно способна в определенном диапазоне физико-химических условий. Уран может находиться в коллоидной и псевдоколлоидной форме—сорбированный на различных взвешях; в катионной форме UO_2^{2+} и $UO_2(OH)^+$, в анионной—в виде комплексных карбонатных соединений—диакводикарбонатного аниона $[UO_2(CO_3)_2 \cdot 2H_2O]$ и трикарбонатного аниона $[UO_2(CO_3)_3]^{-}$, комплексных сульфатных анионов; металлоорганических и др. соединений.

Присутствие в природных водах урана в различных формах зафиксировано рядом исследователей. В частности, нахождение урана в океанической воде в форме коллоидов и карбонатных комплексов впервые было отмечено И. Е. Стариком и Л. Б. Колядиным [9]. Существование урана в форме катионов UO_2^{2+} и $UO_2(OH)^+$ и карбонатных комплексных анионов устанавливается на основании физико-химических расчетов Г. Б. Наумовым [6] и А. К. Лисициным [5].

Экспериментальным путем с использованием различных методов—диализа и ультрафильтрации (через целлофан под давлением) для кол-

лоидной формы; ионнообменных смол КУ-2 и ЭДЭ-10п—для катионной и комплексно-карбонатных анионных форм и химических методов для сульфатных комплексных анионов автором подтверждено присутствие: — в пресных и углекислых водах обоих комплексных карбонатных анионов урана и коллоидов (только в пресных водах). Катионная форма, устанавливаемая физико-химическими расчетами [5, 6] практически в природных водах отсутствует; — в кислых рудничных водах (с рН от 2 до 6) уран находится в форме различных сульфатных комплексов.

Процессы разрушения материнских пород и обогащение вод ураном в различных климатических условиях происходит с различной интенсивностью. В одних условиях, при механическом разрушении пород, уран уносится вместе с обломками пород; в других—при химическом разрушении количество высвобождающегося урана во много раз больше. Следовательно, общая масса подвижного урана, служащая источником обогащения трещинно-грунтовых вод, в значительной мере зависит от ландшафтных и почвенно-геохимических условий. Сказанное автором убедительно подтверждается результатами обработки обширного фактического материала о содержании урана в подземных водах Б. Кавказа.

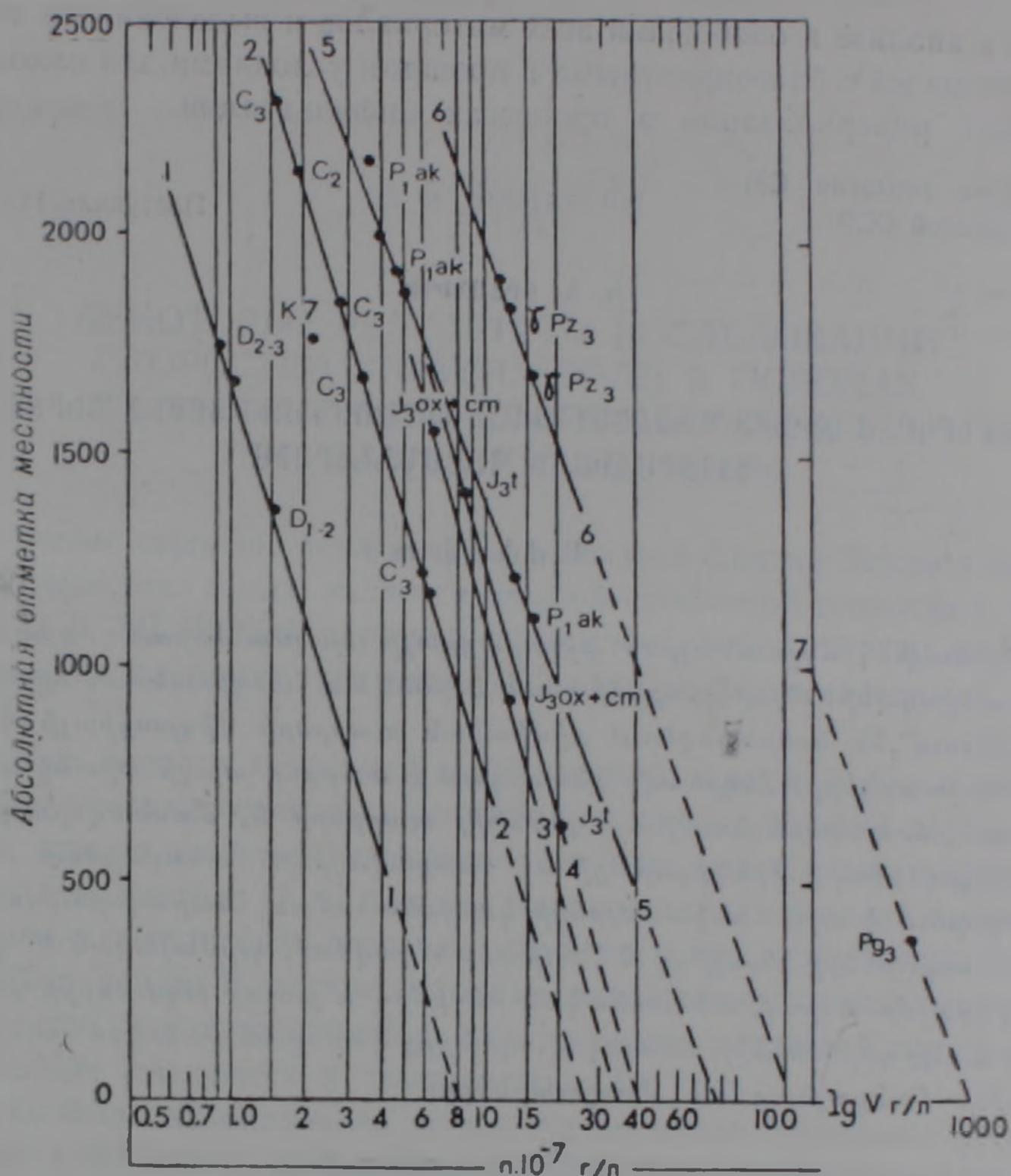
Характер распределения содержания урана, т. е. геохимического фона урана в водах, циркулирующих в породах, находящихся в различных гипсометрических, а стало быть и почвенно-геохимических условиях, иллюстрируется графиками (фиг. 2).

На фиг. 2 видно, что, во-первых, уровень концентрации урана в водах каждого комплекса пород характеризуется своим кларком и особенностями распределения урана между минералами, находится в тесной зависимости от гипсометрии местности, т. е. от высоты, на которой протекают процессы выветривания и обогащения вод ураном, что в конечном итоге указывает на влияние такого обобщенного фактора как климат; во-вторых, на низких высотах, характерных сухостью, т. е. аридным климатом, создаются более благоприятные условия для обогащения вод коры выветривания ураном и, в-третьих, на сравнительно небольших высотах, в частности для вод гранитоидов Главного хребта Б. Кавказа с кларковым содержанием урана ($4 \cdot 10^{-6}$ г/л), геохимический фон урана в воде достигает $(1-2) \cdot 10^{-5}$ г/л, а для вод коры выветривания майкопских глин, обладающих повышенным кларком, составляет $(3-4) \cdot 10^{-5}$ г/л.

Из изложенного следует, что наиболее благоприятные условия для мобилизации урана и обогащения им вод коры выветривания, т. е. вод инфильтрации, создаются при наличии в породах высоких содержаний подвижного урана и аридных климатических условий.

Обобщая изложенные выше соображения, можно сказать, что задача по прогнозированию месторождений урана, связанных с геохимической деятельностью подземных вод в условиях пластовой фильтрации, состоит:

1) в глубоком и всестороннем анализе истории геологического развития изучаемой территории;



Фиг. 2. Графики зависимости геохимического фона (ГФ) содержания урана в водах коры выветривания пород Б. Кавказа от гипсометрии местности (сост. К. Ф. Орфаниди): 1—филлитов и туфогенных песчаников девона; 2—молассевых образований верхнего карбона; 3—4—терригенно-карбонатных отложений верхней юры; 5—молассовых отложений нижней перми; 6—гранитоидов (типа Главного хребта); 7—коры выветривания майкопских глин (олигоцена).

2) в выявлении и картировании площадей развития комплексов пород, благоприятных по литологическому и вещественному составу для проявления процессов инфильтрации и локализации уранового оруденения;

3) в выделении площадей по степени продолжительности континентального режима, существовавшего на этой территории;

4) в выяснении ландшафтно-геохимических и гидрогеологических условий, существовавших в периоды проявления процессов инфильтрации и в течение последующей истории развития речного бассейна, благоприятствовавших сохранению оруденения;

5) в анализе и обобщении всех материалов и выделении на этой основе площадей с благоприятными в прошлом условиями для накопления урановой минерализации в процессах инфильтрации.

Управление геологии СМ
Армянской ССР

Поступила 11.VII.1973.

Կ. Ֆ. ՕՐՖԱՆԻԴԻ

ՍՏՈՐԵՐԿՐՅԱ ՋՐԵՐԻ ԴԵՈՔԻՄԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՒՆԵՈՒԹՅՈՒՆԸ ՇԵՐՏԱՅԻՆ ՖԻՆՏՐԱՑԻԱՅԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ա. մ փ ո փ ու մ

Շերտային (ճնշումնային) ֆիլտրացիայի պայմաններում ստորերկրյա ջրերը բավականին հզոր գեոքիմիական գործոն են հանդիսանում, որոնք պայմանավորում են երկրակեղևում քիմիական տարրերի միգրացիայի հսկայական մասշտաբները: Հեղինակը քննարկում է տարբեր տիպի արտեզյան ավազանների հեռանկարայնությունը լիթոֆիլ տարրերի և, մասնավորապես, ուրանի էպիգենետիկ (ինֆիլտրացիոն) հանքավայրերի առաջացման մեջ: Ընդհանրապես ասելով՝ առաջադրված է այդ հանքավայրերի կանխատեսման հնարավորությունը, ջրատար ապարների բնույթով և նյութական կազմով, կլիմայական և հիդրոգինամիկ պայմաններով, տեկտոնական ռեժիմով և խոշոր խզումների առկայությամբ և այլ գործոնների անալիզով, որոնցից կարող են կախված լինել ինֆիլտրացիոն հանքայնացման մասշտաբները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Батулин С. Г., Головин Е. А., Зеленова О. И. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования. Атомиздат, 1965.
2. Евсева Л. С., Перельман А. И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. Атомиздат, 1962.
3. Каширцева М. Ф. Минералого-геохимическая зональность инфильтрационных рудопроявлений урана. Сов. геология, № 10, 1964.
4. Каширцева М. Ф. Влияние вещественного состава пород на формирование эпигенетических концентраций урана. Сов. геология, № 10, 1968.
5. Лисицын А. К. О формах нахождения урана в подземных водах и условиях осаждения его в воде. Геохимия, № 9, 1962.
6. Наумов Г. Б. К вопросу о карбонатной форме переноса урана в гидротермальных растворах. Геохимия, № 1, 1959.
7. Нейербург Д. Материалы международной конференции по использованию атомной энергии том 6, Женева, 1955.
8. Орфаниди К. Ф. К вопросу о природе восходящих гидротермальных рудообразующих растворов. Тезисы докл. III конф. геологов Сев. Кавказа, 1968.
9. Старик И. Е., Колядин Л. Б. Об условиях существования урана в океанической воде. Геохимия, № 3, 1957.
10. Страхов Н. М. Основы теории литогенезиса. Изд-во АН СССР, 1962.
11. Таусон Л. В. О формах нахождения некоторых редких элементов в изверженных горных породах ДАН СССР, том XV, № 6, 1954.
12. Щербина В. В. Комплексные соединения и перенос геохимических элементов в зоне гипергенеза. Геохимия, № 5, 1956.