

На правах рукописи

Белохин Василий Сергеевич

**ОБРАБОТКА ГАММА-СПЕКТРОВ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ
КАРОТАЖА**

Специальность 25.00.10- Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Кандидат технических наук,
Калмыков Георгий Александрович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор Лухминский Борис Евгеньевич
(РГГРУ)
Кандидат физико-математических наук
Цейтлин Виктор Григорьевич (ЦМиС ООО
«Газпромгеофизика»)

Ведущая организация: ФГУП ГНЦ РФ ВНИИгеосистем

Защита состоится 27 мая 2010 года в 15⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета Д.212.121.07 в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, РГГРУ, ауд. 6-38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ

Автореферат разослан 26 апреля 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Каринский А.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность исследования. В настоящее время при геофизических исследованиях скважин широко применяются многоканальные спектрометрические ядерные методы каротажа. Наибольшее распространение получили такие спектрометрические методы, как спектрометрический гамма-каротаж (СГК) и спектрометрический импульсный нейтронный гамма-каротаж (ИНГК-С). Увеличение вычислительных мощностей ЭВМ позволяет применять для обработки исходных данных спектрометрических методов каротажа всё более сложные алгоритмы. Также сегодня можно уверенно говорить об адекватных как по точности, так и по времени модельных расчетах прямой задачи ядерной геофизики, невозможных еще несколько лет назад.

Главным требованием к обработке и интерпретации данных спектрометрических методов каротажа является точность определения концентраций элементов породы, устойчивость алгоритмов и отсутствие систематических погрешностей. Основные трудности современных методов обработки спектрометрических данных, получаемых в скважине, заключаются в специфике каротажных измерений: малое время регистрации спектров в течение кванта записи каротажа, и как, следствие, невозможность увеличения статистики измерений; изменения температуры в широких пределах и намагниченность колонны, вызывающие изменения параметров шкалы и характеристик энергетического разрешения спектрометра; отличие условий измерений в скважине от условий измерений на эталонных моделях.

Кроме того, к процессу обработки спектрометрических данных предъявляются требования автоматизации и оперативности, что немаловажно для промышленного использования.

Несмотря на широкую распространенность нейтронных спектрометрических методов, не говоря уж о спектрометрическом гамма-каротаже, существует ряд вопросов и нерешенных проблем, связанных именно с первичной обработкой спектрометрических данных.

В работах ряда авторов (Пегоев А.Н., Кадисов Е.М., Калмыков Г.А. и др.) был обоснован подход к обработке данных спектрометрических методов каротажа, основанный на разложении измеренных гамма-спектров по *базе элементарных* спектров, т.е. набору спектров отдельных элементов.

Метрологическое обеспечение СГК разработано достаточно давно, хотя, необходимо отметить, что ввиду особенностей создания метрологических моделей для метода СГК, в основу этого обеспечения было положено понятие *стандартного* спектра, отличающегося от элементарного, наличием излучения всех остальных элементов. Для импульсных спектрометрических нейтронных гамма-методов система метрологии находится в состоянии развития. Получение необходимого набора базовых спектров на моделях практически

невозможно, что, в свою очередь, привело к задаче получения элементарных спектров базы расчетным путем методами математического моделирования. Расчеты элементарных спектров для различных геолого-технических условий методами математического моделирования стали доступными для использования в геофизике лишь недавно (Кадисов Е.М., Лухминский Б.Е., Поляченко А.Л., Тепляков А.В. и др.).

Развитие вычислительной техники также позволило использовать для решения задач обработки спектрометрических данных гамма-каротажа более ресурсоемкие алгоритмы, обладающие рядом дополнительных преимуществ, в первую очередь, возможность поиска решения с ограничениями.

В результате, в условиях современного развития ядерных методов каротажа, стали актуальными задачи разработки новых методик и алгоритмов обработки гамма-спектров.

Цель работы. Создание методики обработки многоканальных гамма-спектров, измеренных в процессе ядерного каротажа, для расчета концентраций элементов с минимально возможными систематическими ошибками.

Для достижения поставленной выше цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать влияние выбора базовых гамма-спектров на результаты разложения с ограничениями измеренных спектров.
- Разработать алгоритм разложения с ограничениями измеренных многоканальных гамма-спектров по элементарным спектрам, полученным при обработке измерений на метрологических моделях или в результате имитационного моделирования.
- Исследовать влияние расхождения энергетических шкал и энергетического разрешения измеренных и базовых спектров на результаты разложения.
- Разработать методику аппроксимации многоканальных энергетических гамма-спектров.
- Разработать алгоритм автоматической энергетической калибровки многоканальных гамма-спектров.
- Разработать алгоритм изменения разрешения многоканальных гамма-спектров как измеренных в скважине, так и полученных на моделях, для наилучшего взаимного согласования.

Научная новизна:

- На количественном уровне исследовано влияние энергетического разрешения, согласования энергетических шкал, неэлементарности базовых спектров на результаты разложения измеренных гамма-спектров.
- Обосновано применение разложения измеренных энергетических спектров на элементарные методом квадратичного программирования с учетом ограничений.
- Обоснована методика аппроксимации многоканальных гамма-спектров квадратичным сплайном для их трансформации.
- Разработан метод автоматического согласования шкал и энергетической калибровки измеренных спектров с использованием базы спектров и поиском минимума невязки методом Хука-Дживса.
- Разработан алгоритм согласования разрешения энергетических спектров и поиска минимума невязки модифицированным методом «золотого сечения».

Защищаются следующие научные положения и результаты:

Предложенный алгоритм разложения измеренного энергетического гамма-спектра на элементарные спектры методом квадратичного программирования с ограничениями реализует несмещенность оценки концентраций элементов.

Алгоритм автоматического согласования шкал энергетических гамма спектров, измеренных сцинтилляционным детектором, основанный на использовании базы элементарных спектров и минимизации квадрата невязки методом Хука-Дживса, реализует несмещенность оценки концентраций элементов.

Алгоритм согласования энергетического разрешения гамма-спектров и соответствующая методика, основанные на решении прямой инструментальной задачи модифицированным методом «золотого сечения» поиска минимума квадрата невязки, позволяет повысить качество обработки и интерпретации данных ядерного каротажа.

Практическая ценность

На базе разработанных алгоритмов создан программно-методический комплекс (ПМК) «NewWork», позволяющий проводить обработку первичных данных спектрометрических методов каротажа, таких как СГК, ИНГК-С.

Результаты работы использованы при создании программно-методического комплекса «NewWork» (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009611480).

Результаты исследования докладывались на:

Научно-практической конференции «Ядерная геофизика 2002», г. Тверь, 2002 г.,

Межотраслевой научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», г. Москва, 26-30 мая 2003 г.,

Международной конференции «Новые идеи в науках о земле», г. Москва, 2003 г.,

Научно-практической конференции «Ядерная геофизика 2004», всероссийского научно-практического семинара «Состояние петрофизического обеспечения ядерно-геофизических, акустических и других методов ГИС», г. Санкт-Петербург, 2004 г.,

Третьей научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений», г. Уфа, 13-15 апреля 2010 г., также регулярно на научно-технических советах ТНГФ, ННГФ.

Внедрение результатов исследования:

ПМК «NewWork» передано для использования в следующие организации: ОАО «Нижневартовскнефтегеофизика», ОАО «Сургутнефтегеофизика», ООО «Деко-Геофизика» для обработки спектрометрических методов каротажа. Применение «NewWork» на данных предприятиях позволило повысить качество обработки и интерпретации данных ГИС, что подтверждено сравнительными испытаниями.

Фактический материал

В работе использовались материалы каротажа СГК, спектрометрического ИНГК (ОАО «Нижневартовскнефтегеофизика»), метрологические измерения на натуральных моделях, спектры рассчитанные методом Монте-Карло (ООО НГТК «КЕРН»).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 6 статей в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 127 машинописных

страниц, из них 112 страниц основного текста, 52 рисунка, 8 таблиц. Список литературы включает 130 наименований.

Благодарности

Автор искренне благодарит своего научного руководителя Г.А. Калмыкова. Выражаю признательность А.Г.Амурскому, С.Ю.Антропову, А.М.Блюменцеву, В.М.Бондаренко, А.А.Винокурову, Л.Н.Воронкову, Н.К.Глебочевой, Е.М.Кадисову, А.Л.Керзину, С.И.Копылову, К.В.Короткову, В.В.Миллеру, С.А.Моисееву, А.А.Никитину, А.В.Петрову, А.Л.Поляченко, В.В.Тарасову, В.М.Теленкову, А.В.Теплякову, Р.И.Юсупову, а также сотрудникам ООО НТФ «ГЕОКОН-М», лаб. №3 ВНИИгеосистем, метрологического центра ОАО «Газпромгеофизика», плодотворное сотрудничество с которыми способствовало решению поставленных перед автором задач. Автор отдельно благодарит Н.Л.Кашину за поддержку в выполнении и оформлении данной работы, А.А.Старцева за неоценимую помощь и научные консультации, Г.М.Тотева и Е.В.Решетова за помощь в программной реализации предложенных алгоритмов, а также всех тех, кто содействовал выполнению этой работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дается общая характеристика диссертационной работы: обосновывается актуальность, теоретическая и практическая значимость темы исследования; формируются цель, задачи, предмет исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Обзор методов спектрометрического ядерного каротажа скважин» автор приводит обзор развития спектрометрических ядерных методов каротажа, характеристик аппаратуры и метрологии СГК и спектрометрического ИНГК, анализ методик и алгоритмов обработки спектрометрических данных каротажа.

Существует ряд программных комплексов, обрабатывающих спектрометрические данные, как полученные в результате каротажа, так и при лабораторных измерениях. К наиболее известным отечественным программным комплексам, ориентированным на обработку каротажа, следует отнести программы МАРКА (ООО НГТК «КЕРН»), LogPWin (ООО «Нефтегазгеофизика»), "Анализатор спектров" (ОАО «Тюменьпромгеофизика»), ПО «ПетроАльянс» (А.В. Тепляков), а к лабораторным комплексам - «Прогресс» (ЗАО «Амплитуда»), «Спектр» (ООО "Радиационно Безопасный Продукт" (РБП)).

В каждой из них, в той или иной мере реализованы алгоритмы обработки спектрометрических данных, такие, как энергетическая калибровка спектров, разложение измеренного спектра на базовые и др.

Дискретный энергетический гамма-спектр Ω_i принято рассматривать как последовательность значений интеграла в пределах i -ого энергетического диапазона (e_i, e_{i+1}) от непрерывной функции распределения энергии $f(e)$ гамма-кванта, регистрируемого спектрометром:

$$\Omega_i = \int_{e_i}^{e_{i+1}} f(e)de, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

где i – номер энергетического канала, n – общее количество каналов спектрометра.

Обработка энергетических гамма-спектров базируется на решении уравнения спектрометрии, основанное на принципе суперпозиции, т.е. представлении гамма-излучения, регистрируемого в процессе измерений, в виде суперпозиции гамма-излучений от отдельных элементов:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^k q_j s_i^j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}, \quad (2)$$

где s_i^j - дискретные элементарные спектры j -ого элемента, т.е. спектры, полученные в результате излучения гамма-квантов одним элементом, k – количество излучающих элементов. Вклад каждого элементарного спектра в общий спектр Ω_i пропорционален q_j - количественной характеристике источника излучения.

Таким образом, задача многоканальной спектрометрии в общем случае сводится к решению переопределенной системы уравнений (2), с целью получения количественных характеристик содержания элементов в породе.

Несмотря на постоянное усовершенствование аппаратуры и методики, остается актуальной проблема уменьшения ошибок определения концентраций элементов породы по данным каротажа. Основные причины возникновения вышеуказанных ошибок подробно рассмотрены в работах А.Н. Пегоева. В работе «Практические приемы обработки данных в прикладной гамма-спектрометрии» (Гидрометеиздат. 1980 г.) А.Н. Пегоев приводит список основных погрешностей гамма-спектрометрических методов каротажа:

«Фундаментальной и принципиально неустранимой причиной погрешностей всех радиометрических измерений является статистика отсчетов при регистрации количества квантов.

Прочие источники погрешностей определения содержаний можно разбить на несколько групп:

1. Нестабильность параметров шкалы или ошибки оператора ...
2. Неточности, связанные с использованием эталонов и констант ...
3. Использование приближенных уравнений для описания зависимостей измеряемых величин от изучаемых характеристик ...

4. Отклонение от номинальных условий физических свойств исследуемого объекта и окружающих тел ...»

Исходя из вышесказанного, можно выделить несколько основных этапов обработки данных многоканальной гамма-спектрометрии.

Один из самых важных этапов обработки многоканальных гамма-спектров - это энергетическая калибровка и согласование шкал измеренного и базовых спектров. В виду того, что каротажные измерения проходят в сложных, динамически изменяющихся условиях (температурный фактор, намагниченность колонны и пр.), происходит изменение характеристик шкалы спектрометра. Обработка гамма-спектров без применения дополнительных мер по калибровке и согласованию шкал сильно осложнена, а получение адекватных результатов практически невозможно. Этот факт не раз отмечался в работах многих авторов (Пегоев А.Н., Крампит И.А., Никитин А.А. и др.). Поскольку калибровка многоканальных спектров лежит в основе любых операций с ними, то к ней предъявляются самые строгие требования.

По тем же причинам (нестабильность аппаратуры) изменяется разрешение спектрометра, что приводит к появлению дополнительных ошибок. Разработка методов согласования разрешений измеренных и базовых спектров позволит уменьшить эти ошибки.

Завершительным этапом обработки первичных данных многоканального гамма-каротажа является разложение измеренных спектров по базовым спектрам, полученным либо на моделях с известными концентрациями, либо рассчитанных посредством математического моделирования. При разложении необходимо использовать дополнительную информацию, позволяющую уменьшать систематические ошибки и увеличивать устойчивость результата, что накладывает на математические методы разложения ряд требований.

Исходя из этого, очевидны задачи адаптации уже известных и разработки новых алгоритмов обработки спектрометрических данных для повышения информативности и корректной обработки многоканальных гамма-спектров, измеренных в процессе спектрометрического каротажа, а также с целью уменьшения систематических ошибок определения концентраций элементов породы, а именно:

- Разложения измеренных спектров на базовые.
- Согласования энергетических шкал измеренных и базовых спектров.
- Согласования энергетических разрешений измеренных и базовых спектров.

Решению этих проблем посвящена работа автора.

Вторая глава «*Методика разложения многоканальных гамма-спектров на элементарные методом квадратичного программирования с ограничениями*» посвящена созданию методики разложения энергетических гамма-спектров, измеренных в результате каротажа, методом квадратичного программирования с ограничениями на элементарные спектры. Обосновывается использование элементарных спектров для обработки СГК, позволяющая определять концентрации радиоактивных элементов с минимальной систематической погрешностью в условиях ярко выраженного преобладания одного элемента над другими (баженовская свита и др.).

Основное уравнение спектрометрии (2) представляет собой переопределенную систему линейных алгебраических уравнений, решение которой основано на минимизации квадратичной невязки R :

$$R = \sum_{i=1}^n p_i^2 \left(\Omega_i - \sum_{j=1}^k q_j s_i^j \right)^2, \quad (3)$$

где p_i – весовые множители, k – количество источников излучения, n – количество каналов спектрометра. Квадратичная невязка в выражении (3) представляет собой квадратичную форму относительно q_j . Для поиска решения уравнения (2) автором предлагается использовать методы нелинейного квадратичного программирования, основанного на минимизации квадратичной формы. В матричной форме уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$\mathbf{S}\mathbf{q} = \mathbf{\Omega}, \quad (4)$$

где \mathbf{S} – матрица $k \times n$, столбцами которой являются базовые спектры, \mathbf{q} – столбец k -мерный столбец искомым концентраций, $\mathbf{\Omega}$ – n -мерный столбец – измеренный спектр. Тогда уравнение (3) можно записать следующим образом:

$$R = \mathbf{\Omega}^T \mathbf{P} \mathbf{\Omega} - \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{\Omega} \mathbf{q} + \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{S} \mathbf{q}, \quad (5)$$

где \mathbf{P} – диагональная матрица весов размера $n \times n$. Учитывая, что $\mathbf{\Omega}^T \mathbf{P} \mathbf{\Omega}$ – константа для измеренного вектора, задача поиска решения системы (4) путем минимизации (5), может быть сведена к задаче квадратичного программирования:

$$\mathbf{g}^T \mathbf{q} + \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{H} \mathbf{q} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где k -мерный вектор $\mathbf{g}^T = -\mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{\Omega}$ и матрица $k \times k$ $\mathbf{H} = \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{S}$, с дополнительными условиями, вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_1 \mathbf{q} &= \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{G}_2 \mathbf{q} &\geq \mathbf{g}_2, \end{aligned}$$

где $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2$ – матрицы коэффициентов, $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2$ – столбцы условий, в частности, условие неотрицательности решения:

$$\mathbf{q} \geq 0. \quad (7)$$

В данной работе, для решения задачи (6) с условием (7) используется метод Пауэлла (M.J.D.Powell), реализованный в стандартной библиотеке IMSL.

Использование методов разложения с ограничениями накладывает дополнительные условия на метрологическое обеспечение, а именно, требует использования при разложении элементарных спектров. В частности, использование стандартных спектров при разложении с условием неотрицательности концентраций измеренного спектра естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) в отложениях баженовской свиты, характеризующейся повышенным содержанием урана, приводит к завышению концентраций калия и тория.

Если для метрологического обеспечения спектрометрического ИНГК-С, получаемого в результате математического моделирования элементарных спектров отдельных химических элементов в процессе расчетов, вышеупомянутое условие выполняется автоматически, то для метрологического обеспечения СГК необходимо рассчитывать элементарные спектры из измеренных на моделях ЕРЭ.

В частности, для получения каждого стандартного спектра СГК используется модель пласта, содержащая смесь изотопов К, U, Th со значительным превышением концентраций одного элемента над другими. Таким образом, стандартные спектры включают в себе излучение всех элементов смеси. В ряде случаев использование стандартных спектров в качестве базовых может приводить к появлению систематической ошибки определения концентраций ЕРЭ.

В работе описывается процедура формирования базы элементарных спектров из спектров стандартных, измеренных в моделях ЕРЭ, использование которой при разложении измеренного спектра методом квадратичного программирования с ограничениями дает несмещенную оценку концентраций ЕРЭ в породе.

В третьей главе «Методы энергетической калибровки и согласования шкал, многоканальных гамма-спектров ядерного каротажа» рассматриваются алгоритмы аппроксимации многоканальных гамма-спектров квадратичным сплайном, автоматической калибровки и согласования энергетических шкал гамма-спектров.

Исходя из уравнения спектрометрии (2), очевидно, что для получения концентраций необходимо, чтобы измеренный гамма-спектр и все элементарные спектры базы имели одну и ту же энергетическую шкалу, т.е. энергетические диапазоны (e_i, e_{i+1}) , соответствующие i -му дискретному каналу спектров совпадали. Однако измерение спектров в скважине и в калибровочных устройствах сопряжено с влиянием ряда факторов, и, в первую очередь, с изменением температуры окружающей среды в скважине и на моделях, а также аппаратными особенностями, например, наличием регулировок. Эти факторы

приводят к тому что, коэффициент сжатия-растяжения и сдвиг нуля энергетической шкалы при измерениях в скважине и в калибровочных устройствах отличаются. В результате скорость счет импульсов Ω_i в одних и тех же каналах будет соответствовать различным энергетическим интервалам. На рисунке 1 приведен типичный пример измеренного спектра и спектра **восстановленного**, т.е. спектра, полученного суммированием базовых спектров с коэффициентами q_j , найденными при решении уравнения (2). Видно, что характерные пики калия (энергия – 1,461 МэВ, канал - 225) и тория (энергия – 2,615 МэВ, канал - 610) на измеренном спектре находятся существенно левее, чем соответствующие пики на восстановленном спектре.

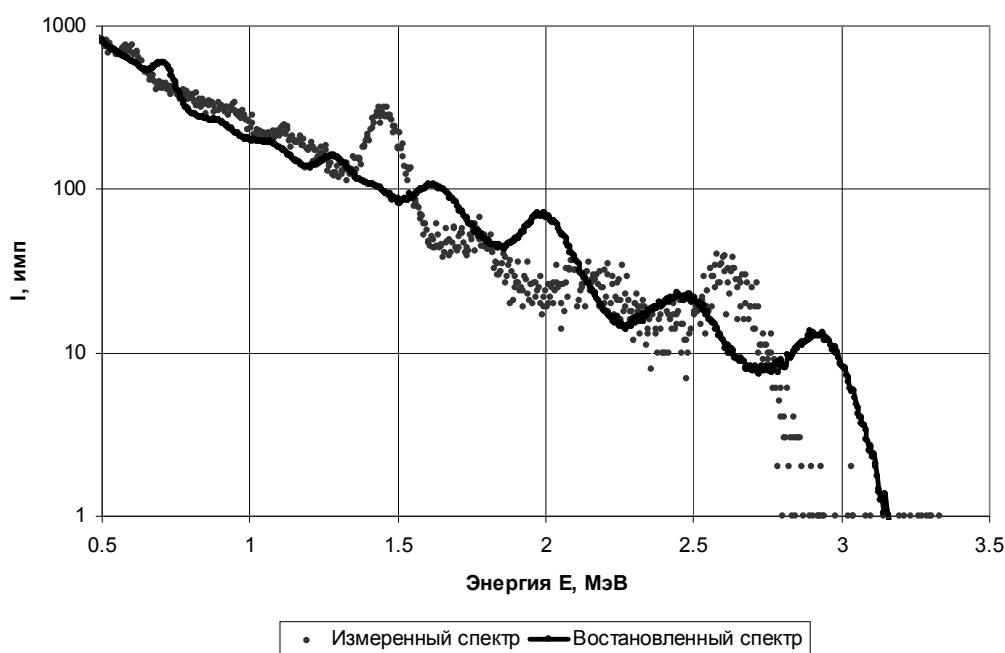


Рисунок 1 - Измеренный и восстановленный спектры СГК без согласования энергетических шкал

На основании анализа скважинных измерений выяснилось, что энергетическая шкала спектрометра в процессе каротажа может изменяться на десятки и более кэВ (по положению пика калия) и значительно отличаться от шкалы базовых спектров.

С целью оценки влияния различий энергетических шкал измеренных и элементарных спектров на значения определяемых концентраций, было проведено имитационное моделирование с использованием спектров, измеренных в Государственных Стандартных Образцах (ГСО) ЕРЭ. Для этого был синтезирован спектр, моделирующий измеренный, путем суммирования элементарных спектров с единичными коэффициентами, что позволило точно определять ошибки в значениях концентраций ЕРЭ и избавиться от ошибок, связанных со статистической обусловленностью измеренных спектров. Затем, путем деформации синтезированного спектра таким образом, чтобы положение пика калия синтезированного спектра не совпадало с положением пика калия

элементарного спектра калия на различное число энергетических каналов (ноль шкалы был зафиксирован), был получен ряд спектров, несогласованных с элементарными спектрами по энергии. Результаты разложения деформированных спектров приведены на рисунке 2.

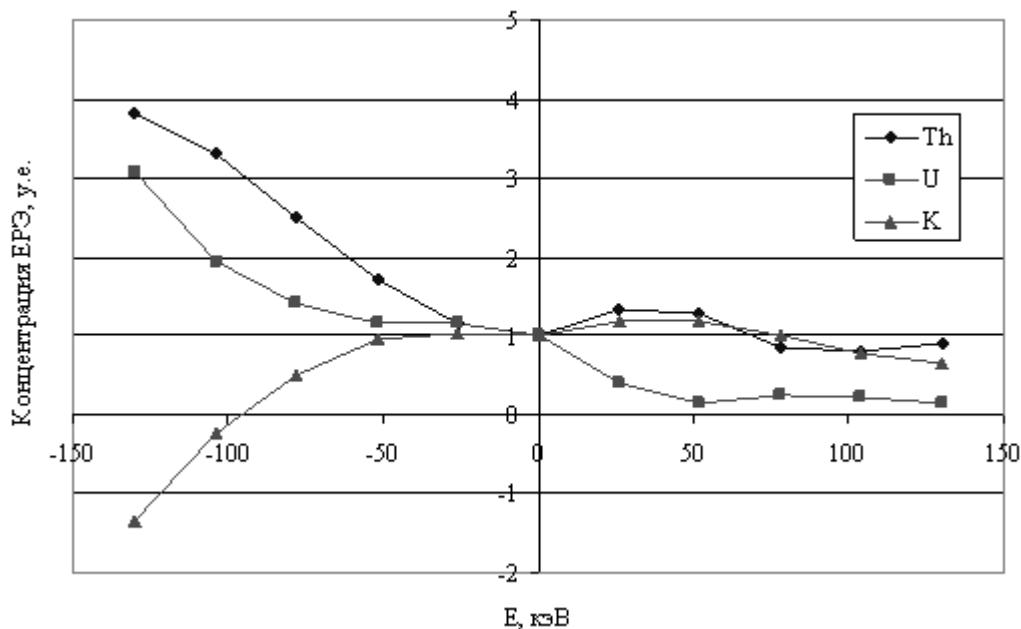


Рисунок 2 - Условные концентрации K, Th и U, полученные при разложении синтезированного спектра с измененными параметрами калибровки в зависимости от смещения положения пика калия

Эти результаты наглядно показали, что без адекватной системы согласования шкал измеренного и элементарных спектров проведение разложения приводит к появлению значительных систематических ошибок в определении концентраций ЕРЭ.

Принципиально применяются два основных типа калибровки: ручная (по двум и более известным пикам) и автоматическая (с использованием калиброванной базы спектров).

Калибровка с использованием двух и более пиков недостаточно точна, поскольку энергия пика задается дискретно, то есть с точностью до одного канала. Также необходимо отметить возможные ошибки оператора.

Алгоритм автоматической калибровки, предлагаемый автором, базируется на использовании откалиброванной, согласованной базы гамма-спектров и позволяет избежать всех вышеперечисленных недостатков.

Задача, по сути, сводится к нахождению минимума функции $R(u, v)$ двух переменных v – параметра смещения нуля и u – параметра сжатия-растяжения энергетической шкалы:

$$R(u, v) = \sum_{i=1}^n \left(\Omega_i - \sum_{j=1}^k q_j s_i^j(u, v) \right)^2 \quad (8)$$

где q_j – коэффициенты разложения, $s_i^j(u, v)$ – базовые спектры, полученные при деформации с параметрами u и v .

Для поиска минимума невязки используется метод Хука-Дживса. Последовательность шагов работы алгоритма показана на рисунке 3.

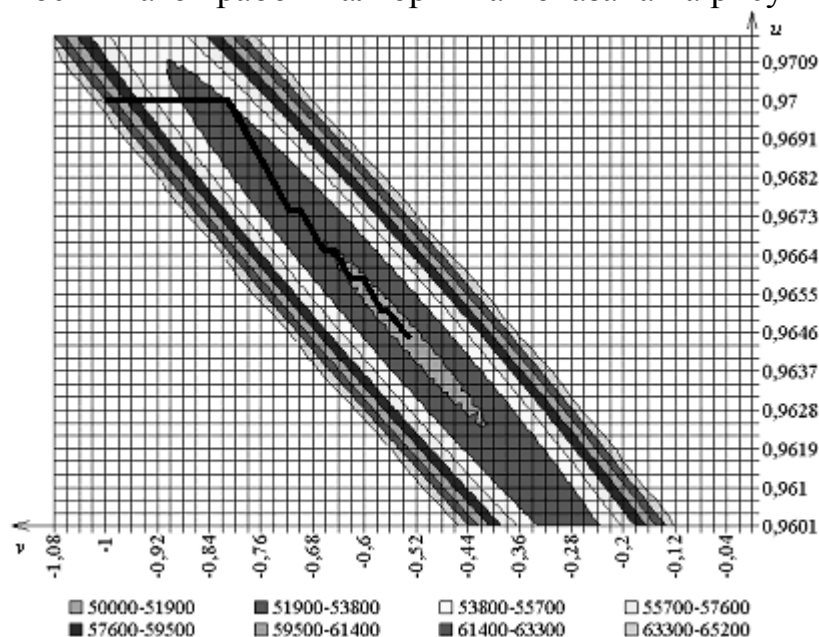


Рисунок 3 - Функция невязки в зависимости от u и v и линия поиска экстремума (черной линией отмечен ход работы алгоритма)

Поскольку при согласовании энергетических шкал спектры приходится трансформировать, необходимо перейти от дискретного спектра Ω_i к непрерывной функции, аппроксимирующей Ω_i . В работе предлагается и обосновывается использование для аппроксимации измеренного спектра квадратичного сплайна $\Psi(e)$:

$$\Psi_i(e) = c_i^{(0)} + c_i^{(1)}(e - e_i) + c_i^{(2)}(e - e_i)^2, \quad (9)$$

где $e \in [e_i, e_{i+1}]$, $i=1..n$, $c_i^{(0)}, c_i^{(1)}, c_i^{(2)}$ – коэффициенты сплайна, который удовлетворяет условию нормировки:

$$\Omega_i = \int_{e_i}^{e_{i+1}} \Psi_i(e) de, \quad (10)$$

непрерывности $\Psi(e)$ и ее первой производной $\Psi'(e)$ в узлах сетки:

$$\begin{aligned} \Psi_i(e_{i+1}) &= \Psi_{i+1}(e_{i+1}), i = \overline{1, n-1} \\ \Psi'_i(e_{i+1}) &= \Psi'_{i+1}(e_{i+1}), i = \overline{1, n-1} \end{aligned} \quad (11)$$

и двум граничным условиям:

$$\begin{aligned} \Psi'_1(e_1) &= 0 \\ \Psi'_n(e_{n+1}) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В работе приводятся обоснования адекватности сплайн-аппроксимации дискретного гамма-спектра и показывается большая, по отношению к линейно-постоянной, точность.

Рисунок 4 иллюстрирует результат работы предложенного алгоритма согласования энергетических шкал измеренных и базовых спектров с использованием квадратичной сплайн-аппроксимации.

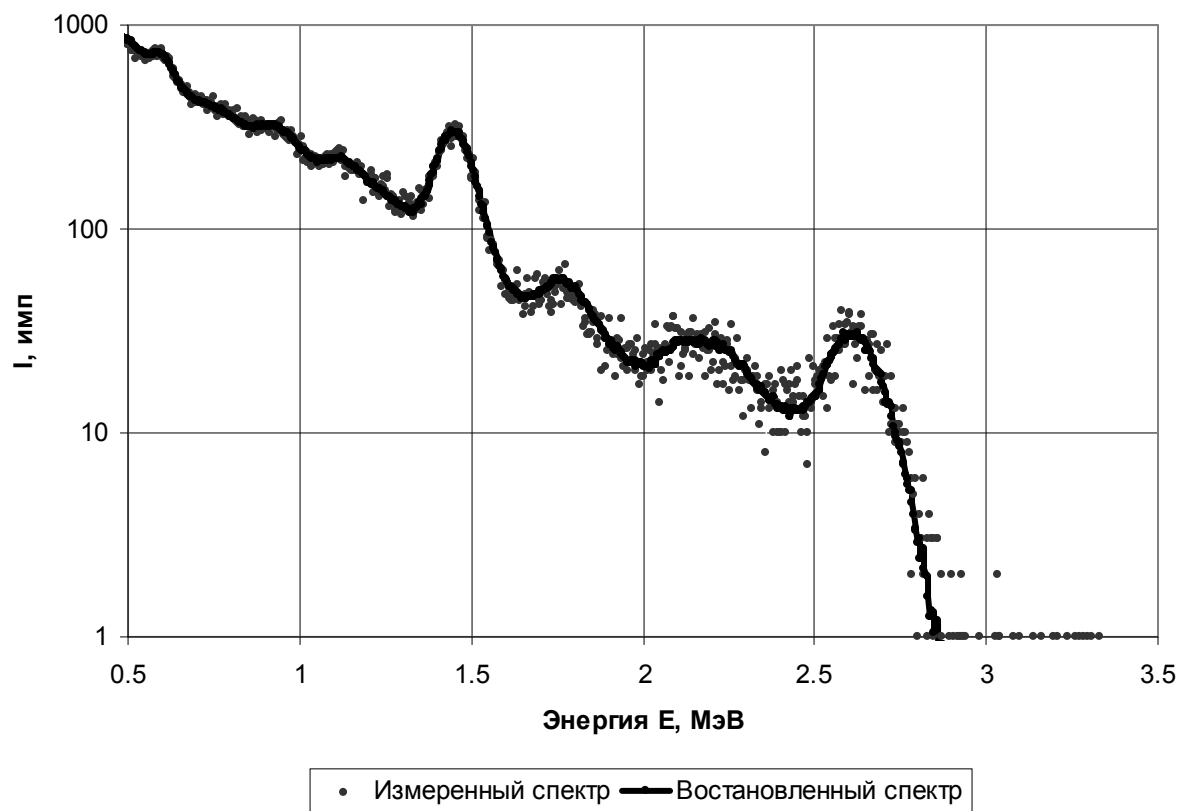


Рисунок 4- Измеренный и восстановленный спектры СГК после использования алгоритма согласования энергетических шкал

После получения при согласовании энергетических шкал измеренного спектра и базы элементарных откалиброванных спектров параметры u и v , производится автоматическая энергетическая калибровка измеренных гамма-спектров, исходя из калибровочных параметров базовых спектров.

Предложенный в данной главе автором алгоритм автоматического согласования энергетических шкал был реализован в виде программного модуля, применение которого к большому числу скважинных данных показало стабильность работы алгоритма.

В четвертой главе «Согласование энергетического разрешения гамма-спектров» описывается и обосновывается алгоритм автоматического согласования энергетических разрешений измеренных и базовых многоканальных гамма-спектров.

В случае СГК спектры, измеренные одним прибором, но в разное время и при различных условиях измерения, часто отличаются энергетическим разрешением, что связано с тем, что разрешение спектрометра является функцией многих параметров, в основном, температуры.

С другой стороны, элементарные спектры, полученные методом математического моделирования (Монте-Карло) для метрологического обеспечения ИНГК-С, как правило, линейчатые, т.е не учитывают конечного разрешения детектора, но, при известной зависимости величины разрешения прибора от энергии, имеется возможность приведения их к аппаратному виду. Такой подход позволяет не проводить повторные расчеты при изменении разрешения спектрометра.

В работе проводится анализ влияния несогласованности разрешения измеренных и базовых спектров на результат разложения, оценивается величина соответствующих погрешностей, показывается их значимость и актуальность решения задачи согласования энергетических разрешений измеренного и базового спектров.

Многоканальный энергетический аппаратный гамма-спектр $\Omega(E)$, т.е. спектр, зарегистрированный с учетом конечного разрешения спектрометра, может быть записан в следующем виде:

$$\Omega(E) = \int_0^{\infty} \omega(E)K(\varepsilon, E)d\varepsilon, \quad (13)$$

где E – энергия линии излучения, ε – энергия, $\omega(E)$ - гамма-спектр без учета разрешения детектора, $K(\varepsilon, E)$ - функция линии спектрометра:

$$K(\varepsilon, E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(E)} \exp\left(-\frac{(E-\varepsilon)^2}{2\sigma^2(E)}\right), \quad (14)$$

а для функции $\sigma(E)$, характеризующей разрешающую способность спектрометра можно записать:

$$\sigma(E) = \frac{\sqrt{\alpha + \beta E}}{2.35},$$

где α и β – параметры.

Принципиально возможно, решая уравнение (13), получить спектр с меньшим разрешением. Однако проведенные автором исследования показали, что подобный подход к решению проблемы согласования разрешения энергетических гамма-спектров обладает рядом недостатков. В частности, решение уравнения Фредгольма I-го рода (13) с ядром (14) является крайне неустойчивым, сильно зависит от граничных условий и требует больших вычислительных затрат. Также, в случае спектрометрического ИНГК-С, когда базовые элементарные спектры получены в «идеальном», с точки зрения разрешения, виде, т.е. линейчатом, решать обратную задачу подгонки разрешения измеренного спектра не имеет смысла. Согласование сводится, наоборот, к прямой задаче, т.е. поиску величин разрешения базовых спектров, соответствующих разрешению спектров, измеренных путем увеличения энергетического разрешения базовых спектров.

В работе предлагается подход к решению задачи согласования энергетических разрешений, основанный на решении прямой инструментальной задачи: даны элементарные энергетические гамма-спектры, рассчитанные методами математического моделирования, энергетическое разрешение которых выше разрешения спектров, полученных в скважинных условиях. Необходимо изменить (увеличить) разрешение элементарных спектров таким образом, чтобы оно соответствовало разрешению измеренных в скважине.

Увеличение разрешения спектров производится в результате свертки исходного сигнала с аппаратной функцией вида (14).

Таким образом, задача согласования энергетических разрешений спектров в случае увеличения разрешения сводится к поиску параметров α и β , таких, при которых измеренный и восстановленный из элементарных (с увеличенным разрешением) в результате разложения максимально точно совпадут в смысле минимума квадрата невязки.

Автором предлагается алгоритм, позволяющий проводить в автоматическом режиме согласование энергетического разрешения. Пример результата работы алгоритма приводится на рисунке 5.

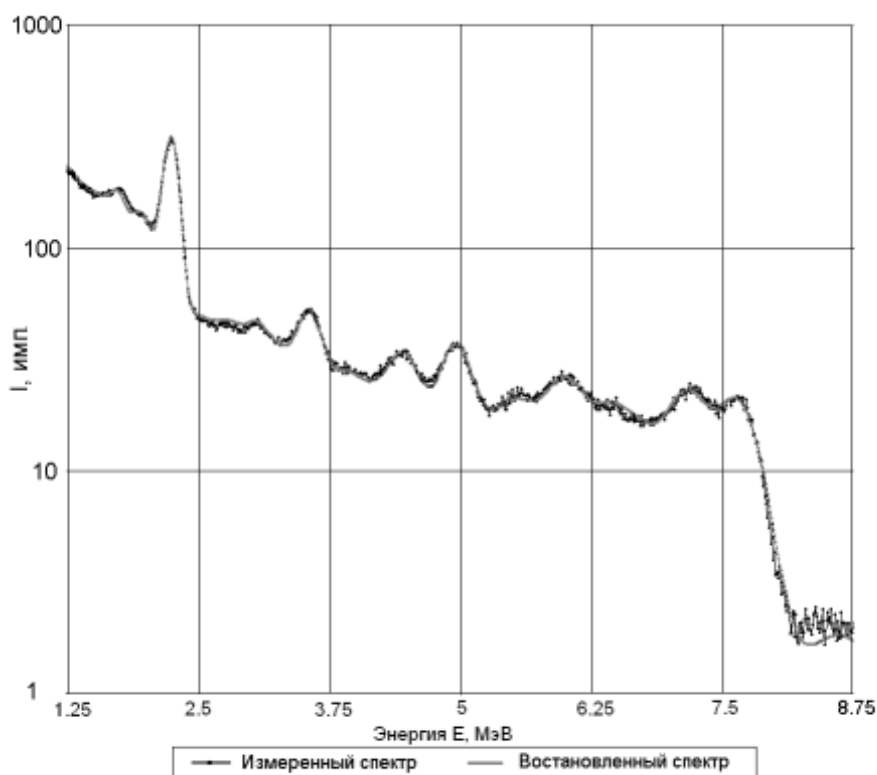


Рисунок 5 - Сопоставление измеренного спектра и восстановленного после разложения на элементарные спектры, подогнанные по разрешению

Что касается СГК, базовые спектры которых измеряются с конечным разрешением на моделях, то проведенный анализ данных измерений спектров в ГСО ЕРЭ и более 200 скважинах показали, что получаемые «модельные»

разрешения в подавляющем большинстве случаев выше, чем у спектров, измеренных этой же аппаратурой, но в скважинных условиях. Тем самым было показано, что согласование энергетического разрешения измеренных и базовых спектров, может быть проведено без использования решения обратной задачи.

В пятой главе «Общая схема обработки спектрометрических данных каротажа» исследуется взаимовлияние несогласованности энергетической шкалы и энергетического разрешения измеренных спектров и спектров базы при проведении процедуры калибровки и согласования разрешений. Показывается возможность проведения автоматического согласования энергетических шкал при неоптимальных параметрах разрешения и последующем согласовании разрешений.

Как было показано выше, при обработке спектрометрических данных каротажа на результат разложения измеренных спектров по спектрам базы, большое влияние оказывают одновременно два важнейших фактора: согласование спектров по энергии и по энергетическому разрешению. В предыдущих главах были предложены методы и обоснована эффективность согласования энергетических спектров и энергетических разрешений измеренных спектров и спектров базы отдельно. В принципе, можно построить алгоритм, позволяющий проводить одновременно согласование этих параметров, но данный подход сильно усложнит задачу, т.к. будет необходимо искать минимум невязки (или другой целевой функции) от четырех параметров, что приведет, во-первых, к проблемам при поиске начального приближения, и во вторых, сложностям разработки метода поиска минимума целевой функции.

Автором предлагается использовать последовательный, отдельный поиск оптимальных параметров при согласовании, как шкал, так и энергетического разрешения. Для обоснования данного подхода проведен численный эксперимент, направленный на выяснение влияния энергетического разрешения на процесс калибровки энергетических спектров (см. рисунок 6).

В результате была показана принципиальная возможность проведения процедуры согласования энергетических шкал с некоторыми неоптимальными параметрами разрешения и независимость определения параметров калибровки от разрешения. Опробование показало, что предложенный подход позволяет получить с достаточной точностью параметры согласования энергетических шкал, и построение итерационной схемы не требуется.

В работе предложена и обоснована следующая общая схема обработки спектрометрических данных каротажа с целью получения концентраций элементов, которую можно представить в виде следующей последовательности:

1. Энергетическая калибровка измеренных спектров по спектрам базы.
2. Согласование энергетического разрешения измеренных спектров со спектрами базы.

3. Разложение измеренных спектров по базе элементарных спектров, согласованных по энергетической шкале и энергетическому разрешению.

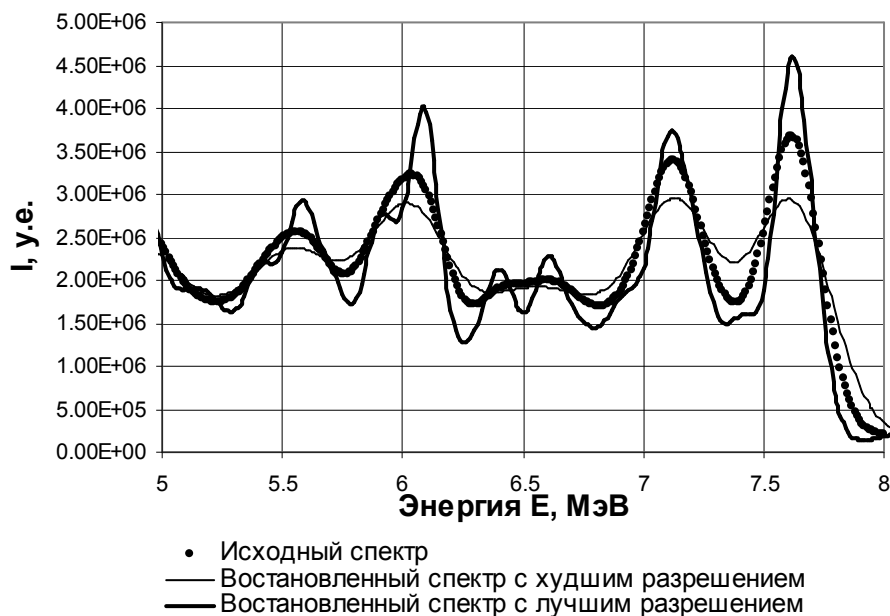


Рисунок 6 - Результаты согласования шкал при различных параметрах энергетического разрешения (Спектр ГИРЗ)

Предложенная автором схема обработки спектрометрических данных ядерных методов каротажа, основанная на разработанных алгоритмах, была реализована в программном комплексе обработки ИНГК-С и СГК. Многочисленные сравнения с результатами исследований на керновом материале показали высокую эффективность и хорошую устойчивость предложенных автором алгоритмов и подходов к обработке спектрометрических данных каротажа.

Заключение

В результате работы над диссертацией автором были:

Исследовано влияние неэлементарности базовых гамма-спектров на результаты разложения с ограничениями измеренных спектров.

Разработан алгоритм разложения с ограничениями измеренных многоканальных гамма-спектров по элементарным спектрам, полученным на моделях или в результате имитационного моделирования.

Исследовано влияние согласования энергетических шкал измеренных и базовых спектров на точность и несмещенность оценки концентраций элементов.

Исследовано влияние согласования энергетического разрешения измеренных и базовых спектров на результаты разложения энергетических гамма-спектров.

Разработана методика аппроксимации дискретных энергетических гамма-спектров.

Разработан алгоритм автоматической энергетической калибровки многоканальных гамма-спектров.

Разработан алгоритм изменения разрешения многоканальных гамма-спектров как измеренных в скважине, так и полученных на моделях, для наилучшего взаимного согласования.

Все предложенные методы обработки спектрометрических данных были реализованы в программном комплексе MinAn (блок «NewWork»), и применяются при обработке данных полученных в результате различных типов и реализаций каротажа в ряде геофизических организаций.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации по теме диссертации в **журналах рекомендованных ВАК:**

1. Методика обработки многоканального спектрометрического гамма-каротажа с использованием элементарных спектров. (Соавторы Калмыков Г.А., Ревва М.Ю.) // Каротажник №10-11, 2004 г., стр. 205-210.

2. Согласование энергетических шкал многоканальных спектров, полученных в процессе спектрометрического гамма-каротажа. (Соавторы Калмыков Г.А., Старцев А.А., Денисов А.И., Тарасов В.В.) // Ядерные измерительные – информационные технологии, №1(17), 2006 г., стр. 31-37.

3. Технологии определения коэффициента текущего насыщения терригенных коллекторов. (Соавторы Калмыков Г.А., Коротков К.В., Решетов Е.В., Смирнов Д.Г.) // Геоинформатика №3, 2006 г., стр. 91-100.

4. Петрофизическое обеспечение интерпретации комплекса геофизических исследований скважин на базе спектрометрического гамма-каротажа. (Соавторы Калмыков Г.А., Корост Д.В., Решетов Е.В.) // Вестник МГУ, Геология №2, 2009 г., стр. 68-74.

5. Комплексы и технологии проведения каротажа на буровом инструменте в условиях Западной Сибири. (Соавторы Коротков К.В., Калмыков Г.А.) // Каротажник № 9, 2009 г., стр. 291-311.

6. О возможности замены стационарного нейтронного каротажа на импульсный при измерении коэффициента газонасыщенности коллекторов подземных хранилищ газа. (Соавторы Зубарев А.П., Амурский А.Г., Калмыков Г.А., Семенов Е.О.) // Газовая промышленность, №5, 2009 г., стр. 52-55.

Публикации в других изданиях:

7. Математическое моделирование методом Монте-Карло – основной инструмент создания метрологического обеспечения количественной ядерной геофизики. (Соавторы Миллер В.В., Кадисов Е.М., Трещалин С.А.) // Тезисы докладов научно-практической конференции «Ядерная геофизика 2002», 12-14 июня 2002 г.

8. Опробование С/О-каротажа с аппаратурой МАРКА-ИНГС на нефтяных месторождениях Татарстана. (Соавторы Нуретдинов Я.К., Юсупов Р.И. Воронков Л.Н., Миллер В.В., Кадисов Е.М., Борискин Н.В.) // Тезисы межотраслевой научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе» 26-30 мая 2003 г., Москва.

9. Математическое моделирование задач С/О-каротажа. (Соавторы Миллер В.В., Кадисов Е.М., Копылов В.Е., Трещалин С.А.) // Тезисы межотраслевой научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе» 26-30 мая 2003 г., Москва.

10. Разработка методики элементного С/О-каротажа. (Соавторы Миллер В.В., Кадисов Е.М., Копылов В.Е., Трещалин С.А.) // Материалы международной конференции «Новые идеи в науках о земле», Москва, 2003 г.

11. Определение глубинности метода С/О-каротажа на основе математического моделирования. // Материалы международной конференции «Новые идеи в науках о земле» Москва 2003 г.

12. Интерпретация С/О-каротажа на основе информации полученной по комплексу ГИС. (Соавторы Теленков В.М., Коротков К.В., Калмыков Г.А., Казанцев С.В.) // Материалы научно-практической конференции «Ядерная геофизика 2004», 28 – 30 июня 2004 г.

13. Выделение нефтегазонасыщенных интервалов по данным ИННК. (Соавторы Калмыков Г.А., Теленков В.М.) // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе» 18-22 октября 2004г., стр.263-268.

14. Оценка ограничений определения коэффициента нефтенасыщенности по методике отношения окон в С/О-каротаже на основании исследования элементарного состава каменного материала. (Соавторы Калмыков Г.А., Малания Г.Т.) // Тезисы докладов Всероссийского научно-практического семинара «Состояние петрофизического обеспечения ядерно-геофизических, акустических и других методов ГИС» 21-24 июня 2005г., Тверь.

15. Разработка методики определения геолого-технических параметров обсаженной скважины гамма-гамма методом. (Соавторы Калмыков Г.А., Коротков К.В., Гималтдинова А.Ф.) // Материалы международной конференции «Наука и новейшие технологии при поисках разведки и разработке месторождений полезных ископаемых», Москва, РГГРУ, 4-6 апреля 2006 г.

16. Согласование энергетических шкал многоканальных спектров, полученных в процессе спектрометрического гамма-каротажа. (Соавторы Калмыков Г.А., Старцев А.А., Денисов А.И., Решетов Е.В., Смирнов Д.Г.) // Материалы международной конференции «Наука и новейшие технологии при поисках разведки и разработке месторождений полезных ископаемых», Москва, РГГРУ, 4-6 апреля 2006., стр. 75.

17. Построение минерально-компонентной модели пласта по радиоактивным методам в обсаженных скважинах. (Building a Mineral Componential Model of Formation Based on C/O and Other Through-Casing Logs) (Соавторы Калмыков Г.А., Коротков К.В.). // Тезисы докладов международной конференции и выставки «Geosciences-To Discover and Develop» c036 Lenexpo, Saint Petersburg, Russia, 16 - 19 October 2006.

18. Петрофизическое обеспечение импульсного нейтрон-нейтронного метода исследований нефте-газовых скважин (Соавторы Калмыков Г.А., Рыжова Л.А.) // Тезисы докладов научно-практической конференции «Геофизические исследования скважин», посвященной 100-летию промысловой геофизики, г. Москва, РГУНГ, 1-2 ноября 2006.

19. Петрофизические методы исследования кернового материала. (Соавторы Иванов М.К., Калмыков Г.А., Корост Д.В., Хамидуллин Р.А.) // Учебное пособие, Книга 2, 2008 г., стр. 75-86, 99-105.

20. Оценка нефте-газонасыщенности коллекторов через неперфорированную колонну. (Соавторы Калмыков Г.А., Ювченко Е.В., Майкова Е.И.), // Тезисы докладов III научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений», г.Уфа, 13-15 апреля 2010г., стр. 14.

Подпись автора _____ /Белохин В.С./