

КР ҰҒА-ның Ҳабарлары. Геологиялық сериясы. Известия НАН РК.
Серия геологическая. 2007, №4. С. 74–82

УДК 550.832,5

В. А. КРАСНОПЕРОВ¹, Д. Р. СЕЙФУЛЛИН²

ПРИКЛАДНЫЕ СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

Сынама мәселелері метрологиялық түрғыдан қарастырылған. Әрбір өдіс екі сатыдан тұрады: бірінші сатыда өлшеуге қолайлы жағдай жасалынады және бұл кезеңде өлшем сапалылығының қателіктері түзетіледі; екінші сатыда – соңғы өлшем жасалады, яғни, аналитикалық қасиеттің сандық сипаттамасында беріледі. Үнғыманы зерттеудегі ядролық – геофизика әдістерінің метрологиялық сипаттамасы анықталды.

Вопросы опробования рассмотрены с метрологических позиций. Каждый метод реализуется в два этапа: на первом создают благоприятные условия измерений, по возможности исключают источники снижения качества; на втором – проводят окончательное измерение, т.е. устанавливают числовую характеристику аналитического свойства. Обсуждаются прикладные схемы определения метрологических характеристик ядерно-геофизических методов исследования скважин.

Questions of approbation are considered from metrological positions. Each method is realized in two stages: on the first create favorable conditions of measurements, whenever possible exclude sources of reduction of quality; on the second – carry out final measurement, i.e. establish the numerical characteristic of analytical property. Applied circuits of definition of metrological characteristics of nuclear-geophysical methods of research of chinks are discussed.

С позиций метрологии опробование – процесс получения информации о составе и свойствах вещества, управляемый вероятностными и систематическими законами. Каждый метод опробования реализуется в два этапа: на первом создают благоприятные условия измерений, по возможности исключают источники снижения качества; на втором – проводят окончательное измерение, то есть устанавливают числовую характеристику аналитического свойства. Из отмеченных обстоятельств вытекают важные следствия: а) количественный анализ – процесс измерительный, б) для него характерны своеобразные и сложные способы устранения факторов, снижающих достоверность результатов, в) при измерениях в естественном залегании (*in situ*) и неразрушающих испытаниях образцов процесс измерений дополнительно осложняется тем, что среда (образец) не может быть подвергнута дополнительной обработке с целью уменьшения влияния неоднородности состава, г) в различных методах опробования содержания в пробах ма-

лых объемов по «аналогии» распространяются на большие объемы, не всегда достаточно обоснованно, д) при использовании физических методов важной особенностью процесса анализа является необходимость градуировки: установления зависимости между содержанием элемента и числовой характеристикой аналитического свойства, что служит специфическим источником погрешностей.

Все отмеченное делает правомерным метрологический подход к проблеме с определением таких характеристик, как избирательность, чувствительность, пределы обнаружения и определения, сходимость и воспроизводимость, представительность, правильность и точность [2, 4, 5, 9, 10, 18].

Понятие избирательности (однозначности, специфичности) характеризует способность метода – выделить измеряемое аналитическое свойство элемента на фоне аналогичного от мешающих элементов. В ЯГФМ опробования однозначность определяется специфичностью свойств измеряемого параметра (оп-

¹ Казахстан, 050043, г. Алматы, ул. Торайғырова, 19, Университет Сuleймана Демиреля.

² Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Бекенбай батыра, 156А, Казахстанский Ядерный Университет.

ределенного элемента), заложенной в физическом процессе для определения аналитической характеристики, связанной с измеряемым параметром.

В общем случае подход заключается в оптимизации различных параметров инструментального метода для снижения влияния помех. Избирательность повышается применением более подходящего источника ядерных излучений, селективного анализатора, эффективного датчика и т.д.

Чувствительность, пределы обнаружения и определения. В ЯГФМ мерой количества определяемого элемента служит величина физического эффекта в показаниях измерительного прибора. Регистрируемый сигнал пропорционален количеству определяемого элемента. Поскольку все измерения выполняются при наличии фона, то мерой количества является разность двух сигналов.

Чувствительность – определяет способность метода измерений обнаружить с заданной надежностью или вероятностью разницу между очень малыми количествами вещества. Существует также понятие – «разрешение метода измерений», т.е. способность с заданной надежностью или вероятностью различать близкие значения измеряемой величины в рабочем диапазоне измерений. Эти понятия специальным ГОСТом не предусматриваются [5]. В проекте рекомендаций [19] понятия чувствительности и разрешения метода также отсутствуют. Даются лишь определения чувствительности и порога чувствительности для измерительного прибора. Понятия точности измерений [5] и чувствительности в рабочем диапазоне измерений практически имеют одинаковый смысл. В области малых значений концентраций введены понятия пределов обнаружения и определения [5], имеющие тот же смысл, что и порог чувствительности метода [12, 14].

Предел обнаружения характеризует способность метода обнаружить минимальное количество полезной информации (химического элемента) с надежностью, не превышающей заданную. Это практически предел, к которому нужно стремиться при разработке методики измерений. Он зависит лишь от соотношения между полезным эффектом и фоном.

Предел определения характеризует способность метода определить минимальное количество полезной информации (химического элемента) с заданной надежностью и зависит от суммарной погрешности измерений в области малых содержаний:

$$P = \frac{K \cdot \sigma_{\Sigma}}{M}, \quad \sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (1.1)$$

где P – предел определения; K – коэффициент надежности; M – величина полезного сигнала на единицу содержания; σ_{Σ} и σ_i – погрешности измерений.

Для ЯГФМ наиболее оптимальен случай, когда сумма аппаратурных, физических и технических погрешностей близка к статистической ошибке измерения фона и распределение информации при достаточно большом количестве измеряемых актов подчиняется нормальному закону:

$$\sigma_{cr}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2; \quad \sigma_{\Sigma} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{cr}.$$

В этом случае предел определения можно оценить как:

$$P = \frac{K \cdot \sqrt{2}}{J_a} \cdot \sqrt{\frac{J_{\Phi}}{t}} = \frac{K \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\eta J_a t}} \quad (1.2)$$

где J_a и J_{Φ} – интенсивности полезного сигнала на единицу содержания и фона; $\eta = J_a / J_{\Phi}$ контрастность; t – время измерения.

Окончательно величина P оценивается по сходимости результатов ЯГФМ в области забалансовых содержаний ($<0,3$ бортового для забалансовых руд) на длину единичной геологической пробы – L (1-2 м) для $t = L/V$, где V – скорость каротажа.

В радиохимии, активационном анализе используются следующие характеристики: критический уровень сигнала, на котором могут основываться решения; нижний предел детектирования, чувствительность детектирования, минимальная определяемая активность (или масса), предел гарантии чистоты. К этому нужно добавить критерии, в которых предел обнаружения принят эквивалентным фону или превышает фон на заданную величину. В работе проведена оценка различных критериев обнаружения, показано, что полученные значения составляют 1-20 стандартных отклонений фона. В ядерной геофизике

порог чувствительности обычно оценивают лишь с учетом статистической ошибки [3, 17]. Поэтому определенный интерес представляет разработка способов оценки порога чувствительности, как предела определения, при конкретном использовании измерений с учетом главных действующих факторов.

В соответствии с [5] качество измерений характеризуется сходимостью и воспроизводимостью.

Сходимость измерений – качество, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях.

Воспроизводимость измерений – качество, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в разное время, в различных местах, различными методами и средствами). Следует отметить, что для рентгеновских и гамма-гамма методов, обладающих малой глубинностью, расхождения при повторных измерениях лучше характеризовать понятием воспроизводимость, т.к. информация поступает с различных частей поверхности скважины (выносной блок датчика описывает различные образующие), что при неравномерном распределении оруденения вносит весьма существенную дополнительную погрешность за счет природной дисперсии содержаний. В то же время повторение результатов в условиях скважин для методов с большей глубинностью (активационных, нейтронных и гамма-радиационных), характеризуется понятием сходимости, т.к. информация поступает практически равномерно из окружающего объема породы, а глубинность исследований соизмерима с диаметром скважин. Поэтому при выполнении контрольных измерений в скважинах с неравномерным оруденением малоглубинными методами при оценке сходимости необходимо учитывать дисперсию содержаний по данным половины кернов. При этом дополнительным способом контроля служат измерения на специальных эталонах до и после записи диаграммы каротажа.

В опробовании понятие представительность имеет ряд толкований, сводящихся к тому, на какой геологический объем распространяется информация от пробы [18]. Для геофизического опробования существует понятие глубинности метода, за которую принимается толщина насыщенного по мощности слоя исследуемой среды, дающая 90% полезной информации [17].

Понятие глубинности отвечает представительности пробы лишь в первом толковании, когда пробы представляют собственную область замера. Для ЯГФМ глубинность изменяется от долей мм до десятков см.

В соответствии с [5] правильность результатов измерений (данных опробования) определяется как качество, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах. Оценка величины систематических расхождений проводится по сопоставлению средних значений подсчетных параметров: содержаний, мощностей и линейных запасов по ЯГФМ и геологическому опробованию. В сопоставлениях не должны участвовать данные геологического опробования, использованные ранее для получения рабочей эталонной зависимости (пересчетного коэффициента) для перевода показаний ЯГФМ в значения определяемого признака.

Оценка правильности результатов наиболее важна для относительных измерений, к которым относятся ЯГФМ. Специфичность оценки правильности результатов при опробовании в естественном залегании, в том числе и ЯГФМ, заключается в отсутствии «абсолютных» эталонов для сравнения. Принято считать, что результаты по пробам большого объема (валовым) обладают большей надежностью, чем результаты оперативных рядовых методик опробования бороздой, затиркой, горстью, с помощью извлечения керна, шлама и т.п. ЯГФМ по объемной представительности (глубинности) принадлежат к группе рядовых, оперативных.

Практика показывает, что на большинстве геологических объектов, разведемых бурением, исполнители-геофизики имеют возможность сравнивать свои результаты с данными рядового опробования керна, отвечающими определенным инструктивным требованиям к качеству исполнения (весовой выход керна не менее допустимого, обычно 70%); точность химического анализа в соответствии с допусками. Причем рядовое опробование зачастую обладает систематическими расхождениями за счет избирательных потерь материала геологических проб.

В заключительную стадию разведки результаты оперативных методов опробования, в том числе ЯГФМ, имеющих эталоном рядовое геологическое опробование, могут быть «заверены»

данными по пробам большого объема (вал, опытная отработка), если это предусмотрено проектом на разведку с целью повышения строгости оценки правильности результатов.

Месторождения с весьма неравномерным распределением полезного компонента (золото, ртуть, вольфрам и т.д.) требуют специальных исследований для обоснования надежности опробования рядовыми геологическими методами. Полученные выводы распространяются и на ЯГФМ [8, 9, 10].

В соответствии с [7] понятие точность измерений трактуется как качество, отражающее близость результатов к истинному значению измеряемой величины. Причем понятие истинного значения принимается как идеальное. В реальных условиях действует понятие действительного значения измеряемой величины, т.е. найденного экспериментальным путем и настолько приближающегося к истинному значению, что может быть использовано вместо последнего.

Точность является основной метрологической характеристикой метода измерений (методики опробования). Высокая (достаточная) точность соответствует малым погрешностям всех видов, как систематических, так и случайных. Поэтому за главный критерий при оценке точности ЯГФМ следует принять то, что их результаты на длину единичной пробы (по пределу определения, сходимости и правильности) должны быть не хуже оперативных геологических методов с близкой геометрией проб. Относительно предела определения ЯГФМ отметим следующее: предел должен обеспечить надежное ($K=2$, $V=0,95$) выделение забалансовых содержаний в единичной пробе.

ЯГФМ каротажа обладают физической однозначностью и во многих случаях решают задачу количественной оценки признака. По своей метрологической сущности они являются относительными и требуют специальных мер по градуировке, которая выполняется статистическим сравнением с кондиционным керном, с данными опробования околосвольного пространства скважин в горных выработках и с искусственными и естественными моделями – эталонами.

Зависимости между геофизическим параметром и определяемым признаком, в частности содержанием, можно рассматривать как функциональные с «шумами». Сравниваемые величины по своей природе не случайны, но измерены с некоторыми случайными и систематическими ошибками. Систематические ошибки в сравниваемых выборках должны быть учтены, а уровень случайных – сведен к разумному минимуму. Соответственно коэффициенты корреляции и корреляционные отношения должны быть близки к единице (не хуже 0,8). Лишь в этом случае градировочные зависимости могут служить для количественных определений. В каротаже практически используются одно- и двухкомпонентные зависимости. Первые – полностью или по частям аппроксимируются набором линейных функций или полиномами до 3-го порядка, вторые – решаются чаще номографически, а также с помощью эмпирических уравнений. Для оценки надежности однокомпонентной градировочной зависимости по среднему колебанию линии регрессии используется линейная связь. В общем содержание (С) и геофизический параметр (J) не случайны, но измерены с некоторыми случайным ошибками (систематические незначимы);

$$\xi = C \pm \sigma_c; \eta = J \pm \sigma_j$$

Выборочные значения случайных величин с математическими ожиданиями $M(\sigma_j) = M(\sigma_c) = 0$. Связь между η и ξ можно представить в виде:

$$(\bar{\eta} \pm \sigma_j) = (\bar{a} \pm \sigma_a) + (\bar{b} \pm \sigma_b) \cdot (\bar{\xi} \pm \sigma_c)$$

она обусловлена определенной функциональной зависимостью между неслучайными «структурными» компонентами J и C: $J = a + b \cdot c$. Запишем приближенные равенства через относительные погрешности:

$$\bar{\delta}_j = \frac{\bar{\sigma}_j}{\bar{J}} \approx \frac{\bar{\sigma}_\eta}{\bar{\eta}} = \delta_\eta; \quad \bar{\delta}_c = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{c}} \approx \frac{\bar{\sigma}_\xi}{\bar{\xi}} = \delta_\xi;$$

$$\bar{\sigma} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{J}{c} \approx \frac{\bar{\eta}}{\bar{\xi}}; \quad \bar{\delta}_e = \bar{\delta} \left(\frac{\bar{J}}{\bar{c}} \right) = \sqrt{\bar{\delta}_j^2 + \bar{\delta}_c^2} \approx \sqrt{\bar{\delta}_\eta^2 + \bar{\delta}_\xi^2};$$

$$\bar{\delta}_a \approx \bar{\delta}_{j(c=0)} \approx \delta_{\eta(\xi=0)}$$

т.к J И C измеряются независимо;

Преобразуем связь между η и ξ :

$$\bar{\eta}(1 \pm \bar{\delta}_j) = \bar{a}(1 \pm \bar{\delta}_a) + \bar{b}(1 \pm \bar{\delta}_e) \cdot \bar{\xi}(1 \pm \bar{\delta}_\xi);$$

$$\bar{\eta}(1 \pm \bar{\delta}_j) \approx \bar{a}(1 \pm \bar{\delta}_a) + \bar{b}(1 \pm \sqrt{\bar{\delta}_\eta^2 + \bar{\delta}_\xi^2}) \cdot \bar{\xi}(1 \pm \bar{\delta}_\xi),$$

откуда:

$$\bar{\xi} \approx \frac{\bar{\eta} - \bar{a}}{\bar{e}} \cdot \frac{(1 \pm \bar{\delta}_{\xi})}{(1 \pm \bar{\delta}_{\eta})(1 \pm \sqrt{\bar{\delta}_{\eta}^2 + \bar{\delta}_{\xi}^2})} \quad (1.3)$$

Полученное выражение позволяет с достаточной точностью оценить средние колебания линии регрессии при линейной аппроксимации градирковой зависимости [1]. Значения величин, входящих в (1.3) определяются из известных соотношений:

$$\bar{\eta} = \frac{\sum \eta_i}{n}; \quad \bar{\xi} = \frac{\sum \xi_i}{n}; \quad \bar{e} = \frac{\bar{\eta}}{\bar{\xi}}; \quad \bar{a} = \bar{\eta} - \bar{e} \cdot \bar{\xi};$$

$$\bar{\delta}_{\eta} = \frac{\sigma_{\eta}}{\bar{\eta}} = \pm \frac{1}{\bar{\eta}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta})^2}{(n-1)}},$$

$$\bar{\delta}_{\xi} = \frac{\sigma_{\xi}}{\bar{\xi}} = \pm \frac{1}{\bar{\xi}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi})^2}{(n-1)}},$$

При опробовании в естественном залегании вопрос правильности результатов имеет принципиальное значение (естественная боязнь систематических отклонений в подсчете запасов). Идеальных способов контроля правильности опробования практически не существует, т.к. при опробовании постоянно действует фактор неполноты информации из-за отсутствия «абсолютно правильных» эталонов, а процесс пробоотбора контролируется не полностью. Существует чисто эмпирическая иерархия «здравого смысла» в правильности результатов по пробам различной величины (валовые и групповые пробы считаются более правильными и представительными). Ведомственные руководства лимитируют лишь величину случайных и систематических погрешностей при аналитических исследованиях проб, а остальные операции, дающие как правило большие отклонения, лишь регламентируются технологически.

Для ЯГФМ с их относительной градировкой оценка правильности результатов проводится в два этапа: на первом выявляются систематические расхождения с рядовым геологическим методом керн-каротаж, борозда – геофизический замер по представительным классам (не менее 20 единичных сравнений в каждом), на втором –

в сравнении с данными «заверочного» опробования большеобъемными контрольными пробами, если специфика объекта по природной дисперсии в рядовых геологических и геофизических пробах не дает основания считать правильными данные рядового опробования. Субъективизм такого подхода очевиден, т.к. само опробование, точнее его математическая модель предусматривает решение некорректной задачи: определение характеристики целого по его частям, без знания законов изменения признака в объеме исследований. Отсюда структурно-системный подход и относительность оценок.

Для ЯГФМ в зависимости от задач и структурного уровня исследования объекта базой для оценки правильности служат результаты геологических методов, обладающие погрешностями, определенными не всегда корректно из-за неповторимости вещественных проб ввиду повышенной природной дисперсии содержаний в смежных элементарных объемах (особенно для ртути, вольфрама, золота). Из различных способов проверки правильности измерений в практике опробования получили распространение способы выявления систематических ошибок по сопоставлению результатов основного и контрольного методов. При этом полагают, что полученные контрольные результаты (геологическое опробование) не имеют систематических ошибок [6, 7, 12].

Сопоставления выполняются по группам (классам), на которые разбивается весь диапазон оцениваемых содержаний. В каждом классе результаты характеризуются близостью значений содержаний и сходимостью измерений. Систематические ошибки устанавливают, проверяя статистическую значимость различия между средними результатами по основным и контрольным измерениям в каждом классе [7]. Схема следующая:

$$\bar{d} = \bar{x} - \bar{y}; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad (1.4)$$

Надежность полученного расхождения между средними оценивают по статистике:

$$V = \frac{|d| \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \quad (1.5)$$

Таблица 1. Значения V_T статистики при доверительной вероятности 95%

n	P					
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
8	2,31	2,25	2,20	2,14	2,10	2,08
10	2,23	2,18	2,14	2,11	2,08	2,06
12	2,18	2,14	2,11	2,08	2,06	2,05
15	2,13	2,10	2,08	2,05	2,04	2,03
20	2,09	2,06	2,05	2,03	2,02	2,02
	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96

где,

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

путем сравнения V с табличным V_T для соответствующих величин

$$\text{и } P = \frac{S_1^2}{S_1^2 + S_2^2}$$

При $V < V_T$, считается, что разность d – случайна, т.е. при данном уровне случайных ошибок, значения систематических незначимы. В случае $V > V_T$ анализируют выборку на наличие членов $(x_i - y_i) > d$ и исключают из рассмотрения "промахи" по статистике:

$$\xi = \max_i \frac{|x_i - y_i - d|}{S}, \quad S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i - d)^2} \quad (1.6)$$

и оценкой ξ по таблицам для доверительной вероятности 95% в зависимости от n . При $n = 20$, $\xi \leq 62,62$.

Оперативная оценка наличия «системы» в парных наблюдениях проводится графически в координатах (x, y) .

В геолого-геофизической практике получил распространение метод выявления систематических ошибок, состоящий в определении уравнения линейной регрессии y на x (x – основные геофизические, y – контрольные геологические измерения) и в оценке существенного отличия коэффициента регрессии и свободного члена от единицы и нуля соответственно [7, 11, 12, 13]. Однако, как показано в [15] уравнение регрессии в общем случае не описывает зависимости между точными результатами измерений, следовательно, не может быть использовано для коррек-

тного выявления систематических ошибок. Действительно, сравнивая два ряда измерений: основной (X_i) и контрольный (Y_i), выполненные без случайных ошибок можно записать:

$$Y_i = \alpha_{y/x} X_i + \beta \quad (1.7)$$

Это уравнение определяет функциональное соотношение между точными результатами измерений и условием отсутствия систематических ошибок является выполнение равенств:

$$\alpha = 1, \beta = 0 \quad (1.8)$$

В случае опробования оба ряда отягощены случайными погрешностями, как основной, так и контрольный. Причем считается, что последний не имеет систематических ошибок. Задача состоит в том, чтобы определить величину и значимость систематических расхождений при данном уровне случайных ошибок в каждом сравниваемом ряде измерений. В этом случае связь между x_i и y_i может быть представлена линейным уравнением регрессии:

$$y_i = \alpha_{y/x} x_i + b_{y/x} \quad (1.9)$$

При этом, если $\sigma^2(\xi)$, $\sigma^2(\epsilon(X))$, $\sigma^2(\epsilon(Y))$ – дисперсии истинных содержаний и ошибок измерений соответственно, то дисперсии результатов измерений, коэффициенты регрессии и корреляции будут равны [27]:

$$\begin{aligned} \sigma^2(x) &= \sigma^2(\xi) + \sigma^2(\epsilon(X)), \quad \sigma^2(y) = \\ &= \sigma^2(\xi) + \sigma^2(\epsilon(Y)), \end{aligned}$$

$$\alpha_{x/y} = r \cdot \frac{\sigma(y)}{\sigma(x)}, \quad r = \alpha_{x/y} \frac{\sigma^2(\xi)}{\sigma(x) \sigma(y)}; \quad (1.10)$$

Откуда получим:

$$\alpha_{x/y} = \alpha_{x/y} \cdot \frac{\sigma^2(\xi)}{\sigma^2(x)} = \alpha_{y/x} \cdot \frac{1}{1 + K(x)},$$

где $K(x) = \frac{\sigma^2(y/x)}{\sigma^2(x)}$; (1.11)

Из (1.11) следует, что если результаты основного метода содержат случайные ошибки измерения, то $a_{y/x} \leq \alpha_{y/x} = 1$, аналогично $\beta_{y/x} = 0$, $b_{y/x} \neq 0$ т.е. при отсутствии систематических ошибок в результатах основного метода коэффициенты уравнения регрессии могут отличаться от 1 и 0. Лишь в случае, когда диапазон изменения истинных содержаний достаточно широк, а ошибки измерений незначительны, различие между (1.9) и (1.7) может быть практически незначительным ($K(x) < < 1$).

В общем случае, для определения коэффициентов (1.9) применяются методы конфлюэнтного анализа [16, 20], позволяющие анализировать априори постулируемые функциональные связи между переменными, в условиях, когда наблюдаются не сами переменные, а случайные величины. Наиболее полно разработаны способы оценки линейного соотношения, из которых интересен для оценки систематических ошибок способ нахождения коэффициентов α и β при наличии дополнительной (по отношению к двум сопоставляемым рядам) информации о характеристиках ошибок измерений [20]. Для этого по экспериментальным данным получают оценки $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ проверяют статистическую значимость различия их от 1 и 0 соответственно. Следуя [16], опишем схему оценки:

1. Имеется n пар измерений (x_i/y_i) для n проб с истинными (но неизвестными нам) содержаниями искомого элемента ξ_i .

2. Ошибки измерений распределены нормально, так что результаты измерений x_i и y_i могут рассматриваться как выборочные значения из нормальных совокупностей со средними значениями X и Y соответственно.

3. Дисперсии ошибок основных и контрольных измерений одинаково зависят от измеряемой величины или постоянны.

4. Имеется дополнительная информация: известно отношение дисперсий ошибок сопоставляемых методов:

$$\lambda(y, x) = \frac{\sigma^2(\xi(Y))}{\sigma^2(\xi(X))} = \frac{s_y^2}{s_x^2}; \quad (1.12)$$

либо одно из значений δ^2 .

Исходные статистики определяются по формулам:

$$\bar{x} = \sum_1^n x_i; \quad \bar{y} = \sum_1^n y_i;$$

$$\sum_{xx} = \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2; \quad \sum_{yy} = \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2;$$

$$\sum_{xy} = \sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}); \quad (1.13)$$

Оценки $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ определяются по формулам:

$$\hat{\alpha}_{y/x} = \beta + \sqrt{\beta^2 + \lambda},$$

$$\beta = \frac{\sum_{yy} + \lambda(y_1 x_1) \cdot \sum_{xx}}{2 \sum_{xy}} \quad \hat{\beta}_{y/x} = \bar{y} - \hat{\alpha}_{y/x} \cdot \bar{x} \quad (1.14)$$

Если известна величина ϑ_y или $\vartheta_y = 0$, то

$$\hat{\alpha}_{y/x} = \frac{\sum_{yy} - n \vartheta_y}{\sum_{xy}}; \quad \hat{\alpha}_{y/x} = \frac{\sum_{yy}}{\sum_{xy}} = \frac{1}{\hat{\beta}_{y/x}} \quad (1.15)$$

Если известна величина ϑ_x или $\vartheta_x = 0$, то

$$\hat{\alpha}_{y/x} = \frac{\sum_{yy}}{\sum_{xx} - \vartheta_x \cdot n}; \quad \hat{\alpha}_{y/x} = \frac{\sum_{yy}}{\sum_{xx}} = \hat{\beta}_{y/x} \quad (1.16)$$

где $\hat{\alpha}_{y/x}$ – оценка коэффициента регрессии y на x .

Получаемые оценки $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ являются состоятельными и несмещанными при любом характере распределения истинных содержаний в пробах и любой λ . Для оценки возможной величины невыявленной систематической ошибки следует найти доверительные интервалы для истинных значений α и β . Если эти интервалы настолько широки, что могут маскировать недопустимые по величине систематические ошибки, необходимо увеличить объем сопоставляемого материала (в разумных пределах) или усовершенствовать методику измерений [6, 16].

В соответствии с характером обсуждаемых в настоящей работе задач и практического опыта применения ЯГФМ на месторождениях Южного Казахстана метрологические требования сводятся к следующему:

1. Фторометрия высоких содержаний, определение подсчетных параметров (содержания и мощности) при разведке флюоритов. В соответствии с требованиями кондиций пласт минимальной промышленной мощности с содержанием для оконтуривания забалансовых руд должен надежно фиксироваться по мощности и содержанию

(10% CaF_2 на 2 м. интервал). Сходимость результатов повторного и контрольного Спектрометрического нейтронного активационного каротажа (СНАК) по содержаниям в промышленных классах по величине среднеквадратической ошибки должна быть меньше среднеквадратических расхождений по половинам керна в промышленных по мощности пересечениях. Правильность СНАК оценивается по массовому сравнению с данными керна, имеющего повышенный выход (в соответствии с геологическим проектом).

2. Фторометрия малых (0,2-3,3% F_2) и близких к кларковым (0,05-0,2% F_2) содержаний (фосфориты, апатиты и геохимические первичные ореолы на месторождениях). Для фосфоритов и апатитов схема подхода остается как в пункте 1, соответственно содержания фтора 1,0% и 0,28% при мощностях 3 и 10 м. т.е. при близких линейных запасах (3 и 2,8 м*%). Для непрерывных и точечных измерений главным требованием становится предел определения (не хуже 0,1% F_2).

3. Определение технологических компонент руд горно-химического сырья. Для флюоритов – CaCO_3 и SiO_2 , для фосфоритов – SiO_2 в каждой пробе и Al_2O_3 , CaO , CO_2 , MgO в подсечении или блоке. Сходимость результатов ЯГФМ по классам содержаний на длину указанных интервалов должна быть не хуже данных по сравнению этих параметров по половинам керна. Систематические погрешности оцениваются и при необходимости учитываются сравнением с результатами кернового химического опробования по опорным скважинам, имеющим кондиционный выход керна.

4. Для фторсодержащих сред с полиметаллическим, баритовым и редкометальным орудьем требования к ЯГФМ можно конкретизировать следующим образом.

В поисковых скважинах интерес представляют визуально отмечаемые в керне включения рудных минералов: вольфрамита, шеелита, галенита, сфалерита и барита. В этих случаях минимальные содержания вольфрама, свинца, цинка не превышают одну десятую и первые десятые доли процента, а барита первые проценты на длину керновой пробы (0,5; 1,0; 2,0 м). РРК должен обладать пределом определения не хуже 0,1% W_0_3 , Pb; 0,2% Zn. и 2,0 BaSO_4 с надежностью

95% на единичный интервал опробования. Для разведочных скважин РРК должен надежно выделять и количественно оценивать содержания рудных компонентов, начиная с забалансовых в единичных интервалах; для вольфрама – 0,17% W_0_3 на мощность 6 м, для полиметаллов – 0,35% Pb и 0,60% Zn на мощность 3 м, для баритов – 10% на 3 м.

5. При расчленении карбонатно-терригенно-глинистых резрезов по петрогенным составляющим – SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 и $(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$ должны быть найдены бескерновые способы однозначной оценки с пределами определения не выше 0,4% Al_2O_3 , 1% SiO_2 и первые проценты для кальцита и доломита с обеспечением градаций расчленения по Al_2O_3 , через 0,5-1%, а для других через 5%.

6. При расчленении пород разреза: по эффективному атомному номеру разрешение метода должно быть не выше 0,2 ед. в диапазоне 9,2-18 ед., по плотности надтепловых нейтронов (общее водородосодержания) в относительных условных единицах разрешение метода должно быть не выше 0,2 усл.ед., по содержанию урана, тория и калия основное внимание должно быть акцентировано на измерении малых активностей с пределами определения на интервал 5 м не выше 0,2-0,3% калия и 1·10(-6)% урана и тория.

ЛИТЕРАТУРА

- Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. М.: Металлургия, 1968. 227 с.
- Блюменцев А.М., Красноперов В.А., Ратников В.М. О терминологии ядерно-геофизических методов рудного каротажа и опробования // Ядерно-геофизические методы при поисках и разведке рудных месторождений. М.: ВНИИЯГГ, 1980. С. 196-199.
- Голданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. Физматгиз. 1959. 412 с.
- ГОСТ 16263-70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. М., 1982. 54 с.
- ГОСТ 14263-69. Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к стандартным образцам веществ и материалов. М., 1970. 8 с.
- Дэвис М. Геостатистические методы при оценке запасов руд / Пер. с англ. М., 1980. 360 с.
- Инструкция по гамма-каротажу при поисках и разведке урановых месторождений. М.: Недра, 1974. 108 с.
- Каждан А.Б. Разведка месторождений полезных ископаемых. М., 1977. 327 с.

9. Красноперов В.А. Об основных определениях опробования и метрологических характеристиках в приложении к ядерно-физическим методам каротажа // Тез. VI конф.: Математические методы при прямых поисках месторождений полезных ископаемых. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1979. С. 83-85.
10. Красноперов В.А. К вопросу оценки достоверности результатов ядерногеофизических методов опробования разрезов скважин на твердые полезные ископаемые. Изв. АН КазССР. Сер. геол. 1982, № 2. С. 80. Полностью статья депонирована в КазНИИНТИ, №322-82 Деп. 12 с.
11. Методические рекомендации МУ 41-06-027-83. Оценка достоверности опробования на месторождениях твердых полезных ископаемых. М.: Мингео СССР, НПО «Нефтегеофизика», ВНИИЯГГ, 1983. 34 с.
12. Новиков Г.Ф. Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Недра, 1965. 650 с.
13. Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе вещества. М.: Физматгиз, 1960. 431 с.
14. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.
15. Рощин Ю.В. Об использовании уравнения регрессии с целью выявления систематических ошибок при сопоставлении рядов основных и контрольных измерений. Сб. «Вопросы рудной радиометрии». Вып. 2. М., 1968. С. 108-120.
16. Рощин Ю.В. Способы конфлюэнтного анализа и выявление систематических ошибок по сопоставлению рядов измерений. Там же. С. 120-132.
17. Филиппов Е.М. Прикладная ядерная геофизика. АН СССР, 1962. 580 с.
18. Четвериков Л.И. Теоретические основы пробы // Применение математических методов при поиске полезных ископаемых. Новосибирск, 1974. С. 73-91.
19. Широков К.П. О проекте рекомендаций ВНИИМ: Основные метрологические термины и определения.- Сб.: Исследования по методике оценки погрешностей измерений, вып. 57(117).- М.-Д.: Стандартиздат, 1962. С. 101-122.
20. Turckian K.K., Wedepohl K.H. Distribution of the elements in same major units of the Earth. "The Geol. Sos. of Am." Bull., 1961, v. 72, N 2, pp. 175-191.