

В.М. Буртняк, Ю.Л. Забулонов, Г.В. Лисиченко, Л.А. Одукалец

Институт геохимии окружающей среды НАНУ и МЧС Украины, Киев

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА СКВАЖИН И ВЫЯВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АНОМАЛИЙ



Обоснована необходимость создания новых технологий и технических средств для повышения эффективности геолого-съёмочных, прогнозно-поисковых, инженерно-геологических, гидрогеологических, геоэкологических работ. Приведены основные технические характеристики разработанного анализатора и методики проведения поисковых работ по выявлению радиоактивных аномалий и исследования керна скважин. Указаны основные отличия прибора от существующих прототипов.

Ключевые слова: естественная радиоактивность, анализатор кернов.

Еще в 30-е гг. XX ст. была установлена связь интенсивности естественного гамма-излучения горной породы с ее литологическим составом. С тех пор измерение и анализ естественной общей и спектральной гамма-активности образцов керна стали неотъемлемой частью комплекса геофизических исследований, проводимых для оценки свойств отложений.

Практика использования метода анализа естественного гамма-излучения керна доказывает широкие его возможности при оценке свойств изучаемых отложений. Данный метод применяется для решения как количественных, так и качественных задач. К числу качественных задач относятся: детальная стратиграфическая корреляция (хронологическое упорядочивание геологических тел), выделение в различных фациях отдельных типов пород (глинистых, карбонатных, эвапоритовых, магматических и метаморфических), высокопроницаемых и трещиноватых зон, а также обводненных интервалов. Количественно метод поз-

воляет оценить глинистость пласта, тип и содержание глинистых минералов в пласте, содержание органогенного углерода в аргиллитовых формациях, а также запасы металлических и неметаллических полезных ископаемых.

Для проведения многофункционального анализа керна необходима, прежде всего, аппаратная база. Существующие в настоящее время подходы для анализа радиоактивности кернов не обеспечивают качественного и быстрого анализа или требуют транспортировки кернов в стационарные лаборатории. Так, и сама технология отбора и анализа керна, включающая организацию работ по отбору и доставке керна на исследование, и стандартные методики анализа керна приводят к тому, что с момента отбора керна до получения результатов его исследования проходит не менее 2–3 месяцев. Это фактически исключает керн как прямой источник геологической информации из комплекса данных, доступных промысловым геологам.

Поэтому актуальность данной темы обусловлена, с одной стороны, необходимостью повышения эффективности поиска уранового сырья (что

является приоритетным направлением развития ядерной энергетики в целом) и с другой — необходимостью усовершенствования аппаратурной базы для геофизических методов исследования.

В настоящем научно-техническом проекте решаются вопросы создания и применения современного оборудования для геологических исследований, а именно:

- ✦ создание новых технологий получения геологической информации из данных, полученных при экспресс-анализе керна;
- ✦ разработка специализированного радиометрического сканера для использования в поисках залежей радиоактивных руд, а также идентификации геологических отложений на основе измерений естественного гамма-излучения керна в режиме реального времени и полевых условиях.

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Во всех горных породах в небольших количествах присутствуют радиоактивные элементы. Содержание радиоактивных элементов в различных горных породах, а следовательно и интенсивность испускаемых ими ядерных излучений различны.

При исследовании керна наиболее информативными из числа радиоактивных элементов являются калий (K), а также представители семейств урана (U) и тория (Th). Их распространенность в земной коре следующая: уран — $\sim 2 \cdot 10^{-4} \%$, торий — $\sim 7 \cdot 10^{-4} \%$ и калий — $40 \sim 1,8 \%$, дающие вместе около 99 % радиогенного тепла. Остальные радиоактивные элементы (напр., Rb^{87} , La^{138} и пр.) имеют большие периоды полураспада и при существующей их распространенности в земной коре заметного вклада в суммарную радиоактивность не вносят.

Радиоактивность основных минералов, входящих в состав осадочных горных пород, колеблется в весьма широких пределах — от сотых долей до нескольких тысяч Ra/г. Соотношение вклада радиоактивных элементов в общую гамма-активность пород различно. Например, ос-

новной вклад в гамма-активность известняков и (особенно) доломитов дает Ra (соответственно 64 % и 75 %), вклад Ra, Th, K в радиоактивность песчаников примерно одинаков (Ra — 23–26 %, Th — 40 %, K — 35 %). В связи с этим спектры естественного гамма-излучения терригенных и карбонатных пород различны.

Если не учитывать урановые и ториевые руды, то наибольшей гамма-активностью обладают кислые изверженные породы (напр., граниты), а также глины. По интенсивности гамма-излучения 1 г этих пород эквивалентен $(4-6) \cdot 10^{-12}$ г ^{226}Ra . Наименее активны (менее 10^{-12} г ^{226}Ra) ультраосновные породы, а среди осадочных пород — чистые разности известняков, песчаников, большинства каменных углей и особенно гидрохимических пород (кроме калийных солей). В осадочных породах, как правило, радиоактивность тем больше, чем выше содержание глинистой фракции. Следовательно, регистрируя естественную интенсивность радиоактивности, можно определить тип горных пород, пройденных скважиной.

Применяя специальные приборы (спектрометры гамма-излучения), получают диаграмму изменения интенсивности гамма-квантов с заданной энергией вдоль керна (рис. 1). Такой метод позволяет определять содержание в породе радия, тория, калия и по соотношению этих радиоактивных элементов определять условия образования осадков, минеральный состав глин, разделить урановые и ториевые руды, а также некоторые другие полезные ископаемые с повышенной радиоактивностью (фосфориты, бокситы и др.).

Использование данных спектрометрии естественного гамма-излучения для геологических исследований [1] приведено в таблице.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КЕРНА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для анализа радиационных полей керна необходимо решить следующие задачи:

- ✦ измерить спектр гамма-квантов, из которых состоит поток ионизирующего излучения;

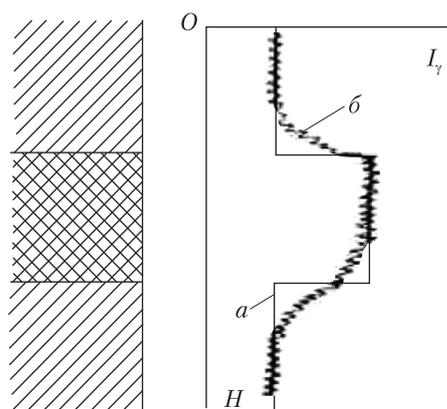


Рис. 1. Диаграмма содержания радиоактивных элементов в породе (а — выделенный пласт породы; б — результаты измерений)

✦ определить эквивалентную дозу и мощность эквивалентной дозы для каждого вида частиц.

Для регистрации естественного гамма-излучения применяются сцинтилляционные спектрометры [2]. Регистрация этими детекторами осуществляется в процессе взаимодействия гамма-излучения с атомами и молекулами вещества, наполняющего спектрометр. Сигналы детекторов излучения, вызванные различными частицами, трудно различимы. Решить эту задачу возможно только на основе цифровых методов регистрации и специальных алгоритмов обработки информации. При цифровых методах измерения параметров ионизирующего излучения токовый импульс, возникающий в анодной цепи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП. Затем полученный цифровой массив подвергается процедуре идентификации. Лучшие результаты дают методы идентификации гамма-квантов по форме сцинтилляционного импульса.

Типичная схема сканирования обследуемого ядра состоит из следующих операций. Анализатор, в котором находится гамма-детектор, перемещается над ядром. Траектория перемещения анализатора — это прямая, проекция которой на плоскость X, Y параллельна оси X . Диафрагма поля зрения детектора представляет

собой вертикально ориентированный коллиматор рупорного типа прямоугольного поперечного сечения с угловой апертурой θ_x, θ_y . В поле зрения детектора попадает почти квадратный фрагмент поверхности ядра, называемый далее *окном просмотра*. Размеры окна просмотра определяются угловой апертурой коллиматора детектора (высотой пренебрегаем).

Интервал времени $\tau = [t_{i-1}, t_i]$, в течение которого производится подсчет вспышек от γ -квантов в детекторе, а в момент t_i — запись накопленной суммы, будем называть *временем экспозиции*. Величина времени экспозиции зависит от величины потока γ -квантов и, естественно, для обеспечения регистрации статистически значимого сигнала при уменьшении потока на входе детектора значение τ должно расти. Окно просмотра перемещается вдоль ядра и за время экспозиции сдвигается на вектор $\tau - V$, образуя *полосу экспозиции*; V — скорость перемещения детектора. Таким образом, в результате измерений ядра в нашем распоряжении будет массив показаний отсчетов детектора $W(t_i), i = 1, N^d$, где N^d — количество интервалов времени экспозиции за полное время сканирования одного ядра.

Специфической особенностью гамма-детектирования является сильно выраженный статистический характер регистрируемого сигнала, который обусловлен пуассоновским процессом радиоактивного распада (выходом гамма-кванта), а также процессами рассеяния и поглощения гамма-квантов в воздухе и объеме детектора.

Исчерпывающее решение задачи состоит в восстановлении функции $\sigma(x, y)$ поверхностной плотности радиоактивного гамма-излучающего материала по массиву данных $W(t_j), j = 1, N^d$. Качество реконструкции функции $\sigma(x, y)$ при использовании однокристалльного гамма-детектора, очевидно, будет сильно зависеть от степени перекрытия окон просмотра.

Между функцией распределения плотности источника $\sigma(x, y)$ радиоактивного излучения и показаниями детектора $W(t_i)$ за время экспозиции $\tau = [t_{i-1}, t_i]$ существует интегральная

взаимосвязь. Рассмотрим неподвижный однокристалльный детектор, расположенный над точкой (x^d, y^d) некоторого керна ($y^d = \text{const}$) на высоте h^d . Тогда число $w(x^d, y^d) = w(x^d)$ гамма-квантов, регистрируемых таким неподвижным детектором за единицу времени, можно выразить двойным интегралом по площади окна просмотра S^d . С учетом изотропности исходного излучения, затухания в атмосферном воздухе и параметров детектора получим:

$$\iint_{s^d} dx dy \sigma(x, y) s g(x^d, y^d, x, y) \frac{\exp(-\mu \rho)}{4\pi \rho^2} = W(x^d), \quad (1)$$

где $\sigma(x, y)$ — поверхностная плотность источника, выраженная в единицах распадов с квадратного метра за одну секунду; s — эффективная площадь входного отверстия детектора (с учетом параметров квантового выхода c^γ , эф-

фективности c^d для выбранной энергии γ -кванта конкретного изотопа и площади входного отверстия s^d). Величина $s = s^d - c^\gamma - c^d$; μ — линейный коэффициент затухания в атмосфере; $g(x^d, y^d, x, y)$ — функция угловой зависимости эффективности детектора, которая в расчетах принимается равной косинусу угла между вертикальной осью детектора и направлением от него в точку (x, y) на поверхности керна, то есть

$$g(x^d, y^d, x, y) = (h^d) / \rho, \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{(h^d - h(x, y))^2 + (x^d - x)^2 + (y^d - y)^2}$$

Необходимо, располагая данными измерений числа гамма-квантов в единицу времени $W(x^d)$, отыскать поверхностную плотность распределения источника излучения $\sigma(x, y)$.

Использование результатов спектрометрии естественного гамма-излучения для геологических исследований (по Ферглу, 1979)

Отношения	Примечания
Торий/уран (Th/U)	В осадочных породах отношение Th/U изменяется в зависимости от условий среды осадкообразования: Th/U > 7 — континентальные условия, окислительная среда, выветренные почвы; Th/U < 7 — морские осадки, серые и зеленые глинистые сланцы, граувакки; Th/U < 2 — морские черные глинистые сланцы, фосфаты. В изверженных породах высокое значение Th/U указывает на существование окислительной среды в период кристаллизации магмы или на ее интенсивное выщелачивание после раскристаллизации. Возможность оценки количества органического углерода в глинистых осадочных породах. Выявление многих типов геологических несогласий. Определение удаленности от древней береговой линии и обнаружение быстрых тектонических подвижек в период осадконакопления. Стратиграфические корреляции, трансгрессии и регрессии, окислительно-восстановительные режимы и т. д.
Уран/калий (U/K)	Возможность оценки содержания органического углерода в глинистых породах. Стратиграфические корреляции. Несогласия, диагенетические преобразования глинистых, карбонатных и других отложений. Для терригенных и карбонатных отложений установление связей с кавернами и системами естественных трещин в пластах, а также локальных связей с повышенным содержанием углеводородов на кривых газового каротажа, снимаемых в процессе бурения, и в кернах
Торий/калий (Th/K)	Выделение типов горных пород в различных фациях. Восстановление палеогеографических и палеоклиматических условий образования фаций. Условия осадконакопления, удаленность от древней береговой линии и т. д. Диагенетические изменения глинистых отложений. Определение типа глин: значение отношения Th/K увеличивается в ряду <i>глюконит — мусковит — иллит — смешаннослойные глинистые минералы — каолинит — хлорит — боксит</i>

ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ФУНКЦИИ АНАЛИЗАТОРА

Анализ требований, выдвигаемых промышленными геологами к техническим средствам анализа керна, показывает, что в настоящее время актуален прибор [3] со следующими функциями:

- ✦ экспрессное определение содержания естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) урана, тория и калия в керне;
- ✦ сопоставление распределения ЕРЭ по длине керна с данными ГИС для послойной «привязки» керна к данным каротажа по глубине;
- ✦ экспрессная оценка по измеренным значениям, относительной глинистости, типов коллекторов и других характеристик изучаемого геологического разреза.

В рамках настоящего проекта был разработан экспериментальный комплекс для использования в геофизической разведке поиска урановых руд, проведения экспресс-анализа керна в реальном времени, а также идентификации радиоактивных отложений на основе измерения природного гамма-излучения керна. В состав комплекса входят мобильный высокочувствительный гамма-спектрометр, система передачи информации и ПК.

Действующий комплекс отличается от существующих прототипов следующими характеристиками:

- ✦ возможность работы в полевых условиях;
- ✦ портативный вариант прибора;
- ✦ клиент-серверная архитектура комплекса;
- ✦ проведение измерений в динамике (непрерывные и стационарные);
- ✦ сохранение измеренных спектров в энергонезависимой памяти (более 20 ч непрерывной работы);
- ✦ визуализация интегральных и усредненных измеренных значений;
- ✦ идентификация отложений;
- ✦ построение графиков интенсивностей гамма-излучений по глубине скважины;
- ✦ ведение базы данных кернов (карточка керна);
- ✦ передача результатов измерений на расстояние.



Рис. 2. Внешний вид прибора

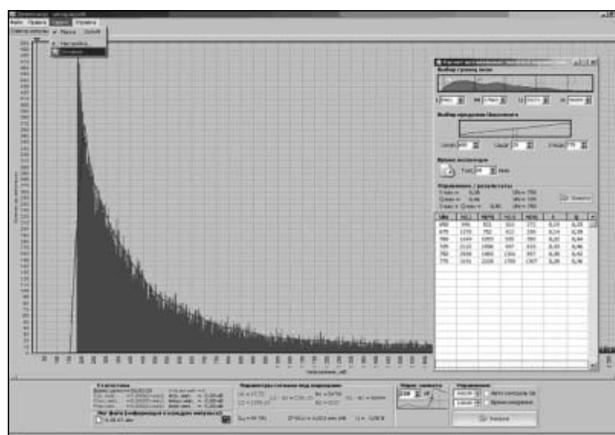


Рис. 3. Результаты измерения гамма-фона

При разработке многоканального анализатора разработчики стремились освоить и применить новые подходы к построению приборов такого типа. В соответствии с принятой идеологией построения мобильный высокочувствительный гамма-спектрометр характеризуется:

- ✦ высоким уровнем интеллектуализации процесса измерений;
- ✦ наличием функции автоматического калибрования;
- ✦ алгоритмической коррекцией ошибок;
- ✦ линеаризацией измерительных характеристик;
- ✦ адаптацией к разным условиям проведения измерений;
- ✦ выделением сигналов, которые представляют интерес, из фоновых по определенным признакам.

Разработанный экспериментальный комплекс имеет следующие характеристики:

- ✦ количество каналов регистрации — 2, в т.ч.:
 - канал измерения интегральной составляющей излучения;
 - канал измерения спектральной составляющей излучения;
- ✦ чувствительность — 10 Бк/л;
- ✦ нестабильность градуировочной характеристики преобразования за время непрерывной работы не превышает 2 %;
- ✦ граница допустимой относительной погрешности измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД) не превышает 25 %;
- ✦ диапазон энергий излучения, который регистрируется — от 5 до 3000 кэВ;
- ✦ энергетическая зависимость в диапазоне — от (0,06–3,0) МэВ \pm 25 %;
- ✦ максимальная входная статистическая нагрузка — не больше 10 000 имп./с;
- ✦ рабочая температура від $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Внешний вид прибора и результаты измерений изображены на рис. 2, 3.

ВЫВОДЫ

Разработан и усовершенствован метод проведения поисковых работ по выявлению радиоактивных аномалий и исследованию керна скважин. В рамках данного проекта выполнены определенные работы, а именно:

- 1) разработка математических моделей, на основе которых созданы рабочие алгоритмы и модули основных программных средств;
- 2) разработка аппаратных средств, на основе которых создан многофункциональный анализатор кернов скважин;
- 3) реализация одновременно интегрального и спектрального методов анализа керна, что позволяет оперативно и с высокой вероятностью определять радиоактивные изотопы малой мощности, их активность и тип (U, Th, Ra и др.) при ограниченном времени наблюдений;
- 4) использование оригинальных методов обработки измерительной информации, базы знаний и элементов экспертных систем, что дает

возможность с высокой вероятностью различать хемогенные и глинистые отложения;

- 5) реализация уникальной методики программной «сшивки» измеренных характеристик кернов по глубине, что позволяет проводить анализ трендов эволюции радиоактивных источников в литологическом разрезе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайкович И.М., Шашкин В.Л. Опробование радиоактивных руд по гамма-излучению. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 160 с.
2. Курашов А.А. Идентификация ионизирующих излучений средних и низких энергий. — М.: Атомиздат, 1979. — 264 с.
3. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М. Новые технические средства поиска урановых месторождений // Сб. научн. ст. Международная научно-практическая конф. УРАН-2009. «Особенности развития минерально-сырьевой базы урана Украины, его добыча и обогащение», Бровары, 2009.

*В.М. Буртняк, Ю.Л. Забулонов,
Г.В. Лисиченко, Л.А. Одукалец*

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗАТОР ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ АНОМАЛІЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРНУ СВЕРДЛОВИНИ

Обґрунтована необхідність створення нових технологій і технічних засобів для здобуття геологічної інформації. Приведені основні технічні характеристики створеного аналізатора радіоактивних полів кернів свердловин. Вказані його основні відмінності від існуючих прототипів.

Ключові слова: природна радіоактивність, аналізатор кернів.

V. Burtnyak, Yu. Zabolonov, G. Lisichenko, L. Odukalets

MULTIFUNCTION ANALYZER FOR DETERMINATION OF RADIO-ACTIVE ANOMALIES AND RESEARCH OF STIPPLER OF MINING HOLE

The necessity of creation of new technologies and hardware for the receipt of geological information is grounded. Basic technical descriptions of the created analyzer of the radio-active fields of mining holes stipplers are presented. Its basic differences from existing prototypes are indicated.

Key words: natural radio-activity, analyzer of stipplers.

Надійшла до редакції 06.02.10