

## ОЦЕНКА ГЛОБАЛЬНЫХ ЗАПАСОВ ПО КЛАРКАМ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Е. М. Квятковский*

Теперь уже общепринятым стало представление о ведущей роли рассеянного вида существования химических элементов в земной коре, на фоне которого наблюдаются повышенные концентрации элементов, при некоторых условиях именуемые рудопроявлениями или месторождениями полезных ископаемых. Образование повышенных концентраций, естественно, возможно лишь при условии затраты энергии, источником которой могут быть процессы как эндогенного, так и экзогенного характера. Соотношение рассеянного и концентрированного вида существования элементов в земной коре можно изучать с этих позиций, привлекая термодинамические расчеты [17, 18]. Не менее интересные данные можно получить при статистическом анализе фактического материала [12, 14, 22]. Этот анализ позволяет установить связь между глобальными запасами элементов в месторождениях и рассеянном состоянии в земной коре, а также между кларками элементов в осадочных и изверженных породах и глобальными запасами элементов в осадочных месторождениях.

**Связь между кларками элементов в литосфере и их глобальными запасами в месторождениях.** Для территории США существует достаточно четкая зависимость между кларками элементов в литосфере  $C_k$  и запасами этих элементов в месторождениях [22]. Как видно из рис. 1, а, запасы 13 элементов из 25 укладываются в область соотношений

$$Q = n 10^9 C_k, \quad (1)$$

т. е. не выходят за пределы одного порядка. Все 25 элементов укладываются в область колебаний отношения запасов к кларку, не выходящую за пределы четырех порядков ( $10^6 \div 10^{10}$ ). Если исключить из рассмотрения пять элементов (алюминий, марганец, хром, олово и бериллий), то диапазон колебаний сократится до трех порядков ( $10^7 \div 10^{10}$ ). Недостаток запасов указанных элементов на территории США может объясняться несколькими причинами: по алюминию здесь учтены только запасы в бокситах, на остальных элементах могло сказаться либо неблагоприятное для формирования месторождений геологическое строение территории США (территория США недостаточно представительна для такого рода расчетов), либо на этой территории еще не выявлены месторождения этих элементов (что, по-видимому, менее вероятно). Мак-Келви [22]

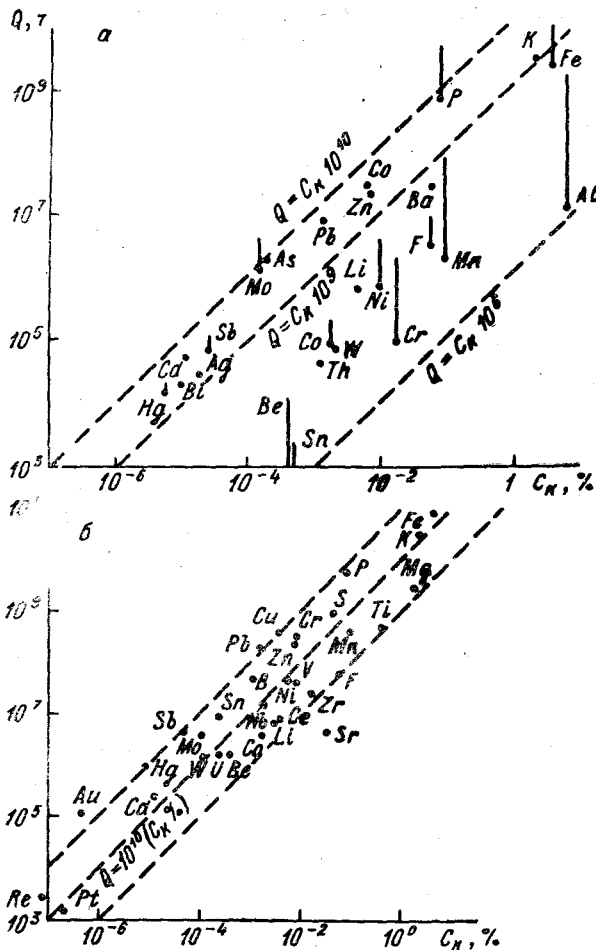


Рис. 1. Поле корреляции между кларками элементов в литосфере и их запасами: а — США [22]; б — известными мировыми

запасами в Австралии с Океанией, для которого это отношение менее  $10^7$ .

Аналогичные расчеты для 32 элементов произвел Ю. О. Козында. Опубликованные данные [1, 2, 9—11] по запасам капиталистических стран, увеличенные в 1,3 раза в соответствии с территорией, он принял за мировые. Как и следовало ожидать, корреляция между логарифмами запасов и кларков элементов по мировым данным (рис. 1, б) выражена более четко. О достаточно высокой связи между этими величинами свидетельствует коэффициент корреляции, равный 0,75. Уравнение регрессии (запасы по кларку) имеет вид

$$Q = C_K^{1,1} 10^{10} \approx C_K 10^{10} \text{ т.} \quad (2)$$

По Л. Н. Овчинникову [12] среднее значение известных мировых запасов равно  $3,2 \cdot C_K \cdot 10^{10}$  т. По этому соотношению легко подсчитать долю запасов, сосредоточенных в месторождениях  $Q_M$ , относительно за-

обращает внимание на то, что большинство элементов, отмеченных максимальными запасами по сравнению с кларками, известны с древних времен: золото, ртуть, серебро, сурьма, мышьяк, свинец, цинк, медь, железо. Элементы, характеризующиеся минимальными запасами, в большинстве своем относительно «молодые».

Аналогичные расчеты по другим континентам для 24 элементов выполнены М. И. Альтшулером с использованием обзора минеральных ресурсов стран капиталистического мира [10, 11]. Во всех случаях отношение запасов к кларку не выходит за пределы отношений  $10^7 \div 10^{10}$ , за исключением ртути в Европе, олова в Азии, меди, хрома и фосфора в Африке, для которых это отношение увеличивается до  $10^{11}$ , и мар-

пасов, находящихся в рассеянном состоянии  $Q_{\text{расс}}$  до глубины 1 км. Если принять, что прогнозные запасы в среднем в 100 раз больше \* известных, то

$$\frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{расс}}} = \frac{101^2 C_{\text{к}} 100 \cdot 100}{SH \delta C_{\text{к}}} = 2,5 \cdot 10^{-2}, \%$$

где  $S$  — площадь материков ( $150 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ );  $H$  — глубина подсчета запасов (до 1 км);  $\delta$  — плотность пород ( $2,7 \text{ т/м}^3$ ).

Такая низкая степень концентрации элементов в месторождениях свидетельствует о преобладающей роли рассеянного вида существования химических элементов в литосфере по сравнению с концентрированным. Учитывая достаточно тесную корреляционную связь между запасами и кларком, можно предполагать, что для таких элементов как стронций, титан, фтор, церий, литий, кобальт, цирконий, магний наиболее вероятны открытия новых типов месторождений. Однако на концентрацию элементов в месторождениях влияют, по-видимому, специфические свойства самих элементов, поэтому трудно ожидать равной концентрации всех элементов. Правда, в глобальном масштабе эти особенности имеют, вероятно, второстепенное значение, так как даже такие элементы, как рений и кадмий укладываются в общую закономерность наряду с железом, серой, бором и другими элементами.

На качестве данных по запасам сказываются и такие факторы, как разрозненность и отрывочность сведений по ряду элементов, дезинформирующие сведения зарубежных фирм, различие во времени оценки запасов и т. д. Кроме того, величина отношения запасов к кларку зависит от надежности определения кларка. Сопоставление кларков по А. П. Виноградову за 1956 и 1962 гг. по 32 элементам, приведенным на рис. 1, б [3, 4], дает следующую картину:

$\frac{C_{\text{к}} - 1962}{C_{\text{к}} - 1956}$	Элемент
5—3,1	B
3,0—2,1	F
2—1,51	Nb, Zr, Ce
1,5—1,11	W, Sb, Hg, P, Mn
1,1—0,91	Pb, K, S, Fe
0,9—0,65	Mg, Au, Zr, Sr, U, Ti, Ni, Re
0,64—0,51	V, Co, Be, Li
0,5—0,33	Cu, Cr, Mo
0,32—0,12	Cd
0,12	Sn

Для большинства элементов кларк 1962 г. отличается от кларка 1956 г. более, чем на 10%, причем для 17 элементов — в сторону понижения и лишь для 10 — в сторону повышения. Наиболее резкое различие у олова — в 16 раз. Однако введение соответствующих поправок не сказывается на закономерностях, следующих из рис. 1, б.

Используя установленные закономерности, можно оценить среднее значение площади, на которую должно приходиться одно месторождение определенных размеров того или иного элемента. Согласно В. И. Красникову [8], рудные месторождения можно разделить по мас-

\* По В. И. Красникову [8] и Н. И. Сафронову [16] в 40 раз больше, по А. И. Семенову, А. А. Смыслову [20] в среднем в 600 раз больше.

штабу запасов на пять групп: рудопроявления, мелкие, средние, крупные и уникальные. В каждой группе запасы месторождений отличаются на порядок от соседних групп.

Приводим для ряда элементов запасы средних месторождений и кларков элемента в литосфере [4]:

Элементы	$C_k, \%$	$Q, \tau^*$	$\frac{Q}{C_k}$
Fe	$n \cdot 1$	$n \cdot 10^8$	$10^8$
Al	$n \cdot 1$	} $n \cdot 10^6$	$10^6$
Ti	$n \cdot 10^{-1}$		$10^7$
Mn	$n \cdot 10^{-1}$	} $n \cdot 10^5$	$10^6$
Zn, Cr, Ni, Cu, Pb	$n \cdot 10^{-3}$		$10^8$
Zr	$n \cdot 10^{-2}$	} $n \cdot 10^4$	$10^6$
V, Li, Nb, Ce	$n \cdot 10^{-3}$		$10^7$
Sn, W	$n \cdot 10^{-4}$		$10^8$
Sb	$n \cdot 10^{-5}$		$10^9$
Th	$n \cdot 10^{-3}$	} $n \cdot 10^3$	$10^6$
Be, U	$n \cdot 10^{-4}$		$10^7$
Hg	$n \cdot 10^{-6}$		$10^9$
Co, Y	$n \cdot 10^{-3}$	} $n \cdot 10^2$	$10^5$
Ta	$n \cdot 10^{-4}$		$10^6$
Ag	$n \cdot 10^{-6}$		$10^8$
Bi	$n \cdot 10^{-7}$		$10^9$
Au, Pt	$n \cdot 10^{-7}$	$n \cdot 1$	$10^7$
	Среднее		$10^7$

Естественно, что понятие *среднее месторождение* носит и экономический характер, и в какой-то мере это сказывается на колебании отношений запасов к кларку. Отклонения этого отношения могут быть обусловлены как ошибочным кларком (висмут?), так и исключением из рассмотрения некоторых типов месторождений (кобальт, иттрий). Интересно, что наиболее резкие отклонения в сторону повышения запасов против средней нормы, кроме висмута, характерны для ртути и сурьмы.

Далее на рис. 2, построенном по данным В. И. Красникова [8], приведены эмпирические графики зависимости числа мелких и средних месторождений, приходящихся на одно крупное месторождение, для различных металлов. Аналитически эту зависимость можно представить в виде

$$\frac{N_i}{N_k} = \left( \frac{Q_k}{Q_i} \right)^b, \quad (3)$$

где  $N_i$  и  $Q_i$  — число месторождений и запасы одного месторождения класса  $i$ ;  $N_k$  и  $Q_k$  — число месторождений и запасы одного месторождения класса  $k$ .

Если принять  $b=0,6$ , то число месторождений соседних классов (отличающихся по запасам в 10 раз) будет различаться в  $10^{0,6}=4$  раза. С несколько иных позиций к решению этого вопроса подходит Д. Н. Сафронов [17]. Используя гипотетическую связь [19] между числом месторождений  $N$  и их линейными размерами  $l$

$$\frac{N_i}{N_k} = \left( \frac{l_k}{l_i} \right)^2 \quad (4)$$

\* Здесь даны  $Q$  в средних месторождениях.

и установив зависимость между  $l$  рудного тела и запасами руды в нем ( $l = \sqrt[n]{Q}$ , где  $n = 3 \div 4$ ), Д. Н. Сафронов получил зависимость, аналогичную (3), причем  $b = \frac{2}{n}$ , т. е. изменяется от 0,5 до 0,66.

По мнению А. П. Соловова [21], соотношение числа месторождений в соседних классах, равное 4, является кажущимся и должно быть увеличено до 7 за счет выявления всех мелких месторождений при достаточно детальных поисках. В наших дальнейших расчетах принято среднее число 5.

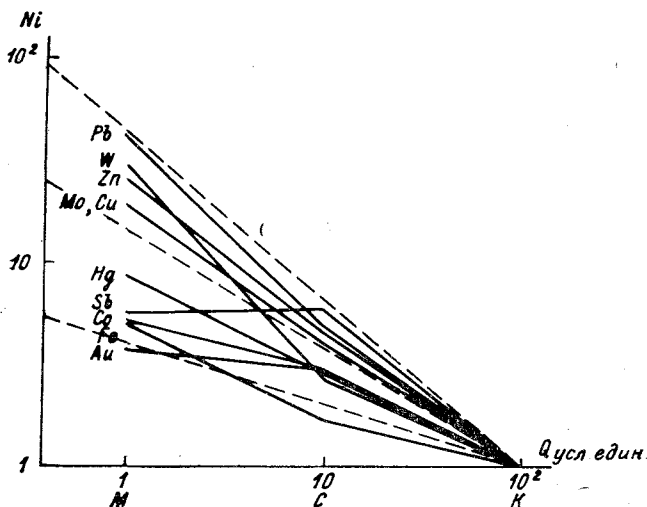


Рис. 2. Число мелких  $M$  и средних  $C$  месторождений, приходящихся на одно крупное  $K$  для различных металлов по В. И. Красникову [8]

$$N_i : N_k = (Q_k : Q_i)^b; \quad 0,3 < b < 0,83; \quad \bar{b} \approx 0,6$$

Если рабочей считать гипотезу о формировании месторождений в литосфере за счет концентрации элементов из рассеянного состояния и экстраполировать зависимость (3) в области уникальных месторождений и рудопроявлений, то можно подсчитать число месторождений на материках до глубины 1 км. На основании зависимости между глобальными запасами и кларком элемента ( $10^{12}C_K$ ), запасами в среднем месторождении и кларком ( $10^7C_K$ ) и соотношением числа месторождений в соседних классах крупности

$$n10^9 + nq10^8 + nq^210^7 + nq^310^6 + nq^410^5 = 10^{12}.$$

При  $q=5$  получим  $n=500$ , число достаточно большое, которое позволяет предполагать наличие в литосфере суперуникальных ( $10^{10}C_K$ ) возможно и феноменальных ( $10^{11}C_K$ ) по запасам месторождений с бедными рудами. При сохранении  $q=5$  в области более крупных месторождений можно подсчитать, сколько в среднем месторождений различных масштабов должно приходиться на  $10^6$  км<sup>2</sup>.

Приведем эти данные для одного элемента:

Месторождение	$Q, т$	$N$ на $10^6 км^2$	Относительные суммарные запасы
Суперуникальное	$10^{10} C_k$	0,33	51
Уникальное	$10^9 C_k$	1,65	26
Крупное	$10^8 C_k$	8	12,5
Среднее	$10^7 C_k$	40	6
Мелкое	$10^6 C_k$	200	3
Рудопроявление	$10^5 C_k$	1000	1,5
		1250	100

Если считать, что каждое месторождение, как правило, комплексное, т. е. руды содержат в промышленных концентрациях до 5 элементов, то для 50 рудных элементов общее число месторождений должно быть на порядок выше, т. е. около  $10^4$  на  $10^6 км^2$ . Таким образом, на территории  $10^6 км^2$  до глубины 1 км можно ожидать выявления до 10 уникальных месторождений и соответствующего числа крупных, средних и мелких месторождений. Естественно, что речь должна идти о месторождениях, формированию которых благоприятствует геологическая обстановка территории, что в самом первом приближении связано с уровнем эрозионного среза региональных структур и другими факторами.

Анализируя распределение месторождений на территории США, как наиболее хорошо опосредованной и разведанной, Ф. Блондель [5] получил следующие данные. Вся площадь США разделена сеткой параллелей и меридианов на квадраты различной площади без какого-либо учета геологического строения территории. Добыча руд ведется соответственно на 100% квадратов площадью в  $10^6 км^2$ ; 95% квадратов площадью  $10^5 км^2$ ; 50% квадратов  $10^4 км^2$  и 0,1% квадратов площадью  $10 км^2$ .

Отмечая общеизвестную связь между геологическим строением и распределением месторождений, Ф. Блондель тем не менее считает, что в глобальном масштабе возможности страны по полезным ископаемым могут оцениваться независимо от геологической карты. Она помогает лишь объяснить, почему при данном статистическом распределении месторождений некоторые участки территории богаты, а другие бедны месторождениями.

Используя методы математической статистики, М. Алле [5] сделал попытку оценить потенциальную рудоносность территории Алжирской Сахары площадью  $10^6 км^2$ . В качестве исходных М. Алле взял статистические данные о распределении рудных индикаций и месторождений по различным территориям. По его данным на  $10^6 км^2$  площади в Катанге (Конго) приходится 11500 рудных индикаций, в Северном Алжире 10 000, во Франции 750—1500, в среднем по многим районам 2000—3000. М. Алле приводит данные по месторождениям с ежегодными затратами на добычу  $10^6—10^9$  долл.:

Территория	$S$ $10^6, км^2$	$N$	$\frac{N}{S}$
Франция			
1950	0,55	13	23,6
1913	0,53	8	15,2
Сев. Африка	0,78	13	16,5
Запад США	1,20	45	37,5
США в целом (без Аляски)	7,7	145	18,8
Весь мир (изученные страны)	70,6	340	0,6

Так как между запасами и добычей существует достаточно тесная корреляционная связь, а нижняя граница затрат на добычу принята  $10^6$  долл., в подсчет, вероятно, вошли частично средние, все крупные и уникальные месторождения по классификации В. И. Красникова. Тогда средняя плотность известных месторождений на  $10^6$  км<sup>2</sup> даже для наиболее хорошо изученных западных штатов США оказывается на порядок более низкой, чем подсчитанная выше по зависимости между глобальными запасами и кларком, запасами месторождений и кларком.

При дальнейших статистических подсчетах М. Алле учитывает такие параметры, как распределение месторождений по масштабам запасов (стоимости руды), вероятность выявления при определенных затратах на поисковоразведочные работы на первом этапе — рудных индикаций, на втором этапе — перспективных рудопроявлений среди рудных индикаций и на третьем этапе — месторождений среди рудопроявлений; вероятность рентабельной разработки выявленных месторождений с учетом географических и транспортных условий Сахары. И в результате приходит к следующим выводам.

1. Из тысяч рудных индикаций на территории Алжирской Сахары будет в конечном счете выделено 20—30 месторождений, из которых только 4—5 окажутся рентабельными.

2. Из общих запасов выделенных месторождений 35—40% будет сосредоточено в одном месторождении и 65—80% в 25% от общего числа месторождений.

3. Поиски будут рентабельны только на всей территории, поскольку ограничение площади поисков (особенно их первого этапа) даже  $0,5 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> заведомо уменьшает вероятность обнаружения рентабельного месторождения.

Оценки М. Алле, по нашему мнению, занижены, даже если поиски ориентированы лишь на неглубоко залегающие рудные месторождения.

**Связь между кларками элементов в горных породах и их запасами в осадочных месторождениях.** Суммарное количество любого химического элемента в осадочном чехле литосферы и океане должно соответствовать его количеству в исходных кристаллических породах и вулканогенном материале

$$Q_{к.п} \cdot C_{к.п} + Q_{к.м} \cdot C_{к.м} + Q_{в.п} \cdot C_{в.п} = Q_{о.п} \cdot C_{о.п} + Q_{о.м} \cdot C_{о.м} + Q_{г} \cdot C_{г}, \quad (5)$$

где  $Q_{к.п}$  — вес эродированных кристаллических пород литосферы;  $Q_{к.м}$  — запасы руд эродированных месторождений кристаллического фундамента;  $Q_{в.п}$  — вес вулканогенного материала, поступившего в осадочную толщу;  $Q_{о.п}$  — вес осадочных пород литосферы;  $Q_{о.м}$  — запасы руд осадочных месторождений;  $Q_{г}$  — вес растворенных солей в гидросфере;  $C_{к.п}$ ,  $C_{в.п}$ ,  $C_{о.п}$ ,  $C_{г}$  — кларк элемента соответственно в кристаллических, вулканогенных, осадочных породах и сухом остатке гидросферы;  $C_{к.м}$  и  $C_{о.м}$  — средние содержания элемента соответственно в месторождениях кристаллического фундамента и осадочной толщи.

После некоторых преобразований получаем

$$C_{к.п} - aC_{о.п} = \frac{(M_{о.м} + M_{г}) - (M_{к.м} + M_{в.п})}{Q_{к.п}}, \quad (6)$$

где  $a = \frac{Q_{о.п}}{Q_{к.п}}$ ;  $M_{о.м}$ ,  $M_{к.м}$ ,  $M_{г}$  и  $M_{в.п}$  — соответственно суммарное количество элемента, сосредоточенное в месторождениях осадочной толщи и

кристаллического фундамента, в гидросфере и вулканогенном материале Или иначе

$$\frac{C_{к.п} - aC_{о.п}}{C_{к.п}} = \frac{(M_{о.м} + M_{г}) - (M_{к.м} + M_{в.п})}{M_{к.п}} \quad (7)$$

В левой части этого выражения стоит отношение изменения кларка элемента при переходе от кристаллических к осадочным породам, в правой части — изменение запасов элемента в осадочных месторождениях относительно постмагматических с учетом выноса элемента в гидросферу и привноса с вулканогенным материалом в долях от количества, находившегося в рассеянном виде в исходных кристаллических породах.

Рассмотрим порядок некоторых величин, входящих в выражение (7). Можно принять  $a = Q_{о.п} : Q_{к.п} = 0,95$ , так как при выветривании кристаллических пород не более 5% их массы переходит в растворимые соединения [15].

При  $Q_{г} = 0,05 Q_{к.п}$  и  $C_{г} : C_{к.п} < 0,01$  для подавляющего числа тяжелых металлов [13] можно принять  $M_{г} : M_{к.п} \leq 5 \cdot 10^{-4}$ . Примерно такого же порядка числом характеризуется доля запасов металлов в месторождениях от общих запасов в рассеянном состоянии, т. е. в первом приближении  $M_{к.м} : M_{к.п} \approx 10^{-4}$ . При этих условиях для большинства металлов выражение (7) можно упростить

$$\frac{C_{к.п} - 0,95 C_{о.п}}{C_{к.п}} = \frac{M_{о.м} - M_{в.п}}{M_{к.п}} \quad (8)$$

Следовательно, относительное различие в кларках осадочных и исходных кристаллических пород определяет вероятность нахождения осадочных месторождений (при  $C_{к.п} > aC_{о.п}$ ) или вулканогенного материала в осадочной толще (при  $C_{к.п} < aC_{о.п}$ ). Примерно к тем же выводам пришел и В. И. Попов [14], который предложил именовать отношение

$$\frac{C_{к.п} - C_{о.п}}{C_{к.п}} 100 = K_1 \quad (9)$$

коэффициентом геохимической вероятности образования осадочных месторождений.

За  $C_{к.п}$  — кларк элемента в исходных кристаллических породах — можно принять средневзвешенное смеси, состоящей из 2/3 гранитов и 1/3 базальтов [3]. За  $C_{о.п}$  — кларк элемента в осадочной толще — можно принять средневзвешенное смеси, состоящей на 80% из пелитовых пород (глины, сланцы), 15 псамитовых (песчаники) и 5% карбонатных (известняки) пород. Наиболее полная таблица кларков элементов в различных типах горных пород составлена К. К. Турекианом и К. Х. Велеполом [14]. Она использовалась В. И. Поповым и нами при расчетах. Как отмечено выше, кларки элементов, приводимые различными исследователями [3, 4, 14], могут сильно отличаться. Допустимым следует считать расхождение не более двухкратного. Большие расхождения свидетельствуют, по-видимому, о наличии грубых ошибок. Основной причиной неустойчивых значений кларков (особенно при низких абсолютных значениях) является скверное качество анализов. Так, например, обработка результатов анализа эталонной пробы гранитов G-1 различными методами в 35 лучших лабораториях мира показала [7], что среднеквадратичная межлабораторная ошибка для элементов со средними значе-

ниями кларков  $n 10^{-3}\%$ , как правило, равна  $\pm 25\%$ , иногда достигает  $\pm 60\%$ .

Приводим результаты расчета по формуле

$$K_i = \frac{C_{к.п} - 0,95C_{о.п}}{C_{к.п}} 100: \quad (10)$$

	Элементы	Группа элементов
+100 ÷ 50	Ta, Ga Na In? Sc Nb Ge?	I
+50 ÷ 20	Ti P Co? Sr Y Ba Ce* V	
+20 ÷ 10	Ca Si Mg Al Cu Fe Mn K	II
±10	Th? Ag Hf Zr O Tl? Ni Zn	
-10 ÷ 20	Cr? Pb? W	III
-20 ÷ 50	F Pb U? Cd? Cs?	
-50 ÷ 100	Be Mo L:? La	IV
-100 ÷ 200	Sn?	
-200 ÷ 500	Hg I Sb As	
-500 ÷ 1000	S? Se B? Cl	
-1000	Br C	

Элементы в строке расположены в порядке убывания значений  $K_i$ .

Вопросительным знаком отмечены элементы с сомнительными значениями  $C_{к.п}$  и  $C_{о.п}$  (по данным [3, 4, 14] различаются на полпорядка — порядок и реже более) и с непроконтролируемыми кларками.

Элементы, извлекаемые в настоящее время преимущественно из осадочных месторождений, отмечены полужирным шрифтом.

Значения  $C_{к.п}$  и  $C_{о.п}$  по кислороду и углероду заимствованы из «Инструкции» [6], так как в таблицах К. К. Турекиана и К. Х. Ведеполя данные по этим элементам отсутствуют.

В зависимости от величины и знака  $K_i$  все элементы разделены на 4 группы.

**Группа I.** В эту группу попадают 34 элемента (включая 11 редкоземельных элементов). Их  $K_i > +10\%$  (до 80%) свидетельствует о дефиците этих элементов в осадочной толще, который должен компенсироваться либо наличием крупных месторождений осадочного генезиса, либо переходом существенного количества элементов в гидросферу. Действительно, для 13 элементов группы (Na, Ti, P, Sr, V, Ca, Si, Mg, Al, Cu, Fe, Mn, K) характерны именно крупные осадочные месторождения. Несколько необычно положение рассеянных элементов (Ta, Ga, In, Se, Nb, Ge), для которых значения  $K_i$  оказались максимальными, близкими к  $K_i$  для Na. Чем компенсируется дефицит этих элементов в осадочной толще, пока неясно. Сходно поведение Co, Y, Ba, C. Возможно, некоторые из элементов попали в I группу по ошибке определения кларков  $C_{к.п}$  и  $C_{о.п}$ . Однако вряд ли в этом главная причина. Целесообразно параллельно с уточнением кларков проводить поиски месторождений этих элементов в осадочных формациях. Особый интерес представляют Co, In, Ba, Ga, Ta, которые до сих пор в основном извлекались из эндогенных месторождений.

**Группа II.** В эту группу попадает 8 элементов, значения которых не выходят за пределы  $\pm 10\%$ . Центральное место занимает кислород, который на 90% [16] по объему слагает как кристаллические, так и осадочные породы. Это позволяет использовать метод кларков для оценки

\* Остальные редкоземельные элементы, кроме La, попадающего в группу III, и Rm, не обнаруженного в литосфере, ведут себя аналогично Ce.

баланса при миграции химических элементов. Для элементов этой группы в равной мере характерны осадочные и эндогенные месторождения.

*Группа III.* В группе 13 элементов с  $K_1$  от  $-0\%$  до  $-200\%$ . Для большинства элементов этой группы наиболее характерны эндогенные месторождения. Повышенный кларк W, F, Be, Mo, Li, Sn в осадочных толщах в какой-то мере может быть обусловлен эрозией эндогенных месторождений, формирующихся, главным образом, в апикальных приконтактовых частях интрузивных массивов. Возможен привнос этих элементов постмагматическими растворами в бассейны седиментации.

*Группа IV.* Сюда относится 10 элементов с  $K_1 < -200$ . Весьма существенное накопление элементов этой группы в осадочной толще ( $C_{o.п} \geq 3C_{к.п}$ ) можно объяснить только привносом с вулканогенным материалом столь типичных для вулканических эманаций элементов. Роль этих элементов вновь в типично осадочных месторождениях увеличивается с ростом абсолютных значений  $K_1$ . Источником элементов, по-видимому, является мантия, в процессе выплавления и дегазации которой продукты дифференциации (гранитный слой и вулканические эманации) обогащаются многими элементами, входящими в группы III и особенно IV. Интересно, что более молодые граниты, которые можно рассматривать как образования, участвовавшие в нескольких геохимических циклах; по данным К. Ранкама [16], обогащены именно этими элементами, характерными для кислых магм.

Как указывает В. И. Попов [14], кларковый метод можно использовать не только для оценки вероятности обнаружения осадочных месторождений в осадочной толще в целом, но и в отдельных геологических регионах, а также в отдельных типах осадочных формаций. В этих случаях, естественно, должны фигурировать не мировые, а региональные и районные кларки элементов в достаточно дробно расчлененных типах горных пород. Если скоро в пределах региона можно выделить замкнутый бассейн (геосинклинального или платформенного типа), где накапливаются осадочные отложения за счет эрозии обрамляющей суши, сложенной кристаллическими породами, зная средний химический состав эродируемого обрамления и достаточно дробную характеристику состава и относительных мощностей осадочных образований, можно, используя кларковый метод, оценить как общие перспективы исследуемой площади, так и участков, и горизонтов внутри осадочной толщи. Пониженные значения  $K_1$  в целом по осадочной толще или в любом из ее горизонтов свидетельствует о возможном нахождении в пределах бассейна осадочных месторождений данного элемента. Повышенные значения  $K_1$  этих же элементов в определенных горизонтах или участках свидетельствуют о перспективности именно этих горизонтов. Если построить карты  $K_1$  на фациально-палеогеографической основе, то направление поисков следует ориентировать в сторону возрастания  $K_1$ .

### Выводы

1. Между количеством элемента в рассеянном и концентрированном состоянии в земной коре существует устойчивая корреляционная связь. В среднем в месторождениях сконцентрировано всего  $n \cdot 10^{-2} \%$  от массы элемента, находящегося в литосфере в рассеянном состоянии. Между запасами элемента в месторождениях и его кларком в литосфере существует зависимость

$$Q = 10^n C_{к.} \quad (11)$$

При  $n=6, 7, 8$  значения  $Q$  соответствуют мелкому, среднему и крупному месторождению, при  $n=10$  — суммарным запасам элемента в известных месторождениях, при  $n=12$  — глобальным запасам до глубины 1 км.

2. Низкие суммарные запасы таких, например, элементов, как Sr, Ti, F, Zr, Ce, Li, Co, Mg, Mn, Be в известных месторождениях по сравнению с оцениваемыми по зависимости (11) при  $n=10$  могут свидетельствовать о существовании неизвестных еще крупных месторождений этих элементов, возможно новых генетических типов.

3. Средняя плотность месторождений на единицу площади материков до глубины 1 км:  $10^4$  рудных индикаций всех масштабов на  $10^6$  км<sup>2</sup>. Среди них только около 300 средних, крупных и уникальных месторождений.

4. По соотношению кларков элемента в кристаллических  $C_{к.п}$  и осадочных  $C_{о.п}$  породах

$$K_i = \frac{C_{к.п} - 0,95C_{о.п}}{C_{к.п}} \quad (12)$$

можно судить о перспективности генетических типов месторождений в глобальном масштабе. Для элементов с  $K_i > 0$  наиболее перспективны типично осадочные месторождения, с  $K_i < 0$  — эндогенные и вулканогенно-осадочные месторождения, судя по параметру  $K_i$  для таких элементов, как Ta, Ga, In, Sc, Nb, Co, Y, Ba, Ce, Ge наиболее перспективными должны быть осадочные месторождения.

5. Кларковый метод оценки прогнозных запасов можно использовать не только в глобальном масштабе, но и в отдельных крупных регионах, что требует, однако, более детального изучения кларков широкого круга элементов во всех типах изверженных и осадочных пород района.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белякова Л. Г., Мареева З. И. Краткие сведения о сырьевых ресурсах и масштабах производства редких и рассеянных элементов, бора и фтора в капиталистических странах. МГИОН, Геологоразведочный трест № 1, 1960.
2. Быховер Н. А. Минеральные ресурсы капиталистических стран. Госгеолтехиздат, 1960.
3. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. АН СССР, 1956.
4. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия, 1962, № 7.
5. Дралюк Л. Б. Математическая статистика в геологоразведочном деле. Тр. ВИТРА, 1964, вып. 44.
6. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Недра, 1965.
7. Кабанова Е. С. Химический состав стандартных образцов гранита ( $G-1$ ) и диабазы ( $W-1$ ) и методы их определения. В сб.: Итоги науки. Геохимия, минералогия, петрография, 1963—1964 гг. ВИНТИ, 1965.
8. Красников В. И. Рациональные поиски рудных месторождений. Госгеолтехиздат, 1959.
9. Минеральные ресурсы капиталистических стран (литий, бериллий, бор, фтор, магний). Госгеолтехиздат, 1959.
10. Минеральные ресурсы капиталистических стран. Ч. I, Госгеолтехиздат, 1963.
11. Минеральные ресурсы капиталистических стран. Ч. II (благородные металлы, уран, редкие земли и рассеянные элементы). Недра, 1964.
12. Овчинников Л. Н. Прогнозная оценка мировых запасов металлов в месторождениях суши. ДАН СССР, 1971, т. 196, № 3.
13. Перельман А. И. Геохимия эпигенетических процессов. Недра, 1968.

14. Попов В. И. Использование кларков для оценки баланса химических элементов и вероятности нахождения осадочных месторождений. В сб.: Геохимия, петрография и минералогия осадочных образований. АН СССР, 1963.
15. Сауков А. А. Геохимия. Наука, 1966.
16. Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Недра, 1971.
17. Сафронов Д. Н. Пример распределения рудных запасов в полиметаллических месторождениях. Зап. ЛГИ, 1966, т. I, вып. 2.
18. Сафронов Н. И. Основные термодинамические закономерности при изучении энергии рудообразования. Зап. ЛГИ, 1966, т. I, вып. 2.
19. Сафронов Н. И., Сафронов Д. Н. О вероятных закономерностях распределения запасов металлов в земной коре. Тр. ВИТРа, 1964, вып. 44.
20. Семенов А. И., Смыслов А. А. Геохимические критерии связи промышленного оруденения с горными породами и проблема источников оруденения ЗВМО, 1967, т. 96, вып. 5.
21. Соловов А. П. Поискные сети и вероятные резервы оруденения в полукрытых районах. В сб.: Глубинные поиски рудных месторождений. Вып. 2, ВИМС, 1968.
22. Mc Kelve y V. E. Amer. J. Sci., 1960, v. 258A.