

Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

Использование портативных каротажных станций при разведке урановых месторождений. Using portable geophysical logging systems for uranium exploration

James J. LoCoco,* Mount Sopris Instrument Company, разъясняет некоторые технические особенности, встречаемые при оценке запасов урана с использованием геофизических исследований в скважинах.

Скважинный геофизический каротаж широко признан во всем мире как один из самых эффективных методов для оценки запасов урана на месте их залегания. Портативные геофизические каротажные станции могут быстро и экономично предоставить информацию о литологии, стратиграфической корреляции, физических свойствах и оценках содержания эквивалентного U_3O_8 . Эти станции являются важной составляющей при разведке, подготовке рудника к эксплуатации и проведении контроля качества. С начала 1950-х годов средства, предназначенные для использования при поисках урана, эволюционирующие от массивных переносных сцинтилляционных счётчиков до последних новинок, регистрирующих множество естественных гамма измерений по одному глубинному зонду, дают возможность полевым операторам сделать заключение о литологии и гранулометрическом составе в широком диапазоне по одной скважине.

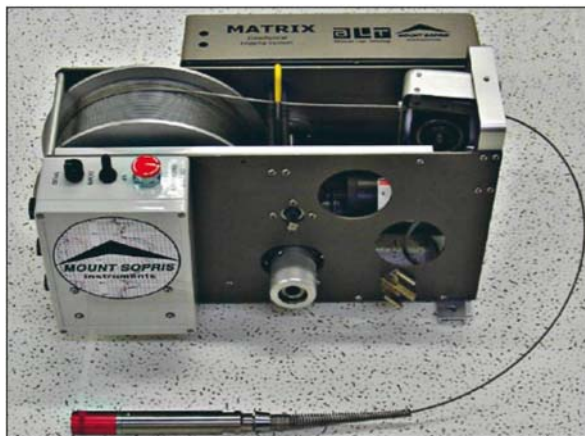
В добавлении к многоканальным спектральным гамма зондам, для разведки урановых месторождений имеются в распоряжении несколько гамма зондов с суммарным счётчиком от разных производителей. Таблица 1 представляет сводку по нескольким типам глубинных зондов и соответствующие урановые калибровочные коэффициенты. Имеются в распоряжении объёмные сцинтилляционные кристаллы, изготовленные по заказу пользователей, а на рынке появились новые люминесцентные материалы, которые вырабатывают свет при 49 photos/keV (38 photos/keV для NaI(Tl)). Эта особенность материала наряду с небольшим временем спада импульса (только 28 нсек, в 10 раз быстрее, чем NaI(Tl)), приводит к превосходным спектральным гамма данным с большей разрешающей способностью.

Следующее ниже является краткой сводкой по естественной радиоактивности в околоскважинном пространстве, используемой при разведке урановых месторождений (разделы, извлеченные из «Скважинного каротажа для поисков урана»: Технические отчеты, серия №212, и другие публикации).

Калий

В природе встречаются уран (элемент 92), калий (19) и торий (90). При урановых геофизических исследованиях в скважине последние два элемента могут потенциально мешать качеству расчетов, это важно учитывать. Калий занимает менее 3% в составе земной коры, но только очень небольшой процент природного калия состоит из радиоактивного изотопа ^{40}K , испускающего энергию гамма-частиц в 1.46 MeV (миллион электронвольт). Даже если этот процент низкий, гамма-излучение, возникающее от содержащегося в некоторых породах калиевого полевого шпата, может внести существенный вклад и усложнить измерение гамма-излучения от низких концентраций урана в некоторых разведываемых по всему миру залежах.

* Email: jim.lococo@mountsopris.com.



Портативный прибор уранового геофизического каротажа.

Гамма-излучение от калия также важно при литологических исследованиях, выполняемых обычно с 2PGA-1000 или 2SNA-10000 зондами стратиграфического каротажа гамма/SP/SPR, так как некоторые породы земли имеют относительно высокое содержание калия (по массе). Некоторые образцы включают в себя сильвин (54% K), поташ (45% K), калиевый полевой шпат (10-20%), аркозовый песчаник (5%), а другие типичные породы земли имеют намного более низкое содержание K, включая известняк (0.27%), базальт (1.4%) и ортокварцитовый песчаник (0.08%). Около 0.012% всего природного калия является радиоактивным и 20% естественного скважинного сигнала от глинистых сланцев обусловлено ^{40}K , оставшийся радиоактивный отклик обусловлен сериями элементов урана и тория.

Уран

При поисках урана гамма-излучение первично возникает от продуктов радиоактивного распада ^{238}U . ^{235}U также существует в природе, но он составляет только 0.72% от общего природного урана. ^{238}U с периодом полураспада 4.51×10^9 лет, распадается, по крайней мере, 14 раз прежде, чем образуется конечный стабильный продукт ^{206}Pb (элемент 83). Некоторые из этапов распада в этом ряду приводят к эмиссии гамма лучей, но не сам ^{238}U . Гамма излучение, полезное при поиске урана, порождается ^{214}Pb и ^{214}Bi , 8-ым и 9-ым продуктами радиоактивного распада в радиоактивном ряду. ^{226}Ra испускает гамма лучи при энергии 0.186 MeV и является также частью уранового ряда.

Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

Глубинный зонд	Описание	Обычный ряд К-фактора (0.24% eU ₃ O ₈ Model)
HLP-2375/1	Диаметр зонда 26 мм с люминесцентным кристаллом NaI 13 мм диам.×38 мм длины. Аналоговый импульсный элемент имеет электрод SP/SPR	3 x 10 ⁻⁶ , 2.25" заполненная воздухом скважина
HLP-2375/м	Диаметр зонда 29 мм с люминесцентным кристаллом NaI 13 мм диам.×38 мм длины. Аналоговый импульсный элемент имеет электрод SP/SPR	3 x 10 ⁻⁶ , 2.25" заполненная воздухом скважина
2PGA-1000	Диаметр зонда 38 мм с люминесцентным кристаллом NaI 22 мм диам.×72 мм длины. Аналоговый импульсный элемент	1 - 3 x 10 ⁻⁶ , 4.5" заполненная водой скважина
2SNA-1000	Диаметр зонда 38 мм с люминесцентным кристаллом NaI 22 мм диам.×72 мм длины. Пальцеобразная скважина; одновременно измеряет SP SPR по естественному гамма излучению. Пальцевидный элемент	2 - 4 x 10 ⁻⁶ , 4.5" заполненная водой скважина
2MGA-1000	Комбинированный modem/gamma элемент, использующий 13 мм диам. ×72 мм длины люминесцентный кристалл. Цифровой	3 x 10 ⁻⁶ , 2.25" заполненная воздухом скважина
2GHG-1000	Измеряет естественное гамма излучение по люминесцентному кристаллу NaI 13 мм диам. x 38 мм длины и пару туб ZP1320 High-Flux Geiger-Muller с антисовпадающими электронными схемами, приводящие к тройному естественному гамма каротажу, одновременно полученному. Группа кристаллов NaI является самой чувствительной, в то время как пара туб G-M используется для определения качества руды с очень высокой концентрацией eU ₃ O ₈ . Антисовпадающие электронные схемы позволяют в реальном времени собрать и зарегистрировать данные каждой тубы G-M, наряду с их суммой, в виде геофизической каротажной диаграммы. Могут быть измерены точные концентрации в урановой руде, располагая по сортам от менее 0.1% до 20% e wt% U ₃ O ₈ .	NaI: 4.75 x 10 ⁻⁶ G1320; 1.1 x 10 ⁻⁶ 4.5" заполненная водой скважина

Таблица 1 Каротажные устройства Mount Sopris Instruments для естественного гамма излучения, используемы при поисках урана.



Окно статистических спектральных данных по 1024 каналам данных спектрального гамма зонда для модели UI (2.6% eU₃O₈) Grand Junction, CO, USA.

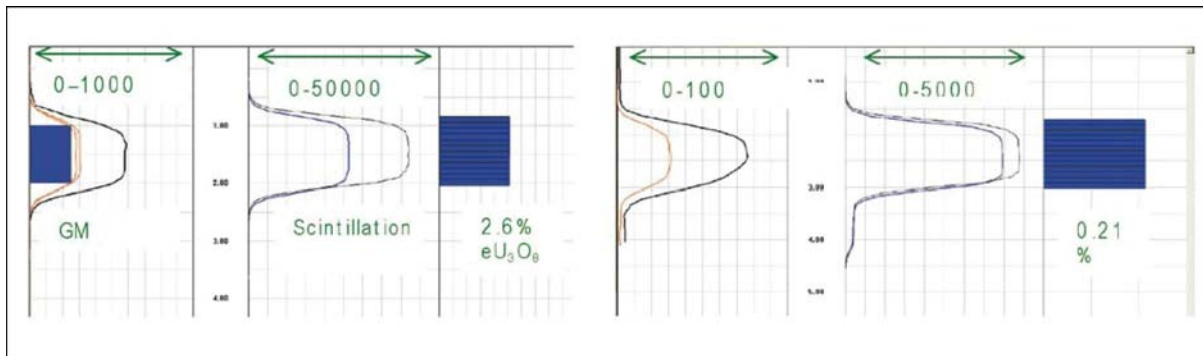
Если вы проводите каротаж с MSI гамма зондами (или другим гамма зондом) для обнаружения урана, эти данные могут быть понятны. Если известна взаимосвязь между эмиссиями продуктов радиоактивного распада и исходным элементом (²³⁸U), может быть оценена концентрация урана, и рассмотрено вещество, которое находится в длительном равновесии. В этой ситуации излучение, испускаемое изотопами радиоактивного ряда, представляет количество присутствующего урана. Оценки концентрации урана улучшаются, когда операторы рассматривают околоскважинное

пространство. Диаметр скважины, присутствие или отсутствие флюидов, тип обсадной трубы и толщина наряду с углом падения рудной зоны (и мощностью) по отношению к скважине оказывают влияние на табуляцию. Скорость каротажа и вертикальный отбор образцов также регистрируются. Все эти факторы используются для формирования «К-фактора», который является значением, применяемым к необработанному гамма данным, и дающим эквивалентное содержание wt% U₃O₈.

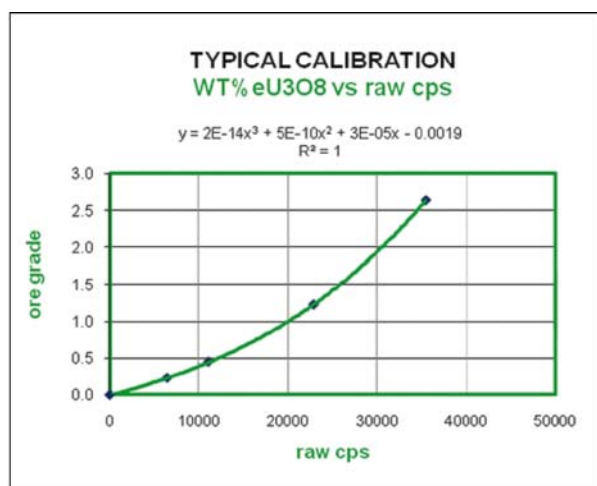
Торий

Существующий в природе радиоактивный торий (²³²Th) с периодом полураспада 1.39×10¹⁰ лет распадается до стабильного ²⁰⁸Pb. Аналогично урановому сценарию ²³²Th сам не испускает гамма излучение, которое может быть измерено зондами естественного гамма каротажа для оценки содержания тория в породах. Самый главный источник гамма излучения в ториевом радиоактивном ряду ²⁰⁸Tl. Продукты радиоактивного распада в ториевом радиоактивном ряду обычно имеют более короткий период полураспада по сравнению с урановым рядом.

Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика



Данные тройного гамма зонда по урановым моделям U1 и U3 в Grand Junction, CO, USA.



Стандартная калибровка ряда cps WT% eU_3O_8
Гамма каротажные расчеты при поиске урана

Калибрование: К-фактор

Гамма зонды с суммарным импульсом калибруются на СО урановых моделях USDOE Grand Junction, и на других установках по всему миру. Пример собранных данных приведен выше на каротажной диаграмме. Эти модели имеют известную концентрацию ^{226}Ra , в которых предполагается эквивалент U_3O_8 (вес%). Большинство ведущих исследователей используют основное уравнение К-фактора, как сообщалось многими авторами много лет.

$$GT = kA$$

A представляется областью под гамма кривой через обогащенную зону, аналогичную каротажной диаграмме на графике выше. G – средний радиометрический уровень эквивалентного урана в зоне минерализации по всей заданной длине скважины T . Коэффициент пропорциональности, k (к-фактор), определяется по прохождению зонда в модели с известными G и T и вычислению A . Единицы измерения k связаны с уровнем урана (в CPS – циклах за секунду). Это уравнение не может быть линейным для широкого диапазона уровней. Очевидно, многие другие факторы, встречаемые в поле, сказываются на окончательной оценке eU_3O_8 . Каротажная аппаратура, типы детекторов, особенности получения данных,

особенности околоскважинного пространства и неуровненность влияют на оценки eU_3O_8 . В моделях Grand Junction часть GT уравнения взята по 50-ти 0.5-футовым образцам (суммированным для получения A), поэтому окончательная оценка eU_3O_8 найдена перемножением – к-фактор \times CPS \times 10. Во многих случаях использованы другие эмпирические коэффициенты и скалярные величины. В последние годы некоторые производители стали использовать полиномиальные уравнения 2-го порядка, связывающие CPS с уровнем. Эти графики созданы в WellCAD или Excel, аналогично приведенному примеру.

Аппаратура/производственный процесс

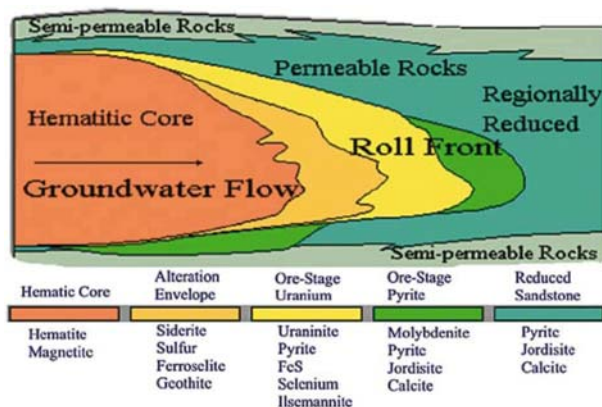
В некоторых работах по урановому каротажу, использующих аналогичные импульсные гамма зонды, понятие «время задержки» является важным для точной оценки уровня. Время задержки является временем после начала импульса, в течение которого импульс не может быть распознан; следовательно, если скорость регистрируемого считывания достаточно высокая, некоторые надежные импульсы не будут считаны. Исправленная скорость считывания, N , определяется стандартным уравнением, приведенным ниже.

$$N = n / 1 - \mu n$$

где n – регистрируемая скорость считывания (число/сек), а μ – время задержки в сек.

Скважинный гамма зонд, когда пронизывается гамма лучом, испускает фотон (квант) света. Этот импульс света затем усиливается тубом фото множителя, который выпускает текущий импульс. Эти импульсы затем регистрируются, сформировываются и отправляются по кабельной линии. Большинство существующих в настоящее время гамма зондов воспроизводят широкие импульсы в 1.25 μSec (μ) (минимально возможное время задержки) в этом процессе. Если зонд считывает, например, 83000 CPS в рудной зоне, $N = 92,608$ CPS. Это число затем перемножается с к-фактором для получения содержания eU_3O_8 . Из таблицы 1, использующей 2PGA-1000, к-фактор равен 0.00003, оценка уровня будет 2.77 wt.% eU_3O_8 , не исправленная за диаметр скважины, плотность флюида, тип установки и мощность, неуровненность и т.д.

Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика



Концептуальная модель урановых фронтальных отложений (Devoto, 1978).

Скважинные факторы

Большинство разработчиков эмпирически определили по зарегистрированным CPS в калибровочных моделях изменения CPS, или девиации, обусловленные диаметром скважины, плотностью флюида, наряду с типом установки и мощностью. NX центра трубки, например, ослабляет CPS почти на 1.38x для зондов HLP-2375.

Геологические процессы

Операторы, участвующие в поисках урана в фронтальных отложениях западной части США, обычно вынуждены установить эмпирическую связь между эмиссией гамма лучей продуктов распада и ^{238}U источника, чтобы оценить эквивалент U_3O_8 . Вопрос состоит в том, является ли длительное равновесие, которое регистрируется геофизическим каротажем, подходящим для геологических пород (в этом случае фронтальные отложения). Если элементы источника, или продукты распада, потеряны в результате других процессов, а не радиоактивного распада, или если источник не был отложен достаточно много лет назад, предположение о длительном равновесии не является удовлетворительным. Большинство методов естественного гамма каротажа предполагает длительное равновесие, пока не появится дополнительная информация.

Урановая отрасль возобновляется: будущие месторождения могут быть разработаны открытой добычей или подземными методами, но вероятно, что большинство разработок месторождений будет выполнено выщелачиванием (выщелачиванием) на месте залегания. Урановые отложения, которые могут быть вымыты, должны соответствовать определенным требованиям. Рудное тело должно быть пористым и водопроницаемым, залежать вероятнее всего в туфогенных или аркозовых песчаниках или конгломератах. Ложе должно быть пологим или слабо наклонным, а водопроницаемое ложе должно быть герметически перекрыто сверху и снизу непроницаемыми аргиллитами или глинистыми сланцами. Ложе должно быть ниже уровня грунтовых вод или в замкнутом водоносном пласте. Воздымание и эрозия будут причиной понижения уровня грунтовых вод, поэтому многие урановые отложения в настоящее время сухие и приподняты. Большинство отложений находится в пористых и пронизанных водопроницаемыми каналами песчаниках или конгломератах.

Урановые фронтальные отложения

Было показано, что большая часть урана была извлечена из метаморфически измененных вулканических пеплов или туфов (E.B. Neylman, Ph.D). Вулканический пепел и туф неустойчивы под действием атмосферных условий и, в конечном счете, изменяются до глинистых или алевролитоглинистых отложений. При изменении уран перемещается в грунтовые воды. Ураносодержащие растворы циркулируют через водопроницаемое ложе до тех пор, пока не встретится реагент (восстановитель) (см. выше концептуальную модель Devoto). Реагенты содержат в себе рассеянный пирит и органическое вещество наподобие остатков растений или углеводов, которые выделяют сульфидные газы по мере растворения. Водород сульфидных газов является сильным реагентом, поэтому уран будет выпадать в осадок из раствора, встречая восстановительные условия, созданные газом H_2S . Иногда, древесина, торф, бурый уголь и углеводороды полностью замещены черными оксидами урана, обычно уранинитом (урановая слюдка). «Карманы» отходов органического происхождения в песчанике могут привести к формированию обогащенных рудных тел.

Фронтальные урановые отложения формируются там, где грунтовая вода в водопроницаемом песчанике или конгломерате сталкивается с поверхностью между условиями окисления и восстановления. Уран в растворе осаждается на поверхности, часто формируя серповидное фронтальное рудное тело (иллюстрация Devoto). Через несколько лет, восстановительный фронт мигрирует в направлении потока грунтовой воды, создавая, таким образом, рудное тело, которое может распространяться на сотни футов. Серповидные гребни часто вытягиваются и создают пластинчатые, пластообразные отложения, которые могут содержать черные и желтые оксиды урана. Зона окисления часто характеризуется структурами урановых отложений, как показано на иллюстрации. Некоторые отложения могут быть обнаружены по обычно присутствующей заметной окраске. Однако, обычно отложения обнаруживаются детектором радиоактивного излучения задолго до того, как обнаруживаются другие признаки. Исключения могут быть там, где уранинит является настолько вновь образованным, что радиоактивные продукты распада еще не образовались. Эти нерадиоактивные урановые отложения могут быть обнаружены по данным химического анализа.

Существует много урановых отложений, которые являются пластинчатыми, пластообразными, а не фронтальными. Такие слои часто примыкают к органическим аргиллитам или сланцам, или там, где присутствуют карманы органических отходов в песчаниках. Богатые отложения в Lisbon, Utah, и Grants, New Mexico являются пластинчатыми. Фронтальные урановые отложения остаются для промывания (выщелачивания), особенно те, которые слишком залегают глубоко для методов открытых разработок. Возможно, что добыча урана в будущем будет производиться методом выщелачивания (или вымывания?) на месте залегания. Тема раскрыта в профессиональных журналах, и дополнительная информация существует в многочисленных отчетах Министерства энергетики Соединенных Штатов (US Department of Energy).

Циркуляр Геологической Службы Соединенных Штатов 1141 (US Geological Survey Circular) является краткой сводкой того, что имеется в наличии в USGS (в Геологической Службе США) бесплатно.