и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова,
т. LVI, вып. 2, 1969 г.

ОБ ИНВЕРСИОННЫХ ЗОНДАХ СЕЛЕКТИВНОГО γ-γ-МЕТОДА

В. А. Арцыбашев

При опробовании руд селективным γ-γ-методом источником существенных помех являются переменный диаметр и кавернозность скважин, неровности опробуемой поверхности стенок в горных выработках и переменная плотность пород и руд. Для исключения этих помех предложены инверсионные зонды [Арцыбашев, 1964; Большаков, Леман, 1965; Большаков, Очкур, 1965]. Теоретические и методические вопросы, относящиеся к созданию и использованию сложных инверсионных зондов селективного γ-γ-метода, до настоящего времени не рассмотрены. Предлагаемая статья представляет собой первый шаг в этом направлении.

Теория сложных инверсионных зондов. Как известно [Арцыбашев, 1964], наличие промежуточной зоны можно рассматривать как изменение некоторой эффективной плотности среды, прилегающей к зонду. Поэтому достаточно сделать зонд нечувствительным к плотности, и автоматически устранится влияние промежуточной зоны. Условие нечувствительности сложного зонда γ-γ-метода к плотности можно выразить следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial J_k^{\gamma}}{\partial \rho} \Delta\rho = 0, \qquad (1)$$

где n — число простых зондов, входящих в сложный зонд; J_k^{γ} — интенсивность рассеянного γ-излучения, регистрируемая k-ым зондом; ρ — плотность; $\Delta\rho$ — интервал компенсации плотности, $\Delta\rho = \rho - \rho_0$.

Очевидно, чтобы удовлетворить условию (1), необходимо среди n зондов иметь как доинверсионные $\Delta J_k^{\gamma} > 0$, так и заинверсионные $\Delta J_k^{\gamma} < 0$. В частности, если сложный зонд состоит из двух зондов различной длины R_1 и R_2, то один зонд должен быть доинверсионным, а второй — заинверсионным. В этом случае основное условие будет

$$\Delta J_1^{\gamma} + \Delta J_2^{\gamma} = 0. \qquad (2)$$

Зависимость рассеянного γ-излучения от плотности в достаточно широких диапазонах изменения плотности можно выразить эмпирической формулой [Арцыбашев, 1965]

$$J^{\gamma} = Q \frac{S}{r^2} e^{\pm \alpha\rho R}, \qquad (3)$$

стояние между центрами источника и детектора; R — длина зонда.

Для доинверсионного зонда коэффициент α берется со знаком плюс, а для заинверсионного — со знаком минус. Используя основное условие (2), получаем связь между параметрами двойного инверсионного зонда

$$\frac{Q_2}{Q_1}\frac{S_2}{S_1}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 e^{-\rho_0(\alpha_1 R_1+\alpha_2 R_2)} = \frac{e^{\alpha_1 R_1 \Delta\rho}-1}{1-e^{-\alpha_2 R_2 \Delta\rho}}. \qquad (4)$$

Анализ этой формулы показывает, что в инверсионном зонде существует определенное соотношение между мощностью Q источников γ-излучения, длинами зондов и расстояниями r от центра источника до центра детектора. Для точечных источника и детектора $r=R$. В реальных зондах между этими величинами существует некоторая разница, о которой подробнее сказано ниже. Если для инверсионного зонда выбраны источники, т. е.

$$\frac{S_2}{S_1} = \text{const},$$

и длина доинверсионного зонда R_1, то существует вполне определенная длина R_2 заинверсионного зонда, при которой инверсионный зонд компенсирован в интервале плотности $[\rho_0, \rho]$. И наоборот — если выбраны R_1 и R_2, то для инверсионного зонда необходимы источники определенной мощности.

Чтобы оценить степень компенсации плотностных помех и выбрать оптимальные параметры инверсионного зонда, необходимо знать зависимости (3) для конкретных условий. На рис. 1 представлены поля рассеянного γ-излучения трех источников, используемых при опробовании руд тяжелых ($Z > 50$) элементов. В доинверсионной области зависимость рассеянного γ-излучения от плотности, установленная расчетом [Арцыбашев, 1967], оказалась близкой для разных источников и поэтому представлена одним графиком. В заинверсионной области γ-поля установлены экспериментально, причем расчеты в доинверсионной области и эксперименты в заинверсионной согласованы.

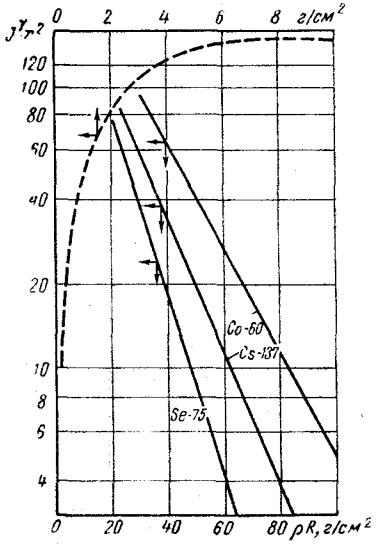


Рис. 1. Поля рассеянного γ-излучения для доинверсионных и заинверсионных зондов. Пунктиром показан доинверсионный участок для источников Se-75, Cs-137, Co-60

Длину доинверсионного зонда для трех рассматриваемых типов источников можно выбирать в диапазоне

$$\rho R_1 = (0 \div 8)\ г/см^2, \qquad (5)$$

а длина заинверсионного зонда должна быть

$$\rho R_2 > (15 - 30)\ г/см^2. \qquad (6)$$

ного зонда исследованы зависимости

$$J_1^{\gamma} = \varphi_1(\rho), \tag{7}$$

$$J^{\gamma} = \varphi(\rho), \tag{8}$$

где $J^{\gamma} = J_1^{\gamma} + J_2^{\gamma}$ — суммарная интенсивность, регистрируемая общим для двух зондов детектором.

Анализ показал, что суммарный эффект очень слабо зависит от плотности при различных соотношениях между R_1 и R_2. За пределами скомпенсированного диапазона плотностей нечувствительность инверсионного зонда сохраняется в некоторых пределах.

На чувствительность сложного инверсионного зонда к содержанию тяжелых элементов в рудах влияет соотношение между J_1^{γ} и J_2^{γ} и спектральный состав этих излучений. Известно, что доля мягкого γ-излучения в спектре увеличивается при росте длины зонда и для малых зондов зависит от энергии первичного γ-излучения. Чувствительность заинверсионных зондов к содержанию существенно выше, чем доинверсионных. Следовательно, при прочих равных условиях желательно, чтобы доля J_2^{γ} в суммарном излучении была наибольшей.

Соотношение между J_1^{γ} и J_2^{γ} определяется выражением

$$\frac{J_2^{\gamma}}{J_1^{\gamma}} = \frac{Q_2}{Q_1}\,\frac{S_2}{S_1}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 e^{-\rho(\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2)}, \tag{9}$$

т. е. зависит от параметров инверсионного зонда и компенсируемого значения плотности.

Таблица 1

Характеристики двойного инверсионного зонда с источниками Cs-137

Длина зонда, *см*	ΔJ_1^{γ}	$\frac{S_2}{S_1}$	$J_2^{\gamma}/J_1^{\gamma}$	
			$\rho = 2$ *г/см³*	$\rho = 3$ *г/см³*
$R_1 = 2$ $R_2 = 20$	5,05 S_1	88	0,24	0,07
$R_1 = 2$ $R_2 = 10$	5,05 S_1	12	0,39	0,20
$R_1 = 2$ $R_2 = 6$	5,05 S_1	5,3	0,69	0,46
$R_1 = 0{,}2$ $R_2 = 20$	270 S_1	$4{,}7 \cdot 10^3$	0,73	0,13

Анализ численных данных (табл. 1) показывает, что доля J_2^{γ} уменьшается при увеличении длины зонда R_2. Известно, что спектр рассеянного γ-излучения при удалении от источника вначале быстро обогащается низкоэнергетическими квантами, а затем форма спектра стабилизируется. Учитывая закономерности изменения спектра и соот-

верхних зондов.

Источник	Se—75	Cs—137	Co—60
ρR_2, г/см^2	20—25	30—35	35—45

Для увеличения чувствительности инверсионных зондов желательно использовать различные источники γ-излучения: в доинверсионном — источник более мягкого γ-излучения, в заинверсионном — более жесткого.

Методика создания двойного инверсионного зонда. Предварительно выбрать размеры зондов, типы и мощности источников можно с помощью приведенных выше рекомендаций и формул. При этом можно использовать значения постоянных Q и α (табл. 2).

Таблица 2

Постоянные Q и α для различных зондов

Источник	ρR, г/см^2	α, г$^{-1}$см^2	Q
	Доинверсионные зонды		
Se-75, Cs-137, Co-60	0,4—0,6	2	9,9
	2,0—3,0	0,26	50
	4,0—6,0	0,074	94
	Заинверсионные зонды		
Se-75	30—100	0,075	350
Cs-137	30—100	0,055	310
Co-60	30—100	0,042	360

Окончательно выбирать параметры малого и большого зондов следует экспериментально, используя две модели руд, плотность которых близка или равна начальной и конечной точкам компенсируемого диапазона. Рекомендуется следующая последовательность.

Изготовляют доинверсионный зонд и на моделях находят

$$\Delta J_1^{\text{I}} = aS_1, \tag{10}$$

где $a = \dfrac{J_1^{\text{I}}(\rho) - J_1^{\text{I}}(\rho_0)}{S_1}$ — определяется экспериментально.

Затем с помощью заинверсионного зонда, меняя его длину, строят график зависимости (3) в инвариантных координатах

$$\frac{J_2^{\text{I}} R_2^2}{S_2},\ \rho R_2 \tag{11}$$

и определяют для конкретной конструкции зонда постоянные α_2 (угловой коэффициент) и Q (отрезок, отсекаемый графиком на оси $\dfrac{J_2^{\text{I}} R_2^2}{S_2}$). Зная отношение мощностей источников $\dfrac{S_2}{S_1} = m$ и используя установленные выше константы, записывают условие компенсации (4) в виде

$$aS_1 = S_2 f_2(R_2), \tag{12}$$

где

$$f_2(R_2) = \frac{Q_2}{R_2^2}\left(e^{-\alpha_2 \rho_0 R_2} - e^{-\alpha_2 \rho R_2}\right).$$

ния (12) значение

$$f_2(R_2) = \frac{a}{m}. \qquad (13)$$

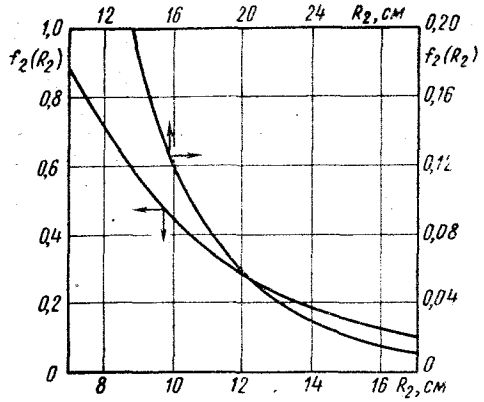


Рис. 2. Графики функции $f_2(R_2)$

находят точную величину R_2, принимая $r_2 = R_2$.

Например, для двойного зонда выбраны источники Cs-137, $R_1 = 2$ *см* и $R_2 = 6$ *см*. По расчету $\Delta J_1^{\text{I}} = 5{,}05\ S_1$ и $\frac{S_2}{S_1} = 5{,}3$ (см. табл. 1). После изготовления доинверсионного зонда и выбора источников из имеющихся в наличии оказалось $\frac{S_2}{S_1} = 8{,}7$ и $\Delta J_1^{\text{I}} = 3{,}5\ S_1$. Определив значение $f_2(R_2) = \frac{3{,}5}{8{,}7} = 0{,}402$, по графикам рис. 2 находят $R_2 = (10{,}4 \pm \pm 0{,}1)$ *см*. Если найденная величина заинверсионного зонда по каким-либо соображениям не подходит, следует изменить соотношение мощностей источников или длину зонда R_1 и выбрать новый заинверсионный зонд.

Конструкция двойного инверсионного зонда. Особенностью конструкции (рис. 3) является воздушный промежуток между кожухом и

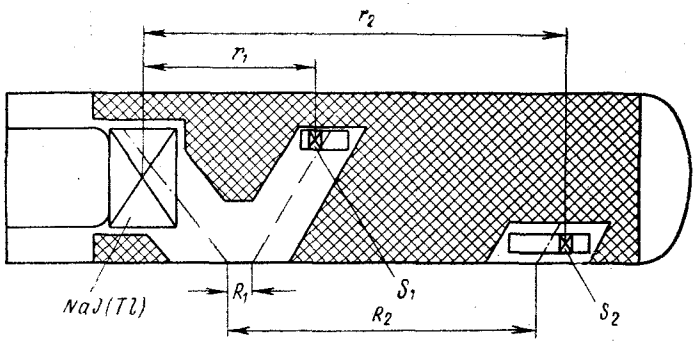


Рис. 3. Двойной инверсионный зонд

свинцовым экраном, разделяющим детектор и источник в доинверсионном зонде. Благодаря такой конструкции, эффективная длина зонда R_1 близка к расстоянию между центрами коллимационных каналов, а расстояние между источником и детектором r_1 и толщина свинцового экрана значительно больше R_1. В зонде предусмотрена возможность изменения величин r_1 и r_2 без перемещения свинцовых экранов. При этом величины R_1 и R_2 сохраняются. Изменением r_1 или r_2 можно в некоторых пределах регулировать величины ΔJ_1^{I} и ΔJ_2^{I}. Например, при $\Delta J_2^{\text{I}} = c$ требуется установить $\Delta J_2^{\text{I}} = d$. Если в зонде $r_2 = r_2'$, то найдем $r_2 = r_2''$, при котором ΔJ_2^{I} изменится на необходимую величину. Так как

$$r_2^2 = \frac{\text{const}}{\Delta J_2^{\text{I}}}, \qquad (14)$$

$$r_2 = r_2 \sqrt{\overline{d}}. \qquad (15)$$

Расстояния r_1 и r_2 в конкретном зонде должны быть строго постоянными, поэтому необходимо обеспечить не только неподвижность ампулы с источником, но и активного вещества внутри ампулы.

Определим требования к жесткости конструкции свинцовых экранов, установив допуски ΔR_1 и ΔR_2 при изготовлении зонда. За меру точности примем такие изменения, при которых возникает

$$\Delta J^{\gamma} = \Delta J_1^{\gamma} + \Delta J_2^{\gamma} = 0{,}02\ J^{\gamma} \qquad (16)$$

при заданном $\Delta\rho = \rho_0 - \rho$. Если меняется только R_2, то

$$\Delta J^{\gamma} = \frac{\partial J_2^{\gamma}}{\partial R_2}\Delta R_2, \qquad (17)$$

$$\frac{\partial J_2^{\gamma}}{\partial R_2} = -\frac{Q_2 S_2}{R_2^2}\left(\frac{2}{R_2} + \alpha_2\rho\right)e^{-\alpha_2\rho R_2} \qquad (18)$$

и

$$\frac{\Delta J^{\gamma}}{J^{\gamma}} = \frac{\left(-\frac{2}{R_2} - \alpha_2\rho\right)\Delta R_2}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}\frac{S_1}{S_2}\left(\frac{R_2}{r_1}\right)^2 e^{\alpha_1\rho R_1 + \alpha_2\rho R_2}}. \qquad (19)$$

Используя условия (16) и формулу (19), получаем оценку

$$\Delta R^2 = -0{,}02\,\frac{\left(1 + \frac{J_1}{J_2^{\gamma}}\right)R_2}{\alpha_2\rho R_2 + 2}. \qquad (20)$$

Аналогично находим

$$\Delta R_1 = 0{,}02\,\frac{\left(1 + \frac{J_2^{\gamma}}{J_1^{\gamma}}\right)R_1}{\alpha_1\rho R_1 - 2}. \qquad (21)$$

Таблица 3

Допуски для R_1 и R_2 при $\frac{\Delta J^{\gamma}}{J^{\gamma}} = 0{,}02$ (источник Cs-137)

Длина зонда, *см*	ΔR_1, *мм*		ΔR_2, *мм*	
	$\rho = 2$ *г/см*^{3}	$\rho = 3$ *г/см*^{3}	$\rho = 2$ *г/см*^{3}	$\rho = 3$ *г/см*^{3}
$R_1 = 2$ $R_2 = 20$	0,29	0,28	5,0	11,6
$R_1 = 2$ $R_2 = 6$	0,40	0,37	1,1	1,3

Численные оценки двух зондов приведены в табл. 3. Как следует из анализа таблицы, особенно жесткие требования предъявляются к доинверсионному зонду.

Арцыбашев В. А. Оптимальный зонд для опробования руд по гамма-гамма-методу. Изв. Вузов. Геология и разведка, № 9, 1964.

Арцыбашев В. А. Гамма-метод измерения плотности. Атомиздат, 1965.

Арцыбашев В. А. Влияние длины зонда на измерения плотности горных пород гамма-гамма-методом. Изв. ВУЗов. Геология и разведка, № 2, 1967.

Большаков А. Ю., Леман Е. П. Усовершенствование методики селективного гамма-гамма-каротажа, Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 6. Изд-во ЛГУ, 1965.

Большаков А. Ю., Очкур А. П. Устранение влияния изменений диаметра сухих скважин в методе рассеянного γ-излучения. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 5. Недра, Л., 1965.