

УДК 553.061.6

ГЕОХИМИЯ

В. С. ГОЛУБЕВ, Е. Ф. ПОШЕХОНОВ, Г. И. РОССМАН

О ДЛИТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО РУДООБРАЗУЮЩЕГО ПРОЦЕССА НА ПОДВИЖНОМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ БАРЬЕРЕ

(Представлено академиком В. И. Смирновым 5 III 1973)

В настоящей работе рассмотрена длительность рудообразования в предположении непрерывного процесса формирования рудного ролла на подвижном восстановительном барьере пластового потока кислородсодержащих вод, которые содержат первичную концентрацию урана $C_0 = n \cdot 10^{-3}$ г/л и образуют современную рудную залежь с концентрацией $q_{\max} = 0,5\%$.

Восстановительные геохимические барьеры, возникающие в зоне гипергенеза при смене окислительных условий на восстановительные, играют существенную роль в концентрации ряда элементов с переменной валентностью (¹). В частности, формирование экзогенных эпигенетических месторождений происходит при инфильтрации кислородных подземных вод, которые содержат рудные компоненты (молибден, уран, селен и др.), в пластах горных пород, содержащих минералы-восстановители и органическое вещество. В результате окисления минералов и органического вещества концентрация растворенного кислорода уменьшается, и в водах формируется восстановительный геохимический барьер, на котором происходит восстановление рудных компонентов в растворе с последующим выпадением в осадок и формированием оруденения. Характерная особенность рассматриваемого геохимического барьера заключается в том, что он перемещается вместе с фильтрующимися водами.

Это существенно изменяет закономерности динамики процесса по сравнению с рудообразованием на неподвижном барьере (^{2, 3, 4}).

Динамика эпигенетического рудообразования на подвижном восстановительном барьере обсуждалась рядом авторов (⁴⁻⁶) для вариантов стационарного и нестационарного процесса.

Согласно (^{2, 4}), распределение концентрации рудного компонента в мешковой (нерасчлененной и наиболее богатой) части рудной залежи по направлению фильтрации раствора (ось x) характеризуется в любой момент времени t следующей зависимостью:

$$q = k \left(C_0 + \frac{kC_H}{u} x_0 \right) \left(t - \frac{x}{u} \right) e^{-\frac{k}{u}(x-x_0)}, \quad (1)$$

где x_0 — координата восстановительного барьера (⁴), u — действительная скорость фильтрации, C_0 — концентрация рудного компонента в окисленной форме в исходном растворе, поступающем в область рудоотложения при $t=0$, C_H — растворимость рудного компонента в восстановленной форме, k — константа скорости процесса рудоотложения. Все концентрации выражаются в граммах на единицу объема породы. Распределение концентрации компонента в окисленной форме в растворе дается выражением (^{2, 4})

$$C = \left(C_0 + \frac{kC_H}{u} x_0 \right) e^{-\frac{k}{u}(x-x_0)}. \quad (2)$$

Логарифмируя (1) и учитывая (2), найдем:

$$\ln q = \ln \left[kC_{\max} \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] - \frac{k}{u}(x-x_0), \quad (3)$$

где $C_{\max} = C_0 + \frac{kC_n}{u}x_0$ — максимальная концентрация компонента в растворе на восстановительном барьере в момент t . При $t=T$, где T — длительность эпигенетического процесса, выражение (3) характеризует современное распределение по x рудного компонента. Так как скорость движения восстановительного барьера существенно меньше u (^{2, 4}), то линейные координаты оруденения $x \ll ut (uT)$. Совмещая начало координат с точкой максимальной концентрации рудного компонента (т. е. осуществляя в (3) замену независимой переменной $x' = x - x_0$ и опуская индекс штрих), получим из (3)

$$\ln q = \ln kC_{\max}T - \frac{k}{u}x. \quad (4)$$

Концентрационный профиль рудного компонента спрямляется в полулогарифмических координатах $(\ln q, x)$, а градиент логарифма концентрации из полученной прямой линии определяется в соответствии с (4) следующим образом:

$$\lambda = 2,303 \frac{\lg kC_{\max}T - \lg q}{x} = \frac{k}{u}. \quad (5)$$

При неизменном масштабе построения графика $(\lg q, x)$ величина (λ) прямо пропорциональна тангенсу угла наклона прямой линии к оси x (⁷):

$$\lambda = \operatorname{tg} \alpha / 0,434\gamma, \quad (6)$$

где γ — принятый по оси ординат модуль десятичных логарифмов концентрации компонента, выраженный в линейной мере масштаба оси абсцисс.

Определяя по результатам полевых исследований скорость фильтрации и $\lambda (\operatorname{tg} \alpha)$, можно в соответствии с (5) найти константу скорости рудообразующего процесса. Длительность его определяется по формуле, следующей из (4):

$$\ln kC_{\max}T = \ln q_{\max}, \quad (7)$$

откуда

$$T = \frac{q_{\max}}{kC_{\max}} = \frac{(1-\kappa)q_{\max}}{\kappa kC'_{\max}}. \quad (8)$$

где $q_{\max}$ — максимальная концентрация рудного компонента (при $x=0$), κ — пористость вмещающих пород, $q'_{\max}$, $C'_{\max}$ — объемные концентрации рудного компонента. Множитель $\left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)$ служит для перехода от концентраций компонентов $q_{\max}$, $C_{\max}$, отнесенных к единице объема породы в целом, к концентрациям $q'_{\max}$, $C'_{\max}$, отнесенным соответственно к долям объема жидкой и твердой фаз в единице объема породы.

Следовательно, данные, необходимые для оценки длительности эпигенетического рудообразующего процесса, можно получить при изучении распределения концентрации компонента в оруденении с привлечением результатов гидрогеологических и гидрогеохимических исследований.

В качестве объекта исследования была выбрана рудная залежь роллообразной формы, расположенная на выклинивании зоны пластового окис-

ления. Общие черты таких залежей приводятся в ряде работ (^{8,9}). Было установлено, что зависимость логарифма средних концентраций по скважинам от ширины мешковой части залежи (т. е. зависимость $\ln q = f(x)$ в принятых выше обозначениях) в пределах контура балансовых руд близка к линейной. Градиент этой линейной зависимости оказался равным $\lambda = 0,014 \text{ м}^{-1}$. Рудовмещающий водоносный горизонт характеризуется следующими осредненными параметрами: $u = 5 \text{ м/год}$, $\kappa = 0,3$ (песчаные отложения). Объемный вес пород в воздушно-сухом состоянии $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$.

По данным геохимических и гидрогеохимических исследований (^{8,9}), $q_{\max} = 0,5\%$; $C'_{\max} = n \cdot 10^{-3} \text{ г/л}$ ($n < 5$). Подставляя эти значения с учетом размерностей в расчетные формулы (5), (8), мы нашли *

$$k = \lambda u = n \cdot 10^{-2} \text{ год}^{-1}; \quad T = n \cdot 10^{-5} \text{ лет.}$$

Длительность рудообразования на современном восстановительном барьере имеет тот же порядок, что и оцениваемая радиогеохимическими методами (¹⁰). Такое совпадение свидетельствует о том, что развитая в (^{2,4}) теория динамики эпигенетического рудообразования правильно отражает существенные закономерности рассматриваемого современного процесса.

Из полученных результатов можно сделать важное заключение: использование аналогичной методики применительно к рудообразующим палеопроцессам (¹¹) должно приводить к объективным оценкам длительности рудообразования.

Аналогичный подход может быть применен для определения ряда других величин, характеризующих генезис месторождений, в частности концентраций рудных элементов в минералообразующем растворе. Так, для рассматриваемого случая, полагая на основе радиогеохимических определений длительность формирования рудной залежи $n \cdot 10^5$ лет, по формуле (8) находим $C'_{\max} \cdot 10^{-3} \text{ г/л}$, что совпадает с наблюдаемой величиной. Если оруденение сформировано в прошлом, то порядок величины длительности его образования, необходимой для расчета концентраций рудных компонентов в растворе, может быть оценен на основе геологических исследований.

Если же считать, что фронт зоны пластового окисления наступал на уже сформированную рудную залежь с образованием переотложенных по пластовому потоку рудных роллов, то длительность формирования последних должна рассчитываться на основе другой модели.

Поступило
28 II 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. И. Перельман, Геохимия эпигенетических процессов. Зона гипергенеза, 1968.
- ² В. С. Голубев, А. А. Гарибянц, Гетерогенные процессы геохимической миграции, 1968.
- ³ В. С. Голубев, Геол. журн. СССР, 29, № 5 (1969).
- ⁴ В. С. Голубев, Динамика физико-химических и геохимических процессов, Автореф. докторской диссертации, М., 1970.
- ⁵ Е. Ф. Пошехонов, В сборн. Кинетика и динамика геохимических процессов, М., 1971.
- ⁶ А. И. Германов, А. А. Ярошевский, В сборн. Кинетика и динамика геохимических процессов, М., 1971.
- ⁷ А. П. Соловов, Геол. рудн. месторожд., № 3 (1966).
- ⁸ М. Ф. Каширцева, Методы изучения эпигенетических изменений в рыхлых осадочных породах, 1970.
- ⁹ Е. М. Шмариович, В сборн. Состояние и задачи советской литологии, 2, «Наука», 1970.
- ¹⁰ К. Е. Иванов, Р. Г. Кудряшова, В сборн. Вопросы прикладной радиогеологии, М., 1963.
- ¹¹ Е. Д. Астраханц, В. С. Голубев, Г. И. Россман, Зап. Всесоюз. мин. общ., 100, № 4 (1971).

* Рассматриваемая одномерная модель рудообразования не учитывает поперечной диффузии в слабопроницаемые породы, вмещающие рудоносный горизонт. Если поперечная диффузия имеет существенное значение, то найденная величина k является эффективной константой, учитывающей размывание концентрационного фронта за счет конечной скорости реакции восстановления урана и поперечной диффузии.