Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красно Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
./XXVI, 1978 г.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ГАММА-СПЕКТРАЛЬНОГО КАРОТАЖА

А.Я.СИНИЦЫН, Г.Ф.НОВИКОВ

Гамма-спектральный каротаж с целью раздельного определения концентраций естественных радиоактивных элементов возник и сформировался в СССР как новый радиометрический метод в середине 60-х годов [2, 3, 10]. Благодаря работам главным образом радиометрической лаборатории ЛГИ, этот метод получил широкое признание и успешно применяется при поисках и разведке месторождений радиоактивных руд. Его основные преимущества по сравнению с геологическим опробованием керна скважин состоят в оперативности, экономичности и возможности полностью исследовать скважину независимо от выхода керна.

Оформились две модификации гамма-спектрального каротажа: рудный и поисковый.

Задача рудного гамма-спектрального каротажа состоит в раздельном определении концентрации урана (по радию) q_U и тория q_{Th} в рудных интервалах скважин на объектах урано-ториевых руд. Получаемые данные о концентрации радиоактивных элементов используются при подсчете запасов, поэтому погрешность их измерения не должна превышать 10% [6].

Методическая особенность рудного каротажа связана с тем, что при достаточно высоких q_U и q_{Th} (свыше 0,01%) влиянием излучения калия можно пренебречь. Поэтому основные уравнения для расчета q_U и q_{Th} в насыщенных по гамма-излучению рудных телах, вскрытых сухими необсаженными скважинами, имеют вид

$$q_U = \frac{a_{2Th}N_1 - a_{1Th}N_2}{\Delta} \cdot 0{,}01 \; ;$$

$$q_{Th} = \frac{a_{1U}N_2 - a_{2U}N_1}{\Delta} \cdot 0{,}01 \; , \qquad (I)$$

где

$$\Delta = a_{1U}a_{2Th} - a_{2U}a_{1Th} \; ;$$

a_{ij} – пересчетные коэффициенты (i – номер энергетического интервала гамма-спектра, j – индекс радиоактивного элемента), имп./с на 0,01% U и Th ; N_i – скорость счета в оптимальных энергетических интервалах гамма-спектра, имп./с.

Для рудных тел ограниченной мощности ранее доказана справедливость следующих уравнений [II]:

$$q_U = \frac{a_{2Th} S_1 - a_{1Th} S_2}{\Delta H} \cdot 0{,}01 \ ;$$

$$q_{Th} = \frac{a_{1U} S_2 - a_{2U} S_1}{\Delta H} \cdot 0{,}01 \ , \qquad (2)$$

где S_i – площади каротажных диаграмм, (см·имп.)/с, над рудными телами мощностью H , см.

При наличии в скважине промежуточной зоны [7]

$$q_U = \frac{k_{1U} k_{2U}}{H \Delta'} \left(a_{2Th} S_1 k_{1Th} - a_{1Th} S_2 k_{2Th} \right) \cdot 0{,}01 \ ;$$

$$q_{Th} = \frac{k_{1Th} k_{2Th}}{H \Delta'} \left(a_{1U} S_2 k_{2U} - a_{2U} S_1 k_{1U} \right) \cdot 0{,}01 \ , \qquad (3)$$

где

$$\Delta' = a_{1U} a_{2Th} k_{1U} k_{2Th} - a_{2U} a_{1Th} k_{2U} k_{1Th} \ ;$$

k_{ij} – поправки на влияние промежуточной зоны скважины.

Для выполнения рудного гамма-спектрального каротажа нами разработана и внедрена в производство аппаратура ГСК-3М [I4] , представляющая собой гамма-спектрометр с двумя независимыми дифференциальными и интегральным каналами регистрации интенсивности гамма-излучения. В комплект прибора входит наземный пульт управления и два детектора диаметром 36 и 45 мм, подключаемые к наземной части кабелем КРК-2 длиной I200 м. Скорость счета N_i регистрируется в цифровой форме электромеханическими счетчиками или в аналоговой форме путем непрерывной записи показаний на диаграммную ленту механически соединенных самописцев. Масштаб энергетической шкалы стабилизирован по гамма-реперу ^{137}Cs .

Тщательное исследование спектров гамма-излучения радиоактивных руд позволило выбрать следующие оптимальные энергетические интервалы: I,05–I,35 МэВ (или I,00–I,60 МэВ) и 2,05–2,65 МэВ [9]. В связи с постоянным присутствием гамма-репера ^{137}Cs в скважинном приборе энергетический порог интегрального канала установлен на уровне 0,9 МэВ, однако, как показал опыт работы, это практически не искажает форму каротажных диаграмм, записанных обычной интегральной аппаратурой.

Для упрощения обработки результатов каротажа сконструирован счетно-решающий блок [15], осуществляющий непрерывное автоматическое решение уравнений (1) и обеспечивающий запись на диаграммной ленте эквивалентных по гамма-излучению концентраций $q_{U\,экв}$ и $q_{Th\,экв}$.

Вопросы методики работ и интерпретации результатов рудного каротажа разработаны нами с исчерпывающей полнотой. Определена оптимальная скорость каротажа рудных интервалов скважин, составляющая в наиболее трудных условиях 20 м/ч и повышающаяся до 70-80 м/ч в благоприятных условиях [8]. Разработаны приемы градуировки и контроля аппаратуры [12] с использованием насыщенных по гамма-излучению и малых рудных моделей, а также ампульных источников гамма-излучения. Определены значения поправок на влияние промежуточной зоны скважины [7].

Интерпретация результатов гамма-спектрального каротажа, полученных над рудными интервалами ограниченной мощности, осуществляется главным образом графически с использованием уравнений (2). Если каротаж выполнен со счетно-решающим блоком, то q_U и q_{Th} определяются по диаграммам $q_{U\,экв}$ и $q_{Th\,экв}$ приемами, заимствованными из интегрального каротажа [13]. Нами разработана, опробована и доведена до внедрения программа дифференциальной интерпретации диаграмм N_i с привлечением ЭВМ.

Весь комплекс работ по рудному гамма-спектральному каротажу испытан и успешно применен на объектах урано-ториевых руд.

Поисковый гамма-спектральный каротаж имеет целью исследовать распределение естественных радиоактивных элементов по оси скважины при их кларковых и надкларковых концентрациях и применяется в процессе поисков месторождений и оценки гамма-аномалий. Влиянием излучения калия при низких значениях q_U и q_{Th} пренебрегать нельзя, поэтому основные уравнения приобретают вид

$$q_U = A_{1U}N_1 + A_{2U}N_2 + A_{3U}N_3 ;$$

$$q_{Th} = A_{1Th}N_1 + A_{2Th}N_2 + A_{3Th}N_3 ; \qquad (4)$$

$$q_K = A_{1K}N_1 + A_{2K}N_2 + A_{3K}N_3 ,$$

где A_{ij} – элементы обратной матрицы пересчетных коэффициентов; q_K – концентрация калия, %.

Специализированная аппаратура для поискового гамма-спектрального каротажа в настоящее время серийно не выпускается. Каротаж выполняют автомобильными гамма-спектрометрами АГС-3М, оборудованными скважинным прибором [16]. К сожалению, такая аппаратура имеется в крайне ограниченном количестве, кроме того, точность получаемых с ее помощью результатов недостаточно высока.

Нами разработан специализированный каротажный гамма-спектрометр для раздельного определения концентраций U, Th и K в скважинах глубиной до 600 м. Спектрометр содержит скважинный прибор диаметром 45 мм и назем-

ный пульт управления, включающий интегральный и три независимых дифференциальных канала с выходом на счетно-решающее устройство. Масштаб энергетической шкалы стабилизирован по гамма-реперу ^{137}Cs. Энергетические интервалы гамма-спектра: I,37–I,59 МэВ; I,57–I,8I МэВ и 2,05–2,65 МэВ. Порог интегрального канала I,I МэВ. Аппаратура смонтирована на автомашине УАЗ–452А, удобна в эксплуатации и обеспечивает высокую точность измерений.

Вопросы методики поискового гамма-спектрального каротажа разработаны менее полно, чем рудного. Нет единого мнения о необходимой точности получаемых результатов. Противоречивыми являются требования к скорости каротажа, выдвигаемые различными исследователями. Окончательно не определены поправки на влияние промежуточной зоны скважины для условий поискового каротажа. Затрудняет массовое проведение работ также отсутствие методической инструкции по поисковому каротажу, недостаточное количество эталонных рудных моделей и отсутствие серийных ампульных источников MsTh, позволяющих резко упростить контроль пересчетных коэффициентов [I2].

Применяемая методика интерпретации результатов поискового каротажа состоит в определении концентрации радиоактивных элементов q_j по графикам $q_{j\,экв}$, записанным счетно-решающим устройством. При этом полагают $q_j = q_{j\,экв}$ для интересующего интервала скважины. Необходимо отметить, что такое допущение может привести к серьезным ошибкам для тел ограниченной мощности (менее I м). Более точные результаты обеспечивает расчет q_j на основе площадей диаграмм $q_{j\,экв}$ с использованием приемов интегрального каротажа [II, I3].

Отсутствие высококачественной серийной аппаратуры не позволяет полностью реализовать возможности поискового гамма-спектрального каротажа. Вместе с тем при современном уровне развития методики поисков радиоактивного сырья, характеризующемся повышением глубинности исследования, гамма-спектральный каротаж должен занять ведущее положение на всех этапах поисковых работ, в первую очередь на закрытых и полузакрытых территориях. По результатам наших исследований в одном из районов с эндогенной и экзогенной урано-ториевой минерализацией, а также по материалам других авторов [4, 5] можно наметить обширный круг задач гамма-спектрального каротажа и объемы его выполнения в зависимости от особенностей объекта поисков и характера территории. Для удобства рассмотрения материалы сведены в таблицу.

Современный гамма-спектральный каротаж в поисковой модификации нацелен главным образом только на решение задач, касающихся определения природы радиоактивности аномалий. Однако, как видно из таблицы, его следует применять также на других этапах поисковых работ, что может быть достигнуто при наличии достаточного числа скважинных гамма-спектрометров.

Таким образом, дальнейшее развитие как рудного, так и поискового гамма-спектрального каротажа должно включать следующие направления.

I. Широкий серийный выпуск универсальных скважинных гамма-спектрометров, обеспечивающих рудную и поисковую модификацию каротажа, с системой выдачи информации, удобной для ввода в ЭВМ.

2. Массовое применение гамма-спектрального каротажа на всех этапах поисков и разведки месторождений радиоактивного сырья.

Рекомендации по применению гамма-спектрального каротажа при поисках урановых месторождений

Объект поисков	Характер территории	Задачи гамма-спектрального каротажа	Объем гамма-спектрального каротажа
1	2	3	4
		Прогнозно-геологические работы масштаба 1:200000	
Месторождения в породах фундамента	Закрытые и полузакрытые	1. Сбор сведений о распределении U, Th, K в разрезе рыхлых образований и в породах фундамента. 2. Предварительное изучение степени дифференцированности распределения U, Th и K в магматических породах, как возможных источниках оруденения, и рудовмещающих формациях	Выполняют во всех картировочных скважинах, а также других скважинах, вскрывающих породы фундамента
Месторождения в чехле рыхлых образований	Закрытые	Выявление природы радиоактивной минерализации	Проводят выборочно в скважинах с аномальной радиоактивностью, установленной интегральным каротажем
		Специализированная подготовка площадей к поискам, масштаб 1:50000	
Месторождения в породах фундамента	Закрытые и полузакрытые	1. Изучение радиологических особенностей рыхлых образований различного типа, в первую очередь - представительного горизонта (привлекаются эталонные объекты на соседних площадях). 2. Составление радиогеохимических разрезов по опорным профилям. 3. Изучение закономерностей изменения q_U, q_{Th} и q_K при переходе от коренных пород к элювиально-делювиальным отложениям с целью использования этого признака при интерпретации глубинных, наземных и воздушных данных. Исследование степени дифференцированности распределения U, Th и K	Выполняют во всех картировочных и опорных скважинах
Месторождения в чехле рыхлых образований		Выявление природы радиоактивной минерализации	Выполняют в скважинах с аномальной гамма-активностью
		Глубинные поиски	
Месторождения в породах фундамента			
1. Урано-ториевое и урано-	Закрытые и полузакрытые	1. Выявление зон привноса и выноса U(Ra), а также Th и K.	

Продолжение

1	2	3	4
ториево-редкоземельное оруденение, связанное с гнейсо-мигматитовыми комплексами, интрузиями кислого и щелочного составов, пегматоидными гранитами со сложнодифференцированным распределением U, Th и K.		2. Выделение слабо проявленных вторичных ореолов U (Ra) в местах со сложнодифференцированным распределением Th и K, где интегральный гамма-каротаж не обладает достаточной разрешающей способностью. 3. Определение природы радиоактивности вскрытых скважинами аномалий	Проводят во всех скважинах и по всему стволу
2. Урановое оруденение в породах разного типа со сложнодифференцированным распределением Th и K.	То же	1. Выявление слабо проявленных ореолов рассеяния U (Ra). 2. Контроль отсутствия Th	Проводят на площадях со слабо проявленной урановой минерализацией в рыхлых отложениях, где аномалии урана могут не фиксироваться на диаграммах интегрального гамма-каротажа
3. Урановое оруденение в осадочном фундаменте со слабодифференцированным распределением радиоактивных элементов	То же	Выборочный контроль отсутствия Th	Проводят в отдельных контрольных скважинах с аномальной радиоактивностью
Месторождения в чехле рыхлых образований	То же	То же	Проводят выборочно в скважинах с высокой и средней радиоактивностью
		Оценка аномалий	
Аномалии в породах фундамента			
1. Развиты магматические породы кислого или щелочного состава со сложнодифференцированным распределением U и Th. Урано-ториевая природа минерализации выявлена на этапе поисков.	Закрытые, полузакрытые и открытые	1. Определение природы радиоактивности аномалий. 2. Опробование рудных интервалов скважин на уран и торий. 3. Получение данных для целенаправленного геолого-минералогического опробования керна скважин. 4. Изучение распределения U, Th и K в зоне аномалии	Проводят во всех скважинах
2. Развиты осадочные или изверженные породы со слабодифференцированным распределением U и Th. Ториевая минерализация на этапе поисков не выявлена	То же	1. Определение природы радиоактивности аномалий. 2. Контроль отсутствия ториевой минерализации	Выполняют в двух-трех скважинах в пределах аномалии как с высокой, так и с рядовой гамма-активностью, выявленной по данным гамма-каротажа

Окончание

1	2	3	4
Аномалии в чехле рыхлых образований.			
1. Развиты магматические породы кислого или щелочного состава.	Закрытые территории	1. Определение природы радиоактивности аномалии. 2. Изучение распределения U, Th и K в зоне аномалии. 3. Выявление генетической природы аномалии (по соотношению U, Th и K в зоне аномалии, коренных породах и аллохтонных осадках)	Выполняют во всех скважинах, совмещая во времени с гамма-каротажем
2. Развиты осадочные породы	То же	1. Определение природы радиоактивности аномалии. 2. Изучение наличия общих черт в распределении U, Th и K в зоне аномалии и коренных породах (для суждения о генетической природе аномалии)	Проводят в двух-трех скважинах по профилю, пересекающему зону аномалии.

3. Изготовление и паспортизация насыщенных и малых рудных моделей для градуировки аппаратуры, а также серийный выпуск ампульных источников MsTh для проверки пересчетных коэффициентов.

4. Разработка требований к точности поискового гамма-спектрального каротажа при разных концентрациях и соотношениях U, Th и K.

5. Обобщение накопленного опыта работ по гамма-спектральному каротажу и выявление характерных признаков перспективных рудных аномалий (по отдельным ландшафтно-геохимическим провинциям и регионам).

6. Выбор оптимальной скорости поискового гамма-спектрального каротажа в зависимости от концентрации и соотношения радиоактивных элементов.

7. Определение поправок на влияние промежуточной зоны скважины при поисковом гамма-спектральном каротаже.

8. Создание методической инструкции по гамма-спектральному каротажу.

Возможности гамма-спектрального каротажа далеко не исчерпываются решением задач, изложенных в таблице и направленных на поиски радиоактивных руд. По данным радиометрической лаборатории ЛГИ, гамма-спектральный каротаж дает положительный эффект при поисках и разведке месторождений флогопита и пьезокварца. Имеется ряд примеров его успешного использования на месторождениях нефти и газа [I]. Можно утверждать также, что этот вид работ найдет применение при поисках золота, олова, вольфрама, полиметаллов и других месторождений, характеризующихся закономерным перераспределением радиоактивных элементов.

Можно предвидеть, что при условии широкого выпуска специализированной аппаратуры гамма-спектральный каротаж станет одним из самых массовых способов исследования скважин при поисках и разведке как радиоактивных руд, так и различных видов нерадиоактивного сырья. Его применение позволит увеличить удельный объем бескернового бурения, резко сократить процент сква-

жин, пробуренных на бесперспективных участках, и получить новую крайне важную информацию о распределении радиоактивных элементов в земной коре, которая может служить основой для прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Ф.А., Готтих Р.П., Лебедев В.С. Использование ядерных методов в нефтегазовой геологии. М., Недра, 1973.

2. Балясный Н.Д. и др. Опыт спектрального гамма-каротажа с использованием универсальных многоканальных спектрометров / Балясный Н.Д, Мищенко В.М., Пегоев А.Н., Тененбаум И.М., Фридман Ш.Д., Калмыков В.Д. - Атомная энергия, 1967, т. 23, вып. 1.

3. Болотников А.Н., Царицын В.А., Райков К.В. К вопросу применения гамма-спектрометрии в скважинах. - В кн.: Вопросы рудной геофизики. Л., Недра, 1968, вып. 8.

4. Высокоостровская Е.Б., Плющев Е.В. Методика интерпретации аэрограмма-спектральных данных при геологической съемке. - В кн.: Методы рудной геофизики. Изд. ВНИИГеофизика, 1976, вып. 11.

5. Вышенков В.В. Опыт применения гамма-спектрометрии при поисках погребенных месторождений урана. - В кн.: Методы рудной геофизики. Л., Недра, 1972, вып. 10.

6. Козында Ю.О., Новиков Г.Ф., Синицын А.Я. Особенности методики гамма-спектрального каротажа на месторождениях урано-ториевых руд. - В кн.: Методы рудной геофизики. Л., Недра, 1972, вып. 10.

7. Козында Ю.О., Новиков Г.Ф., Синицын А.Я. Поправки на влияние промежуточной зоны при гамма-спектральном каротаже. - В кн.: Методы рудной геофизики. Изд. ВНИИГеофизика, 1976, вып. 11.

8. Козында Ю.О., Новиков Г.Ф., Синицын А.Я. Скорость гамма-спектрального рудного каротажа. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1977, № 4.

9. Новиков Г.Ф., Синицын А.Я., Козында Ю.О. Оптимальные энергетические окна сцинтилляционного гамма-спектрометра. - Зап. ЛГИ, 1969, т. 56, вып. 2.

10. Новиков Г.Ф., Синицын А.Я. Опыт использования анализатора ЛСУ-5к для определения U (Ra), Th и K в скважинах. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1968, вып. 35.

11. Новиков и др. Основы интерпретации гамма-спектральных каротажных диаграмм на месторождениях урано-ториевых руд / Новиков Г.Ф., Синицын А.Я., Козында Ю.О., Габитов Р.М. - В кн.: Методы рудной геофизики. Л., Недра, 1970, вып. 9.

12. Новиков Г.Ф. и др. Способы определения и контроля пересчетных коэффициентов каротажного гамма-спектрометра / Новиков Г.Ф., Синицын А.Я., Козында Ю.О., Габитов Р.М. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1978, вып. 63.

13. Овчинников А.К. и др. Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений / Овчинников А.К., Иващенко Т.Ф., Хайкович И.М., Крекнин Ю.С., Алимочкин В.К. М., 1974.

14. Синицын А.Я., Новиков Г.Ф., Козында Ю.О. Трехканальный гамма-спектрометр для определения урана и тория в скважинах. - В кн.: Геофизическая аппаратура, Л., Недра, 1974, вып. 54.

15. Синицын А.Я. Счетно-решающее устройство для непрерывной записи содержаний урана и тория в скважинах. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1972, вып. 48.

16. Филимонов В.В., Степанов В.Б. Снаряд для гамма-спектрального каротажа. - В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., Недра, 1972, вып. 48.