

Условие целесообразности обогащения при оптимальных показателях. Зная оптимальный уровень разделения, можно определить (по кривым контрастности руд) остальные технологические показатели обогащения и оценить целесообразность его проведения. Если учесть приближенное равенство  $\varepsilon_r = \varepsilon_g$ , то условие (8) можно записать в виде неравенства

$$(1 - \gamma_{\text{опт}}) > \frac{C_o}{C_T + C_r} + \frac{\alpha}{\beta_{\text{опт}}} (1 - \varepsilon_{\text{опт}}), \quad (13)$$

где  $(1 - \gamma)$  — выход хвостов;  $(1 - \varepsilon)$  — потери урана в хвостах радиометрического обогащения. Если при оптимальных технологических показателях неравенство (13) не удовлетворяется, то проведение радиометрического обогащения экономически нецелесообразно.

В том случае, когда цена или средняя стоимость урана в промышленности не установлены, можно определить вариант технологических показателей, соответствующий получению максимальной экономии на 1 т перерабатываемой исходной руды по сравнению с вариантом получения урана на данном предприятии без применения обогащения. При этом за среднюю стоимость урана принимается его себестоимость, получаемая при переработке без применения обогащения:

$$C = \frac{C_p + C_T + C_r}{\alpha \varepsilon_r}, \quad (14)$$

а оптимальный уровень разделения определяется уравнением

$$\beta_{\text{опт}} = \alpha \frac{C_T + C_r}{C_p + C_T + C_r}. \quad (15)$$

Выход хвостов, обеспечивающий целесообразность радиометрического обогащения, должен удовлетворять, как и раньше, неравенству (13), которое с учетом уравнения (15) может быть представлено в виде

$$(1 - \gamma_{\text{опт}}) > \frac{C_o}{C_T + C_r} + \left(1 + \frac{C_p}{C_T + C_r}\right) (1 - \varepsilon_{\text{опт}}). \quad (16)$$

Поступило в Редакцию 9/IX 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Д. Мальцев. «Атомная энергия», 8, 121 (1960).
2. Л. Ч. Пухальский. Теория контрастности урановых руд. М., Атомиздат, 1963.
3. P. Formery, V. Zeigler. Proc. of the Second Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, UNO, 1958, V. 3, p. 105.

УДК 622.7:553.495

## Оптимальные показатели радиометрического обогащения и условия целесообразности его проведения при логнормальном распределении объемных элементов руды по содержанию в них урана

Ю. В. Роцин

Во многих случаях логнормальный закон хорошо аппроксимирует кривые распределения объемных элементов руды по содержанию (в них полезного компонента для месторождений цветных, редких и благородных металлов. В частности, проверка логнормальной теории опробования [1] показала ее применимость ко многим урановым месторождениям Франции [2]. Поэтому рассмотрение показателей контрастности урановых руд и условий их радиометрического обогащения для случая логнормального распределения представляет определенный интерес.

Некоторые свойства логнормального распределения. Содержание  $x$  ( $0 < x < \infty$ ) считается логнормальной величиной, если  $\log x$  \* распределен нормально со средним значением  $\mu$  и дисперсией  $\sigma^2$ , т. е. если  $\log x = N(\mu, \sigma^2)$ .

Для описания всех свойств распределения логнормальной величины достаточно знать  $\mu$  и  $\sigma^2$  (о свойствах логнормального распределения см., например, [3—5]). В этом случае среднее значение  $\alpha$  и коэф-

фициент вариации содержания  $V$  определяются выражениями

$$\alpha = \exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right) = Me \exp \frac{\sigma^2}{2}; \quad (1)$$

$$V = (\exp \sigma^2 - 1)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $Me = x_{0.5}$  — медианное значение содержания в объемных элементах исходной руды. Поля руды, которая состоит из объемных элементов с содержанием, меньшим или равным  $x$ , определяется функцией распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx. \quad (3)$$

Введем нормированное содержание

$$z = \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

и обозначим  $T$  общий вес руды. Тогда вес объемных элементов с содержанием в интервале  $x_1 < x < x_2$

\* Для простоты изложения будем использовать  $\ln x$ .



$T(x_1, x_2)$ , среднее содержание  $\alpha(x_1, x_2)$  и количество металла  $Q(x_1, x_2)$  в этом же интервале определяются выражениями:

$$T(x_1, x_2) = T \int_{x_1}^{x_2} dF(x) = T [F(z_2) - F(z_1)]; \quad (5)$$

$$\alpha(x_1, x_2) = \frac{\int_{x_1}^{x_2} x dF(x)}{\int_{x_1}^{x_2} dF(x)} = \alpha \frac{F(z_2 - \sigma) - F(z_1 - \sigma)}{F(z_2) - F(z_1)}; \quad (6)$$

$$Q(x_1, x_2) = \alpha(x_1, x_2) T(x_1, x_2) = Q [F(z_2 - \sigma) - F(z_1 - \sigma)], \quad (7)$$

где  $Q = \alpha T$  — общее количество металла в руде;  $F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$  и  $F(z - \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \int_{-\infty}^{z-\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$  — функции распределения ве-

личины  $N(0, 1)$ , таблицы значений которых приведены в любом руководстве по математической статистике.

Выражение основных показателей сортировки через параметры распределения. Используя основные соотношения, определенные формулами (1)–(7), выразим показатели радиометрического обогащения руд через уровень сортировки  $\{\beta\}^* = x_p$ , где  $p$  — порядок квантили, определяемый соотношением  $p = F(x_p)$ , или нормированный уровень сортировки  $z_p$  [см. формулу (4)] и параметры логнормального распределения  $\mu$  и  $\sigma^2$ . Мы рассматриваем случай идеальных условий сортировки, т. е. считаем, что сортировка производится по истинным содержаниям полезного компонента в объемных элементах руды.

Положим, что в формуле (5)  $x_1 = x_p$  и  $x_2 = \infty$ . Тогда получим выход концентрата

$$\{\gamma\} = \frac{T(x_p, \infty)}{T} = 1 - F(z_p); \quad (8)$$

выход хвостов

$$\{\gamma_{хв}\} = \{1 - \gamma\} = F(z_p). \quad (9)$$

Содержание урана в концентрате и в хвостах получим, положив в формуле (6)  $x_1 = x_p$ ,  $x_2 = \infty$  и  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = x_p$  соответственно:

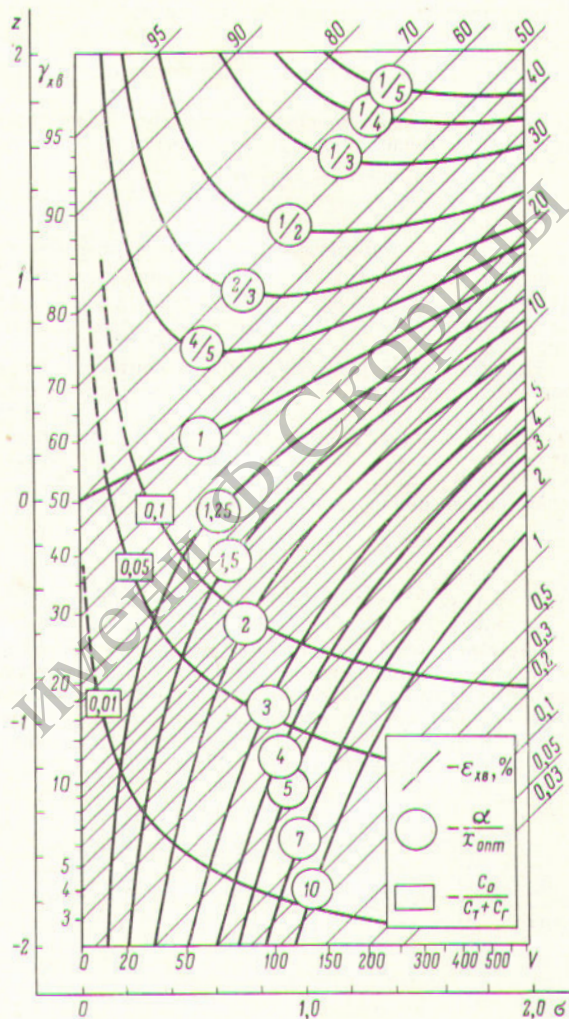
$$\{\beta_k\} = \alpha(x_p, \infty) = \alpha \frac{1 - F(z_p - \sigma)}{1 - F(z_p)}; \quad (10)$$

$$\{\beta_{хв}\} = \alpha(0, x_p) = \alpha \frac{F(z_p - \sigma)}{F(z_p)}. \quad (11)$$

Коэффициент обогащения концентрата

$$\{K\} = \frac{\alpha(x_p, \infty)}{\alpha} = \frac{1 - F(z_p - \sigma)}{1 - F(z_p)}. \quad (12)$$

\* В фигурные скобки заключены символы, использованные в книге Л. Ч. Пухальского [6].



Номограмма для определения оптимальных показателей обогащения при различных значениях  $\alpha/\alpha_{\text{опт}}$  и минимального выхода хвостов при различных значениях  $\frac{C_0}{C_T + C_R}$ , обеспечивающего целесообразность обогащения.

Степень извлечения урана в концентрат

$$\{\varepsilon\} = 1 - F(z_p - \sigma). \quad (13)$$

Доля урана, уходящего в хвосты,

$$\{\varepsilon_{хв}\} = 1 - \varepsilon = F(z_p - \sigma). \quad (14)$$

На рисунке приведена номограмма, связывающая величины  $z$  и  $\gamma_{хв} = F(z)$  с  $\sigma$  и  $V$  для различных значений  $\varepsilon_{хв} = F(z_p - \sigma)$ , являющихся индексами семейства параллельных линий на поле номограммы.

Определение показателей сортировки при оптимальном уровне разделения. Подставляя значение оптимального уровня разделения  $x_{\text{опт}}$  в формулу (4)



и учитывая соотношение (1), получаем

$$z_{\text{опт}} = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{x_{\text{опт}}}{\alpha} + \frac{\sigma^2}{2}, \quad (15)$$

где  $x_{\text{опт}}$ , как было показано в работе [7], не зависит от вида распределения и определяется равенством

$$x_{\text{опт}} = \frac{C_T + C_r}{\Pi \varepsilon_r} \text{ кг/м}, \quad (16)$$

где  $C_T$  и  $C_r$  — стоимости транспортировки и металлургической переработки 1 м обогащенной руды;  $\varepsilon_r$  — степень извлечения урана из обогащенной руды в химическом концентрате;  $\Pi$  — отпускная стоимость 1 кг урана.

На рисунке показано семейство кривых, построенных по уравнению (15) и связывающих величины  $z_{\text{опт}}$ ,  $F(z_{\text{опт}})$ ,  $\sigma$ ,  $V$  и  $F(z_{\text{опт}} - \sigma)$  при различных значениях  $\alpha/x_{\text{опт}}$ . Например, если  $\alpha/x_{\text{опт}} = 4$  и  $\sigma = 1$  (что соответствует  $V \approx 130\%$ ), то  $z_{\text{опт}} = -0,9$ ;  $F(z_{\text{опт}}) = 0,18$  и  $F(z_{\text{опт}} - \sigma) = 0,03$ . По формулам (8) — (14)

легко найти показатели оптимального режима сортировки:  $\gamma = 0,82$ ;  $\gamma_{\text{хв}} = 0,18$ ;  $\beta_K = \alpha \frac{1-0,03}{1-0,18} = 1,18 \alpha$ ;

$\beta_{\text{хв}} = \alpha \frac{0,03}{0,18} = 0,17 \alpha$ ;  $K = \frac{0,97}{0,82} = 1,18$ ;  $\varepsilon = 0,97$ ;

$\varepsilon_{\text{хв}} = 0,03$ .

**Решение вопроса о целесообразности проведения сортировки.** Проведение обогащения при данном оптимальном режиме в зависимости от ряда факторов может быть целесообразным или нецелесообразным. В работе [7] показано, что радиометрическое обогащение целесообразно проводить, если его режим обеспечивает выполнение неравенства

$$(\gamma_{\text{хв}})_{\text{опт}} \geq \frac{C_0}{C_T + C_r} + \frac{\alpha}{x_{\text{опт}}} (1 - \varepsilon_{\text{опт}}), \quad (17)$$

где  $C_0$  — стоимость радиометрического обогащения 1 м исходной руды.

На рисунке построены кривые

$$(\gamma_{\text{хв}})_{\text{опт}} = \frac{C_0}{C_T + C_r} + \frac{\alpha}{x_{\text{опт}}} (1 - \varepsilon_{\text{опт}}), \quad (18)$$

которые соответствуют наименьшим значениям выхода хвостов  $(\gamma_{\text{хв}})_{\text{опт}} = F(z)$ , обеспечивающим выполнение неравенства (17). Таким образом, для условий приведенного выше примера при  $\frac{C_0}{C_T + C_r} = 0,05$  целесо-

образно проводить сортировку, так как «точка» оптимального режима расположена выше линий «целесообразности сортировки» при  $\frac{C_0}{C_T + C_r} = 0,05$ , а при

$\frac{C_0}{C_T + C_r} = 0,1$  — нецелесообразно.

Поступило в Редакцию 9/IX 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Matheron. Ann. mines. No. 9, p. 566 (1957).
2. P. Formery, V. Ziegler. Proc. of the Second Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, UNO, 1958, V. 6, p. 1246.
3. J. Aitchison, J. Brown. The Lognormal Distribution. Cambridge University Press, 1957.
4. Н. К. Рязановский. Логарифмический нормальный закон распределения вещества и его свойства. «Зап. Ленинградского горного ин-та». Т. 20, № 1, 1948.
5. Д. А. Родионов. Функции распределения содержания элементов и минералов в изверженных горных породах. М., «Наука», 1964.
6. Л. Ч. Пухальский. Теория контрастности урановых руд. М., Госатомиздат, 1963.
7. И. А. Андрушин и др. О целесообразности проведения радиометрического обогащения урановых руд и выборе оптимального уровня разделения при обогащении. «Атомная энергия», 19, 79 (1965).

УДК 553.495

## Изотопное смещение между $U^{234}$ и $U^{238}$ во вторичных урановых минералах некоторых месторождений гидротермального типа

Н. И. Чалов, Я. А. Мусин, Т. В. Тузова, К. И. Меркулова

В соответствии с механизмом, предложенным для объяснения нарушений изотопного равновесия между  $U^{234}$  и  $U^{238}$  в природных условиях [1], для вторичных урановых минералов гидротермальных месторождений нельзя ожидать больших отклонений отношения  $U^{234}/U^{238}$  от равновесного. Результаты, полученные в работе [2], в основном подтвердили эту предпосылку. В дальнейшем изотопное отношение  $U^{234}/U^{238}$  в урановых минералах исследовалось также в работах [3, 4].

В настоящем сообщении сравниваются изотопные отношения  $U^{234}/U^{238}$  во вторичных урановых минералах двух гидротермальных месторождений, которые отличаются составом вещества, вмещающего урановое оруденение, и имеют вследствие этого различные типы зон окисления [5]: слюдковую и силикатно-слюдковую.

Изотопное отношение  $U^{234}/U^{238}$  в минералах после предварительного выделения из них урана и очистки