

## К ВОПРОСУ МИГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

П. А. УДОДОВ, В. М. МАГУСЕВИЧ

(Представлена научным семинаром кафедры гидрогеологии  
и инженерной геологии)

Опыт гидрогеохимических исследований показывает, что они дают максимальный эффект при комплексировании различных методов поисков (литохимические, биогеохимический, гидрогеохимический, иловый). Применение этих методов позволяет учесть все основные формы миграции элементов (ионная, комплексные соединения, минеральные и органические коллоиды и др.). Однако постановка каждого из методов определяется соответствующими геологическими условиями. Так, например, в районе Томь-Яйского междуречья нами на отдельных участках применялись: металлометрическое опробование керна и обнажений, метод донных осадков, шлиховое опробование и гидрогеохимический метод поисков. Это было вызвано наличием различной мощности рыхлых отложений, характером режима поверхностных водотоков и обводненности горных пород. Все указанные методы применялись при проведении геологических исследований.

Район исследований располагается в Западной Сибири в зоне тайги и характеризуется гумидным климатом. В геологическом отношении он приурочен к стыку трех геологических структур: Колывань-Томской складчатой зоны, Кузнецкой котловины и Кузнецкого Алатау.

В западной части района распространены песчано-сланцевые отложения нижнего карбона и верхнего девона. В восточной части преобладают эффузивно-туфогенные осадки среднего девона Колывань-Томской складчатой зоны на стыке ее с Кузнецким Алатау и кристаллические сланцы, гнейсы, мраморы северного продолжения Кузнецкого Алатау. Здесь же наблюдаются максимальное распространение зон разрывных нарушений и гидротермальные изменения пород (серицитизация, хлоритизация, окварцевание, карбонатизация, пиритизация). Комплекс палеозойских и кембро-протерозойских пород перекрыт плащеобразно рыхлыми отложениями мощностью 10—15 м, иногда до 100 м (на участках эрозивно-тектонических впадин). Выходы коренных пород наблюдаются, главным образом, по долинам рек и глубоко врезаемых логов. Рыхлые образования представлены озерно-аллювиальными отложениями и корой выветривания преимущественно глинистого состава. Горизонты песков с галькой приурочены к эрозивно-тектоническим впадинам и речным террасам.

Отмеченные особенности физико-географических и геологических условий приводят к тому, что район исследований характеризуется слабой обводненностью рыхлой толщи и значительной водообильностью

зон разрывных нарушений. Регионально выраженный водоносный горизонт, приуроченный к разрушенной кровле палеозойских пород, обладает в общем незначительной водообильностью, за исключением тех участков, где он питается водами зон разрывных нарушений.

Наиболее распространенные элементы в горных породах района разделяются на три основных комплекса: 1) титан, цирконий, хром, ванадий (никель и кобальт); 2) железо, марганец (фосфор, кобальт и никель); 3) цинк, свинец, медь, барий, сурьма, ртуть, мышьяк, серебро (молибден, олово, стронций, кобальт).

Первый комплекс элементов связан с процессами формирования и переотложения кор выветривания. Сюда входят, главным образом, химически устойчивые элементы. Концентрации их в районе представлены россыпями, обогащенными участками в коре выветривания, а также по зонам разрывных нарушений, где они обусловлены наличием даек диабазов. Региональное заражение данным комплексом элементов характерно для осадочных пород района, включая и рыхлые образования.

Второй комплекс приурочен к коре выветривания, развитой на эффузивно-туфогенных породах.

Третий комплекс является продуктом гидротермальной деятельности, которая наиболее интенсивно проявилась по зонам разрывных нарушений на участке смыкания геоструктур района.

Изучение микрокомпонентов по различным водопунтам показывает повсеместно на участках потоков рассеяния наличие сложного комплекса элементов в водах, отражающего чаще всего отмеченные выше три типа минерализаций. Это объясняется взаимосвязью различных водоносных горизонтов, характеризующихся определенными ассоциациями элементов. Так, например, по одному источнику, приуроченному к зоне разрывного нарушения, встречены следующие элементы (содержание в  $мкг/л$ ):

Таблица 1

Cu	Zn	Ag	Ba	As	Ni	Cr	V	Ti	Zr	Be	Mn
10	35	3	210	10	10	21	10	350	105	21	105

Совершенно очевидно, что здесь имеет место смешение вод, обогащенных элементами трех указанных выше комплексов.

В отдельных случаях, когда точки опробования располагаются по периферии потоков рассеяния, имеет место сочетание различных, но неполных комплексов, что объясняется выпадением некоторых элементов в процессе миграции.

На миграцию элементов в районе исследований большое влияние оказывают такие факторы, как широкое распространение щелочных вод, гуматы, наличие сорбентов (глины), повышенное содержание углекислоты в водах и др. Эти факторы по-разному влияют на поведение отдельных элементов. Так, щелочные воды способствуют миграции хрома и в то же время переводят в осадок некоторые элементы в виде комплексных соединений с ванадием (ванадатов). Этим, очевидно, объясняется несколько пониженное содержание в природных водах района ванадия по сравнению с хромом, в то время как в горных породах средние содержания их не отличаются так резко (табл. 2).

Формирование щелочных вод нам представляется как результат воздействия на карбонатные породы, широко развитые в районе свободной  $CO_2$ , главным образом, по зонам разрывных нарушений. При выходе гидрокарбонатных вод на дневную поверхность происходит удале-

ние из них  $\text{CO}_2$ , в результате чего отлагаются карбонатные травертины, часто обогащенные гидроокислами железа и марганца. Последние захватывают и соосаждают кобальт, на что указывает повышенное его содержание в вадоподобных травертинах. Химические анализы травертинов показали наличие в них в повышенном содержании некоторых тяжелых металлов: цинка (0,01%), сурьмы (0,01%), меди (0,01%), свинца (0,003%), следы серебра и др. Таким образом, значительная часть элементов выпадает из миграции в водах непосредственно при выходе их на дневную поверхность.

Гуматы, с одной стороны, предохраняют некоторые коллоиды от выпадения (Сауков, 1950) и, с другой, образуют различные органические соединения с медью и другими элементами, которые выпадают в осадок. Осаждению в донные отложения органо-минеральных коллоидов способствуют повышенное содержание в водах элементов и наличие дополнительных отрицательно заряженных центров коагуляции (глинистые частицы, силикаты и полуторные окислы). При незначительном содержании в водах элементов и повышенном содержании органо-минеральных коллоидов наблюдается явление опалесценции, которое используется широким распространением в районах с гумидным климатом. Поступление в этом случае в воды повышенного содержания элементов (например, на участках подпитывания водотоков трещинными водами зон разрывных нарушений и др.) приводит к быстрому осаждению коллоидов совместно с элементами в илы. В описываемом районе участки зон разрывных нарушений, как правило, характеризуются повышенным содержанием в илах марганца, ванадия, титана, меди, цинка, свинца и др., причем цинк присутствует в иловых пробах только на участках зон нарушений. Проявление этих факторов неодинаково для различных участков, что еще более усложняет условия миграции элементов в водах района, а вместе с тем и интерпретацию полученных данных.

Все формы миграции в настоящее время определяются показателем порядка миграции Б. Б. Полюнова (1934), коэффициентом водной миграции А. И. Перельмана (1961) и показателем водной миграции, предложенным П. А. Удодовым и Ю. С. Париловым (1961). Приведенные коэффициенты отражают наиболее общие закономерности в миграции элементов и не учитывают многие природные факторы, от которых зависят условия миграции элементов. Поэтому целесообразность применения этих коэффициентов, как известно, ограничена случаем выяснения основных моментов в миграции химических элементов.

Между тем для правильной оценки миграционных свойств элементов необходимо учитывать большое число внешних факторов миграции. В настоящее время Н. М. Страховым (1963) миграционная способность оценивается по комплексу геологических, палеогеографических, климатических и других условий. Им показано, что ряды миграции элементов могут существенно меняться в зависимости от конкретных геологических условий.

Для слаборасчлененных территорий гумидного типа с полузакрытой геологической структурой на примере Томь-Яйского междуречья авторами предлагаются два миграционных показателя: 1) показатель переноса (А), 2) показатель осаждения (Б).

Показатель переноса представляет собой отношение среднего содержания элементов в водах к среднему его содержанию в горных породах данного района. Таким образом, расчет построен на использовании частично принципов миграционных коэффициентов А. И. Перельмана (среднее содержание в породах данного района) и П. А. Удодова, Ю. С. Парилова (выражение содержания в воде в весовых процентах).

Таблица 2

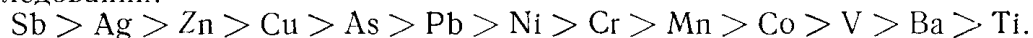
Содержание тяжелых металлов в горных породах, илах и природных водах в районе Томь-Яйского междуречья

Элементы	Горные породы (635 анализов)		Природные воды (2008 анализов)		Иловые отложения (475 анализов)		Показатели миграции металлов	
	% встречаемости	содержание % $10^{-3}$ (и)	% встречаемости	среднее содержание % $10^{-7}$ (в)	% встречаемости	среднее содержание % $10^{-3}$ (и)	показатель переноса $A = \frac{B}{H} \cdot 10^{-4}$	показатель осаждения $B = \frac{H}{H}$
Сурьма	10	0,035	3,6	0,7	не встречено	не встречено	20,0	—
Серебро	12	0,026	9	0,2			7,90	—
Цинк	32	3,9	56	15	9	1,0	3,8	0,26
Медь	96	2,2	85	2,7	94	2,7	1,2	0,79
Мышьяк	9,5	0,2	2,7	0,15	не встречено	не встречено	0,8	—
Свинец	65	1,6	51	0,6	41	0,22	0,4	0,14
Никель	90	1,8	40	0,7	86	2,1	0,4	1,1
Хром	66	18,0	46	3,3	85	9,8	0,18	0,5
Марганец	95	80,0	65	15,0	98	206,0	0,20	2,61
Кобальт	43	0,4	2,1	0,05	3,4	0,2	0,12	0,5
Ванадий	85	10,0	75	0,85	83	9,2	0,08	1,0
Барий	37	80,0	35	4,0	67	1,4	0,05	0,04
Титан	86	197,9	94	11,0	100	21,4	0,06	0,11

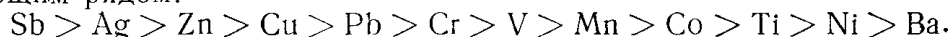
В связи с тем, что в равнинных областях осаждение микрокомпонентов под влиянием различных факторов происходит в донные осадки, авторами предлагается показатель осаждения элементов. Последний представляет собой отношение среднего содержания элемента в иловых осадках к среднему его содержанию в горных породах района. В табл. 2 приведены проценты встречаемости и некоторые исходные данные для расчета показателей миграции для 13 наиболее распространенных элементов в районе. Для остальных элементов, таких как кадмий, ртуть, олово, молибден подсчитать показатели миграции не представилось возможным в связи с недостаточными для них исходными данными.

Из табл. 2 можно видеть, что с понижением миграционной способности отмечается тенденция к увеличению показателя осаждения. Последний позволяет уточнить место того или иного элемента в ряду миграции. Так, например, свинец и никель имеют одинаковые показатели переноса (0,4), в то время как показатель осаждения никеля значительно выше (1,15), чем свинца (0,14), что позволяет заключить о большей миграционной способности свинца по сравнению с никелем. Показатель переноса бария несколько ниже, чем титана, но показатель осаждения последнего значительно ниже, поэтому в приводимом ряду миграции титан стоит после бария. Такая же картина наблюдается для марганца и хрома.

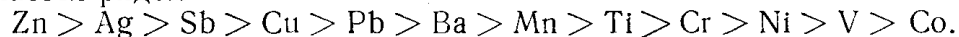
Комплексная оценка миграционной способности элементов по этим двум показателям позволяет построить следующий ряд для района исследований:



Влияние внешних факторов миграции находит свое отражение в некотором изменении рядов миграции, составленных аналогичным способом для различных участков Томь-Яйского междуречья в зависимости от состава горных пород, тектоники и режима природных вод. Для западной части района с наличием песчано-сланцевых отложений миграционная способность микрокомпонентов в водах выражается следующим рядом:



Восточная часть района характеризуется наличием эффузивно-осадочных и карбонатных пород. Миграционная способность здесь выражается рядом



Нетрудно заметить, что некоторые элементы меняют свое место в приведенных рядах в зависимости от внешних факторов. Например, увеличение в восточной части миграционной способности цинка по сравнению с серебром и сурьмой связан с максимальным для всего района проявлением разрывных нарушений, обогащенных углекислотой. Это благоприятствует выносу водами цинка, а наличие химически активных карбонатных пород затрудняет миграцию в водах сурьмы и серебра; цинк же менее подвержен влиянию химической активности горных пород. Кроме того, широко развитое здесь травертинообразование (в связи с обилием зон нарушений) приводит к частичному выпадению сурьмы и серебра с травертинами. По тем же причинам в водах восточной части района возрастает миграционная способность бария, что подтверждено экспериментально-лабораторными работами. С травертинообразованием связано формирование щелочных вод, в результате чего значительно понижается миграционная способность ванадия.

Представляет интерес различное поведение кобальта в западной и восточной частях района. Во втором случае, как видим из приводимых рядов, миграционная способность его понижена. Здесь кобальт хо-

тя содержится в горных породах в количестве 0,03%, но остается в низких содержаниях в водах. Пользующиеся здесь широким распространением железо и марганец, очевидно, являются одним из факторов выпадения кобальта из водной миграции, наряду с процессами травертинообразования. Не случайным является тот факт, что кобальтсодержащими являются не только марганцовистые соединения, но также гидроокислы железа, бурые железняки и карбонатные травертины.

Приведенные данные указывают на большую роль геологических процессов в миграции элементов в природных водах. В данной статье мы рассмотрели влияние только некоторых из этих процессов и не останавливаемся на вопросе о влиянии многих других факторов (характер водообмена, тип минерализации, гуматы и др.).

Таким образом, очевидно, что, кроме внутренних факторов, на миграцию элементов в водах существенное влияние оказывают внешние факторы миграции, а, следовательно, поведение отдельных элементов в рядах миграции в зависимости от конкретных геологических условий в значительной степени может изменяться. Для более полного изучения миграции элементов в различных условиях с учетом концентрации в донных осадках и других новообразованиях зоны гипергенеза, необходима постановка комплексных геохимических исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Гинзбург. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Госгеолтехиздат, 1957.
  2. А. И. Перельман. Геохимия ландшафта. Географиздат, 1961.
  3. Б. Б. Полюнов. Кора выветривания. Изд-во АН СССР, 1934.
  4. А. А. Сауков. Геохимия. Госгеолтехиздат, 1950.
  5. Н. М. Страхов. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. Госгеолтехиздат, 1963.
  6. П. А. Удодов и Ю. С. Париллов. О некоторых закономерностях миграции металлов в природных водах. Геохимия, № 8, 1961.
-