*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLV, вып. 2, 1963 г.*

# К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГАММА-КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ УРАНО-ТОРИЕВЫХ РУД

*Г. Ф. Новиков*

Метод учета тория при интерпретации гамма-каротажных диаграмм, рекомендованный существующей инструкцией по гамма-каротажу [1], предусматривает многочисленные определения тория в пробах керна. Анализ проб на торий выполняется по принципу спектрометрирования гамма-лучей или химическим и радиохимическим методами. Отсутствие в ряде лабораторий стабильно работающих сцинтилляционных анализаторов, а в полевых партиях — каротажных станций, позволяющих надежно разделять уран и торий в скважинах, вынуждает прибегать к дорогостоящим радиохимическим анализам на торий и радий (в связи с необходимостью определения коэффициента равновесия урана и радия).

Этого можно в значительной мере избежать, если рассчитывать содержание урана по каротажным диаграммам $U_к$ по зависимости

$$U_к = \frac{S}{A_U H C_{рм}} 0{,}01\%, \qquad (1)$$

где $S$ — площадь каротажной кривой с учетом поправок за поглощение гамма-лучей в обсадных трубах и глинистом растворе или воде;

$A_U$ — пересчетный коэффициент для урановых руд, равный $115 \pm 5$ *мкр/ч* на 0,01% равновесного урана [1];

$H$ — длина рудного интервала по стволу скважины;

$C_{рм}$ — эффективный коэффициент равновесия, определяется радиометрическим методом путем анализа проб керна по бета- и гамма-лучам без спектрометрирования.

Как показывают теоретический анализ и практические измерения, содержание урана $U_к$, вычисляемое по этой формуле, в широком диапазоне значений торий-уранового отношения $\frac{Th}{U}$ и коэффициента равновесия урана и радия оказывается близким к истинному содержанию урана в руде $U_{ист}$.

**Теоретическое обоснование.** Зависимость между площадью гамма-каротажной кривой $S$ и линейными запасами урана в пласте мощностью $H$ при отсутствии тория в руде имеет вид [2]

$$S = J_\infty H = A_U U_{ист} C_{ист} H 100, \qquad (2)$$

где $J_\infty$ — интенсивность гамма-излучения насыщенного по гамма-лучам пласта;

$C_{ист}$ — истинный коэффициент равновесия между ураном и радием,

$$C_{ист} = \frac{Ra_{ист}}{U_{ист}} 2{,}9 \quad 10^6, \tag{3}$$

$Ra_{ист}$ и $U_{ист}$ — соответственно истинные содержания радия и урана в рудном теле.

При наличии в руде урана и тория справедливо выражение

$$S = A_U U_{ист} C_{ист} H 100 + A_{Th} Th_{ист} H 100 =$$

$$= A_U U_{ист} C_{ист} H \left(1 + \frac{A_{Th}}{A_U} \frac{Th_{ист}}{U_{ист}} \frac{1}{C_{ист}}\right) 100,$$

где $A_{Th}$ — пересчетный коэффициент для ториевых руд, *мкр/ч* на 0,01% равновесного тория;

$Th_{ист}$ — истинное содержание тория.

Принимается, что элементы ториевого рода находятся в равновесии.

По А. М. Лебедеву [4], урановый эквивалент тория $A_{Th}/Au$ при каротаже с газонаполненными трубками в гильзе толщиной 4 *мм* Fe равен 0,42. Тогда

$$S = A_U U_{ист} C_{ист} H \left(1 + 0{,}42 \frac{Th_{ист}}{U_{ист}} \frac{1}{C_{ист}}\right) 100. \tag{4}$$

Как видно из этого выражения, гамма-излучение тория завышает площадь каротажной кривой на коэффициент, указанный в скобках. Можно показать, что практически во столько же раз за счет тория завышается знаменатель в формуле (1). Аналогично (3),

$$C_{рм} = \frac{Ra_{рм}}{U_{рм}} 2{,}9 \quad 10^6, \tag{5}$$

где $Ra_{рм}$ и $U_{рм}$ — содержания радия и урана, устанавливаемые радиометрическим анализом, согласно

$$U_{рм} = \frac{nQ^\beta - bQ^\gamma}{an - bm}, \tag{6}$$

$$Ra_{рм} = \frac{aQ^\gamma - mQ^\beta}{(an - mb)(1 - \alpha)} 3{,}4 \quad 10^{-7}, \tag{7}$$

$Q^\beta$ и $Q^\gamma$ — эквивалентные содержания урана в пробе по бета- и гамма-лучам, вычисленные с учетом коэффициентов равновесия и эманирования порошкового эталона;

$a$, $b$, $m$, $n$ — коэффициенты, характеризующие долю регистрируемого бета-излучения ($a$, $b$) и гамма-излучения ($m$, $n$) элементов урановой и радиевой групп[1];

$\alpha$ — коэффициент эманирования пробы.

Нетрудно доказать, что содержание урана, вычисляемое по формуле (6), практически равно истинному содержанию урана в широком диапазоне значений торий-уранового отношения

$$U_{рм} \approx U_{ист}. \tag{8}$$

Действительно, подставляя в выражение (6) вместо $Q^\beta$ и $Q^\gamma$ их значения[2]

$$Q^\beta = aU_{ист} + b\,Ra_{ист}(1 \quad \alpha) 2{,}9 \quad 10^6 + \beta\,Th_{ист},$$

$$Q^\gamma = mU_{ист} + n\,Ra_{ист}(1 - \alpha) 2{,}9 \quad 10^6 + \gamma\,Th_{ист},$$

[1] Значения $a$, $b$, $m$, $n$ для разных приемников лучей приведены в работе В. Л. Шашкина [3].

[2] Учет поправки на эманирование ториевой компоненты в руде здесь не рассматривается.

получаем

$$U_{рм} = U_{ист} - \frac{b\gamma - n\beta}{an - bm} Th_{ист}, \qquad (9)$$

где $\gamma$ и $\beta$ — урановые эквиваленты тория соответственно по гамма- и бета-лучам для условий измерений порошковых проб.

Коэффициент перед $Th_{ист}$ для разных приемников лучей колеблется от 0,01 до 0,05.

Справедливость выражения (8) наглядно доказывается практическими данными, приведенными на рис. 1, где содержание урана $U_{рм}$ вычислено по формуле (6), а $U_{ист}$ — по химическому анализу.

Содержание радия $Ra_{рм}$, рассчитываемое по формуле (7), оказывается существенно завышенным в присутствии тория. Так, при измерении $Q^{\beta}$ трубками СТС-6 и $Q^{\gamma}$ трубками МС

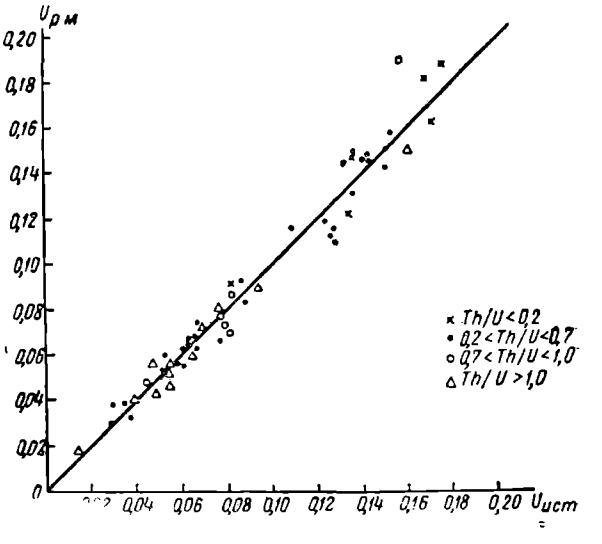



Рис. 1. Корреляционная связь данных радиометрического и химического анализов проб на уран

$$Ra_{рм} = Ra_{ист} + 0{,}44\, Th_{ист}\, 3{,}4 \quad 10^{-7}. \qquad (10)$$

Такое соотношение подтверждается практическими данными рис. 2. На этом рисунке, как и на рис. 1, точки симметрично распределены

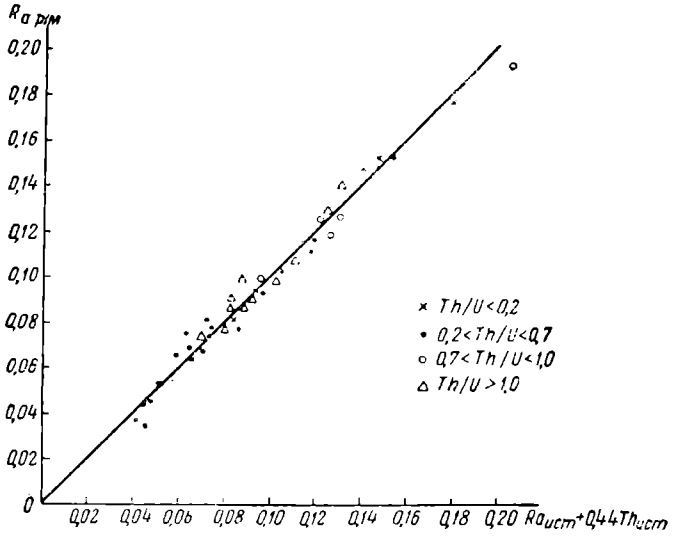



Рис. 2. Корреляционная связь величин, входящих в равенство (10)

по обеим сторонам биссектрисы независимо от соотношения тория и урана в пробах, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки в равенствах (8) и (10).

Подставляя (8) и (10) в выражение (5), получаем

$$C_{\text{рм}} = \frac{\text{Ra}_{\text{ист}} + 0{,}44\,\text{Th}_{\text{ист}}\,3{,}4\ \ 10^{-7}}{\text{U}_{\text{ист}}}\,2{,}9\ \ 10^{6} = \frac{\text{Ra}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}}\,2{,}9\ \ 10^{6} + 0{,}44\,\frac{\text{Th}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}} =$$

$$= C_{\text{ист}} + 0{,}44\,\frac{\text{Th}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}} = C_{\text{ист}}\left(1 + 0{,}44\,\frac{\text{Th}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}}\,\frac{1}{C_{\text{ист}}}\right). \qquad (11)$$

С учетом (4) и (11) выражение (1) для указанных выше условий измерений принимает вид

$$\text{U}_{\text{к}} = \frac{A_{\text{U}}\text{U}_{\text{ист}}C_{\text{ист}}H\left(1 + 0{,}42\,\frac{\text{Th}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}}\,\frac{1}{C_{\text{ист}}}\right)}{A_{\text{U}}C_{\text{ист}}H\left(1 + 0{,}44\,\frac{\text{Th}_{\text{ист}}}{\text{U}_{\text{ист}}}\,\frac{1}{C_{\text{ист}}}\right)} \qquad (12)$$

Так как величины в скобках близки между собой, без заметной ошибки можно написать $\text{U}_{\text{к}} = \text{U}_{\text{ист}}$.

Такая же картина наблюдается не только для указанных выше условий измерения, но и при использовании других приемников лучей при каротаже и измерении порошковых проб. Ожидаемое расхождение величин $\text{U}_{\text{к}}$ и $\text{U}_{\text{ист}}$ может быть оценено аналогичным образом.

**Результаты проверки метода.** Предлагаемый способ учета тория был проверен на одном из рудопроявлений. Отношение тория к урану в рудах колеблется от 0,1 до 3, для большинства проб находится в диапазоне 0,3—0,7. Закономерности распределения тория в рудных телах не отмечается. Нередко отношение Th/U изменяется в широких пределах даже для близко расположенных проб. Равновесие в урановом ряду нарушено незначительно. Коэффициент равновесия по рудопроявлению в целом близок единице, однако для некоторых пересечений рудных тел изменяется от 0,7—0,8 до 1,2—1,3. Коэффициент эманирования руды в естественном залегании не превышает первых единиц процентов, при интерпретации каротажных диаграмм он во внимание не принимался. Выход керна по рудным интервалам составлял в среднем 75%, в отдельных случаях — не более 50—60%. Замечено частичное вымывание урана из керна в процессе бурения, причем, чем меньше выход керна, тем интенсивнее потеря урана.

Керн опробован на уран, радий и торий частично на установке типа ЛАС, частично — химическим и радиохимическим методами. По каждому пересечению рудного тела по групповым или единичным пробам подсчитаны коэффициенты равновесия урана и радия и средневзвешенные содержания тория.

Учет тория при интерпретации каротажных диаграмм проведен двумя способами: методом, рекомендованным инструкцией по гамма-каротажу [1], и предлагаемым методом $C_{\text{рм}}$ согласно выражению (1). В последнем случае для вычисления $C_{\text{рм}}$ привлечены данные измерения проб по бета- и гамма-лучам из одной навески частично на установке с газонаполненными трубками, частично — на установке типа ЛАС без включения канала регистрации жесткого излучения.

По каждому пересечению рудного тела для определения $C_{\text{рм}}$ выбирались лишь пробы с содержанием урана более 0,04%. Это сделано для снижения относительной ошибки величины $C_{\text{р}}$. Среднее значение $C_{\text{р ср}}$ вычислялось по принципу расчета средней гармонической величины

$$C_{\text{рм}_{\text{ср}}} = \frac{\text{Ra}_1 l_1 + \text{Ra}_2 l_2 + \ldots + \text{Ra}_n l_n}{\text{U}_1 l_1 + \text{U}_2 l_2 + \quad + \text{U}_n l_n} \qquad (13)$$

где $\text{Ra}_1$, $\text{Ra}_2$, $\text{U}_1$, $\text{U}_2$ — содержания радия и урана в первой, второй и т. д. пробах;

$l_1$, $l_2$, — длины интервалов, по которым отбирались соответствующие пробы.

При определении радия по формуле (7) средний коэффициент эманирования для порошковых проб по всему месторождению был принят равным 16% (вычислен по 37 пробам). Значение коэффициента $\alpha$ было установлено по гамма-лучам.

Как видно из рис. 3, *а* и *б*, для первого и второго способов учета тория получены идентичные данные. Уравнение регрессии в первом случае имеет вид $y = 0{,}96\,x + 0{,}016$, при учете тория по предлагаемому здесь способу $y = 0{,}98x + 0{,}012$. Расхождение линейных запасов по каротажу с результатами опробования керна объясняется частичным вымыванием урана из керна при бурении.

Сопоставление запасов урана, подсчитанных по каротажу разными способами учета тория, показывает отсутствие систематической погрешности в величинах $U_к H$ в широком диапазоне значений отношения Th/U. Уравнение регрессии имеет вид $y \approx 1{,}01x - 0{,}002$.

Приведенные материалы подтверждают рассмотренные ранее теоретические положения и позволяют широко рекомендовать при интерпретации гамма-каротажных диаграмм для учета тория метод $C_{рм}$, как более простой, оперативный и экономически выгодный, позволяющий обходиться в лаборатории без сцинтилляционных анализаторов. При использовании метода $C_{рм}$ анализы проб керна на Th и Ra выполняются лишь для контроля. Нарушение равновесия урана и радия в рудах учитывается величиной $C_{р.}$.

**Рекомендации по применению метода.** 1. Основным моментом при учете тория рекомендуемым методом является определение $C_{рм}$. Для этого пробы керна из рудного интервала измеряются по бета- и гамма-лучам с газонаполненными счетчиками или сцинтилляторами с повышенной точностью из одной или разных навесок. При расчете $Q^\beta$ и $Q^\gamma$ учитываются коэффициенты равновесия и эманирования порошковых эталонов ($C_{эт}$ и $\alpha_{эт}$), согласно

$$Q^\beta = U_{эт} \frac{J^\beta_{пр} - J^\beta_ф}{J^\beta_{эт} - J^\beta_ф} [a + bC_{эт}(1 - \alpha_{эт})], \qquad (14)$$

$$Q^\gamma = U_{эт} \frac{J^\gamma_{пр} - J^\gamma_ф}{J^\gamma_{эт} - J^\gamma_ф} \frac{p_{эт}}{p_{пр}} [m + nC_{эт}(1 - \alpha_{эт})], \qquad (15)$$

где $J_{пр}$, $J_{эт}$ и $J_ф$ — соответственно интенсивность излучения пробы, эталона и фона по $\gamma$- и $\beta$-лучам;

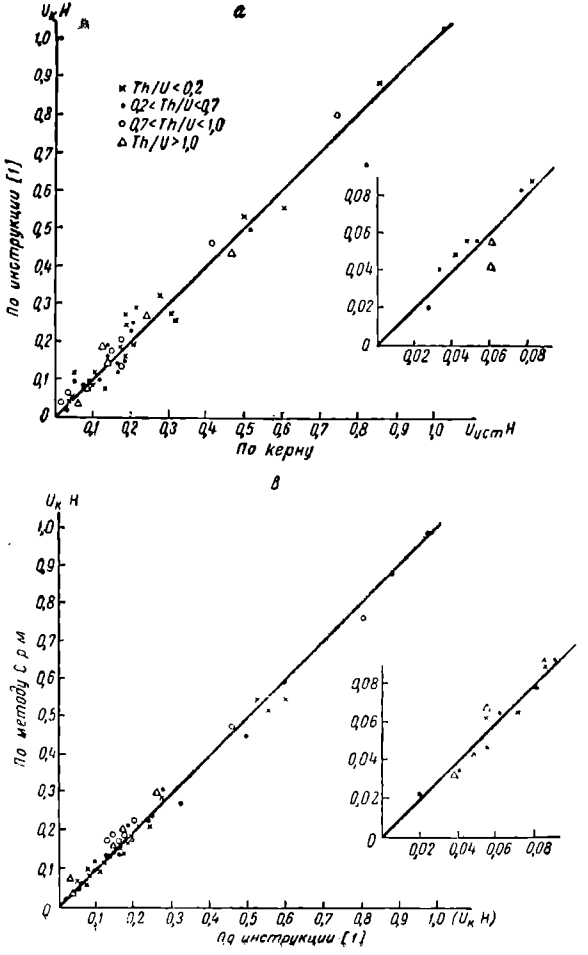
$p_{пр}$ и $p_{эт}$ — вес пробы и эталона.

Для повышения точности анализа целесообразна предварительная проверка паспортных данных порошкового эталона, особенно если эталон находился до этого в эксплуатации. Около 10—15% наиболее активных проб анализируется на коэффициент эманирования.

Если руды однотипные по составу, в формуле (7) при расчете $Ra_{рм}$ принимается средняя по участку величина $\alpha$.

По каждому рудному пересечению $C_{рм}$ вычисляется как средняя гармоническая величина согласно выражению (13). Для определения привлекаются все пробы рудного интервала. Расчет коэффициента равновесия как средней арифметической величины может привести к грубым ошибкам, особенно при наличии проб с низкой активностью, для которых относительная ошибка определения $Q^\beta$ и $Q^\gamma$ велика.

2. Каротажные диаграммы подготавливаются для интерпретации в соответствии с инструкцией по гамма-каротажу. Содержание урана рассчитывается согласно (1). В случае эманирующих руд в числителе появляется член $(1 - \alpha')$, где $\alpha'$ — поправка на эманирование. Все



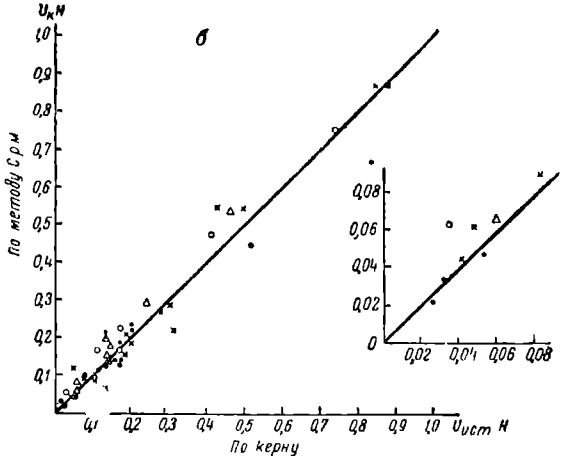




Рис. 3. Корреляционная связь линейных запасов урана в условных единицах по данным опробования:

*а* — керна и каротажа по инструкции [1]; *б* — керна и каротажа по методу $C_{рм}$; *в* — каротажа двумя методами

другие поправки — на воду или глинистый раствор в скважине, на обсадные трубы — учитываются обычным методом.

3. Контролируется рассчитанное по каротажным диаграммам содержание урана путем сопоставления этих данных с результатами интерпретации каротажных диаграмм по инструкции [1] и с результатами опробования керна, как это сделано выше.

4. Оценка содержания тория по каротажным диаграммам возможна лишь в том случае, если известен, хотя бы по сравнительно небольшому числу проб, средний коэффициент равновесия урана и радия $C_{ист}$ по участку. При этом

$$Th = \frac{S}{A_{Th} H} 0{,}01 - \frac{A_U}{A_{Th}} U_к C_{ист} (1 - \alpha'). \qquad (16)$$

Расчет тория по каротажным диаграммам оправдан лишь в случае небольших колебаний значения коэффициента равновесия $C_{ист}$ на изучаемом объекте.

5. Предлагаемый метод учета тория может быть рекомендован и для интерпретации графиков $\Delta J$ при радиометрическом опробовании руд на месте залегания.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Овчинников А. К., Иващенко Т. Ф. Инструкция по гамма-каротажу. Госгеолтехиздат, 1957.

2. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. Госгеолтехиздат, 1957.

3. Шашкин В. Л. Шумилин И. П., Пруткина М. И. Соотношение β- и γ-излучения естественных радиоактивных элементов. Вопросы геологии урана. Приложение № 6 к журналу «Атомная энергия», 1957.

4. Лебедев А. М., Троицкий С. Г. Шашкин В. Л. К вопросу о пересчетном коэффициенте для количественной интерпретации γ-каротажа. «Атомная энергия», 1961, т. 10, вып. 4.

5. Юфа Б. Я. Учет систематических ошибок при подсчете запасов. «Разведка недр», 1957, № 6.