

Член-корреспондент АН СССР Л. Н. ОВЧИННИКОВ

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА МИРОВЫХ ЗАПАСОВ МЕТАЛЛОВ В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СУШИ

Было показано (^{1, 2}), что существует прямая связь между средним содержанием металла в земной коре и его суммарными мировыми запасами в рудных месторождениях (рис. 1). Соотношение между этими двумя величинами, для нескольких десятков металлов, запасы которых оценены в мировых сводках (^{3, 4}), а также для бора, серы, фосфора и фтора, выражаются формулой

$$\Sigma_{\text{зап}} = KA, \quad (1)$$

где K — среднее содержание в земной коре по А. П. Виноградову (⁵), A — средний коэффициент пропорциональности, равный $3,2 \cdot 10^{10}$ при точности 1,08 и стандартном отклонении 3,07. Отсюда

$$\Sigma_{\text{зап}} = K \cdot (3,2 \pm 1,08) \pm 6,13 \cdot 10^{10} \text{ т.} \quad (2)$$

Колебания величины A (табл. 1) находятся в согласии с законом нормального распределения. Точность определения среднего, стандартное отклонение и толерантные пределы довольно велики, но если вдуматься о соотношении каких величин идет речь, то должна порадовать эта закономерная связь между средним содержанием в горных породах и запасами металла в месторождениях, сохраняющаяся в таком широком диапазоне концентраций, который, с одной стороны, включает железо, алюминий, фосфор, калий, присутствующие в заметных количествах в земной коре и образующие крупные месторождения с суммарными запасами в миллиарды тонн, а с другой — рассеянные благородные и редкие металлы с содержаниями в горных породах, составляющими миллионные и десятимиллионные доли процента и запасами в месторождениях, исчисляемыми всего тысячами и сотнями тонн.

Подмеченная закономерность, указывающая, что возможности перехода металлов от рассеяния к концентрации не беспредельны, позволяет с достаточной степенью достоверности оценить потенциальные запасы промышленных металлов в земной коре, которые в благоприятной для рудообразования зоне глубиной до 5—6 км (⁶) могут быть определены соотношением

$$\Sigma_{\text{зап}} = K \cdot 10^{11} \text{ т.} \quad (3)$$

Это соотношение основано на следующем: по формуле (2) среднее значение известных запасов равно $3,2 \cdot 10^{10} K$, глубина разведки и поисков не превышает 1,5—2 км, т. е. одной трети возможной глубины благоприятной зоны.

Соблюдение соотношения величин формулы (2) требует значительного различия в степени концентрирования разных по распространенности металлов. Действительно, коэффициент концентрации, определяемый как отношение минимального промышленного содержания в месторождениях к среднему содержанию металла в земной коре, колеблется от 1, 2 и 5 для калия, алюминия и железа соответственно до нескольких тысяч для подвижных сурьмы и ртути (рис. 2). Однако для большинства металлов (для 30 из 36) этот коэффициент концентрации лежит в пределах $n \cdot 10^1$ — $n \cdot 10^2$ (табл. 1) и его колебания согласуются с логнормальным законом распределения. Точность среднего, стандартное отклонение и соответственно толе-

рантные пределы, видны из формулы

$$C_{\min} = K \cdot (164 \pm 16,3) \pm 79. \quad (4)$$

Разброс точек на рис. 1, т. е. колебания частных значений коэффициента пропорциональности, помимо возможных ошибок в определении среднего содержания металла в земной коре, которые мы пока не можем оценить, зависит: а) от разной степени разведанности месторождений отдельных металлов; б) от концентрирования некоторых металлов не только во взятых на учет промышленных типах месторождений; в) от различия порогов минимального промышленного содержания; г) от разной подвижности при миграции и концентрировании. Так, например, по сравнению со средним уровнем месторождения цезия, тантала, бериллия, тория явно недоразведаны. В сводках запасов фигурирует алюминий, сосредоточенный только в бокситах, а фтор — только в месторождениях флюорита, тогда как несомненно, что это только часть того количества этих элементов, которое вынесено теми же рудообразующими процессами из первичных образований земной коры и мантии.

Таблица 1

Соотношения между средними содержаниями металлов в земной коре, их запасами и минимальными промышленными содержаниями в рудных месторождениях

| Металл | Среднее содержание в земной коре (в %) по (*) | Мировые запасы (в млн. т) | $A \cdot 10^{10}$ | Минимальное промышленное содержание (в %) | Коэффициент концентрации |
|--------|---|---------------------------|-------------------|---|--------------------------|
| Fe | 4,65 | $3,75 \cdot 10^6$ | 8,0 | 22,0 | 5 * |
| Mn | 0,4 | $7,52 \cdot 10^3$ | 7,5 | 5,0 | 50 |
| Cr | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | 445,5 | 5,4 | 7,0 | 843 |
| Ni | $5,8 \cdot 10^{-3}$ | 54,4 | 0,9 | 0,1 | 17 |
| Co | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | 3,24 | 0,2 | 0,02 | 11 |
| W | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | 1,36 | 1,0 | 0,06 | 444 |
| Mo | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | 5,46 | 5,0 | 0,005 | 46 |
| Al | 8,05 | $8,14 \cdot 10^3$ | 0,1 | 17,0 | 2 * |
| Cu | $4,7 \cdot 10^{-3}$ | 342 | 7,2 | 0,2 | 43 |
| Pb | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 107 | 7,0 | 0,3 | 188 |
| Zn | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | 201 | 2,4 | 0,7 | 84 |
| Sn | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | 17 | 6,8 | 0,1 | 400 |
| Sb | $5 \cdot 10^{-5}$ | 2,1 | 4,0 | 0,2 | 4000 * |
| Hg | $8,3 \cdot 10^{-6}$ | 0,80 | 9,6 | 0,05 | 6024 * |
| K | 2,5 | $5,5 \cdot 10^4$ | 2,2 | 2,5 | 1 |
| P | $9,3 \cdot 10^{-2}$ | $6,7 \cdot 10^3$ | 7,2 | 1,3 | 44 |
| S | $3,7 \cdot 10^{-2}$ | $2,0 \cdot 10^3$ | 5,4 | 7,0 | 189 |
| Ba | $6,5 \cdot 10^{-2}$ | 111 | 0,2 | 5,9 | 91 |
| F | $6,6 \cdot 10^{-2}$ | 112,6 | 0,2 | 6,9 | 105 |
| Ti | 0,45 | 486 | 0,1 | 7,0 | 16 |
| B | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 54 | 4,5 | 0,16 | 133 |
| Au | $4,3 \cdot 10^{-7}$ | 0,135 | $31,4 *$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | 235 |
| Be | $3,8 \cdot 10^{-4}$ | 0,243 | 0,06 | 0,007 | 18 |
| Li | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | 8,25 | 0,3 | 0,33 | 103 |
| Nb | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | 18 | 0,9 | 0,14 | 70 |
| Ta | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | 0,52 | 0,2 | $6,5 \cdot 10^{-3}$ | 32 |
| Zr | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | 36,9 | 0,2 | 2,0 | 118 |
| U | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | 2,65 | 1,1 | 0,02 | 80 |
| Pt | $5 \cdot 10^{-7}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | 0,2 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 400 |
| Pd | $1,3 \cdot 10^{-6}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | 0,06 * | $2 \cdot 10^{-4}$ | 154 |
| Re | $7 \cdot 10^{-3}$ | $14 \cdot 10^{-4}$ | 2,0 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 714 |
| Th | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 1,12 | 0,09 * | 0,09 | 69 |
| Cs | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | 0,23 | 0,06 * | 0,1 | 270 |
| Ag | $7 \cdot 10^{-6}$ | 0,46 | 6,6 | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 228 |
| V | $9 \cdot 10^{-3}$ | 22,3 | 0,25 | 0,7 | 77 |
| Bi | $9 \cdot 10^{-7}$ | 0,025 | 2,8 | $1 \cdot 10^{-3}$ | 1100 * |

Среднее по графе 3 для 31 металла $(3,2 \pm 1,08) \pm 6,13 \cdot 10^{-10}$

Среднее по графе 5 для 30 металлов $(164 \pm 16,3) \pm 79$

Примечания. 1. Данные по мировым запасам взяты из опубликованных материалов (*, *). 2. Исключения отмечены звездочкой.

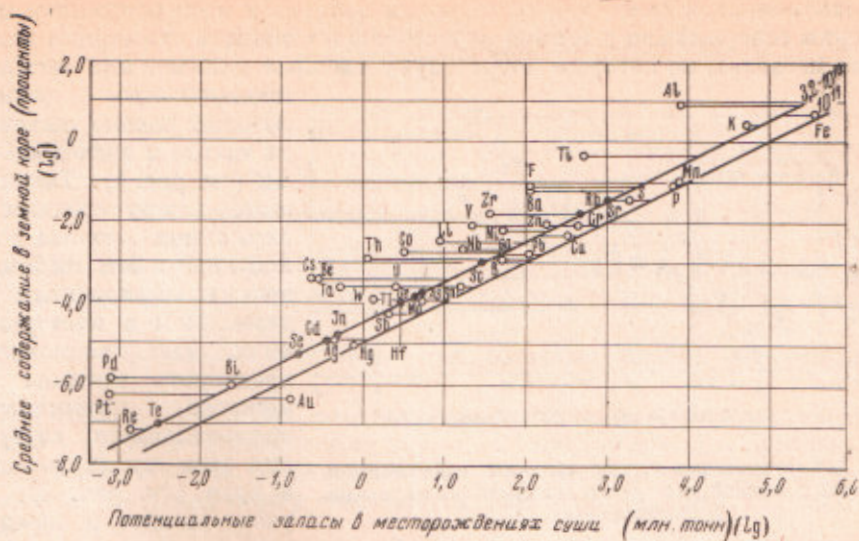


Рис. 1. Соотношение между средним содержанием металла в земной коре и его запасами в месторождениях суши. Черными точками на линии $3,2 \cdot 10^{10}$ показаны вероятные суммарные запасы соответствующих металлов, по которым нет данных в мировых сводках. Линия 10^{14} характеризует потенциальные запасы материков на всю глубину благоприятной для рудообразования зоны (5–6 км)

Обращает на себя внимание также и то, что на рис. 1 (так же как и на рис. 3) наиболее удалены от средней линии пропорциональности в сторону более высоких средних содержаний в земной коре элементы, имеющие большое петрогенетическое значение и относительно равномерно распределенные по всем глубинам земной коры (V, Ti, Al, Zr, F, Ba и др.). Прочие элементы в основной своей массе более рассеяны, преимущественно вынесены в верхние слои земной коры и концентрируются в поздних, более низкотемпературных месторождениях.

Высокий коэффициент пропорциональности у золота (31,4 против среднего 3,2) связан с особенно низким минимальным промышленным содержанием, принятым для этого специфического металла, имеющего наибольший спрос, что привело к вовлечению в эксплуатацию большого числа золоторудных месторождений с относительно малыми содержаниями металла. Вообще минимальное промышленное содержание того или иного металла в том или ином типе месторождений в большей степени определяется экономикой, чем геологическими факторами. Регулирующим является баланс цен, что способствует еще более строгому проявлению установленной закономерности.

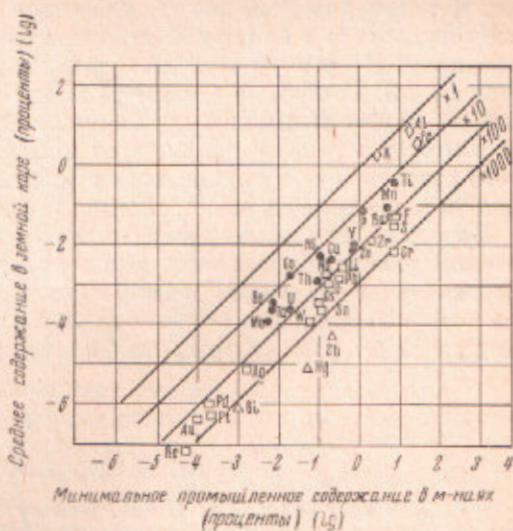


Рис. 2. Соотношение между средним содержанием металла в земной коре и его минимальным промышленным содержанием в месторождениях

Закономерная связь между запасами металла в месторождениях и его средним содержанием в земной коре позволяет оценить суммарные запасы и тех металлов, по которым отсутствуют сводные данные, или металлов,



Рис. 3. Соотношение между средним содержанием металла в земной коре и его суммарными запасами в месторождениях США

промышленное значение которых начало выясняться только в последнее время (см. рис. 1). Такая же связь между средним содержанием металла в земной коре и его минимальным промышленным содержанием в месторождениях дает возможность предвидеть пределы возможного минимального промышленного содержания этих новых металлов в руде (см. рис. 2). Без учета ошибок в определении среднего содержания

в земной коре можно путем сопоставления графиков рис. 1 и 2 предсказать, за счет чего возможно дальнейшее увеличение запасов того или иного металла. Заметный прирост запасов при уже достигнутом действительно минимальном промышленном содержании следует ожидать для бериллия, тантала и некоторых других металлов. Для вольфрама, циркония, висмута, платины, тория и других есть возможность прироста запасов не только путем открытия новых месторождений, но и за счет некоторого снижения порога минимального промышленного содержания.

Установленная закономерность может быть использована для прогнозной оценки запасов металлов в месторождениях не только земной коры в целом, но и ее отдельных, достаточно крупных и представительных участков. К таким участкам могут относиться не только материка, но и некоторые государства с обширной территорией и разнообразным геологическим строением. На это обратил внимание еще Мак-Кельви (¹), оценивший по запасам США мировые запасы ряда металлов. Как видно на рис. 3, зависимость между средним содержанием металла в земной коре и его запасами в месторождениях сохраняется и для территории США, составляющей всего лишь около 7% суши, хотя отклонения от среднего и соответственно ошибки в прогнозе здесь естественно значительно большие.

Вероятно, не следует переоценивать практического значения описанной закономерности и сделанных выше выводов. Здесь подчеркнута главным образом яркая тенденция прямой связи распространенности элемента в земной коре с масштабами его накопления в рудных месторождениях, раскрывающая некоторые стороны механизма формирования последних.

Поступило
13 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ V. E. McKelvey, Am. J. Sci., Bradley vol., 258A, (1960). ² Л. Н. Овчинников, Геология рудных месторождений, № 5 (1967). ³ Mineral Resource Appraisals, Geol. Surv. Profess. Paper, № 600A (1968). ⁴ Н. А. Быховер, Экономика минерального сырья, 1967, 1969. ⁵ А. П. Виноградов, Геохимия, № 7 (1962).