

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3649/2-80

18-80-337 ^{4/8-80}

А.Эрнандес, Д.Рубио

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОНЕЙТРОНОВ
И ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОТРОНА
ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА
ЖЕЛЕЗИСТЫХ ЛАТЕРИТОВЫХ РУД

Многоэлементный анализ проб пород и руд с помощью радиоактивационных методов представляет определенные трудности, связанные с тем, что не все элементы достаточно хорошо активируются нейтронами или γ -квантами^{1-3/}. Для преодоления этих трудностей целесообразно комплексное применение гамма- и нейтронно-активационных методов анализа /ГАА/ и /НАА/ с помощью электронных ускорителей^{4/}. Одним из наиболее подходящих для этого ускорителей является микротрон^{5-7/}.

В настоящей работе предлагается методика для анализа Ni, Fe, Co, Cr, Al, Mg, Si и Mn в железистых латеритах, при комплексном применении гамма- и нейтронного пучков микротрона с энергией электронов 16 МэВ и средним током 25 мкА.

ГАММА- И НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ ЛАТЕРИТОВЫХ РУД

В состав железистых латеритовых руд входит ряд элементов, которые сравнительно хорошо активируются тепловыми нейтронами /Co, Al, Mn/ или быстрыми нейтронами /Mg, Si/. Другие, как, например, Ni, Fe, Cr, эффективнее активировать гамма-квантами. Исходя из критерия достижения наибольшей экспрессности при обеспечении удовлетворительной чувствительности и точности анализов, в работе был экспериментально установлен оптимальный вариант определения содержания данных элементов в железистых латеритах. При этом учитывался и тот факт, что при облучении тормозным излучением микротрона можно использовать для аналитических целей как γ -кванты, так и быстрые нейтроны, образованные в мишени.

Определение содержания Fe, Ni, Cr, Mg осуществляется при одночасовом одновременном облучении 10 проб тормозным излучением микротрона по реакциям, приводимым в табл.1. После облучения проводятся:

- 1/ измерения активности $^{58}\text{Fe} / t_{\text{изм}} = 80 \text{ с};$
- 2/ одновременное измерение ^{57}Ni , ^{49}Cr , $^{24}\text{Na} / t_{\text{изм}} = 3 \text{ мин}.$

Анализ Si /см. табл.1/ осуществляется при 5-минутном облучении и 3-минутном измерении активности ^{28}Al . При наличии пневмопочты возможно определение Si в ~12 пробах за час одновременно с проведением анализа Fe, Ni, Cr и Mg.

Таблица 1

Элементы, активируемые γ -квантами и быстрыми нейтронами в железистых латеритах при их облучении тормозным излучением микротрона

Элемент	Образующийся изотоп	Реакция	E (2), КэВ (выход, %)	T _{1/2} (1)
Никель	⁵⁷ Ni	⁵⁸ Ni(γ, n) ⁵⁷ Ni	127(14), 1378(86) 1890(14)	36ч.
Железо	⁵³ Fe	⁵⁴ Fe(γ, n) ⁵³ Fe	378(32)	8,5мин
Кобальт	⁵⁸ Co	⁵⁹ Co(γ, n) ⁵⁸ Co	810(99), 865(1,4)	71,3д
Хром	⁴⁹ Cr	⁵⁰ Cr(γ, n) ⁴⁹ Cr	90(28), 153(13)	41,9мин.
	⁵¹ Cr	⁵² Cr(γ, n) ⁵¹ Cr	320(9)	27,8д.
Магний	²⁴ Na (3)	²⁴ Mg(n, p) ²⁴ Na	1365(100), 2754(100)	15ч.
Кремний	²⁸ Al (3)	²⁸ Si(n, p) ²⁸ Al	1778(100)	2,3мин.
Марганец	⁵⁴ Mn	⁵⁵ Mn(γ, n) ⁵⁴ Mn	834(100)	303 дн.
Хлор	³⁴ Cl	³⁵ Cl(γ, n) ³⁴ Cl	145(45), 1170(12), 2120(36)	32,4 мин.
Мышьяк	⁷⁴ As	⁷⁵ As(γ, n) ⁷⁴ As	596(61), 635(14)	17,5дн.
Титан	⁴⁷ Sc	⁴⁷ Ti(n, p) ⁴⁷ Sc	160(73)	3,4 дн.
Цирконий	⁸⁹ Zr	⁹⁰ Zr(γ, n) ⁸⁹ Zr	910(99), 1710(1)	79ч.
Сурьма	¹²² Sb	¹²³ Sb(γ, n) ¹²² Sb	564(66), 686(3,4)	2,8дн.
Иод	¹²⁶ I	¹²⁷ I(γ, n) ¹²⁶ I	386(34), 667(33)	13,3 дн.

/1/ Литературные данные^{/12/}.

/2/ Подчеркнуты энергии γ -линий, использованные для аналитических целей.

/3/ Проверено экспериментально, что в рассматриваемом диапазоне концентраций Na, Al эти элементы не дают мешающего вклада по реакциям ²³Na(n, γ)²⁴Na, ²⁷Al(n, γ)²⁸Al.

Анализ Co, Al, Mn производится нейтронно-активационным методом при 10-минутном облучении образцов, расположенных в графитовой призме микротрона^{/7/}, тепловыми нейтронами, по реакциям, показанным в табл.2. Определение Co осуществляется при измерении / t_{изм} ≤ 8 мин / наведенной активности X-лучей внутренней конверсии ⁶⁰Co / E_{K α} = 6,9 КэВ/. Определение Al и Mn производится / t_{изм} = 1 мин / по изотопам ²⁸Al и ⁵⁶Mn.

Таблица 2

Элементы, активируемые в пробах железистых латеритовых руд при их облучении тепловыми нейтронами

Элемент	Образующийся изотоп	Реакция	Σ мбарн (1)	E, кэВ (выход, %)	T _{1/2} (1)
Кобальт	^{60m} Co	⁵⁹ Co(n, γ) ^{60m} Co	1600	59(2,1), 1330(0,25), X-лучи ⁶⁰ Co	10,5мин.
Алюминий	²⁸ Al	²⁷ Al(n, γ) ²⁸ Al	235	1778(100)	2,3мин.
Марганец	⁵⁶ Mn	⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn	13300	846(99), 1811(29), 2110(15)	2,6ч.
Ванадий	⁵² V	⁵¹ V(n, γ) ⁵² V	4900	1434(100)	3,75мин.
Титан	⁵¹ Ti	⁵⁰ Ti(n, γ) ⁵¹ Ti	140	320(95), 605(15), 928(5)	5,6мин.

/1/ Данные взяты из^{/12/}.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ОБРАЗЦЫ И МОНИТОРЫ

В качестве источника нейтронов и γ -излучения использовался микротрон Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ с энергией электронов примерно 16 МэВ и средним током 25 мкА^{/8/}.

Для измерения γ - и X-излучений активированных образцов были использованы Ge(Li)-ППД с чувствительным объемом 23 см³, разрешением 3,5 кэВ по линии 662 кэВ и Si(Li) - ППД, у которого диаметр чувствительной поверхности - 5,12 мм и разрешение для K α линии железа - 190 эВ. Для регистрации и обработки информации использовался 4096-канальный анализатор, разработанный и собранный в ОИЯИ^{/9/} на основе микропроцессора "INTEL-8080" и 800-канальный анализатор фирмы "Nokia" типа LP-4840.

Образцы в виде порошков весом около 1,5 г были упакованы в плексигласовые боксы внутренним диаметром 20 мм и высотой 4 мм. Один из торцов боксов закрыт лавсановой пленкой толщиной 10 мк для обеспечения минимального поглощения X-лучей кобальта.

Для облучения образцов тормозным излучением микротрона была использована подставка, показанная на рис.1. Учет спада интенсивности γ -квантов с увеличением расстояния между про-

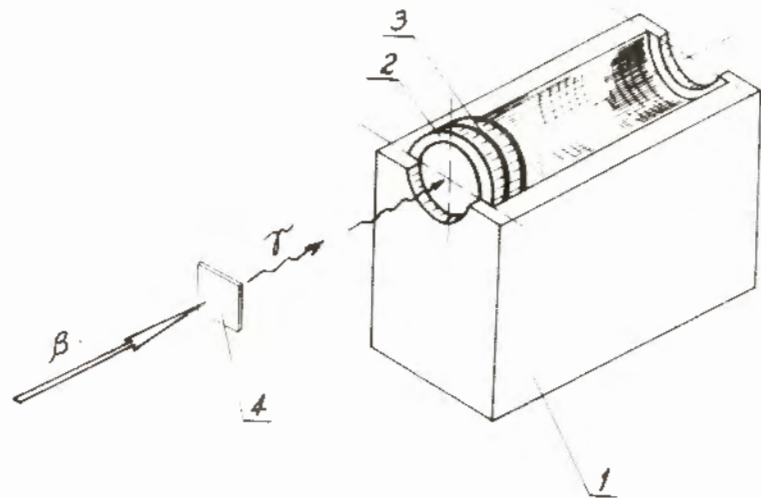


Рис.1. Подставка для облучения образцов тормозным излучением микротрона. 1 - плексигласовая подставка, 2 - образец, 3 - медный монитор, 4 - тормозная мишень.

бами и тормозной мишенью осуществлялся с помощью медных фольг диаметром 25 мм и весом 400 мг. Для мониторинга потока тепловых нейтронов использовались алюминиевые фольги диаметром 25 мм и весом 90 мг.

В работе использовались геологические пробы железистых латеритовых руд с известным содержанием Fe, Ni, Co /данные химического анализа/. Для количественных определений использовались четыре стандарта, изготовленных в нашей лаборатории.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Время измерения активности короткоживущих изотопов надо выбирать таким образом, чтобы площадь фотопика данного изотопа в последнем из измеряемых образцов была максимально возможной. С этой целью на основе уравнения активации и условия максимума измеряемой площади фотопика выведена следующая формула для оптимального времени измерения

$$t_{\text{изм}}^{\text{max}} = \frac{\ln N / N - 1}{\lambda} \quad /1/$$

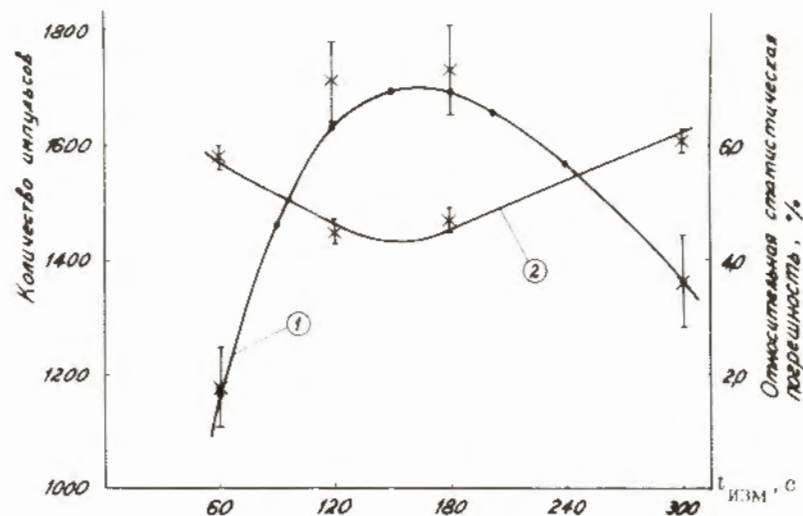


Рис.2. К выбору оптимального времени измерения активности изотопа ^{53}Fe /1/. Зависимость площади фотопика $E_{\gamma} = 378$ кэВ N-ого образца от $t_{\text{изм}}$. -●-●- расчетные данные; * - экспериментальные данные. /2/ Экспериментальные значения относительной статистической погрешности измерения площади фотопика N-ого образца при режимах с различными $t_{\text{изм}}$.

где $t_{\text{изм}}^{\text{max}}$ - время измерения, соответствующее максимальной площади фотопика N-ого образца, N - число измеряемых образцов, λ - постоянная распада измеряемого изотопа.

В качестве примера на рис.2/1/ показана зависимость измеряемой площади фотопика ^{53}Fe N-ого образца (N=5) от времени измерения. Как следует из рисунка, существует удовлетворительное, в пределах погрешности измерения, совпадение расчетных и экспериментальных данных. На рис.2/2/ показан экспериментальный ход относительной статистической погрешности с ростом $t_{\text{изм}}$. Как видно, $t_{\text{изм}}$, соответствующее минимальной ошибке, также совпадает в пределах ошибок с $t_{\text{изм}}^{\text{max}}$, вычисленным по формуле /1/.

При N=10 из /1/ имеем $t_{\text{изм}}^{\text{max}} = 77,5$ с для ^{53}Fe . На практике для определения железа при N=10 и выборе $t_{\text{изм}} = 60, 80, 100, 110, 180$ с наилучшие результаты были получены в режиме с $t_{\text{изм}} = 80$ с.

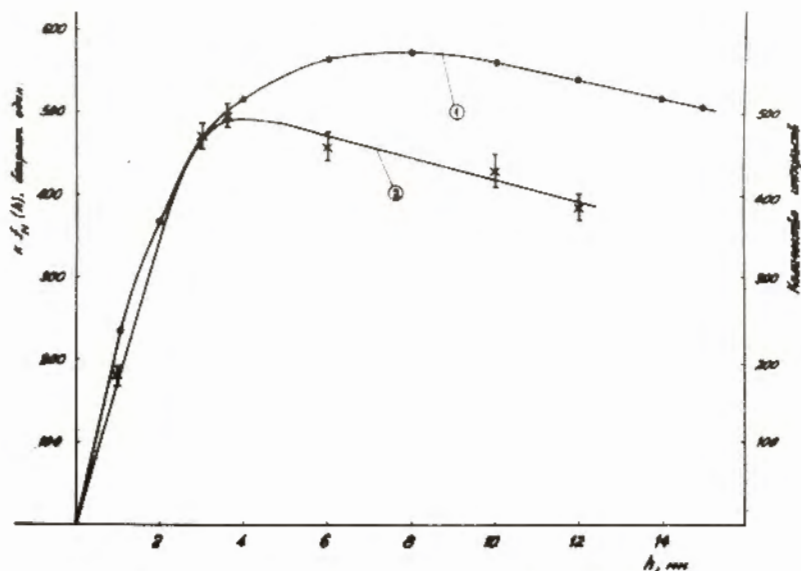


Рис.3. К определению оптимальной толщины проб при облучении N образцов γ -квантами. —●—●— теоретическая кривая $k f_N(h)$, где $k = 7,6 \cdot 10^7$; *—*— экспериментальные значения площади фотопика $^{57}\text{Ni} / E_\gamma = 1378$ кэВ/.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРОБ ПРИ МАССОВОМ ОБЛУЧЕНИИ γ -ПУЧКОМ

Выбор размеров проб, при массовом облучении тормозным излучением микротрона, должен учитывать особенности углового и пространственного распределений γ -квантов [11]. Определенная роль принадлежит также и геометрии измерения.

В настоящей работе мы взяли диаметр проб равным диаметру круглого сечения пучка γ -квантов в плоскости первого образца, а для определения толщины пробы h исходили из требования, что активность, наведенная в наиболее отдаленном от мишени образце, должна быть максимально возможной. Увеличение h пробы приведет с одной стороны к нарастанию навески и соответственно активности, с другой — к уменьшению активности N -ого образца вследствие убывания интенсивности γ -квантов с расстоянием. Нами проверено, что спад интенсивности γ -квантов в отсутствие подставки с образцами можно описать зависимостью $\sim \frac{1}{R^{1,8}}$ / R — расстояние от тормозной мишени/. Убывание интенсивности γ -квантов вдоль подставки, загруженной образ-

цами латеритовых руд, описывается зависимостью $\sim \frac{1}{R^{1,9}}$, что указывает на дополнительное ослабление потока, вызываемое поглощением и рассеянием γ -квантов образцами. Итак, зависимость активности N -ого образца от толщины проб можно представить в виде функции

$$f_N(h) = \frac{h}{(R_0 + (N-1)h)^{1,9}}, \quad /2/$$

где R_0 — расстояние от тормозной мишени до центра первой пробы.

На рис.3 /1/ представлен график $f_N(h)$ при $R_0 = 60$ мм, $N = 10$, что соответствует нашим экспериментальным условиям. Из рисунка видно, что $h_{\text{opt}} = 7,5$ мм. На рис.3 /2/ показаны экспериментальные данные зависимости площади фотопика $^{57}\text{Ni} / E_\gamma = 1378$ кэВ/ N -ого образца от толщины проб. Расхождение экспериментальных данных с теоретической кривой для $h > 3,5$ мм объясняется влиянием геометрии измерения. При этом значение h_{opt} оказывается, как и следовало ожидать, несколько меньшим, чем рассчитанное по формуле /2/.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл.3 приведены результаты ГАА и НАА Ni, Fe, Co в железистых латеритах. Из таблицы следует, что полученные с помощью этих анализов данные хорошо совпадают с результатами химического анализа /ХА/. Расхождения с данными ХА не превышают 15-18%. Как следует из табл.3 и рис.4, существует хорошая корреляция между результатами ГАА и ХА при определении Ni / $r = 0,995$, $b = 0,980$, $a = 0,0013$ / и Fe / $r = 0,999$, $b = 1,025$, $a = -0,265$ /, а также /рис.5/ между НАА и ХА при определении содержания Co / $r = 0,997$, $b = 0,977$, $a = 0,0012$ /. Из-за отсутствия достаточного количества образцов с известным содержанием остальных элементов, корреляционный анализ результатов ГАА, НАА и ХА этих элементов сделан не был.

Минимальная концентрация C^{min} , которую можно обнаружить с надежностью анализа 99% /10/, достигает 0,8% Fe, $5 \cdot 10^{-2}$ % Ni; $4 \cdot 10^{-3}$ % Co, $8 \cdot 10^{-2}$ % Cr, $6 \cdot 10^{-2}$ % Al, $7 \cdot 10^{-1}$ % Mg, 1% Si и 10^{-2} % Mn.

Точность анализов не хуже 3% / $C \geq 10\%$ Fe, $t_{\text{изм}} = 80$ с/, 15% / $C \geq 10^{-1}$ % Ni/, 10% / $C \geq 10^{-2}$ % Co/, 3% / $C \geq 1\%$ Cr/, 2% / $C \geq 1\%$ Al/, 15% / $C \geq 1\%$ Mg/, 8% / $C \geq 2\%$ Si/ и 1% / $C \geq 4 \cdot 10^{-1}$ % Mn/.

На рис.6 показаны участки спектра образца железистых латеритовых руд, облученного на γ -пучке /а/ и на тепловых нейтронах /б,в/ микротрона. Присутствие K_α -линии Fe /рис.6в/

Таблица 3

Результаты ГАА определения Fe, Ni и НА определения Co в железистых латеритах

№ пп	Гамма-активационный анализ		Нейтронный активационный анализ	Химический анализ		
	Содержание, %			содержание, %		
	железо	никель		железо	никель	кобальт
1	2	3	4	5	6	7
1.	9,7±0,3	0,10±0,01	0,004±0,001	9,98±0,43	0,10±0,01	0,004±0,001
2.	9,0±0,4	0,11±0,01	0,004±0,001	10,18±0,21	0,10±0,01	0,005±0,002
3.	9,0±0,2 ⁽¹⁾	0,11±0,01	0,004±0,001	10,48±0,22	0,10±0,01	0,004±0,001
4.	8,6±0,4	0,08±0,01	0,003±0,001	9,17±0,40	0,09±0,01	0,004±0,001
5.	49,0±0,7	1,03±0,02	0,009±0,001	52,0±0,42	1,06±0,05	0,010±0,002
6.	7,2±0,4	0,70±0,02	0,012±0,001	6,14±0,26	0,66±0,05	0,010±0,002
7.	6,8±0,5	0,68±0,03	0,013±0,001	6,34±0,26	0,64±0,05	0,012±0,002
8.	6,0±0,2 ⁽¹⁾	0,21±0,01	0,014±0,001	6,76±0,30	0,23±0,03	0,013±0,003
9.	9,4±0,2	0,63±0,01	0,021±0,002	9,92±0,40	0,62±0,05	0,019±0,002
10.	43,8±0,9	0,41±0,02	0,024±0,002	43,77±0,39	0,38±0,04	0,023±0,004
11.	44,4±1,1	0,70±0,02	0,028±0,002	43,99±0,40	0,69±0,05	0,028±0,004
12.	44,8±0,6 ⁽¹⁾	0,64±0,03	0,031±0,002	43,94±0,40	0,63±0,04	0,030±0,005
13.	49,6±1,0 ⁽¹⁾	0,92±0,04	0,034±0,002	46,79±0,42	0,82±0,06	0,031±0,005
14.	15,9±0,6	1,41±0,03	0,034±0,002	14,07±0,21	1,36±0,07	0,032±0,005
15.	50,7±1,1	0,74±0,03	0,040±0,004	49,27±0,44	0,77±0,05	0,038±0,006
16.	17,0±0,5	1,70±0,02	0,039±0,002	18,35±0,39	1,80±0,09	0,038±0,006
17.	16,8±0,6	1,32±0,03	0,040±0,002	14,85±0,31	1,43±0,07	0,040±0,006
18.	44,6±0,9	0,65±0,02	0,046±0,002	44,17±0,40	0,66±0,05	0,041±0,006
19.	17,0±2,2	1,74±0,03	0,048±0,002	15,11±0,32	1,81±0,09	0,042±0,006
20.	50,1±1,3	0,92±0,03	0,046±0,002	51,67±0,41	1,02±0,05	0,043±0,007
21.	58,7±4,1	0,66±0,03	0,043±0,002	49,78±0,44	0,65±0,04	0,046±0,007
22.	50,2±1,1	0,52±0,03	0,046±0,005	48,78±0,45	0,55±0,04	0,048±0,007
23.	18,7±0,3	1,07±0,04	0,059±0,003	19,25±0,40	0,93±0,07	0,061±0,005
24.	49,8±0,5	1,32±0,03	0,094±0,006	49,47±0,45	1,35±0,07	0,094±0,008
25.	52,6±1,8	0,85±0,02	0,109±0,004	50,12±0,40	0,87±0,06	0,114±0,006
26.	45,3±1,3	1,80±0,03	0,105±0,006	39,36±0,43	1,64±0,08	0,123±0,006
27.	49,8±1,3 ⁽¹⁾	1,00±0,03	0,156±0,006	49,80±0,45	1,04±0,05	0,161±0,006
28.	45,6±1,2 ⁽¹⁾	1,13±0,04	0,162±0,007	45,61±0,41	1,17±0,06	0,169±0,006
29.	51,9±1,5 ⁽¹⁾	0,94±0,04	0,197±0,006	51,4±0,41	0,95±0,07	0,182±0,006
30.	55,7±1,6 ⁽¹⁾	0,97±0,04	0,184±0,005	52,07±0,42	1,06±0,05	0,190±0,006
31.	50,1±1,5	1,22±0,02	0,192±0,006	48,61±0,44	1,30±0,06	0,196±0,010
32.	48,5±3,4	1,11±0,03	0,218±0,004	52,18±0,42	1,20±0,06	0,220±0,009
33.	45,6±1,4	0,55±0,02	0,021±0,002	41,81±0,38	0,51±0,04	0,019±0,004

/1/ t_{изм} = 80 с.

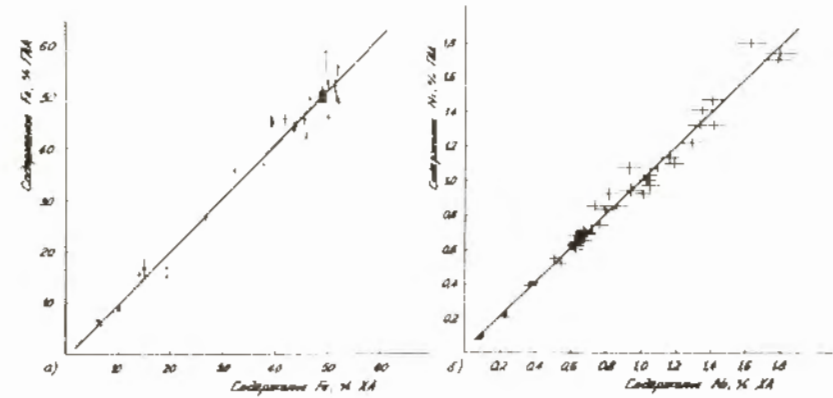


Рис. 4. Корреляционная зависимость результатов ГАА и химического методов анализа железистых латеритовых руд; а/ при определении железа; б/ при определении никеля.

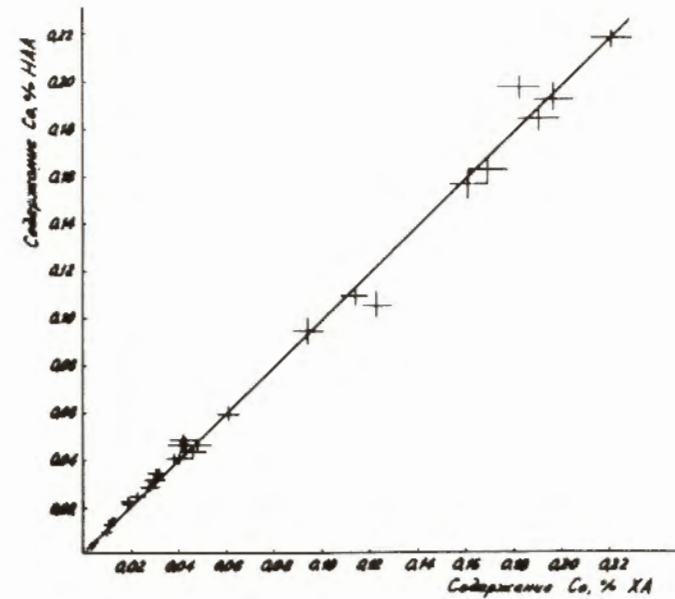


Рис. 5. Корреляционная зависимость результатов НА и химического методов анализа при определении кобальта.

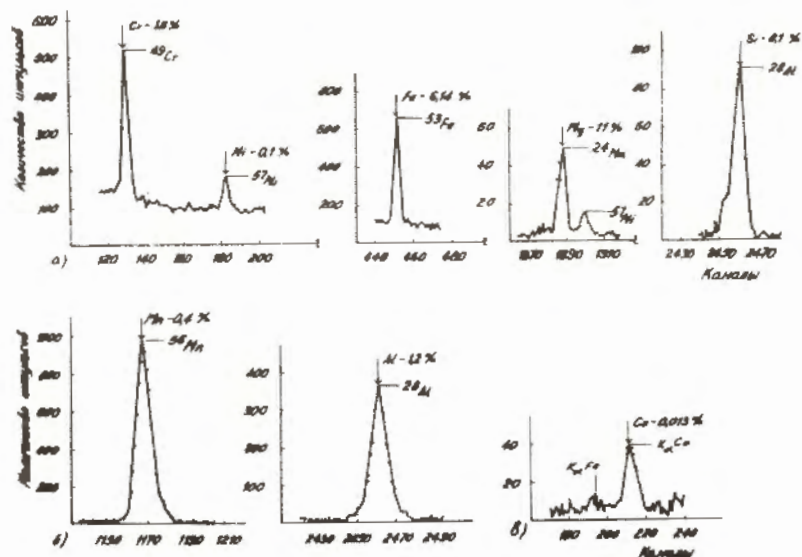


Рис.6. Спектры облученного образца железистых латеритовых руд; а/ участки γ -спектра после облучения тормозным излучением микротрона; б/ участки γ -спектра после облучения на тепловых нейтронах; в/ спектр X-лучей после облучения на тепловых нейтронах.

объясняется возбуждением характеристических лучей этого элемента посредством излучения изотопов матрицы.

Заметим, что: а/ чувствительность и точность анализов Si можно повысить соответствующим увеличением навески образцов; б/ при НАА Co, Al и Mn целесообразно использовать пневмопочту; в/ применение нескольких Si(Li) - ППД увеличивает во столько же раз производительность анализов при измерении X-лучей Co.

При наличии пневмопочты, двух Ge(Li) - ППД и двух Si(Li) - ППД производительность методики составляет за 8-часовую смену: - 200 элементных определений % содержания / Fe, Ni, Cr, Mg, Si / в 40 пробах;

- 160 элементных определений % содержания Al, Mn в 80 пробах одновременно с 48 анализами Co.

Это означает, что производительность составляет 50 элементных определений в час. При настоящих экспериментальных условиях производительность составляет 30 элементных определений данных химических элементов в час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагается методика многоэлементного анализа проб железистых латеритовых руд на основе комплексного использования фотонейтронов и тормозного излучения микротрона.

2. Достигнута чувствительность анализа для Fe - $8 \cdot 10^{-1}$ %, Ni - $5 \cdot 10^{-2}$ %, Co - $4 \cdot 10^{-3}$ %, Cr - $8 \cdot 10^{-2}$ %, Al - $6 \cdot 10^{-2}$ %; Mg - $7 \cdot 10^{-1}$ %, Si - 1%, Mn - 10^{-2} %.

3. Точность анализов во всех случаях не хуже: 3% / C \geq $\geq 10\%$ Fe / , 15% / C $\geq 10^{-1}$ % Ni / , 10% / C $\geq 10^{-2}$ % Co / , 3% / C $\geq 1\%$ Cr / , 15% / C $\geq 1\%$ Mg / , 8% / C $\geq 2\%$ Si / , 2% / C $\geq 1\%$ Al / и 1% / C $\geq 4 \cdot 10^{-1}$ % Mn / .

4. Производительность методики составляет 30-50 элементных определений процентного содержания Fe, Ni, Co, Cr, Mg, Al, Si, Mn в час.

5. При корреляционном анализе результатов ГАА, НАА и ХА Fe, Ni, Co получены коэффициенты корреляции 0,999, 0,995, 0,997 соответственно.

6. Выведена формула для расчета оптимального времени последовательного измерения проб в зависимости от их числа и постоянной распада измеряемого изотопа.

7. Установлен критерий для выбора оптимальных толщин проб при одновременном облучении N-образцов тормозным излучением микротрона.

Авторы глубоко признательны Г.Н.Флерову за постановку проблемы и постоянный интерес к работе; Ю.С.Замятину и Л.П.Кулькиной за поддержку и ценные замечания, В.Я.Выропаеву за полезное обсуждение результатов, а также А.Г.Белову и В.Е.Жучко за помощь и техническое обеспечение экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Е.И., Сотсков Ю.П., Резников Р.С. Нейтронно-активационный анализ горных пород на редкие элементы. "Недра", М., 1978.
2. Lutz G. Analyt.Chem., 1971, 43, No.1, p.93.
3. Бровцын В.К. и др. Сб. статей "Активационный анализ", Изд-во ФАН, Ташкент, 1971, с.70.
4. Бровцын В.К. и др. Сб. статей "Ядерно-физические методы анализа вещества". Атомиздат, М., 1971, с.216.
5. Бровцын В.К., Самосюк В.Н., Ципенюк Ю.М. АЭ, 1972, 32, с.383.

6. Капица С.П. и др. АЭ, 1973, 34, с.199.
7. Базаркина Т.В. и др. ОИЯИ, 18-12699, Дубна, 1979.
8. Выропаев В.Я. ОИЯИ, 14-9446, Дубна, 1976.
9. Глейбман Э.М., Жучков В.Е. ОИЯИ, 10-8051, Дубна, 1980.
10. Хуснутдинов Р.И., Лобанов Е.М., Мингалиев Г.Г. Сб. статей "Активационный анализ", Изд-во ФАН, Ташкент, 1971, с.9.
11. Ковалев В.П. Вторичные излучения ускорителей электронов. Атомиздат, М., 1979.
12. Lederer M.C., Hollander J.M., Perlman I. Table of Isotopes. 6th Edition, John Wiley and Sons, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 мая 1980 года.