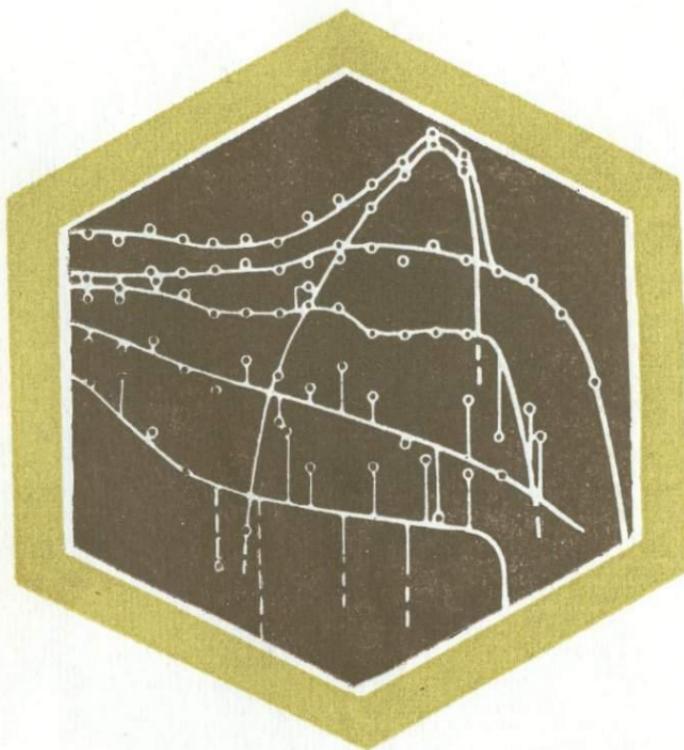


**ЯДЕРНО-
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ**
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ
УРАЛА



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
УРАЛА

3410

СВЕРДЛОВСК, 1980



УДК 550.832+543.08

Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. [Сб. статей]. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.— 96 с.

Представлены материалы о теоретических, методических, аппаратурных разработках ядерно-геофизических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых. Обсуждены результаты опробования нейтронно-активационного, гамма-гамма-селективного и рентгено-радиометрического методов на месторождениях меди, ртути, асбеста, редких металлов. Рассмотрены некоторые вопросы цифровой регистрации и автоматической обработки каротажных данных.

Изучено влияние современных геологических процессов на значения абсолютного возраста урановой минерализации. Рассмотрены изменения изотопных отношений наиболее распространенных во Вселенной элементов в результате воздействия нейтронных потоков.

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов, занимающихся изучением различных вопросов ядерной геофизики.

Ответственный редактор В. И. Уткин.

© УНЦ АН СССР, 1980.

Я 20804—995
053(02)7 24—1980

Ю. П. БУЛАШЕВИЧ, В. В. БАХТЕРЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАЛИЯ И НАТРИЯ
В МЕТАСОМАТИТАХ УРАЛА

Многочисленными исследованиями, например [1—3], установлено, что колчеданные месторождения сопровождаются метасоматическими изменениями вмещающих горных пород. Зоны измененных пород во много раз превышают размеры рудных тел. Такие большие размеры ореолов измененных пород облегчают поиски месторождений, но в то же время затрудняют их, так как сплошное опоискование требует больших затрат сил, средств и времени. Для более эффективных поисков важно знать внутреннее строение метасоматического ореола, т. е. его зональность, теоретическая разработка которой принадлежит Д. С. Коржинскому [4]. Метасоматическая зональность представляет собой самое общее свойство всех метасоматических образований и заключается в последовательном изменении химического и минералогического состава горных пород с приближением к рудному телу или рудоподводящему каналу. При этом степень изменения горных пород оказывается наибольшей в непосредственной близости от рудных тел или рудоподводящих каналов [5, 6]. В процессе метасоматических изменений горных пород происходит привнос, вынос и перераспределение некоторых химических элементов, в том числе калия и натрия.

Для метасоматических зон и особенно для серицитсодержащих измененных горных пород, вмещающих колчеданные месторождения, установлен преимущественный интегральный вынос натрия и привнос калия [7]. В то же время исследователи отмечают изменения содержания калия и натрия в метасоматических породах: с приближением к рудному телу вариации в содержаниях достигают десятков раз [8, 9]. Вдали от рудных тел изменения в содержании этих компонентов незначительны. Тем не менее по отдельным образцам еще нельзя судить о закономерностях пространственного распределения калия и натрия относительно рудных тел и метасоматически измененных горных пород. Только непрерывное изучение распределения калия и натрия по скважине позволит установить характер изменения

этих элементов, которые в окорудном пространстве образуют щелочно-метасоматическую зональность. Отчетливо она выражается по отношению K_2O/Na_2O , и общей ее тенденцией является уменьшение значений K_2O/Na_2O от рудных тел к периферии ореола [10]. При определении этих параметров метасоматического ореола важное место могут занять ядерно-геофизические методы, позволяющие изучить распределение калия и натрия в горных породах с любой степенью детальности непосредственно в скважине. На Чусовском колчеданном месторождении впервые под руководством Г. С. Возженикова [11] в ряде скважин по профилю было изучено распределение натрия, определяемое методом нейтронной активации горной породы в ее естественном залегании. При этом регистрировались гамма-кванты с энергией выше 1 МэВ. Установлено, что к рудному телу тяготеет зона, обогненная натрием, и отмечена тенденция к ее выклиниванию по падению.

В настоящей статье рассматриваются материалы по исследованию распределения калия и натрия по скважинам четырех месторождений меди Урала — Чусовского, Зюзельского, Маканского, Узельгинского, геолого-геофизические сведения о которых имеются в [12—15].

Методика работ. Калий и натрий определяли ядерно-геофизическими методами по естественному излучению калия-40 и гамма-излучению натрия-24, образующемуся в результате нейтронной активации [16—19]. Радиоактивный изотоп калий-40, содержание которого в природной смеси изотопов калия составляет 0,0119%, испускает монохроматическое излучение с энергией гамма-квантов 1,459 МэВ с выходом 10 гамма-квантов на 100 распадов [20]. Кроме калия-40, в исследуемых горных породах могут присутствовать и другие естественные гамма-излучатели, затрудняющие выделение гамма-излучения калия-40,— это элементы уранового и ториевого радиоактивных рядов. Поэтому для исключения влияния гамма-излучения элементов уранового и ториевого радиоактивных рядов, интенсивность гамма-излучения измерялась в трех энергетических интервалах. Первый интервал выбран в области фотопика калия-40 1,15—1,40, второй интервал 1,68—1,92, третий 2,38—2,76 МэВ. При этом гамма-активность, измеренная в третьем интервале, обусловлена излучением только радиоактивного элемента ториевого ряда ThC'' , во втором интервале — излучением элементов уранового и ториевого рядов, а в первом интервале — еще и калия-40. По гамма-активностям, измеренным в трех энергетических интервалах, с помощью спектральных коэффициентов [21] рассчитывается интенсивность гамма-излучения изотопа калия-40. Интенсивность гамма-излучения натрия-24 определяется гамма-спектрометрическим нейтронным активационным методом. В результате нейтронной активации горных пород могут образовываться, кроме натрия-24, другие радиоактивные гамма-

излучатели. Поэтому для исключения влияния последних на результаты определения натрия измеряют наведенную гаммаактивность в энергетическом интервале 2,38—2,76 МэВ. В этом интервале она обусловлена практически только излучением изотопа натрия-24 (энергия гаммаизлучения натрия-24 2,76 МэВ [22]). Исследование вдоль скважины проводится по точкам, расстояние между которыми, как правило, равно 5 м. Участки с резким изменением параметра $q = I(K)/I(Na)$ исследуются через 2,5 и даже 1,25 м. Источник нейтронов ампульный, полонийбериллиевый, активностью около 10^7 нейтр/с. Каротаж выполнен с помощью спектрометра [16—17], разработанного в Институте геофизики УНЦ АН СССР. Детектор гамма-квантов — сцинтилляционный кристалл NaJ(Tl) размером 30×70 мм и ФЭУ-31. Разрешение спектрометра по изотопу цезий-137 не хуже 13%. Статистическая погрешность измерений интенсивностей гаммаизлучения калия-40 и натрия-24 около 3%.

Обсуждение результатов. Результаты измерений приведены в интенсивностях гаммаизлучения калия-40 $I(K)$ и натрия-24 $I(Na)$.

Интенсивности излучения калия-40 и натрия-24 изменяются по скважинам достаточно сильно. При этом минимальным значениям $I(Na)$ соответствуют повышенные значения $I(K)$. На Чусовском месторождении (рис. 1, а) это имеет место на контакте альбитофирос и сланцев, а также в кровле рудного тела на глубине 300 м. Рудному телу сопутствует 25-метровая область низких значений $I(Na)$, к центру которой приурочен минимум $I(K)$, а к краевым частям — его повышенные значения. На Маньинском месторождении (рис. 1, б) наблюдается в общем такая же закономерность, хотя глубокому минимуму $I(Na)$ в центральной части сланцев соответствует также минимум $I(K)$, но с существенно большим значением. На Зюзельском месторождении (рис. 2) картина в основном аналогичная. Порфирит выделяется пониженным значением $I(K)$ и повышенным $I(Na)$. Сланцы дифференцируются по значениям $I(K)$ и $I(Na)$. Причем колебания интенсивностей излучения калия-40 и натрия-24 очень резкие на достаточно малых расстояниях. Из рис. 1 и 2 видно, что только при детальном опробовании можно получить правильное представление о закономерностях изменения содержания калия и натрия в рудных зонах и околоврудных метасоматитах.

В сравнении с регистрируемыми спектральными интенсивностями, или концентрациями, более контрастной величиной является их отношение q . Рудные зоны на Чусовском месторождении характеризуются общим высоким значением параметра q (рис. 3, а, скв. 2 и 3). Ниже по падению происходит не выклинивание, как это указано в [11], а расчленение области высоких значений на отдельные пики, как это следует из данных по скв. 4 (см. рис. 3, а). Верхний пик соответствует контакту

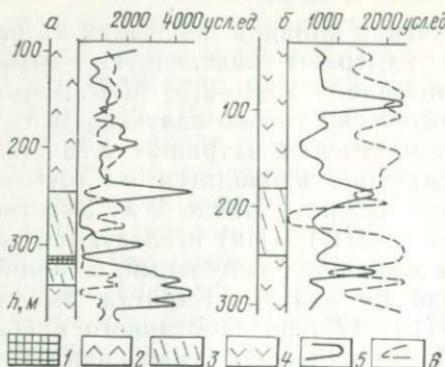


Рис. 1. Результаты комплексного каротажа по скв. 4 Чусовского медноколчеданного месторождения (а) и скв. 4 Маканского сульфидного месторождения (б).

1 — колчеданная руда; 2 — альбитофирсы; 3 — метаморфические (кварцево-сернистые, кварцево-хлоритовые) сланцы; 4 — порфиры андезитового состава и их туфы; 5, 6 — интенсивность гамма-излучения калия-40 и активированного натрия-24, соответственно.

сланцев с альбитофирами, а нижний — с порфиритами. Один из внутренних пиков приурочен к руде, второй — к породам кровли. Выше рудной зоны по восстанию наблюдается лишь незначительное повышение q .

Еще более четкая картина наблюдается на Маканском месторождении (рис. 3, б; см. таблицу). Здесь для скв. 2 и 3 по кривой q наблюдается по два максимума. Один — против руды, другой — в породах кровли. По скв. 1 имеется только один весьма слабый максимум, зато безрудная скв. 4 отмечается очень высоким значением отношения $I(K)/I(Na)$, равным 70,9. Этот максимум приурочен к кварцево-сернистовым сланцам и тяготеет к их контакту с вышележащими порфиритами. Ширина аномалии 25 м. Так же четко двумя максимумами q выделяется рудная зона в скважине на Узельгинском месторождении (рис. 4). Один максимум находится против руды, другой — в породах кровли.

Из анализа пиков q выявляется интересная связь между количеством пиков, их соотношением по величине и интенсивностью оруденения. Так (см. рис. 3, б, скв. 2 и 3; рис. 6), на кривой q наблюдается по два максимума почти одинаковой величины; по скв. 3 верхний максимум чуть меньше. Скв. 2 вскрыла руду, представленную сплошным медным и медно-цинковым колчеданом, причем содержание сульфидов в руде достигает 90% и выше, скв. 3 — вкрапленную медно-цинковую руду, скважина на Узельгинском месторождении (см. рис. 4) — сплошной цинковый колчедан.

Для скважин на Зюзельском месторождении на кривой q против непромышленной сульфидной вкрапленности на глубине 290 м (см. рис. 2, а) наблюдается два пика, причем верхний — весьма слабый, а против вкрапленности на глубине 240 м — один слабый пик. Интересно, что против одиночных пиков нет руды, более того, тут часто горная порода макроскопически по описанию керна не отличается от соседней. Своебразно поведение кривых q на рис. 3, а (Чусовское месторождение, скв. 2, 3).

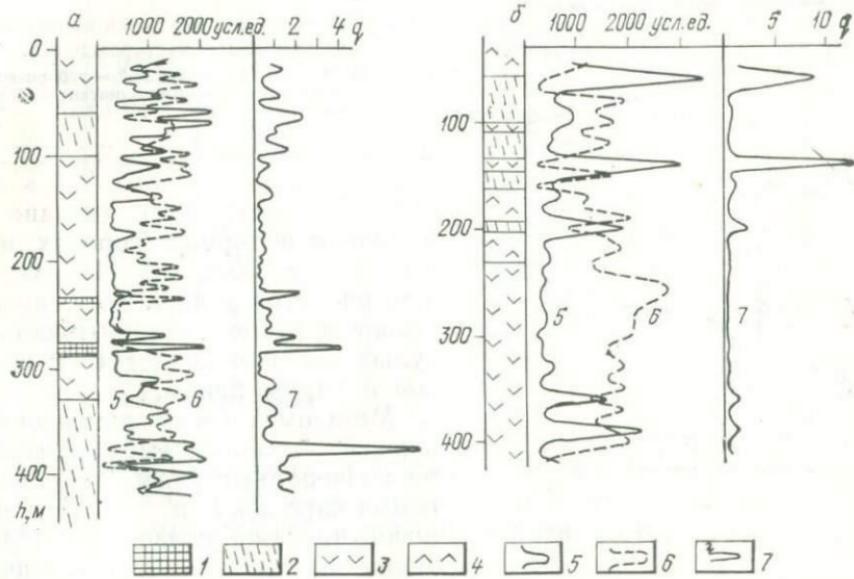


Рис. 2. Результаты каротажа по скв. 1 (а) и 3 (б) на Зюзельском месторождении.

1 — слабая вкрапленность сульфидов; 2 — метаморфические (кварцево-серicitовые, кварцево-хлоритовые) сланцы; 3 — порфирит; 4 — порфириоид; 5, 6 — интенсивность гамма-излучения калия-40 и активированного натрия-24, соответственно; 7 — график отношения интенсивностей.

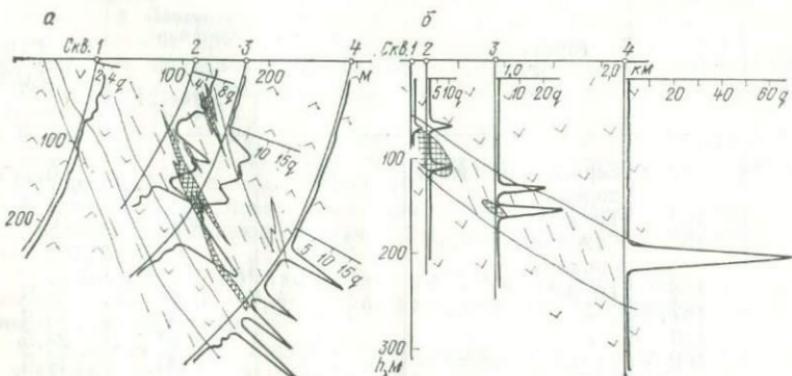


Рис. 3. Результаты определения калий-натриевого отношения по скважинам Чусовского (а) и Маканского (б) месторождений.

Литологические обозначения такие же, как на колонке к рис. 1.

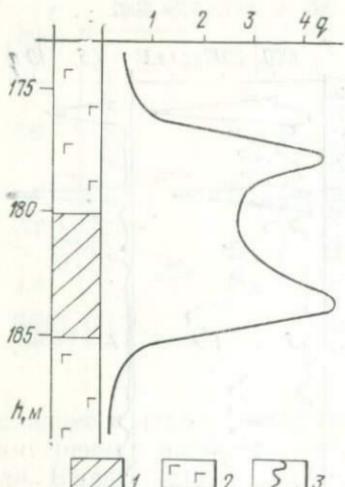


Рис. 4. Результаты каротажа по скважине Узельгинского месторождения.
1 — цинковистый колчедан; 2 — габбро-диабаз; 3 — график отношения интенсивностей гамма-излучения $I(K)/I(Na)$.

Последнее, вероятно, связано с наличием в горных породах нескольких рудных тел. По скв. 4 (см. рис. 3, а) рудная масса представлена слабой вкрапленностью сульфидов и отмечается по кривой q одним пиком.

Метасоматически измененные породы — поисковый признак на колчеданные руды. Комплекс гамма-каротажа и активационного каротажа позволяет оперативно определять в геологическом разрезе скважин калий-натриевое отношение или пропорциональное ему отношение спектральных интенсивностей гамма-излучения изотопов калия-40 и натрия-24. Этот параметр четко выделяет сравнительно узкие зоны наиболее интенсивного калий-натриевого метасоматоза. Отношение K/Na , определяемое в естественном залегании метасоматитов, несет дополнительную информацию об их возможной рудоносности. Соотно-

Результаты определения калий-натриевого отношения по скважинам Маканского месторождения

Скважина	Глубина опробования, м	Горная порода, руда	Интенсивность гамма-излучения изотопов		$q = \frac{I(K)}{I(Na)}$
			калия-40	натрия-24	
3	147,5	Серицит-кварцевая порода	930	2740	0,740
	150	То же	700	2840	0,246
	152,5	Сплошная медно-цинковая руда	2050	65	31,5
	155	То же	1760	84	21,0
	157,5	»	1550	33	46,8
	160	»	1670	63	26,5
	162,5	Туфы андезит-базальтового состава	4870	330	14,9
	165	Порфирит	1590	2350	0,677
	170	То же	1330	2470	0,538

Окончание таблицы

Скважина	Глубина опробования, м	Горная порода, руда	Интенсивность гамма-излучения изотопов		$q = \frac{I(\text{K})}{I(\text{Na})}$
			калия-40	натрия-24	
4	175	Серицит-кварцевая порода	1055	1870	0,567
	185	То же	1740	1335	1,300
	195	»	1225	2025	0,605
	205	»	709	10	70,9
	215	»	523	24	21,8
	225	»	730		
	235	»	980		
	245	»	687	2370	0,290
	255	Порфирит	668	2120	0,315

шение пиков отношения, полученного в нескольких скважинах, расположенных в одном разведочном профиле, возможно, указывает местоположение вероятного рудопроявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татаринов П. М. Условия образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. М., Госгеолтехиздат, 1963.
2. Засухин Г. Н., Логинова Л. А. Опыт применения геохимических поисков колчеданных месторождений на Южном Урале. М., Госгеолтехиздат, 1963.
3. Курицина Г. А. Геолого-петрографическая характеристика рудовмещающей толщи северной части Красноуральского района.— В кн.: Материалы по петрографии и геологии главной (западной) вулканогенной зоны восточного склона Среднего Урала/Горн.-геол. Ин-т УФАН СССР. Свердловск, 1958.
4. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности. М., Наука, 1969.
5. Новицкий В. Я. Метасоматическая зональность медноколчеданных месторождений Северного Урала на примере Воленторского месторождения и ее использование при поисках скрытого оруденения.— В кн.: Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений (тезисы докладов и сообщений к совещанию)/АН СССР, М-во геологии СССР. М., 1972.
6. Янишевский Е. М., Григорян С. В., Баранов Э. Н., Верепов Г. И., Каблуков А. Д. Эндогенные ореолы рассеяния некоторых гидротермальных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1963.
7. Прокин В. А. Оценка колчеданных рудопроявлений по метасоматическим изменениям вмещающих пород (на примере Урала).— Советская геология, 1967, № 9.
8. Буслаев Ф. П. Метаморфизм серицитов из Уральских колчеданных месторождений.— В кн.: Труды Второго уральского петрографического совещания. Свердловск, 1969.
9. Нечеухин В. М., Гуревич Л. П. Минералого-геохимические особенности продуктов региональных, локальных и околоврудных изменений вулканогенных пород раннегеосинклинальных отложений Урала.— В кн.: Ежегодник 1969/Горн.-геол. Ин-т УФАН СССР. Свердловск, 1970.
10. Пищеничный Г. Н. Метасоматическая зональность Узельгинского мед-

ноколчеданного месторождения и ее использование при поисках и разведке глубокозалегающих рудных тел (Южный Урал).— В кн.: Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений/АН СССР, М-во геологии. М., 1972.

11. Возженников Г. С., Марков А. И., Зараменских Н. М. О картировании ореолов гидротермально измененных пород активационным анализом в скважинах.— Изв. вузов. Горный журнал, 1973, № 1.

12. Булашевич Ю. П., Ермаков Н. П. Перспективы применения геофизических методов для регионального изучения Урала и поисков полезных ископаемых.— В кн.: Состояние и перспективы развития геофизических методов на Урале/Ин-т геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1971.

13. Кононенко И. И., Кожевников А. А., Родионов П. Ф. О разрешающей способности радиоволнового просвечивания при поисках и разведке колчеданных и медномагнетитовых месторождений Урала.— В кн.: Электрометрия при поисках сульфидных месторождений/Ин-т геофизики УФАН СССР. Свердловск, 1968.

14. Ермаков Н. П., Сегаль З. Я., Пильник И. М., Бояринков В. В., Бабенков В. К. Поиски глубокозалегающих месторождений железа, меди и бокситов на Урале с применением комплекса геофизических методов.— В кн.: Строение и развитие земной коры и структур рудных полей Урала по геофизическим данным/Ин-т геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1976.

15. Дедышева Т. В., Родионов П. Ф., Рублева И. А., Таврин И. Ф. Особенности физических полей над колчеданными месторождениями Ревдинского и Полевского районов на Среднем Урале.— Там же.

16. Деев Л. Л., Сенько-Булатный И. Н. Прибор для скважинной гаммаспектрометрии.— Методические вопросы рудной геофизики Урала/Ин-т геофизики УФАН СССР. Свердловск, 1965.

17. Бахтерев В. В., Баусов А. В., Зырянов Л. А., Сенько-Булатный И. Н., Светлов М. И. Стабилизация скважинного гамма-спектрометра с помощью инжекционного диода.— Приб. и техн. эксп., 1973, № 4.

18. Булашевич Ю. П., Бахтерев В. В., Сенько-Булатный И. Н. Картирование метасоматически измененных горных пород рудных месторождений ядерно-геофизическими методами.— В кн.: Геофизические исследования при крупномасштабном картировании и прогнозировании месторождений. Тезисы докладов всесоюзного совещания в г. Ленинграде 24—26 февраля 1976 г./Всес. ин-т развед. геофизики. Л., 1976.

19. Бахтерев В. В., Сенько-Булатный И. Н. Ядерно-геофизический метод исследования околоврудных метасоматитов. Свердловский ЦНТИ. Информ. листок № 321-74. Свердловск, 1974.

20. Баранов В. И. Радиометрия. М., Изд-во АН СССР, 1956.

21. Воскобойников Г. М., Карташов Н. П. К вопросу о спектрометрических исследованиях γ -излучения естественных излучателей.— Атомная энергия, 1959, т. 6, вып. 1.

22. Меднис И. В. Справочные таблицы для нейтронно-активационного анализа. Рига, Зинатне, 1969.

В. А. ЩАПОВ, В. И. УТКИН

**О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ АСБЕСТОВЫХ ЖИЛ
МЕТОДАМИ КАРОТАЖА**

Асбестоносные породы — классический пример пород с минерализацией прожилкового типа: мощность асбестоносных жил составляет, как правило, менее 2 см. Интересно рассмотреть возможности гамма-гамма-метода коллимированных пучков [2] для выделения асбестоносных жил, которые по своим электрическим свойствам практически не отличаются от вмещающих пород (серпентинитов и перидотитов).

Основные породы Баженовского месторождения, вмещающие асбестоносную толщу, — перидотиты, серпентиниты, диориты и гранатовые породы [1]. Плотность и химический состав асбеста и этих пород указаны в табл. 1.

Содержание главных окислов (SiO_2 и MgO) в хризотил-асбесте и серпентините варьирует в небольших пределах, что свидетельствует о близости кристаллических структур хризотил-асбеста и серпентинита. Перидотит характеризуется повышенной (приблизительно на 0,2—0,3 г/см³) плотностью относительно серпентинитов при практически том же химическом составе. Диорит отличается не только повышенной плотностью, но и повышенным, относительно среднего значения, содержанием железа и кальция. Для гранатовых пород характерно очень высокое содержание окиси кальция.

Интересно, что хризотил-асбест эластичный практически не содержит железа, а хризотил-асбест хрупкий и серпентинит с прожилками хризотил-асбеста имеют довольно высокие содержания окиси железа. Известно, что хризотил-асбест в серпентините и перидотитах развивается в процессе хризотилизации по трещинам, выполненным серпентином первой генерации — лизардитом. При этом лизардит, развиваясь по трещинам, образует лизардитовые шнуры, мощность которых около 0,05—0,5 мм. Для этих шнурков характерны продольные просечки, расположенные посредине шнурков и заполненные магнетитовыми полосками из сплошных или разобщенных зернышек. Хризотил-асбест развивается по лизардиту в процессе хризотили-

Таблица 1

Плотность и химический состав пород Баженовского месторождения

Породы	Удельный вес, $\text{г}/\text{см}^3$	Химический состав, %					
		SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	CaO	$Z_{\text{зфф}}$
Хризотил-асбест:							
эластичный	2,49—2,52	42,1	0,7	40,8	1,1	0,3	11,1
хрупкий	2,50—2,54	39,5	0,8	36,4	6,1	0,6	12,4
Серпентинит с хризотил-асбестом	2,48—2,58	36,4	1,4	35,1	12,3	0,1	13,9
Серпентинит	2,47—2,57	38,9	2,2	40,7	8,1	0,6	13,1
Перидотит	2,79	39,0	1,3	41,1	8,4	3,2	13,4
Диорит	2,75	55,8	15,9	6,8	10,0	6,4	14,2
Гранатовые породы	2,45—2,53	42,4	15,1	11,6	1,50	27,4	14,1

зации и накладывается на петельную структуру, унаследованную от лизардита и созданную магнетитовыми зернышками. При выклинивании прожилок хризотил-асбеста направление прожилковой минерализации легко прослеживается по просечкам, заполненным зернышками магнетита [1]. Наблюдаемая генетическая связь хризотил-асбеста с магнетитом отражена в табл. 1. При хорошей очистке волокон хризотил-асбеста от

Таблица 2

Аномальные изменения спектральной интенсивности

№ п. п.	a	b	H, мм	$E \gamma$, кэВ	Хризотил- асбест		Гранодиорит		Перидотит	
	град	град			A	η	A	η	A	η
1			0	50 75	0,92 0,94	0,98	1,09 1,95	0,95	0,89 0,99	0,99
2	45	45	15	50 75	0,78 0,90	0,87	0,81 0,93	0,87	0,94 0,98	0,96
3			20	50 75	0,88 0,93	0,95	0,88 1,03	0,85	0,93 1,00	0,93
4	90	30	5	50 75	0,78 0,82	0,95	0,89 0,97	0,92	0,90 0,93	0,97
5	45	90	5	50	0,54— —0,62	0,83	0,74	0,80	0,89	0,95
				75	0,65— —0,77	0,81	0,92		0,34	

Таблица 3

**Амплитуды аномалий спектральной интенсивности
при $\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$, $H=5,0$ мм**

$E \gamma, \text{ кэВ}$	Хризотиз-асбест		Гранодиорит		Перидотит	
	A	η	A	η	A	η
50	0,54—0,62	0,85	0,74		0,89	
Более 80	0,63—0,73	0,84	0,96	0,77	0,98	0,90

зернышек магнетита содержание железа в волокнах составляет 1—1,52%. Хрупкий хризотил-асбест хуже отделяется от магнетита, и содержание железа в нем повышается до 6,1%, а серпентинит с прожилками асбеста имеет аномально высокое содержание железа (12,3%). Последнее связано с увеличением количества магнетита, приуроченного к прожилкам хризотил-асбеста.

Интересные данные получены с помощью магнитного микрозонда при исследовании поверхности образцов серпентинита с прожилками хризотил-асбеста (рис. 1). На графиках отчетливо просматривается приуроченность повышенного содержания магнетита к жилам хризотил-асбеста. Указанное обстоятельство можно использовать при выделении асbestовых жил методом селективного гамма-гамма-микрокаротажа [3].

В лабораторных условиях исследовали горные породы, характерные для Баженовского месторождения хризотил-асбеста: серпентиниты с прожилками хризотил-асбеста, перидотиты, гранодиоритовые породы. Предварительно образцы разрезали таким образом, чтобы на месте среза сохранялись основные особенности структуры этих пород (поперечные и продольные прожилки, вкрапления и т. п.).

В качестве измерительной установки использовали измерительный выносной блок снарядов селективного ГГК (СГГК-48). Углы наклона коллиматоров к поверхности образца для источника α и детектора β измерительного зонда изменяли от 30 до 90° через 15° , а расстояние H между ближайшими точками коллимационных отверстий на поверхности снаряда — от 0 до 30 мм.

Наиболее интересные результаты приведены на рис. 2, где представлены спектры рассеянного гамма-излучения, полученные на основные породы асbestового месторождения.

На рис. 2, a , представлены спектры, полученные при $\alpha=45^\circ$, $\beta=45^\circ$, $H=35$ мм. На фоне серпентинита увеличение асбестосодержащности вызывает уменьшение интенсивности рассеянного гамма-излучения для всех регистрируемых энергий гамма-квантов.

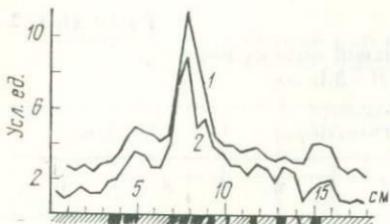


Рис. 1. Величина магнитной восприимчивости вдоль образцов асбестосодержащих серпентинитов Баженовского месторождения. Длина магнитного зонда: 1 — 2, 2 — 1 см. Ниже оси абсцисс показана структура сечения образца; темные линии — прожилки асбеста.

Для гранодиоритовых пород интенсивность линии 51 кэВ находится на уровне монолитного волокна хризотил-асбеста, а для линии 82 кэВ спектральная интенсивность больше, чем для серпентинитов. При уменьшении расстояния между крайними токами отверстий коллиматоров до 22 мм (рис. 2, б) спектры, зарегистрированные на гранодиоритах и асбестоносной руде, практически не различаются. На фоне серпентинитов их интенсивность меньше для всех регистрируемых энергий рассеянных гамма-квантов.

Дальнейшее уменьшение расстояния между коллиматорами приводит к существенному изменению распределения спектральных интенсивностей. При $\alpha = \beta = 45^\circ$, $H = 15$ мм (рис. 2, в) появляется «зона прямой видимости» [3], т. е. проекции коллиматоров источника и детектора на исследуемую среду имеют

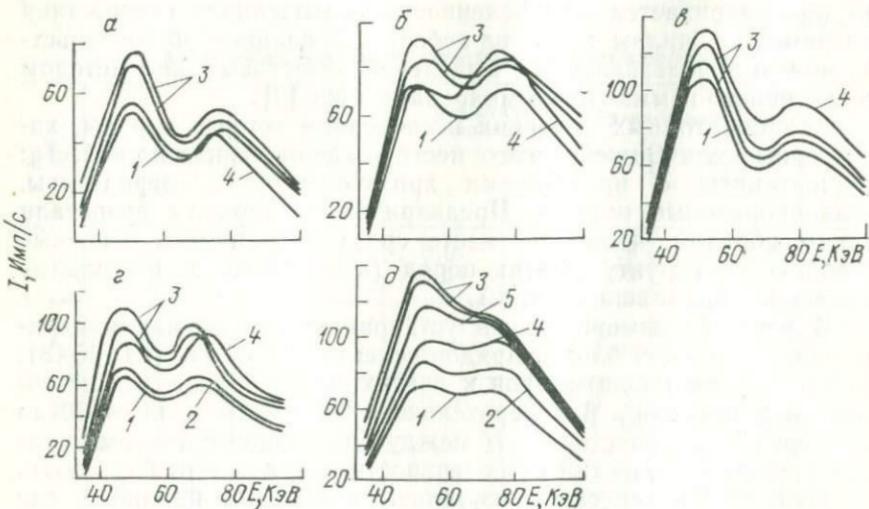


Рис. 2. Спектры рассеянного гамма-излучения селективного гамма-гамма-микрокаротажа.

a—e: $\alpha = \beta = 45^\circ$, $H = 35$ (а), 22 (б) и 15 мм (в); *е:* $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $H = 20$ мм;
g: $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $H = 17$ мм.

1 — монолитное волокно хризотил-асбеста мощностью 15 мм; 2 — серпентинит с прожилками асбеста мощностью 3—8 мм; 3 — серпентинит без прожилок асбеста; 4 — гранодиорит; 5 — перидотит.

общую поверхность. Гранодиоритовые породы в этих условиях измерений отмечаются большей спектральной интенсивностью рассеянных гамма-квантов, чем серпентиниты, в то время как для прожилок асбеста характерно понижение интенсивности рассеянного излучения.

Для $\alpha=90^\circ$, $\beta=30^\circ$, $H=20$ мм (рис. 2, *г*) характерны пониженные (относительно серпентинитов) значения спектральных интенсивностей как для гранодиоритов, так и для прожилок хризотил-асбеста.

При $\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$ и $H=18$ мм спектры рассеянного серпентинитами гамма-излучения (рис. 2, *д*) имеют наибольшую интенсивность во всей области регистрируемых энергий. Перidotиты и гранодиориты характеризуются пониженными значениями спектральной интенсивности, наименьшая величина которой наблюдается в области энергий 50 кэВ. При энергиях гамма-квантов более 80 кэВ указанные среды различаются незначительно. Жилы хризотил-асбеста отличаются существенно от этих сред во всем диапазоне регистрируемых энергий.

На основании проведенных экспериментов составлена табл. 2, где указаны аномальные изменения спектральной интенсивности по отношению к серпентиниту (спектральная интенсивность и отношения интенсивностей на серпентинитах приняты равными единице; A — амплитуда аномалии; η — амплитуда спектральных отношений).

Из табл. 2 видно, что спектральные характеристики рассеянного гамма-излучения для жил хризотил-асбеста и гранодиорита близки. Исключение составляет изменение спектральной интенсивности при энергии 75 кэВ в геометрии 3, когда спектральная интенсивность для гранодиоритов выше, чем для серпентинитов.

В геометрии 5 наблюдается аномальное уменьшение спектральной интенсивности в области 50 кэВ для хризотил-асбеста. Для гранодиоритов изменение спектральной интенсивности приблизительно в два раза меньше. В этой геометрии для различия указанных пород необходимо регистрировать спектральную интенсивность в области энергий выше 80 кэВ или отношения спектральных интенсивностей с $E_y = 50$ кэВ и $E_y > 80$ кэВ. Для последних условий измерений величины амплитуд аномалий указаны в табл. 3. Наиболее перспективно применение регистрации рассеянного гамма-излучения с энергией более 80 кэВ.

Исходя из факта обогащения асbestовых прожилок магнетитом, т. е. учитывая генетическую связь магнетита с асbestовыми прожилками, можно сделать вывод о том, что последние будут выделяться как аномальным уменьшением спектральной интенсивности, так и аномальным увеличением магнитной восприимчивости и, вероятно, электропроводности. Однако для использования двух последних свойств асbestовых руд с целью

выделения прожилок хризотил-асбеста необходимо конструирование специальных скважинных электрических и магнитных микрозондов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Татаринов П. М., Артемов В. Р. Месторождения хризотил-асбеста СССР. М., Недра, 1967.
2. Уткин В. И., Бурдин Ю. Б., Гера Д. Ф. Радиометрический способ исследования горных пород. Авт. св. 354384 [СССР].—Бюлл. изобрет., 1974, № 42.
3. Уткин В. И., Стариков В. Н., Ермаков В. И., Якушев К. Применение метода Монте-Карло для решения задач селективного гамма-гамма-метода.—Изв. АН СССР. Физика Земли, 1974, № 9.

В. В. ШЕСТАКОВ, О. М. НОМЕРОВАННЫЙ,
В. Н. СТАРИКОВ, Н. Н. ХАМИДУЛЛИН

СТРУКТУРА РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ПЛОСКИХ ПРОБАХ

Рентгено-радиометрический метод анализа вещества (РРМ), связанный в СССР с именем А. Л. Якубовича, его учеников и последователей, находит широкое применение в практике аналитических лабораторий для определения элементного состава различных веществ [1], и прежде всего руд и продуктов их переработки [2]. Порог чувствительности анализа при детектировании характеристического излучения элементов сцинтиляционными и пропорциональными счетчиками составляет обычно 10^{-1} — $10^{-2}\%$ [3].

Применение полупроводниковых детекторов (ППД) и малошумящих предусилителей [4] при регистрации характеристического излучения позволило, благодаря резкому улучшению энергетического разрешения, снизить порог чувствительности метода до 10^{-2} — $10^{-3}\%$ [2, 3, 5].

Физические факторы, определяющие порог чувствительности, можно разделить на два класса.

1. Аппаратурные факторы: материал, качество, конструкция детектора; разрешение спектрометрического тракта; конструкция и материал коллиматоров первичного и отраженного излучения и др.

2. Методические факторы: энергетическая характеристика возбуждающего излучения (выбор «оптимального» источника); толщина пробы (выбор оптимальной толщины); угол облучения и угол, под которым принимается рассеянное излучение (выбор оптимальной геометрии); методики измерений и обработки результатов (экспозиция, градуировка, учет фона и т. п.).

Для обеспечения минимального порога чувствительности необходимо иметь представление о механизме проявления каждого из факторов (приведенный выше перечень далеко не полный).

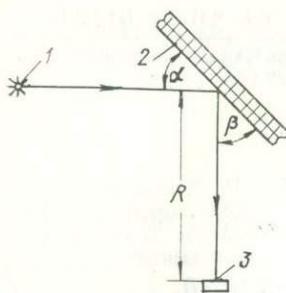


Рис. 1. Схема взаимного расположения детектора, пробы и источника, положенная в основу математической модели.

1 — источник; 2 — проба; 3 — детектор.

Как показал опыт практической работы с германиевыми детекторами радиационного типа, роль каждого из этих факторов, ввиду одновременного их действия, оценить экспериментально крайне затруднительно. Поэтому представляется целесообразным получить необходимые сведения посредством математического моделирования процесса.

В настоящей работе описаны методика и результаты расчетов спектров рассеянного и характеристического излучения, испускаемого плоскопараллельными пластинами (пробами) при РРМ анализе.

Постановка и условия задачи

Необходимо рассчитать спектр характеристического и рассеянного излучения, испускаемого пластинками различной толщины под воздействием квантов рентгеновского излучения. Расчетные данные должны быть представлены в виде парциальных спектров 1; 2; 3; 4 и 5-кратного рассеяния, суммарного спектра и линии характеристического излучения одного из редких элементов со средним атомным весом.

Условия: источник точечный, моноэнергетический, энергия 122 кэВ (основная линия источника Со-57, эффективного при анализе на элементы со средним атомным номером). Кванты источника распространяются в единственном направлении, не меняя энергии («идеальный» коллиматор) до момента пересечения поверхности пробы, обращенной к источнику, в единичной точке (рис. 1).

Пробы — плоскопараллельные бесконечные пластины из кремнезема SiO_2 толщиной 0,03; 0,1; 0,3; 1,0; $3,0 \mu^{-1}$ (μ — линейный коэффициент поглощения энергии 122 кэВ без учета когерентного рассеяния). Анализируемый элемент — тантал; его содержание в пробе 0,01 %.

Угол падения первичных квантов $\alpha = 45^\circ$, угол отражения $\beta = 45^\circ$ (см. рис. 1).

Точечный детектор, которому условно присвоена площадь 1 см^2 , удаленный от точки входа квантов в пробу на расстояние 8 см, обладает стопроцентной эффективностью («идеальный» детектор) во всем расчетном спектре (40—122 кэВ). Спектр разбит на 41 энергетический подынтервал (по 2 кэВ каждый).

Расчет и программа

Математический расчет вида спектра рассеянного рентгеновского излучения производился методом Монте-Карло. Программа расчетов была составлена на алгоритмическом языке «АЛГОЛ БЭСМ-6». Способ моделирования с использованием статистических весов [6] (называемый иногда методом «фиктивных моделей» [7]) позволил при сравнительно небольшом количестве историй получить как суммарный спектр, так и парциальные спектры каждой кратности рассеяния до пятой включительно, со сходимостью, удовлетворительной для целой сравнительного анализа. Вероятность регистрации характери-

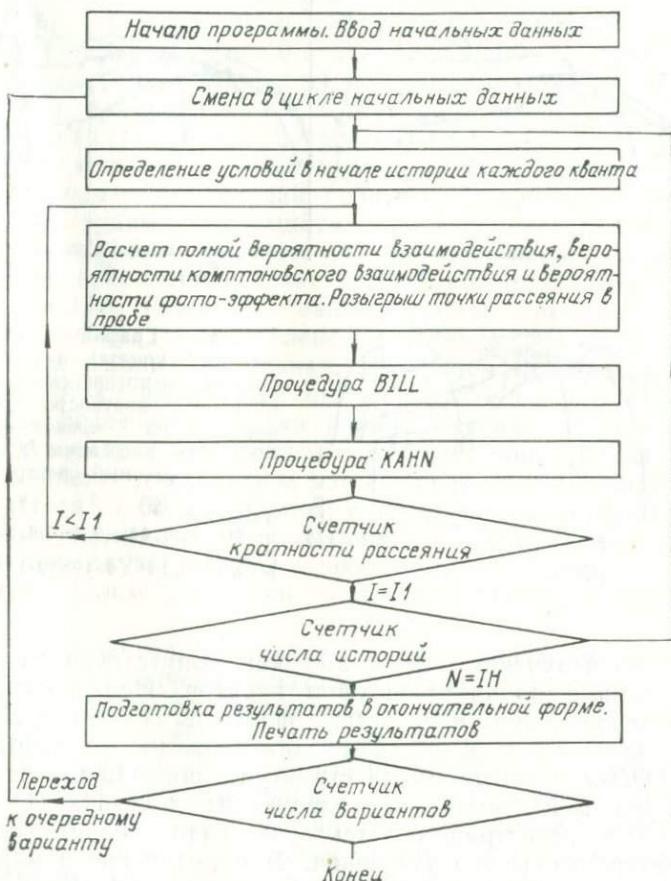


Рис. 2. Структура программы расчетов на ЭЦВМ спектра рассеянных гамма-лучей.

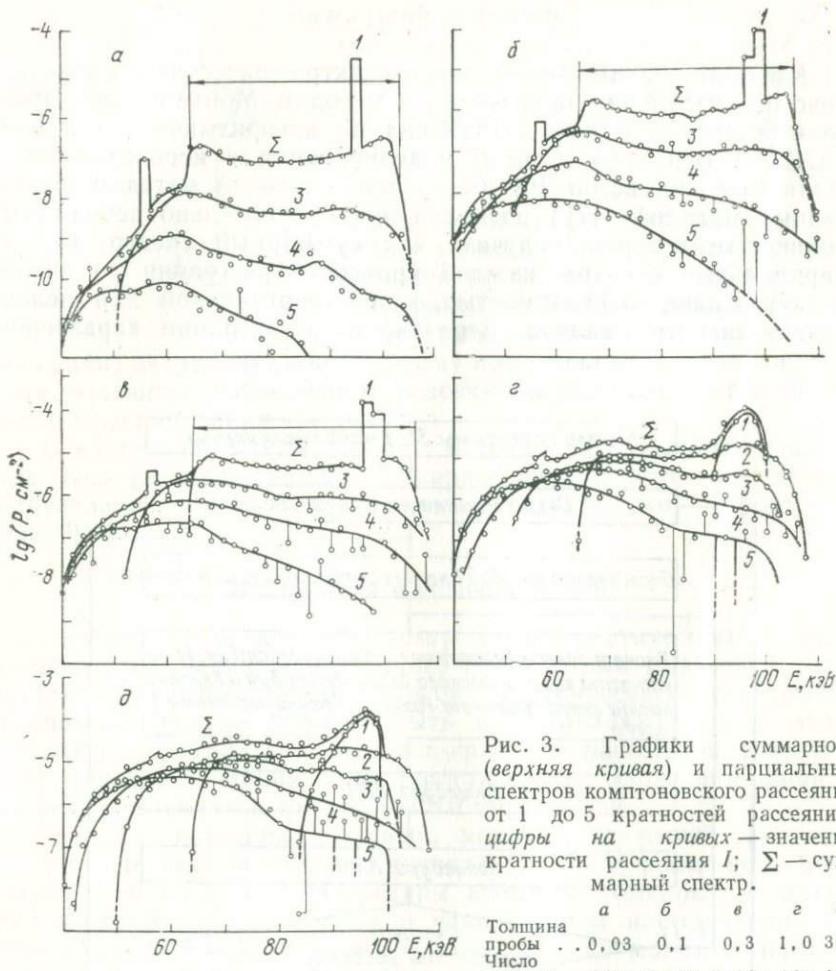


Рис. 3. Графики суммарного (верхняя кривая) и парциальных спектров комптоновского рассеяния от 1 до 5 кратностей рассеяния; цифры на кривых — значения кратности рассеяния I ; Σ — суммарный спектр.

а	б	в	г	д
Толщина пробы . . .	0,03	0,1	0,3	1,0 3,0
Число историй . . .	10^4	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	10^3 10^3

стического излучения рассчитана как сопутствующая рассеянию величина вдоль траектории квантов. Использованные в программе величины и расчетные формулы сечений взаимодействия излучения с веществом заимствованы из работы [8].

АЛГОЛ-программа имела структуру, показанную на рис. 2. Процедура BILL выполняет следующие действия: 1) расчет вероятности регистрации детектором квантов комптоновского и характеристического излучения, 2) определение номера соответствующего спектрального канала, в который попадает данный квант, 3) суммирование вероятностей регистрации в канале.

Процедура КАНН [9] выполняет следующие действия:
1) розыгрыш угла рассеяния и направления движения кванта в пробе, 2) определение энергии кванта после рассеяния.

В программе расчетов определение сечений взаимодействия производится по формуле линейной интерполяции. При интерполяции между энергиями, для которых сечения взаимодействия протабулированы в [8], средняя систематическая погрешность для сечений фотоэффекта составляет не более 10%, для сечений комптоновского рассеяния — не более 1%.

Анализ результатов

На рис. 3 приведены результаты расчета в виде суммарных и парциальных (обусловленных I -кратным рассеянием) спектров для проб различной толщины (от 0,03 до 3,0).

Весь диапазон исследуемых проб можно разбить по толщине на три интервала: 1) $d < 0,1$; 2) $0,1 < d < 1,0$; 3) $d > 1,0$. Первый интервал («тонкие» пробы) обычно используются при низкокороговых измерениях (ППД-спектрометрия); второй — при более высоких значениях порога чувствительности (сцинтиляционные счетчики); третий интервал эквивалентен полубесконечной среде — этот случай реализуется при поверхностном опробовании рудных тел (сцинтиляционные счетчики и ППД).

Для достижения высокого порога чувствительности наибольший интерес представляет первый интервал. Именно для случая $d = 0,03$ (рис. 3, а) наиболее четко проявляются особенности спектра, обусловленные спецификой рассеяния в плоско-параллельных пластинах. На общем фоне рассеянного излучения резко выделяется пик однократного рассеяния, его амплитуда более чем на два порядка превышает фон, образующийся в результате многократного рассеяния. Спектр квантов, испытавших двухкратное рассеяние, имеет вид плато, простирающегося от 66 до 105 кэВ, с четко выраженным краевыми максимумами, которые обусловлены кумулятивными эффектами при двухкратном рассеянии квантов вдоль пластинки под общим углом рассеяния около 145° (назад) и около 45° (вперед).

Спектры квантов, претерпевших более двух актов рассеяния, по мере увеличения кратности утрачивают симметричный вид, их максимум смещается в более низкоэнергетическую область, постепенно увеличивается наклон правого (высокоэнергетического) крыла. Левое крыло остается более крутым. Границное значение минимальной энергии I -кратного рассеяния можно вычислить аналитически по формуле Комptonа; оно соответствует траекториям гамма-квантов с максимальной потерей энергии. Присутствие в спектре многократно рассеянных гамма-квантов с энергиями, близкими к начальной, обусловлено наличием убывающей с кратностью рассеяния (но конеч-

ной) вероятности многократного рассеяния с малыми потерями энергии.

Область суммарного спектра в интервале 65—110 кэВ формируется (практически целиком) из пика однократного и протяженной области двухкратного рассеяния. Левое крыло суммарного спектра содержит несколько максимумов, вызванных трех- и более кратным рассеянием первичных гамма-квантов.

Расположенный на левом крыле пик характеристического излучения выделяется четко и превышает интенсивность фона на 1,5—2 порядка.

По мере увеличения толщины пробы (см. рис. 3,б—д) вклад в суммарный спектр от многократно рассеянных квантов увеличивается. На графиках это проявляется, в частности, как сближение (по интенсивности) парциальных спектров. Уменьшается наклон правого крыла парциальных спектров трех- и более кратного рассеяния. Кривая суммарного спектра приобретает плавный вид. Сглаживаются и постепенно исчезают максимумы спектральной интенсивности. Одновременно с расширением (в сторону меньших энергий) пика однократно рассеянного излучения его относительная амплитуда уменьшается.

Одна из наиболее важных особенностей, сопутствующая трансформации спектра при увеличении толщины пробы,— относительное уменьшение амплитуды пика характеристического излучения (при переходе от $d=0,03$ к $d=3,0$ на два порядка).

Выводы

1. Метод Монте-Карло позволяет эффективно моделировать процессы рассеяния первичного и возникновения характеристического излучения в плоскопараллельных пластинах.

2. Спектры рассеянного излучения тонких плоскопараллельных проб имеют специфические особенности, наличие которых следует учитывать при разработке методик РРФМ-анализа с германиевыми ППД.

3. Наличие, в частности, на низкоэнергетическом крыле спектра двухкратного рассеяния максимума и резкое снижение фона рассеянного излучения за границей двухкратного излучения диктует определенные условия при выборе источника возбуждающего излучения и геометрии измерений (для обеспечения минимального порога чувствительности положение анализируемого пика целесообразно выбирать за пределами спектра двухкратного рассеяния).

4. С увеличением толщины пробы отмеченные в п. 3 особенности сглаживаются, чувствительность РРФМ-анализа резко уменьшается в результате интенсивного роста фона, порождаемого многократно рассеянными квантами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hollstein M., De Voe J. R. The use of solid state detectors for the quantitative determination of W and Mo in alloys by gamma-excited x-ray fluorescence.—Radioanal. Chem., 1970, v. 6, N 1.
2. Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Прожиляговский С. М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. 2-е изд. М., Атомиздат, 1973.
3. Прикладная спектрометрия с полупроводниковыми детекторами. М., Атомиздат, 1974.
4. Вольдсегт Р. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения. М., Атомиздат, 1977.
5. Cooper J. A. Comparision of particle and photon excited X-ray fluorescence applied to trace element measurements of environmental samples.—Nucl. Instr. Meth., 1973, v. 106, N 3.
6. Соболь И. М. Численные методы Монте-Карло. М., Наука, 1973.
7. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М., Наука, 1971.
8. Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Сахаров В. Н. Распространение гамма-излучения в веществе. М., Физматиздат, 1960.
9. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. М., Госатомиздат, 1963.

В. В. ШЕСТАКОВ, О. М. НОМЕРОВАННЫЙ

ПРЕДЕЛЬНЫЙ ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
РЕНТГЕНО-РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА
АНАЛИЗА С ИСТОЧНИКОМ Со-57

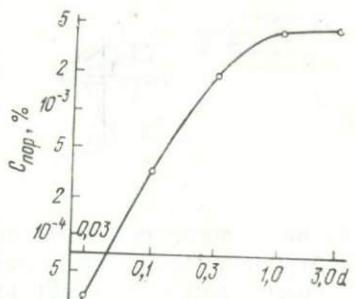
Показано¹, что порог чувствительности рентгено-радиометрического метода (РРМ) существенно зависит от толщины пробы и выбора источника излучения, и отмечается, что на реальный порог чувствительности влияют аппаратура и методика измерения. Ввиду того, что учесть влияние всех факторов экспериментальным путем практически невозможно, представляется целесообразным решать задачу последовательно: вначале найти некоторую функцию для «идеальных» условий, а затем поочередно налагать функции, обусловленные конструктивным выполнением аппаратуры и особенностями применяемой методики измерений, постепенно приближаясь к реальным физическим условиям.

В настоящей работе такой подход позволил на первой стадии определить предельный порог чувствительности метода, а затем произвести анализ и сравнительную оценку других факторов.

Вопрос о подходе к оценке порога чувствительности остается дискуссионным. Особенno большие затруднения возникают при оценке порога таких методов, как РРМ с применением ППД-спектрометрии, результаты которой существенно зависят от стабильности детектора, предусилителя, анализатора. В связи с указанным, а также для удобства сопоставления расчетных и экспериментальных данных представляется рациональным принять используемое иногда на практике определение порога чувствительности как содержание определяемого компонента, обусловливающее в спектре пик характеристического излучения, амплитуда которого составляет 10% от величины фона под ним.

¹ Шестаков В. В., Номерованный О. М., Стариков В. Н., Хамидуллин Н. Н. Структура рентгеновского спектра при возбуждении характеристического излучения в плоских пробах.— В наст. сб., с. 17—23.

Рис. 1. График зависимости от толщины пробы (из кремнезема) предельного порога чувствительности РРМ-анализа по К-линии tantalа



На рис. 1 приведен график предельного порога чувствительности анализа $C_{\text{пор}}$ при определении tantalа в зависимости от толщины проб, построенный по результатам расчетов спектров рассеянного в пробе излучения методом Монте-Карло. Из графика видно, что порог чувствительности снижается с уменьшением толщины. Вначале до толщины $0,3 \mu^{-1}$ (где μ — коэффициент линейного поглощения первичных квантов) проб изменение происходит медленно, затем при толщине пробы $0,1$ приобретает характер логарифмической прямой.

Наиболее важны следующие особенности отмеченной зависимости: неограниченное уменьшение $C_{\text{пор}}$ при уменьшении толщины пробы и асимптотическое выполнование кривой для проб толщиной больше $1,0$. Вторая особенность обусловлена тем, что фон под пиком порожден квантами трехкратного рассеяния², интенсивность потока которых для проб при $d \ll 1$ (d — толщина пластины) изменяется примерно пропорционально d^3 , в то время как интенсивность характеристического излучения пропорциональна d^1 .

Такая сильная зависимость предполагает снижение $C_{\text{пор}}$ на порядок при уменьшении толщины пробы в 3—4 раза. Уменьшая толщину пробы, можно было бы снизить $C_{\text{пор}}$ до 10^{-5} и ниже.

Для проверки указанного предположения были выполнены экспериментальные исследования (схема экспериментальной установки приведена на рис. 2) с применением германиевого ППД радиационного типа, снабженного охлаждаемым головным каскадом предусилителя. Результаты эксперимента показали, что при изменении толщины пробы от $0,06$ до $0,015$ чувствительность анализа возрастает лишь в 1,5 раза.

Такое резкое расхождение экспериментальных и теоретических данных может быть обусловлено наличием более высокого уровня «фонового» излучения в области анализируемого пика. Основными причинами этого явления могут быть следующие факторы:искажение первичного спектра коллиматором источника, изменение вторичного спектра в результате рассея-

² Шестаков В. В. и др. Структура рентгеновского спектра... — Там же, рис. 3.

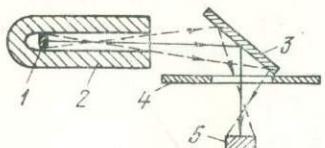


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения концентрации tantalа.
 1 — источник; 2 — коллиматор источника; 3 — проба; 4 — коллиматор детектора; 5 — детектор; линии со стрелками — гамма-лучи.

ния на стенках коллиматора вторичного излучения, искажения апертурного характера, рассеяние квантов стенками и арматурными элементами датчика и детектора и, наконец, искажения ввиду изменения функции отклика детектора.

Как показала опытная проверка, сужение каналов коллиматоров к существенным изменениям спектра не приводит. Следовательно, остаются две основные возможные причины увеличения фона: рассеяние в датчике и в арматуре детектора, а также влияние функции отклика.

С целью большего приближения к истине, с помощью описанного³ метода после соответствующей специализации программы была рассчитана функция отклика для детектора, предположительно близкого по параметрам к использованному в эксперименте: диаметр 8 мм, общая толщина 7 мм, толщина чувствительной области 5 мм, толщина «мертвой зоны» по боковой поверхности цилиндра 1 мм (диаметр чувствительной области 6 мм, глубина 5 мм).

Рассчитан график функции отклика на монолинию 100 кэВ (средняя энергия квантов однократного рассеяния источника Со-57) — см. рис. 3 (кривая 1). На графике, помимо пика однократного рассеяния, видны два максимума меньшего порядка. Первый из них (80 кэВ) соответствует рассеянию на 90°, второй (70 кэВ) — на 180°. Однако в связи с малой (относительно главного пика 100 кэВ) амплитудой эти максимумы не вызывают серьезных изменений регистрируемого спектра. Подъем в области малых энергий обусловлен высокой вероятностью процесса вылета квантов после потери части энергии при рассеянии в чувствительном слое детектора (потерянная энергия и регистрируется в детекторе).

Кривая 2 (см. рис. 3) соответствует суммарному спектру, рассчитанному для пробы толщиной 0,03 [1] (кривая смешена для удобства построения). Кривая 3 — спектр, построенный с учетом функции отклика. Наложение этой функции приводит к расширению пика однократного рассеяния и к подъему низкоэнергетического крыла; в области 50—98 кэВ заметных изменений не отмечается.

Кривая пороговой чувствительности РРМ, определенная с учетом функции отклика идеального германиевого детектора для элементов с атомным номером 62—92, приведена на рис. 4.

³ Шестаков В. В. и др. Структура рентгеновского спектра... — Там же.

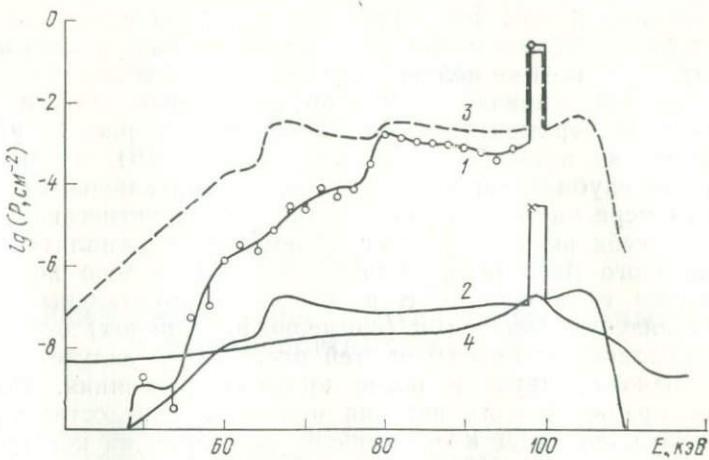


Рис. 3. Графики аппаратурной функции идеального германиевого детектора для монолинии 100 кэВ (1), суммарного спектра для пробы толщиной $0,03 \mu^{-1}$ (2), суммарного спектра идеального германиевого детектора (3) и экспериментально снятого спектра пробы толщиной $0,03 \mu^{-1}$ (4).

Оценка пороговой чувствительности производилась на основании спектра пробы толщиной 0,03 с характеристическим пиком tantalа (содержание 0,01%) (кривая 1) и графика выхода характеристического излучения (кривая 2).

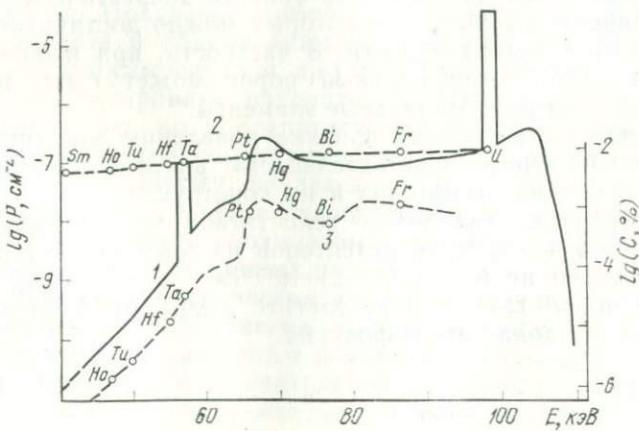


Рис. 4. Графики интенсивности характеристического излучения различных химических элементов при $C=10^{-2}$ вес. % (1), суммарного спектра для пробы толщиной $0,03 \mu^{-1}$ (2), предельной чувствительности метода для указанных химических элементов при использовании идеального германиевого детектора (3).

Наиболее низкий порог при использовании источника Со-57 может быть обеспечен, согласно теоретическим предпосылкам, для группы редкоземельных элементов с номерами 67—69 (Но, Ег, Ти) — кривая 3. Это предположение отчасти согла-суется с экспериментальными данными (см. рис. 3, наличие минимума на кривой 4 в области 40—50 кэВ), однако отно-сительная глубина «провала» на экспериментальной кривой по крайней мере на порядок меньше, чем на теоретической. Обра-щает на себя внимание также несоответствие амплитуд пиков однократного рассеяния. Отчасти это обусловлено конечными размерами коллиматора. В целом экспериментальный спектр характеризуется меньшими (примерно на порядок) относительными различиями интенсивностей рассеянного излучения в об-ласти одного-, двух- и более кратного рассеяния. На наш взгляд, причиной этого явления может быть недостаточно вы-сокое качество ППД и интенсивное рассеяние на конструктив-ных элементах (корпус блока детектирования, капсула детек-тора и т. д.).

Выводы

1. Согласно выполненному теоретическому расчету, при РРМ-анализе с германиевыми ППД имеется принципиальная возможность значительного снижения порога чувствительности метода посредством уменьшения толщины анализируемой пробы.

2. Существуют оптимальные области энергетического спектра рассеянного излучения, в которых можно достичь минимального порога чувствительности. В частности, при использовании источника Со-57 минимальный порог может быть достигнут при анализе на редкоземельные элементы.

3. Наиболее вероятная причина появления дополнительного фона, снижающего чувствительность анализа — недостаточно высокое качество детекторов и их конструктивное оформление.

4. Устранение указанных недостатков может быть достигнуто путем изготовления детекторов из германия с концентра-цией примесей не более $(1 \div 2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и малой плотностью дислокаций, а также в результате разработки оптимальной конструкции блока детектирования.

*В. В. ШЕСТАКОВ, А. С. МИТРОФАНОВ***ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ЭСПРЕСС-АНАЛИЗ БЕРИЛЛИЕВЫХ РУД
В ТРАНСПОРТНЫХ ЕМКОСТЯХ**

Ядерно-геофизические методы, использовавшиеся ранее преимущественно при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, находят все более широкое применение и в горнорудной промышленности. Они применяются для определения концентрации полезных ископаемых в разведочных и буровзрывных скважинах, в стенках горных выработок, в отбитой рудной массе [1—5]. Основные достоинства ядерно-геофизических методов опробования, выгодно отличающие их от геологических,— низкая стоимость анализа и высокая экспрессность.

Одним из перспективных направлений рудничной ядерной геофизики является экспресс-анализ рудной массы в транспортных емкостях. Получение информации о концентрации полезного компонента в объеме каждой транспортируемой единицы (вагонетки, автосамосвала и др.) позволяет не только целесообразно координировать направление горно-подготовительных и очистных работ, но и оперативно разделять транспортируемые рудные объемы на промышленные и непромышленные. Благодаря экспрессному разделению руд существенно снижаются их разубоживание и непроизводительные потери сырья, а также обеспечивается возможность вовлечения в переработку «бедных» и некондиционных руд.

В настоящей работе рассматриваются результаты широкого промышленного применения экспресс-анализа бериллиевых руд в транспортных емкостях с целью выделения фракции с высокой (промышленной) концентрацией из общего потока транспортируемой горнорудной массы с низким (некондиционным) средним содержанием металла, которая в дальнейшем подавалась на обогатительную фабрику. Методика опробована на двух различных по генезису месторождениях.

Месторождение А. Отличается сложностью геологического строения, крайней невыдержанностью рудных тел по простиранию и мощности, высокой степенью вариации концентраций

Результаты сортировки руд

Период	C_0	C_1	C_2	P_1/P_0	C_1/C_0	M_1/M_0	M_2/M_0
<i>Месторождение А *</i>							
1-й год	0,54	1,11	0,09	0,45	2,05	0,92	0,08
2-й год	0,79	1,18	0,13	0,63	1,48	0,94	0,06
Среднее	0,66	1,15	0,11	0,54	1,77	0,93	0,07
<i>Месторождение Б **</i>							
1-й год	0,62	1,05	0,24	0,47	1,69	0,80	0,20
2-й год	0,68	1,01	0,38	0,46	1,49	0,69	0,31
Среднее	0,65	1,03	0,31	0,46	1,59	0,75	0,25

* Сортировка в вагонетках; высококонтрастные руды.

** Сортировка в автосамосвалах; низкоконтрастные руды.

бериллия в рудах. Руды месторождения высококонтрастные, что определяет возможность надежной их сортировки. Месторождение отрабатывается подземным способом. Экспресс-анализ руд применяется при отработке блоков с низкими (непромышленными) концентрациями.

Фотонейтронное опробование руд в вагонетках выполняли с помощью портативных переносных бериллометров, состоящих из пульта управления и датчика, укрепленного на конце длинной штанги, снабженной устройством дистанционного управления положением датчика [3]. Опробовали верхнюю, открытую часть рудного объема. Для измерения использовали глазомерно разбиваемую сетку. Исходный параметр для определения концентрации — значение интегральной скорости счета за две минуты, относимое к скорости счета в эталонном устройстве.

Результаты сортировки руд на промышленные и непромышленные за двухлетний период приведены в таблице, где P — вес, усл. ед.; C — концентрация бериллия (минимального промышленного содержания), отн. ед.; M — количества металла ($M = P \cdot C$); индексы 0; 1; 2 относятся к исходной, отсортированной и некондиционной руде, соответственно.

Как видно из таблицы, с помощью фотонейтронной сортировки из руды, концентрация в которой в полтора раза ниже промышленной, оказалось возможным выделить около половины объема руд с низкой концентрацией, благодаря чему концентрация в остальной части рудной массы увеличилась в 1,8 раза и оказалась на 15% выше минимальной плановой. При этом коэффициент эффективности сортировки ($M_1/M_0 \cdot 100$) составил 93%. При сортировке сырья с более высокой концентрацией (2 год) эффективность (извлечение) несколько выше.

Таким образом, фотонейтронное опробование высококонтрастных руд в таких относительно малых объемах, как вагонетка, обеспечивает эффективную сортировку с незначительными потерями металла.

Интересным побочным экономическим аспектом использования результатов экспресс-анализа руд в условиях подземной выработки, позволяющим увеличить их эффективность, является возможность применения низкосортных (некондиционных) руд в качестве забутовочного и закладочного материала, благодаря чему уменьшаются расходы на их подъем на дневную поверхность, подготовку и формирование складов.

Месторождение Б. Отличается от первого как генетически, так и по ряду параметров. Рудные тела здесь значительно крупнее, менее изменчивы, руды менее контрастны. Концентрация берилля в полтора раза ниже минимального промышленного. Месторождение в целом квалифицируется как забалансовое и эксплуатироваться без предварительной селекции не может. С целью определения возможности сортировки руд при открытом способе эксплуатации были проведены экспериментальные работы по экспресс-анализу горнорудной массы, погруженной в автотранспортные емкости. Положительные результаты опытных работ позволили начать плановую отработку месторождения.

Экспресс-анализ, как и в предыдущем случае, выполняли с помощью портативных фотонейтронных бериллометров с приставным выносным датчиком [3] методом поверхностного опробования.

Оператор при опробовании находился в специальном помещении, рядом с которым была расположена площадка стоянки автосамосвала. Для выполнения измерений датчик на штанге достаточной длины выносили через специальное окно, положение и ширина которого обеспечивали необходимую свободу действий оператора при перемещении датчика по рудной поверхности.

Результаты эксплуатации месторождения за два года показали (см. таблицу), что из общего объема «бедных» руд, поступивших на сортировку, удалось выделить промышленные руды, в которых сконцентрировано 75% металла. Более высокие, чем в первом случае, потери обусловлены прежде всего

относительно невысокой контрастностью руд. В частности, это наглядно подтверждается сопоставлением показателей первого и второго года: из-за меньшей контрастности руд, несмотря на более высокие концентрации, потери во второй период возросли.

Таким образом, опыт промышленного применения фотонейтронного экспресс-анализа бериллиевых руд в транспортных емкостях малого и большого объема на существенно различных месторождениях показал высокую эффективность его применения. Возможность разделения руд с помощью ядерно-геофизического экспресс-анализа на промышленные и непромышленные позволяет не только сократить потери и разубоживание добываемых руд, но и обеспечить отработку крупных блоков забалансовых руд, а в некоторых случаях и месторождений, эксплуатация которых без применения экспрессной селекции нерентабельна.

Дополнительным фактором, повышающим экономическую эффективность использованного метода, является возможность применения отсортированного низкокачественного сырья в качестве забутовочного и закладочного материала. Эффективность сортировки определяется прежде всего степенью изменчивости руд (контрастностью), а также фактическим соотношением средних и минимальных промышленных концентраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерно-геофизические методы опробования при добыче и переработке минерального сырья. Л., Наука, 1972.
2. Леман Е. П. Рентгенорадиометрический метод опробования месторождений цветных и редких металлов. Л., Недра, 1973.
3. Шестаков В. В. Рудничная аппаратура для фотонейтронного опробования.—В кн.: Геофизическая аппаратура, вып. 53. Л., Недра, 1973.
4. Шестаков В. В. Аппаратура для фотонейтронного опробования бериллиевых руд в буровзрывных скважинах.—В кн.: Геофизическая аппаратура, вып. 46. Л., Недра, 1971.
5. Шестаков В. В. Каротажный снаряд для фотонейтронного опробования шпурков и скважин подземного бурения.—В кн.: Ядерно-геофизические исследования/Ин-т геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1975.

Г. С. ДАНИЛОВ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ИЗМЕРЕНИЙ
В СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ НЕЙТРОННОМ ГАММА-КАРОТАЖЕ
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ РУДНОГО
КОМПОНЕНТА

(на примере ртутных месторождений Донбасса)

В практике ядерно-геофизических исследований скважин правильный выбор режима измерений зачастую определяет их экономическую и геологическую эффективность. Это особенно справедливо для месторождений цветных и редких металлов, кондиционные концентрации которых соизмеримы с порогом чувствительности применяемых методов.

Для правильного выбора режима измерений прежде всего необходимо четко определить минимальную мощность h_{\min} и минимальную среднюю концентрацию (на эту мощность) q_{\min} рудоуказаний, подлежащих выделению и оценке, с учетом требования кондиций, характера распределения оруденения и возможностей применяемого метода.

Кондиции большинства рудных месторождений определяются следующими характеристиками [1]: \bar{C}_{\min} — минимальное промышленное содержание металла в подсчетном блоке, %; $C_{\text{борт}}$ — бортовое содержание металла в крайней пробе, %; H_{\min} — минимальная мощность рудного интервала, включаемого в подсчет балансовых руд; H_0 — максимальная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в контур подсчета запасов.

Для месторождений с крайне неравномерным распределением оруденения в случае, когда размер линейной зоны исследования L значительно меньше H_{\min} , величины h_{\min} и q_{\min} будут существенно отличаться от кондиционных (H_{\min} , \bar{C}_{\min}). За величину h_{\min} следует принять значение L , $h_{\min}=L$. Имея количественную оценку неравномерности оруденения в виде линейного коэффициента вариации K_v , нетрудно определить величину q_{\min} . Для этого рудный интервал со средним содержанием металла \bar{C}_{\min}

и мощностью H_{\min} произвольно разобьем на n подынтегралов мощностью h_{\min} со средним содержанием C_i . При этом

$$\bar{C}_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, \quad (1)$$

$$(\bar{C}_{\min} \cdot K_v)^2 = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n-1} - \left(\frac{n}{n-1} \cdot \bar{C}_{\min} \right)^2. \quad (2)$$

Из всех возможных комбинаций распределения концентраций C_i наименьшее значение K_v будет в случае, если C_i имеет только два значения: 0 и q_{\min} . Отсюда выражения (1) и (2) можно переписать в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{C}_{\min} &= \frac{q_{\min} \cdot m}{n}, \\ (\bar{C}_{\min} \cdot K_v)^2 &= \frac{q_{\min}^2 \cdot m}{n-1} - \left(\frac{n}{n-1} \cdot \bar{C}_{\min} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где m — число рудных подынтегралов. Решение системы (3) дает оценку¹

$$q_{\min} = \frac{(\bar{C}_{\min} \cdot K_v)^2 + \left(\frac{n}{n-1} \cdot \bar{C}_{\min} \right)^2}{n \cdot \bar{C}_{\min}}. \quad (4)$$

Аналогично получим значение $q_{\text{борт}}$.

Следует отметить, что в пределах зоны исследования ($L = h_{\min}$) распределение рудного компонента может изменяться от равномерного до скопления в узкой трещине. Например, для ртутных месторождений кондиционное рудопроявление может быть представлено оруденелой трещиной мощностью в доли сантиметра.

Исследования скважин обычно проводятся в поисковом (1:200) и детализационном (1:20, 1:50) масштабах. Задача поисков — качественное выделение кондиционных рудопроявлений, задача детализации — регистрация аномалий с точностью, необходимой для количественных определений.

Учитывая, что \bar{C}_{\min} обычно в два раза и более превышает $C_{\text{борт}}$, задачу поисков целесообразно ограничить выделением рудопроявлений (h_{\min}, q_{\min}). Поиск рудопроявлений бортовой концентрации ($h_{\min}, q_{\text{борт}}$) в этом случае осуществляется при детализации, для чего интервалы детализации охватывают по H_0 метров кровли и почвы выявленных в поисковом масштабе аномалий.

Далее рассмотрим выбор режима измерений применительно к ртутным месторождениям Донбасса.

¹ Выражение (4) справедливо, если K_v определен по интервалам, равным L .

Рис. 1. График чувствительности НГК-С к ртути. $A_{\text{Hg}} = \kappa_a - \kappa_0 / \kappa_0$.

Минимальными рудопроявлениями, подлежащими выделению и оценке для наиболее «мягких» из действующих кондиций с учетом (4), будут: $q_{\min} = 0,21\% \text{ Hg}$, $q_{\text{борт}} = 0,09\% \text{ Hg}$, $h_{\min} = L = 35 \text{ см}$ (см. ниже).

Задача решается методом спектрометрии захватного гамма-излучения (НГК-С) в модификации спектральных отношений. Регистрируемый параметр — отношение скоростей счета $\kappa = n_1/n_2$ в двух дифференциальных каналах: $\Delta E_1 = 4 \div 5 \text{ МэВ}$, $\Delta E_2 = 6 \div 8 \text{ МэВ}$. Длина зонда $l_3 = 22 \text{ см}$. Применяется спектрометр СГСЛ-2, детектор NaI(Tl) $30 \times 70 \text{ мм}$, источники нейtronов Po—Be мощностью $I = 2 \cdot 10^7 \text{ нейтр/с}$. Корпус скважинного прибора стальной.

Расположение каналов, длина зонда, материал кожуха выбраны экспериментально из условия обеспечения максимального отношения сигнал/помеха. За оценку сигнала принята величина аномалии от минимального поискового объекта, за оценку по-

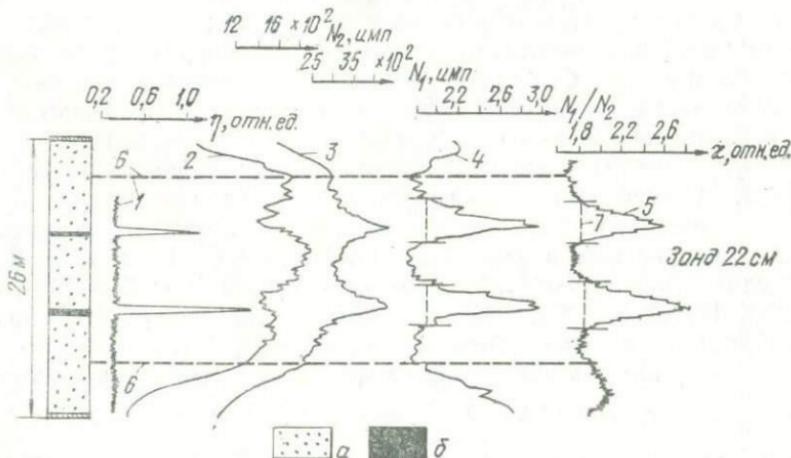
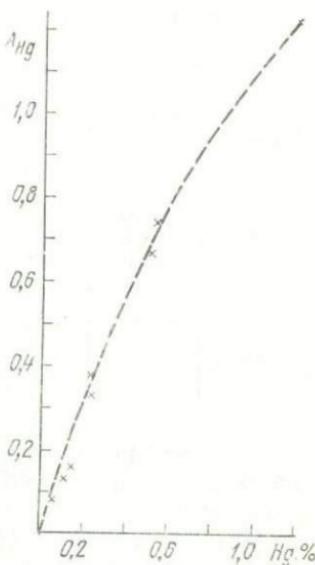


Рис. 2. Моделирование прослоев мощностью 2 и 5 см. Модель насыпная.
a — песок, $\rho = 1,65 \text{ г/см}^3$; б — прослой «богатого» ртутного концентрата; 1 — ППК;
2—4 — НГК-С, поточечная запись, соответственно кривые N_1 , N_2 и N_1/N_2 ;
5 — НГК-С, непрерывная запись (κ); 6 — границы зоны влияния краевых эффектов;
7 — фиктивная мощность прослоев h_Φ .

Величина фиктивной мощности прослоя при длинах зонда 17 (A), 22 (Б), 27 (В) см

Мощность пропластика h , см	A		Б		В		$\Delta\bar{h}$
	h_{ϕ}	Δh	h_{ϕ}	Δh	h_{ϕ}	Δh	
0,3	38,0	37,7	39,5	39,2	39,5	39,2	38,7
2	37,0	35,0	39,0	37,0	38,5	36,5	36,2
5	41,0	36,0	45,0	40,0	48,5	43,5	39,8
10	51,5	41,5	50,0	40,0	52,0	42,0	41,2
$\Delta\bar{h}$	—	37,6	—	39,0	—	40,1	39,0

мехи — дисперсия регистрируемого параметра в безрудных интервалах вмещающих пород, обусловленная их геологической неоднородностью.

Чувствительность НГК-С к ртути оценена (рис. 1) на бетонной модели, построенной на Никитовском ртутном комбинате. Вещественный состав и плотность модельных блоков близки к составу и плотности вмещающих пород и руд.

Режим измерений при поисках должен обеспечивать превышение регистрируемой аномалии от минимального поискового объекта над уровнем помех в самом неблагоприятном случае. Это условие можно записать в виде

$$v \cdot A_{Hg} - 3\delta > 3\delta_x, \quad (5)$$

где $v \cdot A_{Hg}$ — регистрируемая аномалия от минимального поискового объекта с учетом инерционных искажений; δ — статистическая погрешность измерителя отношений; δ_x — дисперсия регистрируемого параметра в безрудных интервалах вмещающих пород.

Рассмотрим каждую из величин, входящих в неравенство (5).

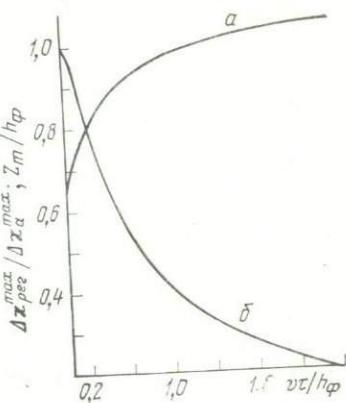
1. Для оценки степени инерционных искажений v определим форму и линейный размер аномалии от минимального поискового объекта. С этой целью проведено моделирование тонких ($h \ll l_3$) рудных прослоев (рис. 2). На модели поточечно с интервалом 2 см и непрерывно в масштабах 1:20 при $Vt=3$ см и $\delta=2,5\%$ записаны диаграммы НГК-С по прослоям 0,3; 2; 5 и 10 см на зонах 17; 22 и 27 см. Статистическая погрешность отношения N_1/N_2 при поточечной записи не превышала 3%.

За фиктивную мощность пропластика h_{ϕ} принята ширина аномалии на высоте $0,1 \left(\Delta \frac{N_1}{N_2} \right)_{\max}$ или $0,1 \Delta x_{\max}$. Значения h_{ϕ} для различных пропластиков на зонах различной длины сведены в таблицу. Как видно, h_{ϕ} значительно превышает фактическую мощность прослоя h . Разность $\Delta h = h_{\phi} - h$ составляет в среднем 39 см и слабо зависит от длины зонда. Эта величина и является оценкой минимальной мощности рудной аномалии.

Рис. 3. График величин $Z_m = f(V\tau/h_\phi) - a$ и $v = f(V\tau/h_\phi) - b$.

С другой стороны, величина Δh дает оценку линейной зоны исследования метода. Размер этой зоны можно оценить и по расстояниям от бортов модели, на которых начинают влиять краевые эффекты. Размеры «зоны» влияния краевых эффектов для зондов различной длины следующие:

$l_3, \text{ см}$	Борт верхний	Борт нижний
17	36	50
22	34	45
27	33	48
Среднее	34,3	47,6



Различие величин «зоны» для верхнего и нижнего бортов объясняется тем, что при увязке диаграмм со схемой модели за «точку записи» принята середина кристалла. Реальная «точка записи» смешена в сторону источника. Величину этого смещения можно оценить как половину разности между значениями «зоны»

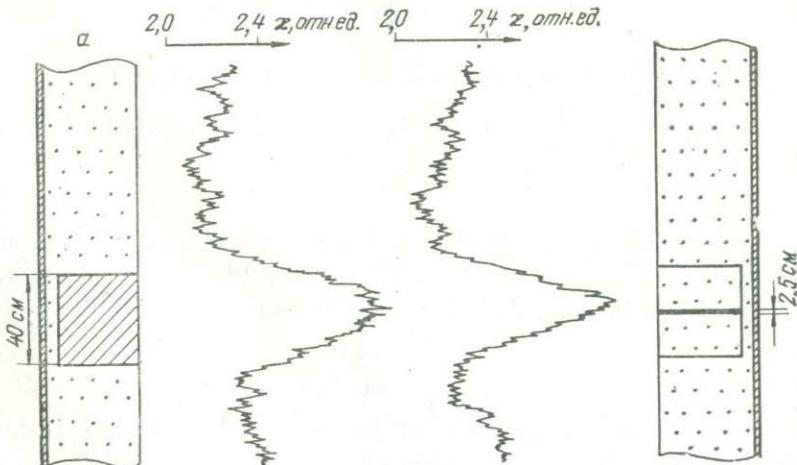


Рис. 4. Диаграммы НГК-С (z) на насыпной модели при различном распределении рудного компонента в исследуемом объеме ($80 \times 80 \times 40 \text{ см}$). а — равномерное распределение ртутного концентрата (порошок); б — скопление того же количества концентрата в прослое мощностью $2,5 \text{ см}$.

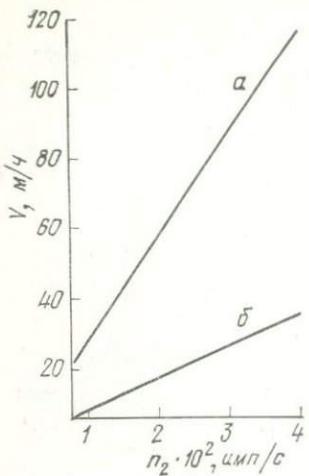


Рис. 5. График для выбора скорости каротажа в зависимости от загрузки в канале делителя при поисках (a) и детализации (б).

для верхнего и нижнего бортов (7 см). Величина самой «зоны» определится как полусумма этих значений (41 см). Как видно, обе оценки L согласуются вполне удовлетворительно.

Однако, поскольку при моделировании не соблюден принцип подобия, полученная оценка L неточна для реальных условий. Принцип $h = h_\Phi - \Delta h$ проверен на бетонной модели, где услов-

вия более близки реальным. Величина Δh здесь составляет в среднем 35 см, что и принято за оценку L для реальных условий.

По форме аномалию от минимального поискового объекта можно аппроксимировать синусоидой на отрезке $[\pi, 3\pi]$

$$\Delta \kappa_a(Z) = \frac{1}{2} \Delta \kappa_a^{\max} \left[\cos \left(\frac{1,6\pi Z}{h_\Phi} \right) + 1 \right], \quad 0 \leq Z \leq 1,25h_\Phi. \quad (6)$$

Регистрируемая аномалия при использовании RC-интегратора описывается выражением [2]

$$\Delta \kappa_{\text{per}} = \frac{1}{V\tau} e^{-\frac{Z}{V\tau}} \int_0^Z \Delta \kappa_a(Z) e^{\frac{Z}{V\tau}} dZ. \quad (7)$$

Заменив $\Delta \kappa_a(Z)$ выражением (6) и решая (7), получим

$$\Delta \kappa_{\text{per}}^{\max} = \frac{\Delta \kappa_a^{\max}}{2} \left\{ \frac{a}{a^2 + (1,6\pi)^2} [a \cos(1,6\pi Z_m + \pi) + 1,6\pi \sin(1,6\pi Z_m + \pi) + ae^{-aZ_m}] + 1 - e^{-aZ_m} \right\}, \quad (8)$$

где $a = 1,25h_\Phi/V\tau$; Z_m — ордината максимума регистрируемой аномалии в единицах h_Φ . Пользуясь графиком зависимости $Z_m = f\left(\frac{V\tau}{h_\Phi}\right)$ (рис. 3, a), рассчитываем зависимость

$$v = f\left(\frac{V\tau}{h_\Phi}\right), \quad (9)$$

где $v = \Delta \kappa_{\text{per}}^{\max}/\Delta \kappa_a^{\max}$, график которой показан на рис. 3, б. Последний получен решением уравнения²

$$\partial \Delta \kappa_{\text{per}} / \partial Z = 0. \quad (10)$$

² Уравнение (10) аналитически не решается, решение получено графически.

2. Изменение распределения рудного компонента в пределах зоны исследования метода от равномерного до скопления в узкой трещине промоделировано на насыпной модели (рис. 4). Как видно, амплитуда аномалии существенно не изменяется, следовательно, при оценке величины минимальной аномалии можно пользоваться графиком на рис. 1, полученным на прослоях $h > L$.

3. Относительная статистическая погрешность δ используемых измерителей отношения скоростей счета определяется [3]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\tau}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}. \quad (11)$$

Выражение (11) справедливо для установившегося режима, когда время измерения стремится к бесконечности, т. е. выполняется условие $h \gg V\tau$. В случае маломощных прослоев это условие не выполняется.

Для δ измерителей интенсивности в неустановившемся режиме дано выражение в [2]:

$$\delta = \frac{1+e^{-\frac{h'}{V\tau}}}{\sqrt{2n\tau}}, \quad (12)$$

где h' — расстояние по оси скважины от точки начала роста (спада) интенсивности до точки, для которой вычисляется статистическая погрешность.

Используя вывод (11) и условия [2] при выводе (12), получим для относительной статистической погрешности измерителя отношений в неустановившемся режиме

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\tau}} \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \cdot \left(\frac{1+e^{-\frac{h'}{V\tau}}}{1-e^{-\frac{h'}{V\tau}}} \right)}, \quad (13)$$

где $h' = 1,25L/2$.

4. Дисперсия регистрируемого параметра $\delta_{\text{р}}^2$ в интервалах безрудных вмещающих пород обусловлена их геологической неоднородностью и статистической погрешностью измерений:

$$\delta_{\text{р}}^2 = \delta_r^2 + \delta^2. \quad (14)$$

Величина δ_r , оцененная двукратной регистрацией χ в заведомо безрудных интервалах вмещающих пород по 40 скважинам, колеблется в пределах 2,5—4%.

В условии (5) заложены два конкурирующих процесса: увеличение v при возрастании $\tau(V\tau)$ и уменьшение при этом уровня помех. Поэтому существует оптимальный режим регистрации, определяемый максимально допустимой скоростью каротажа.

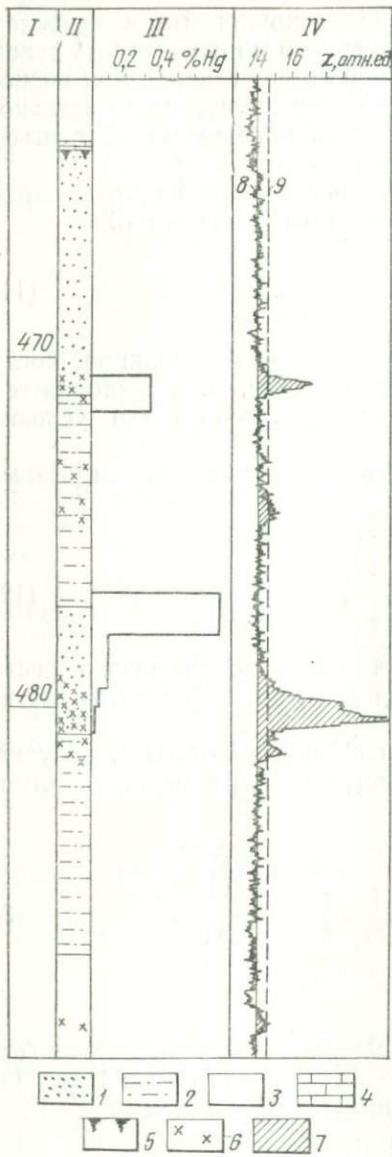


Рис. 6. Диаграммы НГК-С (χ) по одной из скважин Константиновского месторождения (детализация М 1:50).

I — глубина скважины; II — геологическая колонка; III — результаты опробования керна; IV — диаграммы НГК-С (χ). 1 — песчаник; 2 — алевролит; 3 — аргиллит; 4 — известняк; 5 — «кучерячик»; 6 — интервалы ртутной минерализации; 7 — рудные аномалии; 8 — линия χ_0 ; 9 — линия уровня помех.

Зная загрузки в каналах при используемых мощностях (Q) Рo — Вe источников (так при $Q = 1 \cdot 10^7$ нейтр/с загрузки в среднем составляют $n_1 = 250$ имп/с, $n_2 = 100$ имп/с), величины q_{\min} , h_{Φ}^{\min} , h' и δ_r и используя графики (рис. 1 и 3, б) и выражения (13), (14), из условия (5) подбором находим оптимальный режим для поисков: $V = 52$ м/с, $\tau = 5$ с ($V\tau \approx 7$ см), при этом $\delta = 3,5\%$.

Режим измерения при детализации также должен удовлетворять условию (5), для минимального объекта, подлежащего выделению (h_{\min} , $q_{\text{борг}}$), и обеспечивать требуемую точность регистрации аномалий v , δ согласно [4].

В рассматриваемом случае, ввиду недостаточной чувствительности метода, условие (5) практически невыполнимо. Поэтому режим детализации с учетом требований [4] выбран из условия $v \cdot A_{Hg} - 2\delta \geq 2\delta_n$. При этом ухудшается достоверность выделяемых аномалий.

Для повышения достоверности при детализации используется метод РРК. Конкретно для детализации выбран режим (при тех же исходных данных, что и в случае поисков, за исключением $q_{\text{борг}}$): $V = 16$ м/с, $\tau = 8$ с ($V\tau \approx 3,5$ см), при этом $\delta = 2,5\%$.

Режимом измерений, т. е. величинами δ и $V\tau$, при прочих

равных условиях определяется порог чувствительности метода. Используя источники различной мощности, сохранить режим измерений, а следовательно, и порог чувствительности можно лишь корректировкой скорости каротажа. Так, τ измерителя отношений обратно пропорциональна загрузке в канале делителя [3]:

$$\tau = \frac{a}{n_2}, \quad (15)$$

где a — коэффициент пропорциональности, определяемый параметром схемы измерителя (изменение величины a предусмотрено в схеме изменением накопительной емкости).

Подставляя (15) в (13), получим:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2a}} \sqrt{\frac{z+1}{z} \cdot \frac{1+e^{-h'/V\tau}}{1-e^{h'/V\tau}}},$$

т. е. при изменении мощности источника, но сохранении a и $V\tau = \text{const}$ статистическая погрешность остается неизменной. Для сохранения $V\tau = \text{const}$ необходимо компенсировать изменение τ корректировкой скорости каротажа (рис. 5).

Пример выделения кондиционных рудопроявлений методом НГК-С в выбранном режиме показан на рис. 6.

Описанный способ выбора режима измерений позволяет в конкретных геолого-физических условиях месторождения обеспечить надежное выделение кондиционных рудопроявлений при максимально возможной производительности метода.

Способ выбора оптимального режима можно рекомендовать и для методов РРК, ГГК-С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коган И. Д. Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. М., Недра, 1974.
2. Ларionов В. В. Радиометрия скважин. М., Недра, 1969.
3. Брагин А. А., Федорив Р. Ф. Универсальный линейный измеритель отношения интенсивностей.— Геофизическая аппаратура, 1968, № 35.
4. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. М., Госгеолтехиздат, 1963.

В. И. УТКИН

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭФФЕКТИВНЫЙ АТОМНЫЙ НОМЕР
ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ

Одним из факторов, определяющих точность определения зольности углей методом ГГК-С, является химический состав золы ископаемых углей. Для оценки влияния изменения химического состава на данные ГГК-С рассмотрим изменчивость эффективного атомного номера ($Z_{\text{эфф}}$) различных угольных бассейнов СССР и величину погрешности в величине зольности, которая вызывается непостоянством $Z_{\text{эфф}}$ золы углей.

В таблице приведен средний химический состав золы различных угольных месторождений СССР [1]. Угли Донбасса в целом, а также отдельные марки углей других районов характеризуются повышенным (по сравнению с остальными углями) содержанием в зольном остатке железа и кальция за счет уменьшения кремния и алюминия. Особенно интересны аномальные отклонения состава золы для Сангарского месторождения (Якутия) и сланцев Эстонии. В последних, например, зольный остаток почти наполовину представлен окисью кальция.

Изменения химического состава золы отражаются на величине $Z_{\text{эфф}}$ последней (см. таблицу). Для золы большинства углей характерно значение $Z_{\text{эфф}} = 12,8 \div 14,3$. При повышенных содержаниях железа или кальция $Z_{\text{эфф}}$ увеличивается до 14,8—16,4.

Интересна рассчитанная по данным месторождений Кузбасса и Восточного Донбасса корреляционная связь между зольностью углей и эффективным атомным номером золы (рис. 1). Из приведенных результатов видно, что независимо от марочного состава углей и типа месторождения с уменьшением зольности угля $Z_{\text{эфф}}$ золы повышается. При этом абсолютные значения $Z_{\text{эфф}}$ золы в среднем для Донбасса выше, чем для Кузбасса, что является следствием особенностей химического состава золы, отмеченных в таблице.

Указанную закономерность можно объяснить следующим образом. В угольной массе всегда имеется некоторое постоянное количество относительно «тяжелых» (железо, кальций) элементов, химически связанных непосредственно с горючей массой; вероятны

Средний химический состав золы углей различных месторождений СССР, %

Район, место- рождение	Марка угля	$A_{\text{сред}}^c$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$S_{\text{общ}}$	$Z_{\text{ЭФФ}}$
Донбасс	Д	19,5	52,0	24,0	14,0	2,7	1,5	3,5	14,8
	Г	20,0	51,0	25,0	14,8	2,8	1,5	2,8	14,92
	Т	18,0	39,8	26,6	22,0	5,0	2,1	2,6	16,38
	А ₁	22,0	52,0	22,0	15,0	4,0	2,0	1,6	14,94
	А ₂	16,5	53,0	22,5	15,5	3,0	1,5	2,0	15,02
Кузбасс	Д	9,5	53,4	23,8	8,1	7,6	3,6	0,3	13,83
	Г	11,8	54,1	25,2	9,6	6,9	1,6	0,5	14,1
	Ж	21,0	62,2	20,3	4,7	7,4	1,1	0,6	13,17
	ОС	12,5	57,3	26,1	7,9	4,9	1,3	0,3	13,67
	Т	12,0	57,7	26,5	7,0	3,6	1,4	0,5	13,35
Караганда	К	17,0	53,5	30,8	5,0	4,6	0,3	1,2	13,0
	ОС	26,0	61,0	31,1	5,1	1,3	0,5	0,8	12,9
Печора	Д	28,5	55,1	21,5	12,9	6,0	2,2	3,0	14,8
	К	25,0	59,8	21,7	9,3	4,2	2,4	0,8	13,9
	Ж	17,0	60,4	22,4	9,4	7,4	1,4	0,9	14,3
	ЖР	19,5	62,5	22,0	6,9	4,8	1,1	0,6	13,5
Урал: Кизеловское Булашское Егоршинское	Г ₁	22,0	46,3	31,5	18,0	1,2	0,9	6,5	15,6
	Г ₂	23,0	56,4	24,4	10,4	3,0	3,0	1,0	14,0
	Т	22,0	51,8	37,9	5,0	3,9	1,6	1,0	12,8
Иркутск, Че- ремховское	Д	25,0	61,5	22,5	10,4	4,2	1,5	1,2	14,2
Якутия: Сангарское Чулма-Кан- ское Нерюнгри-Грин- ское	Д	13,0	43,7	10,7	10,9	25,4	3,6	0,3	15,46
	Ж	12,0	60,6	25,8	5,0	5,4	2,4	0,3	13,10
	СС	11,0	52,4	36,1	4,5	3,7	1,2	0,2	12,93
Эстония (слан- цы)		48,0	28,9	9,1	6,8	48,3	4,2	1,5	16,24

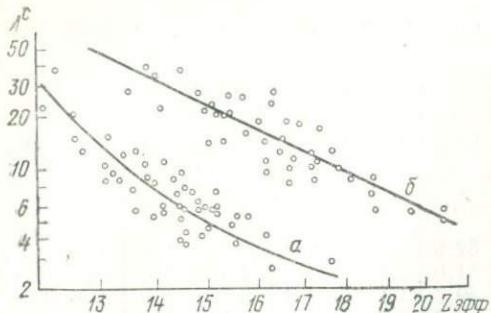


Рис. 1. Корреляционная связь между эффективным атомным номером золы и зольностью углей Кузбасса (а) и Донбасса (б).

вклад этого постоянного остатка незаметен, но при меньших зольностях влияние этого остатка велико, что и приводит к заметному повышению $Z_{\text{эфф}}$ золы.

Влияние непостоянства химического состава золы на изменение $Z_{\text{эфф}}$ угля можно оценить из формулы, посредством которой вводится эффективный атомный номер:

$$Z_{\text{эфф}} = \sqrt[3]{\sum_i P_i Z_i^3}. \quad (1)$$

Для рассматриваемых условий формулу (1) можно записать следующим образом:

$$Z_{\text{эфф}}^3 = (1 - A^c) Z_c^3 + A^c \cdot Z_3^3, \quad (2)$$

где A^c — зольность угля; Z_c — атомный номер собственно горючей массы ($Z_c \approx 6,5$); Z_3 — эффективный атомный номер золы.

Уравнение для вариаций величин $Z_{\text{эфф}}$, A^c , Z_3 имеет вид

$$\delta Z_{\text{эфф}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A^c} - 1\right)\left(\frac{Z_c}{Z_3}\right)^3 + 1} \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{Z_c^3}{Z_3^3}\right) \delta A^c + \delta Z_3 \right], \quad (3)$$

где $\delta Z_{\text{эфф}}$, δA^c , δZ_3 — относительные изменения этих величин.

При постоянной величине зольности ($\delta A^c = 0$)

$$\delta Z_{\text{эфф}} = -\frac{\delta Z_3}{\left(\frac{1}{A^c} - 1\right)\left(\frac{Z_c}{Z_3}\right)^3 + 1}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что с уменьшением зольности угля влияние незакономерных колебаний состава золы уменьшается.

На основании (4) можно также определить эквивалентность изменений δA^c и δZ_3 в условиях постоянного эффективного атомного номера угля ($\delta Z_{\text{эфф}} = 0$):

$$\delta A^c = \frac{3}{1 - \left(\frac{Z_c}{Z_3}\right)^3} \delta Z_3 = -\zeta \delta Z_3. \quad (5)$$

Рис. 2. Дисперсия величины зольности, вызываемая предельными изменениями химического состава зоны Кузбасса (а) и Донбасса (б).

Пояснения см. в тексте.

Значение множителя зависит от атомного номера золы:

$Z_3 \dots$	10	12	14	16	18	20
$\zeta \dots$	3,71	3,43	3,26	3,17	3,12	3,08

Относительное изменение зольности более чем в 3 раза превышает относительное изменение эффективного атомного номера золы.

На основании уравнения (5), данных о зависимости ζ от Z_3 и рис. 1 можно оценить дисперсию зольности, вызываемую предельными изменениями химического состава золы при различной величине зольности угля. Результаты вычислений представлены на рис. 2. Штриховой линией отмечены значения неопределенности в диапазоне изменения зольности от 0 до 30%, которые составляют 1,4% A^c для Кузбасса и 2,6% A^c для Донбасса. Расчет средних погрешностей для фактических значений $Z_{\text{эфф}}$ золы, представленных на рис. 1, дает несколько меньшие значения ΔA^c : 1,1% A^c для Кузбасса и 2,1% A^c для Донбасса. Это может быть следствием того факта, что часть минеральных примесей, составляющих золу углей, находится в виде микрзерен (что характерно для пирита и сидерита). Поэтому эффективность поглощения гамма-квантов этими включениями несколько меньше [2].

Рассмотренные погрешности соответствуют теоретически предельно достижимой статистической точности селективного гамма-гамма-метода при определении зольности углей в определенном районе. Таким образом, анализ химического состава золы и применение параметра $Z_{\text{эфф}}$ в этих условиях позволяет оценить предельно достижимые точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическое топливо СССР. Справочник. М., Энергия, 1968.
2. Захарченко В. Ф. К методике интерпретации нейтронных измерений в средах с включениями.— В кн.: Ядерно-геофизические исследования/Ин-т геофизики УФАН СССР. Свердловск, 1967.

Ю. Б. БУРДИН, В. А. БОЛЬЩИКОВ, В. И. УТКИН,
Г. Д. ЗУБАРЕВ, Т. И. СКВОРЦОВА

АППАРАТУРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СЕЛЕКТИВНОГО ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА

В Институте геофизики Уральского научного центра АН СССР разработана специализированная цифровая автоматическая аппаратура «ИНТАК» (Интерпретатор автоматический каротажный) для количественной интерпретации показаний селективного гамма-гамма-каротажа (СГГК). Аппаратура рассчитана на работу совместно в прижимным скважинным прибором СГГК (например, типа РУР-1). В процессе каротажа аппаратура принимает сигналы от электронной схемы скважинного прибора и перерабатывает их в численные данные о глубине залегания угольных пластов или рудных зон и о процентном содержании золы в угле (или о содержании полезного компонента в руде). Эти сведения по мере получения печатаются на бумажной ленте. Вся обработка каротажных данных выполняется аппаратурой «ИНТАК» в реальном масштабе времени, т. е. параллельно с обычной записью диаграммы СГГК, поэтому по окончании каротажа результаты интерпретации могут быть непосредственно использованы для геологической документации скважины.

Ниже изложены основные принципы построения аппаратуры и некоторые результаты ее полевых испытаний на угольных месторождениях.

Техника интерпретации. Оценка точности результатов

Для количественной интерпретации аномалий СГГК в аппаратуре «ИНТАК» использован способ преобразования регистрируемой при каротаже скорости счета x электрических сигналов, вырабатываемых чувствительным элементом измерительного зонда, в процентное содержание y определяемого компонента. Сущность этого способа заключается в том, что непрерывная кривая СГГК $x(h)$ как функция глубины h представляется набором дискретных значений x_i , каждое из которых равно среднему значению $x(h)$ на соответствующем i -м

элементарном интервале глубины Δh_i^1 . Результат преобразований, выполненных над набором $x_i(h)$ в виде набора $y_i(h)$ печатается на бумажной ленте вместе с абсолютными значениями глубины h_i , которые соответствуют верхнему концу каждого интервала Δh_i . Метки $\Delta h_i=2 \text{ см}$ вырабатываются специальным импульсным датчиком глубины.

Логическая схема аппаратуры рассчитана таким образом, что печать указанных выше данных производится только в пределах аномалий СГГК, т. е. автоматически начинается при входе в аномалию и прекращается по выходу из нее. Границы аномальных зон, превышающих по мощности длину измерительного зонда R , определяются с помощью установленной в [1] эмпирической зависимости². Согласно [1], мощность Δh аномальной зоны при $\Delta h > R$ совпадает с шириной аномалии, отсчитанной на уровне x_a , который в конкретных условиях применения метода СГГК устанавливается экспериментально и полагается в этих условиях постоянным. Так, в случае исследования угольных пластов мощность последних равна ширине аномалии на уровне x_a , соответствующем $y(x_a) = 0,55$, т. е. 55%-ной зольности угля. При этом глубина, по достижении которой выполняется равенство $y(x) = 0,55$, совпадает с границей угольного пласта, если точку записи диаграммы СГГК отнести к геометрической середине измерительного зонда. Очевидно, что при дискретной регистрации глубины возможная ошибка определения глубины границ угольного пласта не превышает величины Δh_i .

Функциональное преобразование скорости счета x осуществляется в соответствии с интерпретационной формулой СГГК, которая в общем случае имеет вид [1]

$$y(x) = a + b \ln \frac{x}{x_0},$$

где x_0 — нормальное значение скорости счета, которое определяется при эталонировании измерительного зонда;
 a и b — постоянные коэффициенты при фиксированных параметрах измерительной установки.

Значения a и b определяются обычно путем статистического сопоставления показаний каротажа и геологического опробования на конкретных геологических объектах.

Функция вида (1) образуется в арифметическом устройстве аппаратуры путем численного интегрирования дифферен-

¹ Такое представление правомерно, если спектр функции $x(h)$ ограничен сверху, а величина элементарного интервала Δh выбрана при этом таким образом, чтобы выполнялись условия известной теоремы Котельникова. Практически указанные условия соблюдаются при $\Delta h < R$, где R — длина измерительного зонда.

² Статистические флуктуации x_i мешают применению известного способа определения границ по началу нарастания и началу спада скорости счета x .

циального уравнения, порождающего эту функцию. В основу процесса интегрирования такого уравнения положены теоремы Шеннона и вытекающие из них преобразованные уравнения [2]. Для рассматриваемой функции (1) система уравнений Шеннона имеет вид

$$\left. \begin{aligned} dy &= b dz, \\ dz &= \frac{1}{x} dx = W dx, \\ dW &= -\frac{1}{x^2} dx = -W dz, \\ W(x_0) &= \frac{1}{x_0}, \\ y(x_0) &= a. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Следует отметить, что форма записи (2) системы уравнений Шеннона не отражает реальный процесс обработки данных СГГК, поскольку к началу измерений этим методом не известно точное значение x_0 . С учетом этого процесс измерений и обработки разделяется на два этапа. На первом в качестве начальных условий принимается некоторое значение x_1 , ориентировочно близкое к x_0 , и $W(x_1) = 1/x_1$, после чего решается система уравнений, аналогичная (2); причем x изменяется от x_1 до x_0 , а W — от $W(x_1)$ до $W(x_0)$. Значения x_0 и $W(x_0)$ служат начальными условиями на втором этапе, когда решается собственно система уравнений (2). Полученное на первом этапе значение $y(x_0)$ при решении системы (2) не используется, так как в соответствии с последним условием следует положить $y(x_0) = a$.

Цифровые интеграторы, с помощью которых решается система уравнений Шеннона, рассчитаны на прием приращений входных величин (подынтегральной функции и аргумента), а не их полных значений. Каждый интегратор хранит перед очередным шагом интегрирования текущее значение подынтегральной функции и остаток, полученный при округлении последнего приращения интеграла, в свою очередь полученного на предыдущих шагах интегрирования. На рис. 1 приведена схема решения системы (2). Схема содержит два идентичных цифровых интегратора I и III (последний отличается только инверсией знака выходной величины) и один интегратор с постоянным значением подынтегральной функции, равным b (масштабный интегратор II). На выходе интегратора II возникают приращения функции $\Delta y(x)$, которые в дальнейшем суммируются для образования текущего значения $y(x)$ с учетом начального условия $y(x_0) = a$. Интегратор III, как видно из схемы, служит для образования приращений подынтегральной функции $W(x)$, общей для интеграторов I и III.

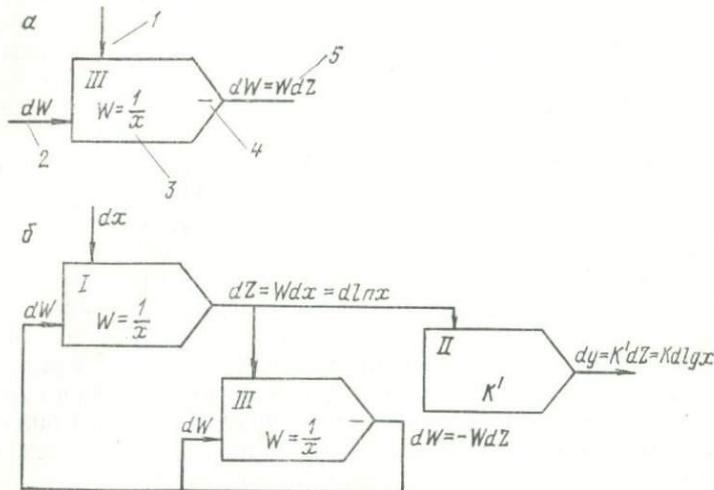


Рис. 1. Условное обозначение цифрового интегратора (а) и схема соединения цифровых интеграторов в аппаратуре «ИНТАК» (б). I—III — номер интегратора; 1 — вход приращений аргумента; 2 — вход приращений подынтегральной функции; 3 — вид подынтегральной функции; 4 — признак инверсии знака; 5 — выход интегратора (приращение интеграла).

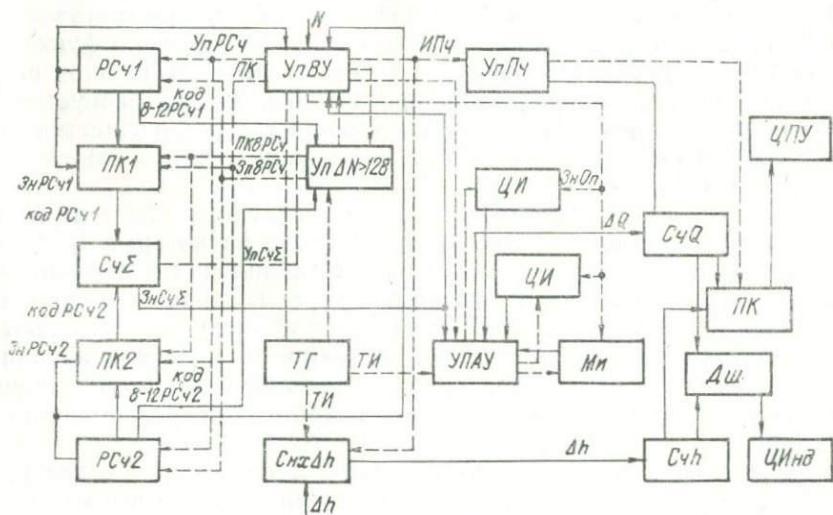


Рис. 2. Структурная схема аппаратуры «ИНТАК».
Пояснение см. в тексте.

Погрешность результата интегрирования в рассмотренной схеме зависит от пределов и величины шага интегрирования, который связан с количеством двоичных разрядов в регистрах памяти, хранящих значения подынтегральной функции. Расчетная величина предельной относительной погрешности вычисления $y(x)$, например, при изменении скорости от $x_0=50$ до $x_k=500 \text{ 1/c}$ (реальные пределы изменения x в условиях применения СГГК на угольных месторождениях) составляет $\sim 0,2\%$, если шаг интегрирования равен $\sim 0,002 \text{ 1/c}$, а функция $W(x)$, соответственно, представлена в регистрах интеграторов с точностью до $\sim 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}$. В этом случае каждый регистр хранения $W(x)$ должен содержать 15 двоичных разрядов при условии представления $W(x)$ в системе с фиксированной запятой. Практически в этих же условиях длину регистров можно уменьшить без потери точности за счет исключения старших разрядов, так как обычно величина x ограничена снизу некоторым значением x_{\min} и емкость регистров, соответственно, не превышает значения $W(x_{\min})$.

Описание аппаратуры

Аппаратура «ИНТАК», структурная схема которой представлена на рис. 2, состоит из нескольких функциональных устройств: 1) входного устройства (ВУ), осуществляющего преобразование статистической последовательности импульсов N , приходящих от электронной схемы скважинного прибора, в скорость счета x и вычисляющего приращение скорости счета dx , подлежащей вводу в цифровые интеграторы; 2) арифметического устройства (АУ), вычисляющего текущее значение функции $y(x)$; 3) устройства управления (УУ), задающего порядок следования операций обработки скорости счета в остальных устройствах аппаратуры и 4) устройства вывода данных, осуществляющего печать $y(x_i)$; h_i и цифровую индикацию этих величин в десятичной системе счисления.

Полный цикл обработки входной последовательности N в ВУ разбит на два отрезка времени, один из которых $t_1 \approx 1 \text{ с}$ представляет собой собственно время накопления и обработки, а второй $t_2 \approx 60 \text{ мс}$ предназначен для переключения цепей управления и печати результатов. Интервалы времени t_1 и t_2 задаются тактовым генератором (ТГ), состоящим из стабилизированного кристаллом кварца мультивибратора и делителя частоты, ТГ задает также тактовые импульсы различной частоты, необходимые для синхронизации работы остальных устройств аппаратуры.

Основными функциональными узлами ВУ являются два реверсивных счетчика РСЧ1 и РСЧ2 и суммирующий счетчик СЧΣ; емкость счетчиков выбрана больше максимальной скорости счета x_{\max} , которая может быть зарегистрирована в обычных условиях применения метода СГГК. С помощью схемы управления

Последовательность операций вычисления приращения

№ цикла	Время	Содержимое	
		РСЧ1	РСЧ2
0	t_0	x_1	0
1	t_1	$\Delta x_1 = x_1 - x_{t_1}$	x_{t_1}
	$t_1 + t_2$	0	x_{t_1}
2	$2t_1 + t_2$	x_{2t_1}	$\Delta x_2 = x_{t_1} - x_{2t_1}$
	$2(t_1 + t_2)$	x_{2t_1}	0
...

УпВУ последовательность N подается на входы РСЧ1 и РСЧ2 в течение интервалов времени t_1 , а на время t_2 после этого входы счетчиков блокируются. В таблице приведена последовательность операций, поясняющая процесс образования величины $\Delta x_i \approx dx_i$ к концу i -го цикла начиная с исходного момента времени t_0 , соответствующего началу работы аппаратуры.

Параллельный код Δx_i , образующийся к концу i -го цикла в одном из счетчиков, в момент времени $i(t_1 + t_2)$ переносится в суммирующий счетчик СЧΣ по команде переноса кода ПК, а затем содержимое реверсивного счетчика сбрасывается. В следующем $(i+1)$ -м цикле параллельный код Δx_i преобразуется в последовательный путем заполнения СЧΣ импульсами от ТГ. Частота следования f_1 , этих импульсов выбрана с таким расчетом, чтобы за время t_1 заполнился СЧΣ, содержащий максимальную величину разности Δx_{\max} , которая по условиям измерений может быть зафиксирована в РСЧ. Параллельно с заполнением СЧΣ ТГ выдает импульсы с частотой следования $f_2 = \kappa \cdot f_1$, кодирующие приращение Δx_i в масштабе, соответствующем заданной величине шага интегрирования по переменной x в цифровых интеграторах. Знак приращения Δx_i в i -м цикле фиксируется схемой УпВУ и запоминается на время отработки цифровыми интеграторами в $(i+1)$ -цикле.

В зависимости от знака разности Δx_i ее значение переносится из РСЧ в СЧΣ в прямом или обратном коде, в последнем случае схема УпВУ добавляет единицу на вход СЧΣ для образования дополнительного кода разности. Способ переноса кода устанавливается в схеме переноса кода (ПК) по содержимому знакового разряда соответствующего РСЧ.

Вследствие флюктуаций величины Δx_i ее значения в отдельные моменты времени могут превышать Δx_{\max} . В таких случаях отработка разности $\Delta x_i > \Delta x_{\max}$ осуществляется в два приема: в одном цикле отрабатывается часть разности, равная Δx_{\max} , а в следующем — остаток $\Delta x_i - \Delta x_{\max}$, благодаря чему случайные выбросы Δx_i усредняются за два соседних цикла измерения.

Как видно из таблицы, начальные условия x_0 и $W(x_0)$ могут быть получены за один (первый) цикл работы ВУ. С целью уменьшения статистической ошибки определения начальных условий в аппаратуре предусмотрен специальный цикл их набора. В этом цикле импульсы входной последовательности N , приходящие со средней скоростью x_0 , записываются в реверсивные счетчики входного устройства в течение времени nt_1 , после предварительного пересчета двоичным пересчетным устройством с коэффициентом пересчета, равным n . Значение n выбирается исходя из заданной статистической точности вычисления x_0 .

В АУ, состоящем из цифровых (ЦИ) и масштабного (МИ) интеграторов, по мере прихода импульсов с частотой f_2 осуществляется вычисление приращений Δy функции $y(x)$ согласно схеме (см. рис. 1). Значения Δy алгебраически суммируются в счетчике СчУ, хранящем текущее значение функции $y(x)$. В соответствии со сказанным выше, после набора начальных условий в СчУ предварительно устанавливается требуемое исходное значение $y(x_0) = a$. Для уменьшения ошибки интегрирования в цифровых интеграторах применена тернарная система кодирования приращений интеграла [2], в соответствии с которой приращения могут принимать только три возможных значения: 0, +1 или -1. Эти значения регистрируются схемой управления УпАУ отдельно для каждого интегратора и распределяются между интеграторами, как это указано на схеме (см. рис. 1).

Если к моменту окончания отработки в АУ очередного приращения Δx_i поступила новая метка глубины Δh_i от импульсного датчика глубины, то в конце этого же цикла выдается команда на печать текущего значения $y(x)$. Поскольку за время t_2 до окончания цикла значение $y(x)$ измениться не может (так как Δx_i отрабатывается только в первой части цикла t_1), то на печать выносится непосредственно содержимое СчУ. Одновременно печатается содержимое счетчика Сч h , суммирующего метки Δh_i . Чтобы предупредить возможное изменение состояния счетчика Сч h в момент печати его показаний, схема синхронизации меток Сих задерживает те метки глубины, которые приходят в отрезок времени t_2 каждого цикла, и выдает их на вход Сч h в начале следующего цикла.

Счетчики СчУ и Сч h построены из двоично-десятичных десяток. Перевод их показаний в десятичную систему осуществляется дешифратором, встроенным в цифропечатающее устройство (ЦПУ), и специальным дешифратором, выходы которого связаны со входами цифрового индикатора ЦИнд. По показаниям последнего осуществляется визуальный контроль текущих значений $y(x)$ и h .

Роль оператора, работающего с аппаратурой «ИНТАК», заключается в наборе заданных значений a и b на панели управления, установке счетчика глубины и переключении режимов работы аппаратуры — набора начальных условий и измерения

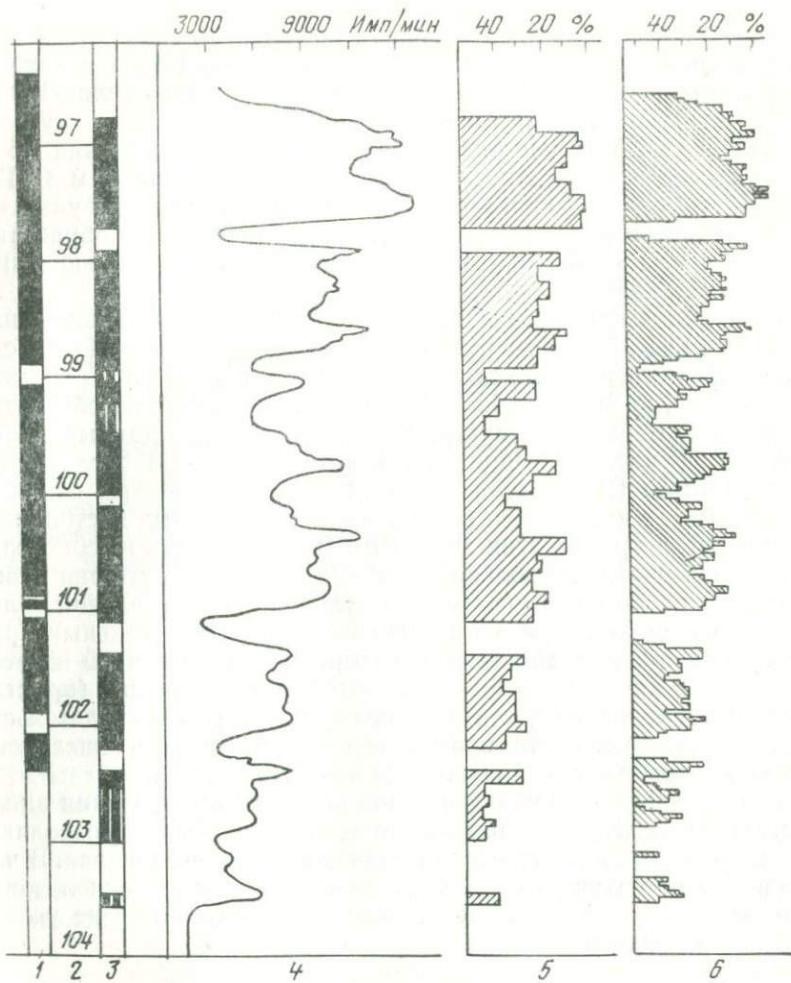


Рис. 3. Иллюстрация ручной и автоматической интерпретации данных СГГК, зарегистрированных против угольного пласта.

1 — геологическая колонка; 2 — глубина скважины, м; 3 — колонка по каротажу; 4 — диаграмма ГГК-С (прибор РУР-1, пульт ДРСТ-2, источник селен-75, зонд 0,15 м, постоянная времени 1,5 с, масштаб записи 1:20); 5, 6 — гистограммы зольности при ручной и автоматической отработке данных ГГК-С, соответственно.

текущих значений y . Остальные операции выполняются аппаратурой автоматически.

Результаты полевых испытаний

Полевые испытания аппаратуры проведены на угольных месторождениях Дальнего Востока, Иркутска, Челябинского и Ка-

рагандинского угольных бассейнов. В качестве скважинной измерительной аппаратуры использованы прибор РУР-1 с длиной измерительного зонда 10 и 15 см и источниками тулий-170 и селен-75. Для записи диаграмм СГГК применяли пульты ДРСТ-2 и РСКМ-1; постоянная времени записи составляла 1,5 с.

О качестве автоматической интерпретации диаграмм СГГК позволяют судить приведенные ниже некоторые результаты сравнительного анализа материалов, полученных при обработке диаграмм СГГК обычным путем (вручную) и с помощью аппаратуры «ИНТАК».

На рис. 3 приведен типичный пример интерпретации диаграммы СГГК. На этом рисунке кроме диаграммы СГГК представлены гистограммы зольности, вычисленные вручную и автоматически. Как и следовало ожидать из описания способа автоматической обработки, диаграмма зольности (по данным автоматической интерпретации) по форме полностью согласуется с диаграммой СГГК, если не считать незначительных отличий как результат имеющейся разницы в эквивалентных постоянных времени регистрации этих диаграмм. В то же время из сопоставления двух диаграмм зольности можно заключить, что они практически в равной мере позволяют судить о распределении зольности по глубине. При этом значения мощности угольных пластов и их средней зольности по результатам ручной и автоматической интерпретации отличаются незначительно (практически в пределах точности ручной обработки), что свидетельствует об эффективности практического применения описанного способа автоматической обработки диаграмм СГГК.

Результаты анализа материалов полевого опробования аппаратуры «ИНТАК» и высокая стабильность ее работы позволяют рекомендовать аппаратуру для практического применения. В частности, аппаратура может быть рекомендована к использованию производственными каротажными организациями на угольных месторождениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уткин В. И. Селективный гамма-гамма-каротаж на угольных месторождениях. М., Наука, 1975.
2. Каляев А. В. Введение в теорию цифровых интеграторов. Киев, Наукова думка, 1964.

В. А. БОЛЬЩИКОВ

АНАЛОГОВОЕ УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ СЕЛЕКТИВНОГО ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА

При обработке данных селективного гамма-гамма-каротажа (ГГК-С) необходимо в конечном счете преобразовать поступающую от измерительного зонда или скважинного прибора гамма-гамма-каротажа информацию в соответствии с интерпретационной формулой, в общем случае имеющей вид [2]:

$$A = a - b \ln \frac{I_a}{I_\Phi}, \quad (1)$$

где A — определяемый параметр (содержание тяжелых металлов или зольность угля);

a и b — постоянные величины, которые предварительно определяются при анализе корреляционной связи между измеряемой интенсивностью и содержанием тяжелых металлов или зольностью угля по данным геологического опробования;

I_a и I_Φ — соответственно аномальное и «фоновое» значение интенсивности, т. е. ее значение во вмещающих породах, принимаемых за эталон 0%-ного содержания тяжелых элементов или за эталон 100%-ной зольности.

При «ручной» обработке этих данных производится функциональное преобразование измеряемой интенсивности в соответствующее напряжение с последующей записью кривой на диаграммной ленте. Затем, в соответствии с методикой интерпретации данных ГГК-С, проводят количественную обработку записанной кривой для определения содержания тяжелых элементов или зольности угля [1].

Наряду с высокой трудоемкостью ручная обработка каротажной диаграммы приводит к существенной погрешности, связанной с графическим представлением измеряемой интенсивности и субъективными ошибками интерпретатора. Причем вклад такой погрешности в общую величину ошибки определяемого параметра может достичь 80—90% [3].

Однако эта погрешность может быть снижена до пренебрежимо малой величины с применением техники цифровой регистрации результатов измерений, а также при автоматической обработке

данных ГГК-С с представлением конечных результатов в цифровой форме.

Функциональное преобразование измеряемой интенсивности в соответствии с интерпретационной формулой (1) может быть реализовано различными путями. Ниже рассматривается аналоговый способ автоматизации обработки данных ГГК-С и устройство для его реализации.

Известно, что процесс разряда емкости характеризуется выражением

$$U_t = U_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где U_t и U_0 — соответственно текущее и начальное значение потенциала; $\tau = RC$ — постоянная разряда емкости.

Преобразовав выражение (2) относительно t , получим

$$t = RC \ln \frac{U_0}{U_t}. \quad (3)$$

Легко заметить, что соотношение (3) аналогично интерпретационной формуле (1), для реализации которой необходимо преобразовать аномальное и «фоновое» значение интенсивности в соответствующий потенциал U_0 и U_t и измерить время разряда емкости от потенциала U_0 до потенциала U_t , предусмотрев возможность ввода постоянных величин a и b .

Интенсивность входных сигналов можно преобразовать в потенциал с помощью интегратора аналогично тому, как это производится в известной наземной радиометрической аппаратуре ДРСТ, РСК, РСК-М и др.

Если к выходу интегратора периодически подключать RC контур, то емкость контура будет заряжаться до потенциала, соответствующего интенсивности входных сигналов. Длительность разряда емкости до потенциала, соответствующего «фоновой» интенсивности, необходимо преобразовать далее в измеряемый параметр A , пользуясь аналогией выражений (1) и (3).

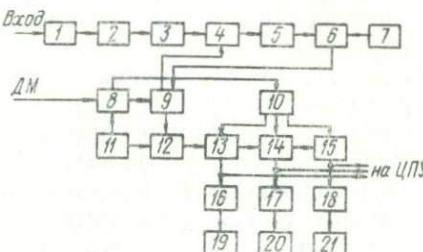
Для этого можно использовать время — импульсное преобразование, заполняя временной интервал сигналами задающего генератора и производя их счет.

Блок-схема устройства, реализующего интерпретационную формулу (1) для автоматической обработки данных ГГК-С, показана на рисунке.

Устройство работает следующим образом. На вход дискриминатора 1 поступают сигналы с измерительного зонда или со скважинного снаряда в виде статистически распределенной последовательности импульсов. Дискриминатор собран по схеме одновибратора с обратной связью и регулируемым порогом срабатывания. С выхода дискриминатора импульсы с постоянной длительностью порядка 30 мкс поступают на нормализатор 2, который стабилизирует импульсы по амплитуде. Нормализованные по длительности и амплитуде сигналы подаются на интегратор 3, в котором

Структурная схема аналогового устройства автоматической обработки данных ГГК-С.

1 — дискриминатор; 2 — нормализатор; 3 — интегратор; 4 — управляемый ключ; 5 — времязадающая цепочка; 6 — нуль-орган; 7 — источник опорного потенциала; 8 — схема управления; 9 — триггер цикла; 10 — схема начальной установки счетчика содержания; 11 — тактовый генератор; 12 — схема совпадения; 13—15 — декады счетчика содержания; 16—18 — преобразователи кода; 19—21 — цифровые индикаторы; ДМ — датчик меток глубины.



происходит функциональное преобразование интенсивности входных сигналов в потенциал. Выход интегратора через управляемый ключ соединен с времязадающей цепочкой 5, потенциал на которой при замкнутом ключе 4 устанавливается равным потенциальному интегратора. На входы нуль-органа 6 подается с одной стороны потенциал времязадающей цепочки и с другой стороны потенциал опорного источника.

При эталонировке устройства, т. е. при «фоновом» значении интенсивности уровень выходного сигнала интегратора и соответственно потенциал времязадающей цепочки устанавливают равным по величине потенциальному опорного источника для стабилизации кривой разряда времязадающей цепочки. Контроль установки «фонового» значения интегратора 3 производится с помощью нуль-органа 6, имеющего выход визуального контроля.

Таким образом, на входе нуль-органа фиксируется «фоновое» значение потенциала, которое в процессе автоматической обработки является опорным при определении конечного результата.

Постоянная времени времязадающей цепочки устанавливается с помощью переменного резистора в соответствии с интерпретационной формулой (1)

$$\tau = RC = b.$$

Устройство может работать в нескольких режимах:

- режим автоматической обработки данных ГГК-С при катотаже угольных скважин,
- режим автоматической обработки данных ГГК-С при определении содержания тяжелых элементов,
- промышленное опробование и лабораторные исследования угольных моделей,
- промышленное опробование и лабораторные измерения содержания тяжелых элементов.

Рассмотрим работу устройства в режиме «а».

При входе скважинного снаряда в зону угольного пласта интенсивность сигналов на его выходе возрастает, что вызывает соответствующее увеличение потенциала на выходе интегратора 3, до которого заряжается емкость времязадающей цепочки 5.

С приходом импульса от датчика меток глубины ДМ схема управления формирует сигнал установки $T_{уст}$, который через схему начальной установки счетчика 10 устанавливает его декады 13, 14, 15 в исходное состояние, т. е. вводит постоянную a в соответствии с интерпретационной формулой (1). Одновременно вырабатывается импульс цикла $T_{ц}$, который перебрасывает триггер цикла. При этом управляемый ключ 4 закрывается, а на вход схемы совпадения 12 подается разрешающий потенциал. Сигналы тактового генератора с частотой 100 кГц проходят через схему совпадения 12 и поступают на вход трехдекадного счетчика содержания 13, 14, 15, который работает в режиме вычитания.

Потенциал времязадающей цепочки 5 падает и, как только становится равным потенциалу опорного источника 7, на выходе нуль-органа 6 формируется сигнал, который поступает на управляющий вход триггера цикла 9 и возвращает его в исходное состояние. На схему совпадения 12 подается запрещающий сигнал и на декадах счетчика устанавливается текущее значение зольности.

Двоично-десятичный код, в котором работает счетчик, преобразуется преобразователем кода 16, 17, 18, и на цифровых индикаторах 19, 20, 21 индицируется значение зольности в цифровой форме. Состояния декад счетчика содержания выводятся после каждого цикла обработки в двоично-десятичном коде на цифropечатающее устройство.

Работа в режиме «в» отличается лишь тем, что формирование сигналов $T_{уст}$ и $T_{ц}$ производится схемой управления либо от кнопки ручного управления, либо автоматически от сигналов тактового генератора. При этом увеличивается постоянная времени интегратора до 2–5 с и выбирается соответствующая ей длительность цикла измерений, что позволяет существенно снизить статистическую ошибку и повысить точность опробования.

В режиме автоматической обработки данных ГГК-С при определении содержания тяжелых элементов декады счетчика содержания переключаются в режим сложения и устанавливается верхний уровень потенциала опорного источника. В этом случае при аналоговой интерпретации используется заряд емкости времязадающей цепочки.

Процесс эталонировки устройства аналогичен вышеописанному, однако «фоновое» значение интенсивности при этом максимально, поэтому используется верхний уровень потенциала опорного источника для стабилизации кривой заряда емкости времязадающей цепочки.

При входе каротажного снаряда в монометаллическую рудную зону интенсивность сигналов на его выходе и, соответственно, потенциал на емкости времязадающей цепочки уменьшаются.

С приходом импульса от датчика меток глубины схема управления формирует соответствующие сигналы, управляемый ключ разрывает связь интегратор — времязадающая цепочка и подает

на ее вход стабилизированное напряжение, равное примерно двойному значению верхнего уровня потенциала опорного источника.

Одновременно сигналы тактового генератора 11 через схему совпадения 12 поступают на вход счетчика содержания 13, 14, 15, который производит их суммирование. При равенстве потенциала времязадающей емкости верхнему уровню опорного источника триггер цикла возвращается в исходное состояние и в счетчике фиксируется текущее значение содержания тяжелого элемента, которое индицируется на индикаторах в десятичной форме.

Таким образом, описанное устройство позволяет автоматически обрабатывать данные селективного гамма-гамма-каротажа (ГГК-С) как на угольных, так и на монометаллических месторождениях тяжелых элементов, а также результаты лабораторных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воскобойников Г. М., Балашов В. Н., Главчев П. А. К вопросу о количественных определениях содержания тяжелых металлов в руде по данным селективного каротажа.—В кн.: Геофизический сборник № 3/Ин-т геофизики УФАН СССР. Свердловск, 1962.

2. Уткин В. И. Селективный гамма-гамма-каротаж на угольных месторождениях. М., Наука, 1975.

3. Уткин В. И., Бурдин Ю. Б. О точности аналоговой регистрации в гамма-гамма-каротаже.—В кн.: Ядерно-геофизические исследования/Ин-т геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1975.

М. И. СВЕТЛОВ, В. В. БАХТЕРЕВ,
В. М. СТЕПАНОВ, Л. А. ЗЫРЯНОВ

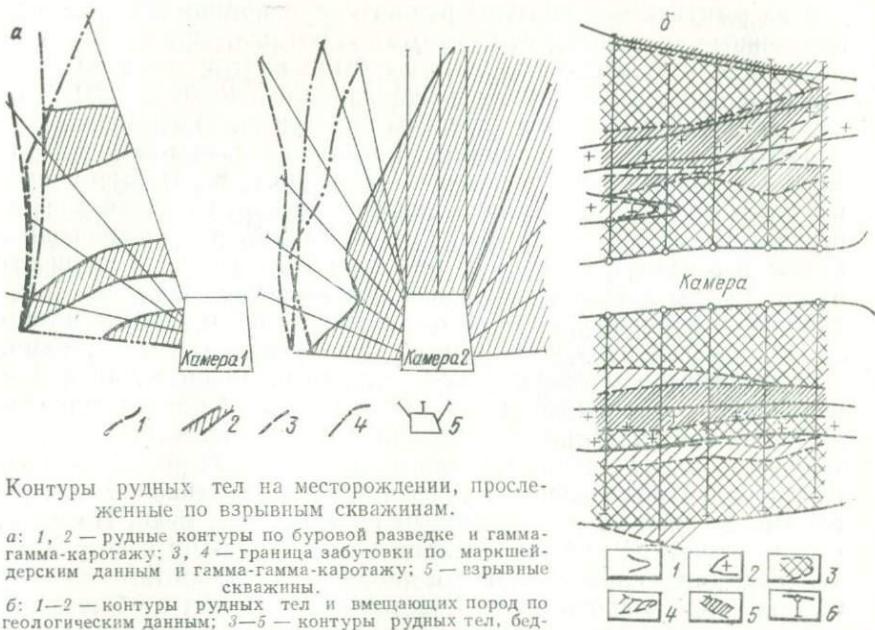
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА
ПОДЗЕМНЫХ СКВАЖИН
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИ

Отработка месторождений меди сопровождается большими объемами горнопроходческих и буровых работ. При подземной разработке медную руду добывают так называемым камерным способом массового обрушения с последующей забутовкой отработанного пространства бетоном. Цикл отработки камеры включает в себя проходку нарезных выработок, бурение шпуров, отбойку и выпуск руды, закладку пустот бетоном. Направление и глубину шпуров (взрывных скважин) задают по материалам эксплуатационной геологической разведки. Границы рудных тел определяют по шламу взрывных скважин, проходкой дополнительных горных выработок с последующим визуальным определением границ.

Точность увязки границ рудных тел зависит от многих факторов, частью субъективного характера. Поэтому предполагаемые границы рудных тел часто не совпадают с фактическими, установленными только в процессе отработки рудного блока, что приводит либо к неоправданным потерям руды, либо к ее разубоживанию.

С целью повышения эффективности эксплуатационных работ авторы использовали гамма-гамма-каротаж взрывных скважин для оперативного выделения кондиционных руд. В настоящей работе описаны результаты применения указанного метода для оконтуривания кондиционных медных руд на двух разрабатываемых месторождениях меди.

Красноуральское месторождение — типичное медноколчеданное. Руды массивные. Контакты с вмещающими породами умеренно резкие. Плотность руд $4,2\text{--}4,4 \text{ г}/\text{см}^3$, средний эффективный атомный номер $Z_{\text{эфф}}=21,3$. Вмещающие породы, представленные ксенотуфами плагиоклазовых порфиритов или серицит-кварцевыми разностями, имеют плотность $2,76\text{--}2,84 \text{ г}/\text{см}^3$ и $Z_{\text{эфф}}=16,2\div16,8$. Бетон, заполняющий отработанные камеры,



Контуры рудных тел на месторождении, прослеженные по взрывным скважинам.

а: 1, 2 — рудные контуры по буровой разведке и гамма-гамма-каротажу; 3, 4 — граница забутовки по маркшейдерским данным и гамма-гамма-каротажу; 5 — взрывные скважины.

б: 1—2 — контуры рудных тел и вмещающих пород по геологическим данным; 3—5 — контуры рудных тел, бедных руд и вмещающих пород по данным гамма-гамма-каротажа; 6 — взрывные скважины.

имеет плотность $3,1-3,2 \text{ г}/\text{см}^3$ — промежуточную между рудой и породой, $Z_{\text{эфф}}=20,6$. Для оперативного определения границ руда — бетон, руда — порода, порода — бетон авторы применили плотностной вариант гамма-гамма-каротажа, так как по $Z_{\text{эфф}}$ руда и бетон дифференцированы слабо, в то время как избыточная плотность руд составляет $1,0-1,2 \text{ г}/\text{см}^3$.

Измерения выполнены с применением серийно выпускаемой аппаратуры РСР-3. В качестве детектора гамма-излучения использовали сцинтилляционный счетчик, состоящий из кристалла иодистого натрия и ФЭУ-31. Кристалл заключен в кадмиевый экран. Источник гамма-лучей селен-75. Зонд 15 см. Каротаж точечный, шаг опробования 10 см. Время каротажа одной взрывной скважины длиной 6—8 м равно 8—10 мин. Интенсивность рассеянного излучения выражали в относительных единицах — делениях шкалы регистратора.

Медная руда, вмещающие породы и бетон надежно дифференцируются по величине интенсивности рассеянного гамма-излучения. Так, интенсивность измеряемого излучения, выраженная в делениях шкалы регистратора, над рудой составляет 5—10 ед., а над вмещающими породами и бетоном — соответственно 40 и 30 ед. Таким образом, оперативно удалось уточнить границы рудного тела, вмещающей породы и бетона.

Положение рудных тел, определенное по данным гамма-гамма-каротажа сравнивали с геологическим опробованием. При-

чем за фактические контуры рудного тела принимали границы, полученные по данным гамма-гамма-каротажа. При этом считали, что если фактические контуры были внутри проектных, то это приводило к излишнему разубоживанию. Если же фактические контуры выходили за пределы проектных, то это приводило к потерям руды. Так, например, по данным гамма-гамма-каротажа установлено, что в камере 1 (см. рисунок, а) выемочный контур в результате непредвиденного резкого изменения конфигурации рудного тела содержит не менее 60% разубоживающей массы, а в камере 2 — около 20%. При этом в камере 2 при отработке руды дополнительно может быть оставлен целик. Своевременное изменение способа отработки данного участка позволило добывать руду с меньшими разубоживанием и потерями.

Гумешевское месторождение — типичное медно-скарновое с невысоким содержанием меди. Промышленная медная минерализация, представленная в основном халькопиритом, не имеет тенденций к локализации в строго определенных разностях горных пород. Промышленные руды представлены скарнами, кварцевыми диоритами с повышенным содержанием меди. По плотности нет четкой дифференциации между рудными и безрудными скарнами, скарнированными диоритами и диоритами с повышенным содержанием меди. Участки сыпучих руд вообще отмечаются пониженными значениями плотности. По величине $Z_{\text{эфф}}$ все руды на 4—5 ед. выше безрудных разностей горных пород. Поэтому была применена селективная модификация гамма-гамма-каротажа. При этом основные помехи, обусловленные переменной плотностью горных пород и руд, были в значительной мере ослаблены выбором источника гамма-лучей (cobальт-57, энергия гамма-излучения 122 кэВ) и оптимальной длины зонда (9 см).

Измерение проводили по точкам, расстояние между которыми 25 см. Время каротажа одной взрывной скважины длиной 6—8 м равно 4—6 мин. При таких условиях скорость счета, выраженная в делениях шкалы регистратора, составила над рудой 15—20 ед., над рудой с бортовым содержанием меди 30 ед., над вмещающими породами 40 ед. Однако здесь результаты измерений могут быть осложнены наличием карстовых пустот и скоплений пирита, что вызовет аномальные значения скорости счета регистрируемого рассеянного гамма-излучения. При этом карстовые полости отмечаются значениями скорости счета порядка 5—10 ед. шкалы регистратора, т. е. ниже статистического уровня скорости счета над рудами, что в большинстве случаев позволяет (по совокупности с условиями продвижения снаряда в скважине) исключить участки с аномальными значениями из рассмотрения.

Аномалии гамма-гамма-каротажа, вызываемые преимущественно пиритовыми рудами, являются основными источниками ошибок при определении мощности выделенных рудных подсес-

чений. Лишь знание участковым геологом конкретной геологической обстановки в какой-то степени поможет исключить эти ошибки при интерпретации диаграмм гамма-гамма-каротажа. На рисунке, б, сопоставлены контуры рудных тел и вмещающих пород по данным геологической разведки и гамма-гамма-каротажа, прослеженные по одному из отрабатываемых горизонтов.

Эффективность использования гамма-гамма-каротажа очевидна: она определяется оперативным (в процессе проходки взрывных скважин) выделением границ рудных интервалов с качественной оценкой руд, сокращением объемов дополнительных горных выработок для прослеживания контактов рудных тел с вмещающими породами, возможностью документального прогнозирования направления проходки основных нарезных выработок на стадии опережения горных работ, снижением потерь и разубоживания руд в процессе отработки месторождения.

В. М. ЕРШОВ, Э. С. ЛОБОВ, Г. А. ТАРХАНОВА

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЗНАЧЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Гидротермальные месторождения нередко характеризуются проявлением нескольких последовательных генераций рудной минерализации. Датирование этапов формирования руд по отдельным образцам приводит к выводам о большой продолжительности рудообразования, измеряемой десятками и сотнями миллионов лет. Данные о формировании месторождений в несколько фаз, связанных с тектоно-магматическими этапами развития регионов, имеют принципиальное значение и существующими сейчас геохронологическими методами могут быть обоснованы лишь при изучении проявлений урановой и ториевой минерализации. Однако определение абсолютного возраста месторождений осложняется тем, что простейшие физические модели нередко не отражают геологической истории радиоактивных минералов. Несоответствие принятой модели действительному ходу накопления радиогенных элементов приводит к ошибочным заключениям о возрасте минерализации. Например, в работе [2] отмечается несколько разновозрастных генераций смолок в пределах одного месторождения. На возможность интерпретационной ошибки в этом случае уже было обращено внимание [1].

Вероятно, не всегда выделение нескольких фаз минералообразования методами ядерной геохронологии можно считать достаточно обоснованным. Один из примеров того, когда абсолютный возраст настурганов, вычисленный по уран-свинцовым отношениям, искажен современными процессами и его не следует принимать в качестве доказательства многофазности минерализации, рассматривается в предлагаемой статье.

По результатам изучения абсолютного возраста формально можно было выделить до пяти генераций настурганов с возрастом от 90 до 840 млн. лет. Детальные минералогические и геохронологические исследования позволили установить действительный возраст минерализации и показать, что формирование ее произошло в одну стадию.

Гидротермальная минерализация относится к уран-молибденовой формации и локализована в вулканогенных породах за-

ключительной стадии тектоно-магматического этапа геосинклинального развития. Она приурочена к южному крылу брахиантиклинальной складки, сложенной девонскими вулканогенно-осадочными породами, представлена пологопадающими зонами линзовидно-пластовой формы, приуроченными к местам пересечения пласта спекшихся туфов кислого состава с крутопадающими нарушениями. Установлены два типа минерализации, резко отличающиеся по минеральному составу и морфологическим особенностям. Это фемолит-настурановые и настуран-черниевые образования. К фемолит-настурановому типу минерализации относятся урановая, молибден-урановая и молибденовая. По минеральному составу им соответствуют настуран-гематитовые, фемолит-настурановые и пирит-фемолитовые парагенезисы. Порядок перечисления соответствует последовательности их формирования.

Основные минералы этого типа минерализации — настуран и сложный сульфид молибдена и железа — фемолит. Неодновременность образования фемолит-настурановой минеральной ассоциации обуславливает выделение двух генераций настуранов. Настуран первой генерации входит в состав настуран-гематитовой ассоциации, второй — в состав фемолит-настурановой. Обе генерации настурана неравномерно распределены во вмещающих туфах в виде колломорфных образований микроскопических размеров, вкрапленных и сетчатых выделений. В редких случаях настуран обеих генераций встречается и в зонах тектнических нарушений. Тогда он иногда обнаруживает прожилковый характер выделений. Свойства настуранов приведены в табл. 1.

В фемолит-настурановой ассоциации отмечаются многочисленные секущие прожилки кварц-карбонатного состава с небольшим количеством сульфидов (галенит, пирит, халькопирит и блеклая руда). В этих прожилках встречается настуран, отнесенный к третьей генерации. Он является минералом, переотложенным под влиянием процессов заключительной стадии минералообразования, так как присутствует в прожилках лишь орудененных участков. В то же время настуран ранних генераций имеет несколько отличающиеся визуально оптические свойства.

Гидротермальный генезис фемолит-настурановой минерализации подтверждается наложенным характером оруденения, наличием и типом околоврудных изменений вмещающих пород и контролем оруденения разрывными нарушениями.

Настуран-черниевая ассоциация отличается резко преобладающим над молибденом содержанием урана. Эта минерализация отмечается на границе фемолит-настурановой с расположенным выше зонами окисления и выщелачивания. Основные рудные минералы этой ассоциации — урановые черни и настуран, выделенный как настуран четвертой генерации. По

Таблица 1

Сравнительная характеристика настуранов разных генераций (I—IV)

Свойства	Гипогенный этап			Гипергенный этап IV
	I	II	III	
Форма выделения	Колломорфная почко-видная	Колломорфная прожилковая	Почковидная	Прожилковая
Цвет	Черный	Черный	Черный	Черный
Блеск	Матовый	Матовый	Матовый	Сильный
Относительная твердость	5,5—6,0	—	—	4,4—4,5
Отражательная способность, %	14,2—15,7	14,0—15,0	14,0—15,0	11,5—12,0
Константа решетки, Å	5,40—5,42	5,40—5,41	5,42	5,37—5,39
Кислородный коэффициент	2,35			2,46
Ассоциация	Гематит, кварц, кальцит	Фемолит, пирит	Кварц, доломит, кальцит	Ковеллин, пирит, каолинит, марказит, урановые черни
Концентрация элементов-примесей, %:				
0, n	Pb, As, Sb	Нет данных		Pb, As, P
0,0 n	Zr			Sb, Cu
0,00 n	Cu			Mo, Zr

физическим свойствам, парагенезису и комплексу элементов-примесей настуран четвертой генерации резко отличается от настуранов предыдущих генераций.

Взаимоотношения между различными ассоциациями фемолит-настурановой и настуран-черниевой минерализации свидетельствуют о более позднем времени формирования последней. В отличие от настурана первой и второй генерации настуран четвертой генерации, как правило, образует прожилковые формы выделения.

Закономерное положение настуран-черниевых образований на границе первичных гидротермальных (фемолит-настурановых) зон и зоны окисления, приуроченность к определенному гипсометрическому уровню позволяет связывать образование настурана четвертой генерации с процессами гипергенеза.

Нижняя граница геологического возраста фемолит-настурановой минерализации определяется наличием гидротермальных урановых минералов в измененных постгранитных дайках диабазов. Аналогичные по составу дайки прорывают пестроцветную толщу франского яруса. Учитывая, что каледонский тектономагматический этап развития геосинклиналии, к которой приурочена минерализация, завершился в конце девона — начале карбона, наиболее вероятным возрастом гидротермального минералообразования можно считать верхний девон — нижний карбон.

Геологическое обоснование возраста вторичной минерализации затруднено из-за отсутствия здесь более молодых палеозойских образований, чем девонские вмещающие породы. Однако, судя по геологической истории развития района после гидротермального минералообразования, наиболее вероятными эпохами проявления процессов гипергенеза являются триас-юрская и четвертичная.

Уже к концу палеозоя регион начинает испытывать интенсивные тектонические движения, приводящие к его поднятию. В послепермское время начинается пенепленизация рельефа. Время, охватывающее ранний триас — позднюю юру, было относительно спокойным. В этот период происходит размытие и нивелировка суши и образование мощных кор выветривания.

Кайнозойские отложения (палеоген и неоген) широко распространены на описываемой территории, при этом установлены факты перекрытия триас-юрской коры неогеновыми озерными отложениями, что связано с незначительным опусканием некоторых участков региона. К концу неогена район испытывает общее поднятие, приведшее к оживлению эрозионной деятельности, размытию рыхлых отложений и созданию условий, благоприятных для протекания процессов гипергенеза.

О древнем возрасте зоны окисления свидетельствует различие между современным уровнем грунтовых вод и глубиной развития зоны окисления, а также радиоактивное равновесие в ряду уран — радий при наличии мощных интенсивно выщелоченных

Таблица 2

Результаты анализов и вычислений абсолютного возраста настуранов

Проба	Содержание, %		Изотопный состав свинца, %				Возраст, млн. лет		
	урана	свинца	204	206	207	208	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
Настуран ранних генераций из тонковкрапленных настуран-гематитовых выделений, не окисленный . . .	24,40	1,60	0,04	93,09	5,47	1,40	445	420	335
Настуран ранних генераций из настуран-гематитовой минерализации, слабо окисленный	47,93	6,10	0,03	93,37	5,35	1,25	840	710	337
Настуран ранних генераций из слабо окисленных настуран-гематитовых образований, слабо окисленный . . .	52,96	3,02	0,02	93,99	5,26	0,73	395	377	350
Настуран четвертой генерации из микропрожилков, секущих слабо окисленные настуран-гематитовые выделения	57,42	2,17	0,04	92,88	5,64	1,44	260	265	415
Фельзит, обогащенный настураном четвертой генерации	1,07	0,038	0,22	83,24	7,67	8,87	212	217	370
Фельзит, обогащенный настураном четвертой генерации	0,91	0,046	0,50	69,87	10,65	18,98	230	210	56
Настуран четвертой генерации из кварцевого прожилка	52,63	0,71	0,10	89,48	6,60	3,82	90	105	540

Таблица 3

**Результаты определения абсолютного возраста
вторичных урановых минералов**

Минерал	Содержание, %		Изотопный состав свинца, %				Возраст, млн. лет		
	Уран	Свинец	204	206	207	208	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
Уранофан . . .	15,40	2,14	0,06	92,12	5,78	2,04	900	740	360
Уранофан . . .	37,50	0,96	0,03	93,38	5,44	1,15	180	190	380
Фосфуранилит	43,97	2,75	0,06	92,04	5,78	2,12	420	400	360
Фосфуранилит	41,58	0,723	0,65	61,44	12,87	25,04	66	74	445
Бета-уранотил	45,11	0,304	0,10	90,74	5,94	3,22	45	47	190
Отенит	48,62	0,302	1,12	38,36	18,08	42,44	Современный		

участков фельзитов при застойном характере современных вод.

Развитие вторичных урановых минералов по настурану четвертой генерации свидетельствует о вероятном существовании и молодых (близких к современным) процессов гипергенеза.

Выявленные особенности первичных руд и минералов зоны окисления и возникшие в связи с этим задачи геохронологических исследований сделали необходимым изучение мономинеральных фракций, отбор которых производили под микроскопом при крупности зерен 0,1—0,5 мм.

Изотопный состав рудного свинца (для внесения поправки) принят по результатам анализа галенита. Распространенность изотопов в нем (от 204 к 208) составляет, %: 1,362; 25,50; 21,29; 51,85.

Результаты анализов и вычислений возраста настуранов приведены в табл. 2. Полученные значения абсолютного возраста позволяют заключить, что либо здесь проявлены по меньшей мере пять генераций настуранов, либо исследованные настураны ранних генераций подверглись воздействию каких-то процессов, приведших к нарушению уран-свинцового отношения и соответствующим колебаниям значений возрастов. В то же время возраст ранних настуранов по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ в этих пробах близок и соответствует с учетом только экспериментальных данных изохроне с тангенсом угла наклона $0,05324 \pm 0,00018$, отвечающей возрасту 360 ± 8 млн. лет. Это позволяет принять значение абсолютного возраста настуранов ранних генераций равным 360 млн. лет.

Получены три значения возраста настуранов четвертой генерации. В связи с этим можно предполагать, что либо в течение 260 млн. лет были проявлены эти три этапа минералообразования или метаморфизма, ранний из которых оторван от основной стадии оруденения почти на 100 млн. лет, либо образование настуранов поздней генерации связано с экзогенными

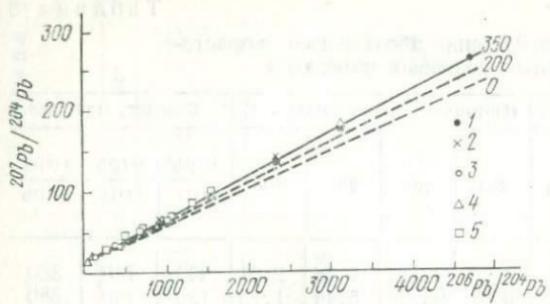


Рис. 1. Свинцовая изохронна, построенная по результатам изотопных анализов настуранов ранних и поздних генераций (табл. 2), вторичных урановых минералов (табл. 3) и девяти валовых рудных проб.

1 — настуран ранних генераций;

2 — настуран поздней, четвертой генерации; 3 — фельзиты с настураном четвертой генерации;

4 — вторичные урановые минералы — теоретические изохроны для

ралы; 5 — валовые пробы фельзитов. Штриховые линии — для различных возрастов генераций.

Цифры на кривых — возраст генераций, млн. лет.

процессами. Попытка оценить абсолютный возраст поздних настуранов по свинец-свинцовой изохроне привела к значению возраста 430 ± 72 млн. лет, что несколько выше возраста ранних настуранов и свидетельствует о наличии в поздних настуранах некоторой доли примесного радиогенного свинца ранних минералов. Следовательно, к значениям возраста, полученным по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, нужно отнестись с осторожностью. Тем более что геологические наблюдения свидетельствуют о гипергенном происхождении настуранов четвертой генерации, а геохронологические исследования позволяют предполагать три последовательных этапа окисления руд. Это предположение может быть проверено определением абсолютного возраста вторичных урановых минералов, широко развитых в зоне окисления. Результаты геохронологических исследований вторичных минералов приведены в табл. 3. Прежде всего следует отметить значения абсолютного возраста уранофана и фосфуранилита, значительно превышающие возраст настуранов ранних генераций, что позволяет предполагать в них примесь радиогенного свинца первичных минералов. Поэтому нет оснований считать, что в остальных минералах примесный радиогенный свинец отсутствует. Другие два значения возраста уранофана и фосфуранилита близки к абсолютному возрасту поздних настуранов (210 — 100 млн. лет). Кроме того, устанавливается и более молодой (современный) возраст вторичных минералов.

Предположение о древнем, триас-юрском возрасте вторичной минерализации может быть проверено построением свинец-свинцовой изохроны, тангенс угла наклона которой для вторичных минералов оказался равным $0,05375 \pm 0,00071$, что соответствует возрасту 385 ± 28 млн. лет. Это значение абсолютного возраста в пределах аналитических ошибок совпадает с возрастом настуранов ранних генераций и дает основание считать, что вторичные минералы имеют молодой возраст и содержат преимущественно примесный свинец настуранов ранних генераций. Следо-

Рис. 2. Свинец-урановые отношения и график «согласующихся» значений возрастов.

1—5 — то же, что на рис. 1.
Цифры на кривой — возраст генераций, млн. лет.

вательно, можно ожидать, что возраст всех проанализированных образцов должен соответствовать одной изохроне, которая определяется возрастом ранних настуранов.

Тангенс угла наклона изохроны (рис. 1), вычисленной на основании данных табл. 2 и 3, а также девяти валовых проб, равен $0,05302 \pm 0,0003791$,

что соответствует абсолютному возрасту 350 ± 16 млн. лет. На рис. 1 показаны изохроны для возраста 200 млн. лет и современного. Видно, что данные для настуранов поздней генерации и вторичных минералов не соответствуют этим изохронам. Кроме того, следует учесть, что анализы одного образца отенита указывают на современный возраст вторичной минерализации.

Разброс значений абсолютного возраста настуранов ранних генераций по уран-свинцовым отношениям связан с перераспределением урана и радиогенного свинца, близким к современному. Это видно на графике «конкордии» (рис. 2) и по отношению изотопов свинца-207 и 206 в радиогенной компоненте аномального галенита (табл. 4). Среднее отношение $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ равно 0,05336, т. е. такое же, как и угловой коэффициент свинцовой изохроны настуранов ранних генераций (0,05324). Такой свинец мог накопиться только за время от 360 млн. лет до настоящего времени.

Итак, полученные геохронологические данные убедительно свидетельствуют о близком к современному возрасте вторичной урановой минерализации. Эти данные допускают многостадийное формирование минералов зоны окисления в пределах нескольких десятков миллионов лет. Сопоставляя минералогические наблюдения и значения абсолютного возраста настуранов и вторичных урановых минералов, можно заключить, что настурен четвертой генерации имеет экзогенное происхождение.

Возраст первичной минерализации, принятый по анализам ранних генераций настуранов, равен 360 млн. лет, образование

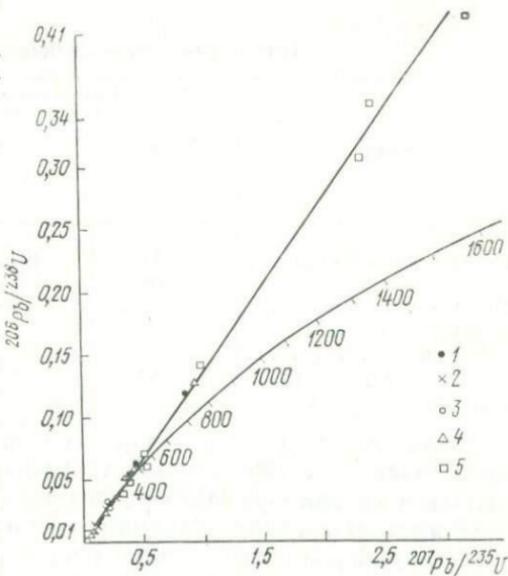


Таблица 4

Изотопный состав свинца в галенитах

Минерал	Изотопные отношения			Отношение в радиогенной компоненте
	$\frac{206}{204}$	$\frac{207}{204}$	$\frac{208}{204}$	
Галенит аномальный . .	3341 3108	191,8 181,7	37,50 42,00	0,05299 0,05373
Среднее	—	—	—	0,05336
Галенит обыкновенный (среднее)	18,72	15,63	38,07	—

настуранов четвертой генерации связано с переотложением урана, близким к современному. Следовательно, нет оснований выделять несколько фаз минералообразования.

Выполненные исследования показывают, что только детальные минерало-геохимические исследования могут привести к выяснению действительного возраста оруденения сложной геологической истории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугаринов А. А. О достоверности определения абсолютного возраста урановых минералов по отношению изотопов свинца.—ДАН СССР, 1954, т. 99, № 6.
2. Collins C. B., Farquar R. M., Russel R. D. Isotopic constitution of radiogenic leads and measurement of geological time.—Bull. Geolog. Soc. Amer., 1954, v. 65, N 1.

Р. Л. ХАРУС

ГИПОТЕЗА НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОВЕЩЕСТВА ЗЕМЛИ И ИЗОТОПНЫЕ ОТНОШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследование изотопных отношений элементов в метеоритах и различных типах горных пород позволяет лучше понять процессы образования химических элементов в природе и закономерности относительной распространенности изотопов. Естественно допустить, что первоначальный изотопный состав элементов протовещества планет был вполне определенным, но на некоторых стадиях эволюции Земли могли преобладать различные виды ядерных реакций, при которых происходило «выгорание» одних изотопов и накопление других. Примером таких процессов являются реакции поглощения нейтронов с последующим испусканием гамма-квантов, протонов, альфа-частиц и т. д. Согласно [1—4], наблюдаемые в природе большие аномалии изотопных отношений некоторых элементов можно объяснить облучением вещества нейтронами, величина интегрального потока которых составляет около 10^{21} нейтр./см².

В настоящей работе рассматривается влияние нейтронного потока на изотопные отношения некоторых наиболее распространенных во Вселенной элементов, имеющих два стабильных изотопа (водород, гелий, углерод, азот и хлор).

Количественные изменения изотопов во времени, происходящие в результате ядерных процессов, описываются системой линейных дифференциальных уравнений [3]

$$\frac{dN_i}{dt} = -f\sigma_i N_i + f \sum_k \sigma_k N_k, \quad (1)$$

где N_i — количество атомов i -го изотопа;

f — нейтронный поток, нейтр/см²·с;

σ_i , σ_k — нейтронные сечения поглощения, см².

Первый член в правой части уравнения характеризует скорость «выгорания» i -го изотопа вследствие нейтронных реакций, а второй — скорость его накопления за счет других элементов или второго изотопа i -го элемента.

Влияние нейтронного облучения на распространность некоторых легких элементов

Элемент	Распространенность изотопа, отн. ед.	Нейтронные ядерные реакции	Сечение поглощения, барн	Интегральный нейтронный поток, нейтр./см ²
¹ H	$2,6 \cdot 10^{10}$ $3,9 \cdot 10^6$	¹ H (<i>n, γ</i>) ² H ² H (<i>n, γ</i>) ³ H	$(3,32 \pm 0,02) \cdot 10^{-1}$ $(4,6 \pm 1,0) \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{20}$
² He	$6,3 \cdot 10^5$ $2,1 \cdot 10^9$	³ He (<i>n, γ</i>) ⁴ He ³ He (<i>n, p</i>) ³ H ⁴ He	$(5,5 \pm 0,3) \cdot 10^3$ $(5,4 \pm 0,2) \cdot 10^3$ —	$5,3 \cdot 10^{20}$
⁶ C	$1,33 \cdot 10^7$ $1,55 \cdot 10^5$	¹² C (<i>n, γ</i>) ¹³ C ¹³ C (<i>n, γ</i>) ¹⁴ C	$(3,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ $(9,0 \pm 3,0) \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{24}$
⁷ N	$2,44 \cdot 10^6$ 9000	¹⁴ N (<i>n, γ</i>) ¹⁵ N ¹⁴ N (<i>n, p</i>) ¹⁴ C ¹⁵ N (<i>n, γ</i>) ¹⁶ N	$(8,0 \pm 2,0) \cdot 10^{-2}$ $(1,75 \pm 0,05)$ $(2,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{22}$
³⁷ Cl	1490 480	³⁵ Cl (<i>n, γ</i>) ³⁶ Cl ³⁵ Cl (<i>n, p</i>) ³⁵ S ³⁷ Cl (<i>n, γ</i>) ^{38m} Cl ³⁷ Cl (<i>n, γ</i>) ³⁸ Cl ³⁷ Cl (<i>n, p</i>) ³⁷ S	$(3 \pm 2) \cdot 10^{+1}$ $(1,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-1}$ $(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$ $(5,6 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}$ $2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{20}$

Как показано в [3], N_i определяется не величиной нейтронного потока f , а интегральным потоком нейtronов F :

$$F = \int_0^t f(\tau) d\tau. \quad (2)$$

В таблице приведены данные о космической распространенности рассматриваемых элементов по А. Камерону [5], современные значения их изотопных отношений и нейтронные характеристики [6]. Существует корреляция между сечениями поглощения нейтронов легкими изотопами элементов и относительной распространностью их изотопов: чем больше сечение поглощения, тем большее величина отношения тяжелого изотопа к легкому (исключение составляет углерод).

Несомненно, что мощный нейтронный поток, облучающий протовещество, мог существенным образом изменить изотопные отношения элементов с большими сечениями поглощения нейтронов.

В расчетах мы исходили из предположения, что в протовеществе Земли полностью отсутствовали тяжелые изотопы элементов, указанных в таблице. Для этих условий рассчитан интегральный нейтронный поток (см. таблицу), необходимый для того, чтобы

изменить первоначальные изотопные отношения до современных значений.

Анализируя полученные значения интегрального нейтронного потока, можно сделать следующие выводы.

1. В протовеществе Земли легкие изотопы были более распространены, чем в настоящее время.

2. Изотопы ^2H , ^4He и ^{37}Cl могли быть продуктами нейтронного захвата при облучении легких изотопов соответствующих элементов нейтронным потоком, величина которого порядка $10^{21} \text{ нейтр}/\text{см}^2$.

3. Изотопы ^{13}C и ^{15}N , по-видимому, присутствовали уже в протовеществе Земли или были продуктами других процессов нуклеосинтеза.

Расчеты показали, что поток нейтронов $F = 10^{21} \text{ нейтр}/\text{см}^2$ может изменить изотопные отношения углерода лишь на $3 \cdot 10^{-2}\%$, а азота не более чем на 2% от современных значений.

Наблюдаемые в природе вариации относительной распространенности изотопов частично можно объяснить вариациями интегрального нейтронного потока. Большие вариации гелия в различных космических объектах связаны в значительной степени с тем, что тяжелый изотоп гелия ^4He образуется при распаде естественно-радиоактивных рядов урана и тория.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Н. А. Природный ядерный реактор на Земле.—Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 5.
2. Прасолов Р. С. Геохимические изотопные аномалии и гипотеза естественных ядерных реакторов.—Там же, 1974, т. 36, вып. 1.
3. Ершов В. М., Сенько-Булатный И. Н., Харус Р. Л. Исследования аномальных отношений стабильных изотопов некоторых элементов.—ДАН СССР, 1975, т. 224, № 2.
4. Харус Р. Л. Возможность изменения изотопного состава бора.—В кн.: Ядерно-геофизические исследования/Ин-т геофизики УНЦ АН СССР. Свердловск, 1975.
5. Cameron A. G. W. A new table of abundances of the elements in the solar system.—In: Origin and Distribution of the Elements. N.Y.—London, 1968, p. 125—143.
6. Алиев А. И., Дрынкин В. И., Лейпунская Д. И., Касаткин А. В. Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа. Справочник. М., Атомиздат, 1969.

В. Б. ЧЕРМЕНИНОВ

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕЙТРОННОГО
АКТИВАЦИОННОГО КАРОТАЖА ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ

Обычно при интерпретации результатов непрерывного нейтронного активационного каротажа (НАК) используются способы, разработанные для гамма-каротажа скважин. Однако существенным отличием НАК от гамма-каротажа является необходимость проведения всех, даже детализационных, измерений с определенной скоростью, что не позволяет методически исключить влияние инерционности аппаратуры на вид аномалии и ее интенсивность. Особенно значительно влияние инерционности при активационном каротаже по изотопам с небольшим периодом полураспада, например ^{20}F и ^{16}N , образующихся при активации ядер фтора.

Для месторождений фторсодержащего сырья с большой мощностью рудных тел возможно проведение НАК с зондами 1,6—2,0 м и скоростью до 650 м/ч, однако для продуктивных зон малой мощности (менее длины зонда) наблюдаются большие погрешности при определении содержания фтора [3]. Многие кварцфлюоритовые месторождения Забайкалья характеризуются небольшой мощностью рудных тел, что обусловило необходимость разработки методики интерпретации результатов НАК для пластов мощностью менее 1 м. В результате проведенных работ установлено [2], что для определения мощности рудного тела наиболее целесообразно использование экспериментальной зависимости ширины аномалии на половине максимальной интенсивности от величины мощности рудного тела. Влияние инерционности и ненасыщенности пласта на величину аномалии может быть с достаточной точностью учтено по экспериментально установленным функциям насыщения.

В дальнейшем методика совершенствовалась, было изучено влияние различных факторов на вид аномалии для пластов мощностью менее 1 м. Ниже рассмотрены некоторые результаты, причем основное внимание уделено методическим вопросам, так как характер конкретных зависимостей мощности рудной зоны от ширины аномалии определяется прежде всего особенностями аппаратуры и методики НАК.

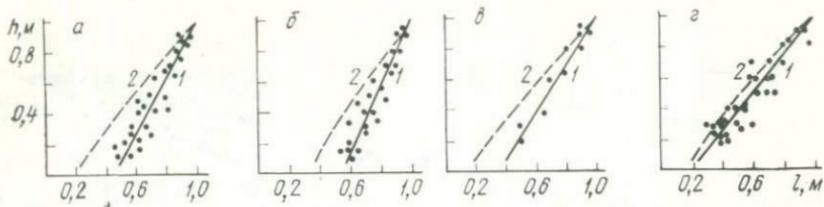


Рис. 1. Связь между мощностью пласта и шириной аномалии.

a — счетчики МС-16 (2 шт.), $v=250 \text{ м/ч}$, $\tau=3,8 \text{ с}$; *б* — то же, $\tau=6,8 \text{ с}$; *в* — счетчик МС-9, $v=250 \text{ м/ч}$, $\tau=3,8 \text{ с}$; *г* — кристалл NaI (размер $30 \times 70 \text{ мм}$), $v=360 \text{ м/ч}$, $\tau=2,0 \text{ с}$. 1 — экспериментальные зависимости, 2 — инерционности, рассчитанные по выражению (1).

Для разных методик НАК на фтор получены кривые зависимости ширины аномалии от мощности пласта (рис. 1). По ним видно, что при использовании детекторов большой длины изменение постоянной времени регистрации, а следовательно, и скорости каротажа слабо влияет на результаты измерений. Для детекторов с небольшим линейным размером вид кривой определяется по формуле [4]

$$l = h + v \cdot \tau \cdot \ln \left(e^{-\frac{h}{v\tau}} + 1 \right), \quad (1)$$

где l — ширина аномалии на половине максимальной интенсивности; h — мощность пласта; v — скорость каротажа; τ — постоянная времени аппарата.

Формула (1) справедлива для детекторов с длиной чувствительной части, меньшей произведения $v \cdot \tau$, а величина τ должна определяться экспериментально для данного типа радиометра и регистратора. Так, для регистраторов типа ПАСК-8 установлено, что при обычных режимах записи их собственная постоянная времени составляет $0,8 \text{ с}$. Влияние изменения постоянной времени или скорости может быть учтено либо по экспериментальным зависимостям, либо по расчетам для детекторов с малыми размерами.

Для пластов мощностью менее 1 м определенное влияние на ширину аномалии будет оказывать их ненасыщенность по гамма-нейтронным свойствам. С учетом этого выражение (1) можно представить в виде

$$l = \varphi(h) \cdot h + v \cdot \tau \cdot \ln \left(e^{-\frac{\varphi(h) \cdot h}{v\tau}} + 1 \right), \quad (2)$$

где $\varphi(h)$ — функция, учитывающая влияние ненасыщенности пласта на ширину аномалии.

В первом приближении величину $\varphi(h)$ можно оценить по экспериментальным данным из выражения

$$\varphi'(h) = \frac{1}{h} \left[l - v \cdot \tau \cdot \ln \left(e^{-\frac{h}{v\tau}} + 1 \right) \right]. \quad (3)$$

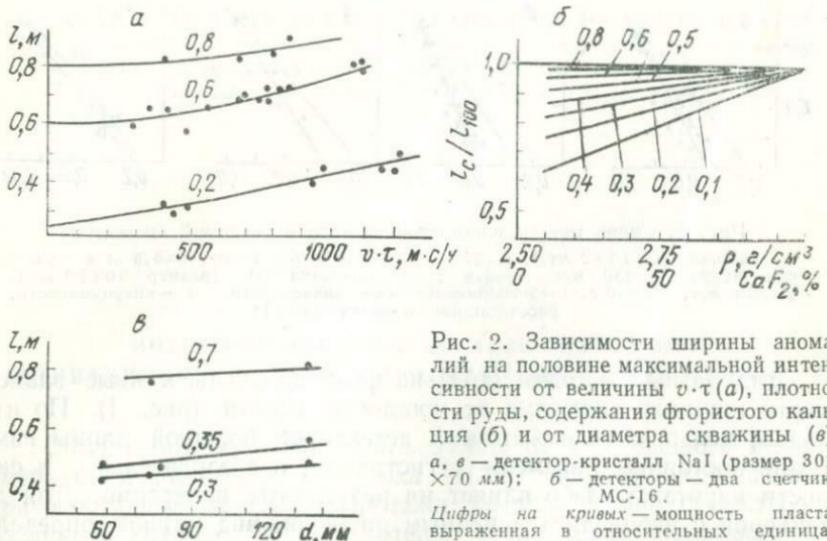


Рис. 2. Зависимости ширины аномалий на половине максимальной интенсивности от величины $v \cdot \tau$ (а), плотности руды, содержания фтористого кальция (б) и от диаметра скважины (в).
а, в — детектор-кристалл NaI (размер 30×70 мм); б — детекторы — два счетчика MC-16.
Цифры на кривых — мощность пласта, выраженная в относительных единицах длины зонда.

Методом приближений величина $\phi(h)$ может быть рассчитана с достаточной точностью, и по формуле (2) для данного детектора получена зависимость для любого другого значения $v \cdot \tau$, основанная на экспериментальных данных.

По этой методике для спектрометрического НАК на фтор по изотопу ^{16}N была построена палетка для введения поправок на изменение величины $v \cdot \tau$. По палетке были рассчитаны зависимости $l(h)$ для участков работ, где исследования проводились аналогичной аппаратурой, но величины $v \cdot \tau$ заметно отличались и отсутствовало достаточно данных для построения экспериментальных зависимостей. Это позволило повысить точность и экспрессность количественной интерпретации результатов НАК на стадии поисков и предварительной разведки.

Кривые зависимости ширины аномалии от скорости каротажа и величины $v \cdot \tau$ получены для пластов разной мощности по измерениям в скважинах (рис. 2). С увеличением мощности пласта влияние скорости на изменение ширины аномалии уменьшается, и для пластов мощностью более 1 м изменение $v \cdot \tau$ практически не сказывается на ее величине. Для пластов мощностью более 0,4 м фактические колебания скорости при каротаже приводят к изменению ширины аномалии на величину, соизмеримую с точностью измерений. Для маломощных пластов ширина аномалии увеличивается в большей степени, чем теоретическое влияние инерционности. Можно предположить, что с увеличением скорости каротажа плотность активируемых атомов уменьшается и возрастает влияние ненасыщенности пласта на вид аномалии.

Влияние ненасыщенности пласта увеличивается также с уве-

личением диаметра скважины. На рис. 2, в, приведены данные о влиянии диаметра скважины на ширину аномалии, полученные по измерениям в опорных скважинах на Оцолуйском флюоритовом месторождении, последовательно разбурившимися, диаметрами 59,76 и 132 м. При изменении диаметра от 59 до 100 м ширина аномалии для пласта мощностью 0,4 м увеличивается в пределах ошибки измерений.

Влияние на аномалию различия в плотностях руды и вмещающих пород связано с измерением части гамма-квантов активируемого изотопа за пределами рудного тела [1]. Вклад этих гамма-квантов в аномалию от пласта возрастает с уменьшением уровня дискриминации, мощности пласта и увеличением длины детекторов. Для спектрометрического НАК на фтор в влияние колебаний различия в плотностях до $\pm 0,3 \text{ г/см}^3$ приводит к изменению ширины аномалии $\pm 0,04\text{--}0,05 \text{ м}$ для рудных тел мощностью 0,4—0,5 м. Для интегральной методики с газоразрядными счетчиками это влияние более существенно и должно учитываться.

На рис. 2, б, в относительном виде показаны зависимости ширины аномалии для интегральной методики с двумя счетчиками типа МС-16 (общая длина около 50 см) от содержания фтористого кальция, с которым достаточно тесно (коэффициент корреляции +0,92) связана плотность руд. Для пластов мощностью менее 0,6 м влияние плотности на ширину аномалии заметно. По этой же причине площадь аномалии для маломощных рудных тел будет зависеть от плотности, но в меньшей мере, чем ширина аномалии. Поэтому, как показали работы по выбору способа интерпретации для пластов мощностью менее 1 м [2], лучшие результаты получены при расчете содержаний по максимальной интенсивности аномалии.

Величина максимальной интенсивности аномалии для пласта мощностью h с учетом влияния на нее ненасыщенности пласта и инерционности аппаратуры с достаточной точностью может быть представлена кривой насыщения

$$I_h = I_\infty (1 - e^{-ah}), \quad (4)$$

где I_∞ — интенсивность аномалии для бесконечного пласта, a — параметр кривой насыщения.

Аналогичное выражение имеется для оценки влияния инерционности регистрирующей аппаратуры на величину аномалии [4]:

$$I_h = I_\infty \left(1 - e^{-h/v \cdot \tau} \right). \quad (5)$$

Наиболее полно и точно влияние мощности пласта на величину максимальной интенсивности аномалии может быть установлено по экспериментальным данным. Для этого (4) перепишем в виде

$$I_h/I_\infty = (1 - e^{-ah}). \quad (6)$$

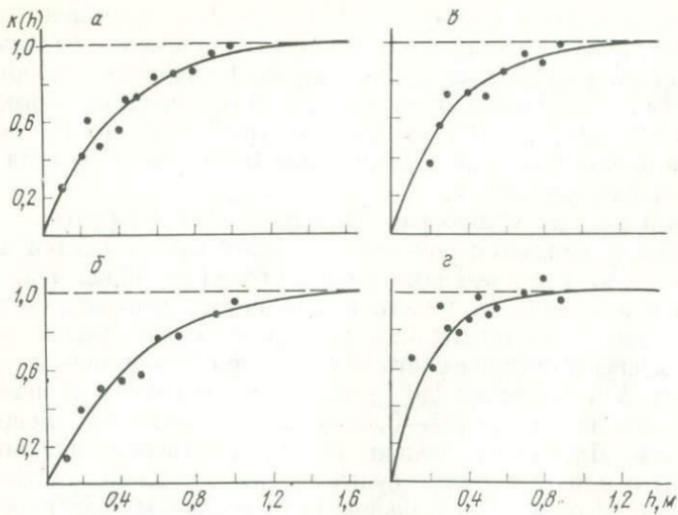


Рис. 3. Зависимость интенсивности аномалии от мощности пласта в относительном виде.

a — два счетчика МС=16, $v=250 \text{ м/ч}$, $\tau=3,8 \text{ с}$; *б* — то же, $\tau=6,8 \text{ с}$, уровень дискриминации $2,5 \text{ МэВ}$; *в* — два кристалла NaI (размер $30 \times 70 \text{ мм}$), $v=360 \text{ м/ч}$, $\tau=2,0 \text{ с}$, уровень дискриминации $2,5 \text{ МэВ}$; *г* — кристалл NaI (размер $30 \times 70 \text{ мм}$), $v=360 \text{ м/ч}$, $\tau=2,0 \text{ с}$, уровень дискриминации $3,0 \text{ МэВ}$.

Значения I_h и I_∞ определяются из выражений

$$I_\infty = k_\infty \cdot A \cdot q, \quad (7)$$

$$I_h = k_h \cdot A \cdot q = k(h) \cdot k_\infty \cdot A \cdot q, \quad (8)$$

где k_∞ , k_h — пересчетный коэффициент для пласта бесконечной мощности и мощности h , соответственно; $k(h)$ — коэффициент, учитывающий влияние мощности пласта на величину аномалии; A — мощность источника нейтронов; q — содержание компонента в пласте.

Подставляя (7) и (8) в (6), получим

$$k(h) = \frac{k_h}{k_\infty} = (1 - e^{-ah}). \quad (9)$$

Значения k_∞ и k_h определяли из (7) и (8) по сопоставлениям с керновым опробованием. Среднее значение k_∞ рассчитывали по интервалам мощностью не менее 1 м , что практически исключало влияние инерционности и ненасыщенности. Точность определения среднего не хуже 4 отн. \% . Затем для пластов мощностью менее 1 м определяли частные значения $k(h)_i$ и параметр a .

Кривые зависимости $k(h)$ для интегральной и спектрометрической методик НАК приведены на рис. 3. Для интегральных измерений влияние изменения τ на величину a оказывается слабее, чем следовало ожидать из выражения (5): при $\tau=3,8 \text{ с}$

$a=2,67 \text{ м}^{-1}$, при $\tau=6,8\text{с}$ $a=2,32 \text{ м}^{-1}$, что можно объяснить преобладанием влияния значительной длины детекторов. Для спектрометрических измерений различие в виде кривых объясняется изменением длины детекторов и некоторым увеличением мощности насыщенного пласта при уменьшении уровня дискриминации. Наибольшей мощности насыщенного пласта следует ожидать для интегральной методики измерений, вследствие значительной длины детекторов и регистрации гамма-квантов низких энергий.

Поскольку поправка на мощность пласта может быть рассчитана по экспериментальной кривой при известной величине h , а при использовании зависимости $I(h)$ основная методическая погрешность вычисления h связана с учетом влияния плотности руды, то при отсутствии данных ГГК-П параметры рудного тела следует определять методом приближений по следующей методике.

По значению I , измеренному на диаграмме НАК, вычисляется в первом приближении мощность рудного тела h' . По величине h' находится поправка $k(h')$ и рассчитывается содержание компонента в рудном теле

$$q' = \frac{I_h}{k(h') \cdot k_\infty \cdot A}.$$

По корреляционной кривой определяется плотность руды при данном содержании q' и уточняется мощность рудного тела. Для значения h находится поправка $k(h)$ и более точно рассчитывается содержание компонента q . При спектрометрическом НАК для пластов мощностью более 0,4 м уже в первом приближении достигается достаточная точность определения параметров рудных тел.

Полученные результаты позволяют оценить влияние различных факторов на результаты НАК и целенаправленно вести дальнейшее совершенствование методики количественной интерпретации результатов НАК для маломощных пластов. Наиболее перспективно получение обобщенных зависимостей, основанных на экспериментальном материале, которые могли бы преобразованы к конкретным условиям измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошелев И. П., Краснопоров В. А., Шишакин О. В. и др. Нейтронный активационный каротаж на фтор (НАК- ^{16}N).—В кн.: Ядерно-геофизические методы опробования скважин на месторождениях фосфоритов, апатитов и палевого шпата. Алма-Ата, ҚазВИРГ, 1975.
2. Кучурин Е. С., Черменинов В. Б. Использование нейтронного активационного каротажа (НАК) для повышения геологической эффективности поисково-разведочных работ на маломощных кварцево-флюоритовых жилах.—В кн.: Новые методы прогнозов и поисков полезных ископаемых в условиях Восточной Сибири. Иркутск, 1977.
3. Нейтронный активационный каротаж на фтор с использованием гамма-спектрометрической аппаратуры. Метод. рук-во. Алма-Ата, ҚазВИРГ, 1974.
4. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. М., Госгеолтехиздат, 1957.

В. Б. ЧЕРМЕНИНОВ, А. И. МАШКИН

**РАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА АКТИВАЦИОННОГО КАРОТАЖА
НА ФЛЮОРИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Нейтронный активационный каротаж (НАК) на фтор нашел широкое применение при поисках и разведке месторождений флюорита. Он позволяет быстро и с достаточной точностью оценивать параметры рудных тел в условиях скважин. При низком выходе керна результаты НАК более достоверны данных кернового опробования и могут быть использованы при подсчете запасов флюоритовых руд [2]. Детально изучены основные вопросы методики спектрометрического НАК на фтор по изотопу ^{16}N , влияние на результаты исследований условий измерений и физических свойств руды [5]. Однако, в связи с нестандартностью аппаратуры и многообразием состава и условий залегания флюоритовых руд, отсутствует единая методика активационного каротажа, что обуславливает необходимость проведения на каждом месторождении определенного объема заверочных работ [2]. Основное направление в совершенствовании методики НАК — повышение точности его результатов: статистической точности измерений, точности определения пересчетного коэффициента, полноты и точности учета изменений условий измерений применительно к конкретным месторождениям.

Ниже рассмотрены некоторые вопросы совершенствования методики НАК на месторождениях флюорита Забайкалья. До 1974 г. активационный каротаж на фтор проводили в интегральном варианте [1]; в 1974 г. в производство был внедрен спектрометрический вариант НАК по изотопу ^{16}N [4], позволивший повысить производительность каротажа и однозначность выделения флюоритовой минерализации, понизить порог чувствительности метода. В качестве примера рассмотрим результаты НАК по Худжиртуйскому флюоритовому месторождению.

Месторождение, эпимеральное кварц-флюоритовое, расположено в пределах Бугутуро-Абагайтуйской группы флюоритовых месторождений. В геологическом строении месторождения принимают участие граниты, эффузивные образования и породы дайкового комплекса. Рудные тела представляют собой минерализованные флюоритом зоны брекчий.

Результаты сопоставления данных каротажа и кернового опробования

Интервал сопоставлений, м	Число сопоставлений	Средние значения		Относительное случайное расхождение, %
		по керну	по НАК	
Мощность рудного тела, м				
Менее 2	17	1,09	1,08	5,5
Более 2	20	5,74	5,66	3,7
Содержание фтористого кальция, %				
Менее 20	23	10,82	11,15	13,8
Более 20	21	41,78	41,94	8,5

Активационный каротаж проводили с помощью модернизированной аппаратуры РСК-М с пороговой дискриминацией. Стабильность работы аппаратуры контролировали по измерениям на эталонной скважине не реже двух раз в месяц, при этом расхождения от средней величины не превышали 10 отн.%. При длине зонда 1,4 м скорость каротажа составляла 450—480 м/ч, что соответствует первой оптимальной скорости для изотопа ^{16}N [3]. Уровень дискриминации 2,7—2,8 МэВ, фоновое излучение в скважинах, заполненных водой, составляло 25—30 имп/мин. Воспроизводимость диаграмм для интервалов промышленного оруднения не хуже 5 отн.%. Порог чувствительности метода в скважинах диаметром 59 мм составляет 1,77% CaF_2 для интервала 1 м и выхода источника нейтронов 10^7 нейтр/с. В таблице приведены результаты сопоставлений данных НАК, при интерпретации которых вводили поправки на диаметр скважины и изменение выхода Ро—Ве источника нейтронов, с кондиционным керновым опробованием. Наблюдается хорошая сходимость данных НАК и опробования керна.

Сопоставлены данные кернового опробования и НАК по одной из скважин месторождения (рис. 1). Активационный каротаж дает более полное представление о строении рудной зоны, исключает разубоживание руды в результате избирательного истирания флюорита и ошибок в распределении керна по интервалу бурения. На основе данных НАК установлена равная достоверность геологического опробования и каротажа при выходе керна 50—100%.

С целью дальнейшего повышения точности измерений были проведены экспериментальные работы и теоретические расчеты по уточнению основных элементов методики НАК: длины зонда, скорости каротажа, уровня дискриминации.

Длина зонда при непрерывном активационном каротаже определяет величину наведенного эффекта и скорость каротажа. С учетом небольшой мощности кварц-флюоритовых рудных тел и необходимости снижения влияния инерционности аппара-

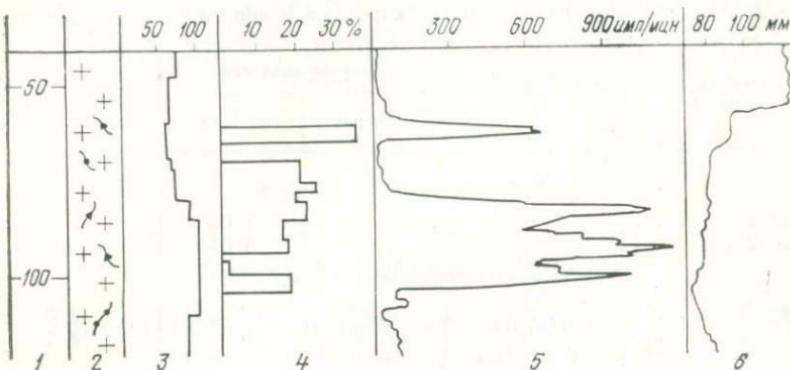


Рис. 1. Результаты НАК и опробование керна по скв. 146 Худжиртуйского флюоритового месторождения.

1 — глубина, м; 2 — геологическая колонка (окварцованные и оплавленные граниты); 3 — выход керна, %; 4 — гистограмма опробования; 5 — диаграмма НАК; 6 — диаграмма кавернometрии.

туры, длину зонда целесообразно принимать равной 1,4—1,5 м при изучении высоких содержаний фтора. Для низких содержаний — минимум ошибки измерений наблюдается при длине зонда 1,5—1,8 м [5], поэтому длина зонда была сохранена равной 1,4 м.

Известно теоретически установленное существование двух оптимальных скоростей активационного каротажа [3], связанных с длиной зонда d и постоянной распада активируемого изотопа λ соотношениями $v_1 = d\lambda$ и $v_2 = \frac{1}{2}d\lambda$. Получена кривая экспериментальной зависимости интенсивности аномалии (пересчетного коэффициента) от скорости при длине зонда 1,4 м (рис. 2, а). Ее вид подтверждает значение первой оптимальной скорости для изотопа ^{16}N 480 м/ч. По этой кривой была рас-

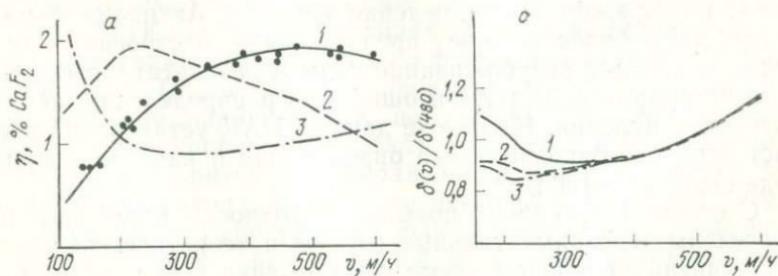


Рис. 2. Зависимости от скорости каротажа (длина зонда 1,4 м) интенсивности аномалии (1), числа импульсов (2), порога чувствительности (3) НАК при уровне дискриминации 3,0 МэВ (кристалл NaI размером 30×70 мм) — а и относительной ошибки измерений НАК- ^{16}N для пластов с различными параметрами h , q — б.

$h: 1, 2 - 0,5; 3 - 5 \text{ м. } q: 1 - 5; 2, 3 - 45\%$.

считана зависимость числа импульсов от скорости каротажа, положение максимума которой совпадает с расчетным значением $v_2 = 240 \text{ м/ч}$. Экспериментальное подтверждение теоретических значений v_1 и v_2 позволяет использовать полученные кривые для установления рациональной скорости НАК при данной длине зонда.

Статистическая ошибка измерения аномалии [6]:

$$\delta = \frac{\sqrt{N_a + 2N_\phi}}{N_a}, \quad (1)$$

где δ — статистическая ошибка измерения; N_a — число импульсов аномалии; N_ϕ — число импульсов фона.

Выражение (1) применительно к НАК принимает вид

$$\delta(v) = \frac{\sqrt{k(v) \cdot q \cdot h \cdot A + 2I_\phi \cdot L_a}}{k(v) \cdot q \cdot h \cdot A} \cdot \sqrt{v}, \quad (2)$$

где v — скорость каротажа, $k(v)$ — пересчетный коэффициент при скорости v ; q — содержание компонента в рудном теле; h — мощность рудного тела; L_a — интервал, в котором регистрируются гамма-кванты аномалии, несколько больший h ; I_ϕ — интенсивность фона; A — относительный выход источника нейтронов.

При известной зависимости $k(v)$ по формуле (2) может быть рассчитана зависимость ошибки измерений от скорости каротажа для конкретных условий измерений и параметров рудных тел. На рис. 2, б приведены в относительном виде графики $\delta(v)$ для разных параметров рудных тел, рассчитанные для спектрометрического НАК на фтор. С уменьшением содержания фтора минимум ошибки смещается в сторону первой оптимальной скорости, тогда как для промышленных руд он наблюдается при 240—300 м/ч, т. е. на скоростях, незначительно превышающих вторую оптимальную скорость. Из (2) следует, что с увеличением I_ϕ минимум зависимости смещается в сторону больших скоростей.

На флюоритовых месторождениях целесообразно проводить активационный каротаж на стадии поисков со скоростью, близкой к v_1 , а при количественной оценке промышленных руд — со скоростью, незначительно превышающей v_2 .

Проведение каротажа при поисках флюоритовой минерализации со скоростью, близкой к v_1 , позволит повысить и чувствительность метода. В отличие от других методов радиоактивного каротажа (ГК, РРК и др.), зависимость порога чувствительности от скорости для НАК имеет экстремальный характер. Порог чувствительности метода может быть найден из выражения [6]

$$\eta = \frac{3}{I_a} \sqrt{\frac{I_\phi}{t}}, \quad (3)$$

где η — порог чувствительности метода, %; I_a — интенсивность аномалии, приходящаяся на 1% содержания компонента; I_Φ — интенсивность фона; t — время измерений.

Для НАК выражение (3) принимает вид

$$\eta = \frac{3}{k(v) \cdot A} \sqrt{\frac{I_\Phi \cdot v}{h}}. \quad (4)$$

Зависимость порога чувствительности применяемой методики НАК от v для $I_\Phi = 30$ имп/мин, $h = 1$ м и $A = 10^7$ нейтр/с приведена на рис. 2, а. Максимальная чувствительность НАК достигается на скоростях, близких к v_i , причем из выражения (4) видно, что, в отличие от минимума статистической ошибки, положение минимума $\eta(v)$ не зависит от величины интенсивностей фона и наведенного эффекта.

Однозначность выделения и высокая чувствительность метода при изучении низких концентраций фтора и повышенной радиоактивности руд обеспечивается при пороге дискриминации более 2,7 МэВ, поскольку в этом случае измеряется наведенная активность только ^{16}N . Однако при этом происходит увеличение статистической погрешности измерений, что особенно ощутимо при количественной оценке промышленных рудных тел в скважинах малого диаметра. Потеря части рассеянных гамма-квантов ^{16}N и излучения ^{20}F , образующегося при активации ядер фтора на тепловых нейтронах ($T = 10,7$ с, $E = 1,63$ МэВ), приводит к тому, что даже для интегральной методики на газоразрядных счетчиках (рис. 3) ошибка измерений для промышленных руд не превышает ее значения для спектрометрии.

Так, для пласта мощностью 1 м с содержанием 30% CaF_2 при $A = 10^7$ нейтр/с ошибки измерений составляют соответственно 12,0 и 12,1 отн.% (диаметр скважины 76 мм), 9,4 и 10,7 отн.% (диаметр скважины 59 мм). Для промышленных рудных тел в скважинах диаметром 59 мм относительные ошибки измерений сцинтилляционным детектором для интеграла примерно в 2 раза меньше, чем для спектрометрии при размере кристалла 30×70 мм.

Таким образом, существует реальная возможность повышения статистической точности измерений с переходом на интегральную методику при количественной оценке промышленных руд в скважинах диаметром 76 мм и менее. Такой переход возможен и целесообразен для месторождений с низкой естественной радиоактивностью пород и руд.

На основании полученных результатов уточнены режимы измерений для спектрометрического НАК на фтор. При длине зонда 1,4 м основное измерение по скважине производится на скорости 450—480 м/ч, что обеспечивает надежное выделение

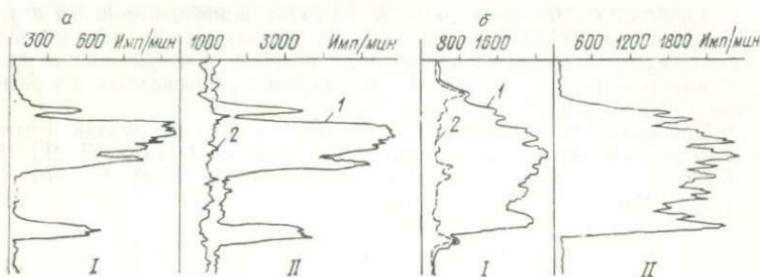


Рис. 3. Сопоставление результатов спектрометрического (уровень дискриминации (3,0 МэВ) НАК (I) и интегрального НАК (II) на газоразрядных счетчиках МС-16 (а) и на кристалле NaI размером 30×70 мм (б).

1 — диаграмма НАК; 2 — диаграмма фона, записанная на спуске.

всех интервалов флюоритовой минерализации, а детализация интервалов промышленного оруденения производится в масштабе глубин 1 : 50 на скорости 280—320 м/ч, обеспечивающей минимальную ошибку измерения аномалии. Измерения проводятся скважинными приборами с верхним положением Рo—Be источника мощностью $(10 \div 20) \cdot 10^6$ нейтр/с. Электронные схемы приборов позволяют использовать их для работы с низкоэнергетическими спектрометрами типа РРША-1 и «Минерал-5», чем достигается универсальность аппаратуры, высокая степень ее использования, повышение точности результатов НАК.

В связи с низкой естественной радиоактивностью кварц-флюоритовых руд $(15 \div 35) \cdot 10^{-2}$ расн/(с·ч) перспективен переход при количественной оценке промышленных руд в скважинах малого диаметра к интегральной методике. В то же время при поисках флюоритовой минерализации необходимо применять спектрометрический НАК, порог чувствительности которого значительно ниже. При изучении ореолов фтора на месторождениях флюорита наиболее перспективен дискретный активационный каротаж.

Таким образом, наилучшие результаты дает методика НАК, наиболее полно соответствующая решаемой геологической задаче с учетом специфических особенностей метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардовский В. Я. Количественное определение плавикового шпата методом наведенной активности.— Разведочная геофизика, № 1. М., Гостоптехиздат, 1964.
2. Борзунов В. М., Дудникова Л. Т. Использование данных геофизических методов при подсчете запасов флюорита.— Разведка и охрана недр, 1973, № 11.
3. Булашевич Ю. П., Бреднев И. И. Об оптимальных скоростях активационного каротажа.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1972, № 5.

4. Кучурин Е. С., Черменинов В. Б. Использование нейтронного активационного каротажа (НАК) для повышения геологической эффективности поисково-разведочных работ на маломощных кварцево-флюоритовых жилах.— В кн.: Новые методы прогнозов и поисков полезных ископаемых в условиях Восточной Сибири. Иркутск, 1977.

5. Нейтронный активационный каротаж на фтор с использованием гамма-спектрометрической аппаратуры. Метод. рук-во. Алма-Ата, ҚазВИРГ, 1971.

6. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. М., Госгеолтехиздат, 1957.

СОДЕРЖАНИЕ

Ю. П. Булашевич, В. В. Бахтерев. Исследование распределения калия и натрия в метасоматитах Урала	3
В. А. Щапов, В. И. Уткин. О возможности выделения асбестовых жил методами каротажа	11
В. В. Шестаков, О. М. Номерований, В. Н. Старикив, Н. Н. Хамидуллин. Структура рентгеновского спектра при возбуждении характеристического излучения в плоских пробах	17
В. В. Шестаков, О. М. Номерований. Предельный порог чувствительности рентгено-радиометрического флуоресцентного метода анализа с источником Co-57	24
В. В. Шестаков, А. С. Митрофанов. Фотонейтронный экспресс-анализ бериллиевых руд в транспортных емкостях	29
Г. С. Данилов. О выборе оптимального режима измерений в спектрометрическом нейтронном гамма-каротаже для выделения локальных скоплений рудного компонента (на примере ртутных месторождений Донбасса)	33
В. И. Уткин. Химический состав и эффективный атомный номер ископаемых углей	42
Ю. Б. Бурдин, В. А. Больщиков, В. И. Уткин, Г. Д. Зубарев, Т. И. Скворцова. Аппаратура для автоматической интерпретации данных ГГК-С	46
В. А. Больщиков. Аналоговое устройство автоматической обработки данных селективного гамма-гамма-каротажа	55
М. И. Светлов, В. В. Бахтерев, В. М. Степанов, Л. А. Зырянов. Опыт применения гамма-гамма-каротажа подземных скважин при эксплуатации месторождений меди	60
В. М. Ершов, Э. С. Лобов, Г. А. Тарханова. Влияние современных процессов на значения абсолютного возраста урановой минерализации	64
Р. Л. Харус. Гипотеза нейтронного облучения протовещества Земли и изотопные отношения некоторых легких элементов	73
В. Б. Черменинов. Интерпретация результатов нейтронного активационного каротажа для маломощных рудных тел	76
В. Б. Черменинов, А. И. Машкин. Рациональная методика активационного каротажа на флюоритовых месторождениях	82

УДК 550.832,5+553.2.22

Исследование распределения калия и натрия в метасоматитах Урала. Булашевич Ю. П., Бахтерев В. В.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Концентрации калия и натрия определены в естественном залегании пород и руд методом каротажа на ряде колчеданных месторождений Урала. При использовании спектрометрической аппаратуры калий определялся по гамма-излучению естественного радиоактивного изотопа. Для нахождения натрия применен метод нейтронной активации.

В метасоматитах повышенными значениями калий-натриевого отношения выделяются сравнительно узкие зоны. По-видимому, по этим зонам наиболее интенсивно происходит процесс калий-натриевого метасоматоза.

Таблиц 1. Илл. 4. Библиогр. 22 назв.

УДК 550.832

О возможности выделения асбестовых жил методами каротажа. Щапов В. А., Уткин В. И.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Проанализирован химический состав и $Z_{\text{эфф}}$ наиболее распространенных пород Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Приведены спектры рассеянного гамма-излучения различных пород при разных углах источника и детектора. Показано, что увеличение асбестосодержания вызывает уменьшение интенсивности рассеянного гамма-излучения для всех регистрируемых энергий гамма-квантов. Показана возможность выделения прожилок хризотил-асбеста методами селективного гамма-гамма-микрокаротажа и каротажа магнитной восприимчивости.

Таблиц 3. Илл. 2. Библиогр. 3 назв.

УДК 543.08

Структура рентгеновского спектра при возбуждении характеристического излучения в плоских пробах. Шестаков В. В., Номерованный О. М., Стариков В. Н., Хамидуллин Н. Н.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

На основе математического моделирования процессов комптоновского рассеяния и фотоэлектрического поглощения возбуждающего рентгеновского излучения веществом пробы показано, что спектры многократного рассеяния проб имеют особенности, обусловленные формой объекта исследования, углом падения первичного и углом приема вторичного пучка излучения; анализ спектров рассеянного излучения.

Даются частные рекомендации по применению рентгено-радиометрического анализа в тонких пробах.

Илл. 3. Библиогр. 9 назв.

УДК 543.08

Предельный порог чувствительности рентгено-радиометрического флюoresцентного метода анализа с источником Co-57. Шестаков В. В., Номерованный О. М.—В кн.: Ядер-

но-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований в области минимизации порога чувствительности метода свидетельствует о наличии больших расходов в оценке порога. В работе на основании расчетов дается оценка теоретического минимума порога чувствительности и анализ возможных причин несоответствия результатов теоретического моделирования и экспериментальных данных.

Илл. 4. Библиогр. 1 назв.

УДК 550.835

Фотонейтронный экспресс-анализ бериллиевых руд в транспортных емкостях. Шестаков В. В., Митрофанов А. С.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Приводится материал из опыта эксплуатации двух различных месторождений с применением экспресс-анализа руд в вагонетках и автотранспортных емкостях. Показано, что применение экспресс-анализа в транспортных емкостях с целью селекции в целом некондиционных руд позволяет обеспечить выделение из них промышленной фракции с сохранением в них большей части исходного металла, что обеспечивает рентабельную эксплуатацию непромышленных рудных тел, флангов месторождений.

Таблиц 1. Библиогр. 5 назв.

УДК 550.835

О выборе оптимального режима измерений в спектрометрическом нейтронном гамма-каротаже для выделения локальных скоплений рудного компонента (на примере ртутных месторождений Донбасса). Данилов Г. С.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Приведен способ оценки минимального поискового объема для ядерно-геофизических исследований при использовании коэффициента вариации распределения оруденения. Моделированием оценены: форма и линейный размер аномалии НГК-С от узких рудных прослоев; размер зоны исследования НГК-С. Получены график инерционных искажений для аномалии, аппроксимируемой отрезком синусоиды на отрезке $[\lambda, 3\lambda]$. Показано изменение аномалии НГК-С при перераспределении рудного компонента в пределах зоны исследования от равномерного до скопления в узкой «трещине». Получено выражение для оценки статической погрешности измерителя отношений в неустановившемся режиме. Предложен способ выбора оптимального режима измерений НГК-С на конкретном примере.

Таблиц 1. Илл. 6 Библиогр. 4 назв.

УДК 550.832.5

Химический состав и эффективный атомный номер ископаемых углей. В. И. Уткин.—В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Оценено влияние непостоянства химического состава золы ископаемых углей на точность определения зольности методом ГГК-С. Проанализирован химический состав углей основных месторождений СССР. Показано, что по величине эффективного атомного номера золы все угли могут быть разделены на две большие группы, предельная точность определения зольности в которых равна 1—2 % абсолютного содержания золы. Аналитически показано, что относительное изменение зольности более чем в три раза превышает относительное изменение эффективного атомного номера золы.

Таблица 1. Илл. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 550.832

Аппаратура для автоматической интерпретации данных селективного гамма-гамма-каротажа. Бурдин Ю. Б., Больщиков В. А., Уткин В. И., Зубарев Г. Д., Скворцова Т. А.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Изложены основные принципы построения аппаратуры для оперативной обработки данных гамма-гамма-каротажа углеразведочных скважин, описаны ее возможности и приведены некоторые результаты полевых испытаний.

Илл. 3. Библиогр. 2 назв.

УДК 550.832

Аналоговое устройство автоматической обработки данных селективного гамма-гамма-каротажа. Больщиков В. А.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Изложен один из способов автоматизации обработки данных селективного гамма-гамма-каротажа и описано устройство для его реализации.

Илл. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 550.835

Опыт применения гамма-гамма-каротажа подземных скважин при эксплуатации месторождений меди. Светлов М. И., Бахтерев В. В., Степанов В. М., Зырянов Л. А.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Описаны результаты использования гамма-гамма-каротажа подземных взрывных скважин при эксплуатации месторождений меди. Исходя из конкретных геологических условий, по данным гамма-гамма-каротажа (плотностной или селективный вариант) удалось выделить границы рудных интервалов с качественной оценкой руд. Это повысило эффективность эксплуатационных работ за счет снижения потерь и разубоживания руды.

Илл. 1.

УДК 550.35

Влияние современных процессов на значения абсолютного возраста урановой минерализации. Ершов В. М., Лобов Э. С., Тарханова Г. А.— В кн.: Ядерно-геофизические

методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

На примере урановой минерализации в кислых эфузивах показано, что уран-свинцовые отношения в эндогенных настуранах искажены современными гипергенными процессами, с которыми связано образование гипергенного настурана, других минералов и галенита с радиогенным свинцом. Показано, что возраст эндогенной минерализации по свинцовой изохроне 360 млн. лет, а свинца во всех минералах 350 млн. лет, и нет оснований для выделения других гипогенных стадий отложения рудных минералов.

Таблиц 4. Илл. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 550.35(550.42)

Гипотеза нейтронного облучения протовещества Земли и изотопные отношения некоторых легких элементов. Харус Р. Л.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Рассматривается изменение изотопных отношений наиболее распространенных во Вселенной элементов (H, He, C, N, Cl) под воздействием нейтронного потока. Расчеты показали, что в протовеществе Земли легкие изотопы рассматриваемых элементов были более распространены, чем в настоящее время; изотопы ^2H , ^4He , ^{37}Cl могли образоваться вследствие нейтронного облучения при интегральном потоке порядка $10^{21} \text{ нейтр}/\text{см}^2$, в то время как изотопы ^{13}C и ^{15}N образовались одновременно с соответствующими легкими изотопами. Изотопные отношения первозданного углерода и азота изменились незначительно по сравнению с принятыми в настоящее время.

Таблиц 1. Библиогр. 6 назв.

УДК 550.832.5

Интерпретация результатов НАК для маломощных рудных тел. Черменинов В. Б.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Рассмотрены вопросы интерпретации результатов НАК на фтор для маломощных рудных тел. Основными факторами, искажающими параметры аномалии, являются инерционность аппарата и ненасыщенность пласта по гамма-нейтронным свойствам. Наиболее полный учет влияния условий измерений и мощности пласта возможен при использовании экспериментальных зависимостей. Применение их на флюоритовых месторождениях Забайкалья позволило значительно повысить точность результатов НАК для пластов мощностью менее 1 м.

Илл. 3. Библиогр. 4 назв.

УДК 550.832.5:553.634.12

Рациональная методика активационного каротажа на флюоритовых месторождениях. Черменинов В. Б., Машкин А. И.— В кн.: Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке твердых полезных ископаемых Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980.

Рассмотрены вопросы выбора элементов методики НАК на флюоритовых месторождениях. Целесообразно проводить активационный каротаж со скоростью, обеспечивающей минимальную ошибку измерений. Для промышленных рудных тел это достигается на скоростях, незначительно превышающих 2-ю оптимальную скорость НАК, для интервалов с низкими содержаниями НАК — на скорости, близкой к 1-й оптимальной, что обеспечивает и наибольшую чувствительность метода. При низкой естественной радиоактивности и оценке промышленных руд возможен переход к интегральному варианту на сцинтилляционных детекторах и длине зонда 1,4—1,5 м.

Илл. 3. Библиогр. 6 назв.

ВЫХОДИТ В СВЕТ

сборник научных статей
сотрудников Института геофизики
УНЦ АН СССР

Сейсмические исследования земной коры и рудоперспективных структур Урала. 10 п. л. Цена 1 р.

Рассматриваются материалы рудной сейсморазведки на Урале. В частности показано, что совместное использование продольных и поперечных отраженных волн позволяет определить коэффициент Пуассона и строить «упругие» модели рудных районов, вносящие новый вклад в изучение их строения. Рассмотрены материалы по изучению сейсморазведки разломов в верхней части земной коры. Сформулированы признаки их выделения. Строение одной из зон нарушения (разломов) изучено как на глубине, так и по простирианию.

Сборник предназначен для геологов и геофизиков, интересующихся глубинным строением, геодинамикой, особенностями структур рудных полей Урала.

Заявки направлять по адресу:

г. Свердловск, ГСП-169,
ул. Первомайская, 91.
РИСО УНЦ АН СССР.

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
УРАЛА

*Рекомендовано к изданию
Ученым советом
Института геофизики
и РИСО УНЦ АН СССР*

Редактор Л. Н. Петленко
Обложка художника М. Н. Гарипова
Техн. редактор Н. Р. Рабинович
Корректор Е. М. Бородулина

РИСО № 995—24(80). Сдано в набор 7.01.80. НС 32414
Подписано к печати 8.09.80. Формат 60×90¹/₁₆. Усл.-печ.
л. 6. Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 700. Бумага типографская № 1.
Заказ 38. Цена 65 коп.

РИСО УНЦ АН СССР, Свердловск, ГСП-169
Первомайская, 91
Типография изд-ва «Уральский рабочий»,
Свердловск, пр. Ленина, 49.

65 коп.

3410

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
СВЕРДЛОВСК, 1980