

На правах рукописи



ЗЕЛЕНОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО
КАРОТАЖА В ИСКУССТВЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Специальность 25.00.10 –
«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2017

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью
«Нефтегазгеофизика»

Научный руководитель: **Мурцовкин Владимир Анатольевич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Еникеева Фаузия Хасановна**
доктор технических наук, заведующая
отделением технологий комплексной
интерпретации данных ЯФМ ГИС ОАО «НПЦ
Тверьгеофизика»

Денисенко Александр Сергеевич
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Московского научно-
исследовательского центра Шлюмберже, ООО
«Технологическая Компания Шлюмберже»

Ведущая организация: **ПАО НПП «ВНИИГИС»**

Защита диссертации состоится 16 мая 2017 г. в 15:00, в ауд. 523, на заседании диссертационного совета Д.212.200.05 при Российском государственном университете нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина по адресу: Москва, 119991, Ленинский проспект, 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина и на сайте <http://gubkin.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



М.С. Хохлова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Методы геофизических исследований скважин (ГИС) обеспечивают получение основной информации о литологическом строении разреза, пластах-коллекторах, их фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС) и насыщенности. По мере усложнения условий разведки комплекс ГИС совершенствуется, в нем появляются новые эффективные методы. Одним из таких методов, вошедших в отечественную практику за последнее время, является метод ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле (далее – ЯМК). Магнитное поле в данном случае называют “искусственным”, чтобы подчеркнуть отличие этого метода от ядерно-магнитного каротажа в поле Земли. В ряде источников такое поле называют “сильным”, что также допустимо. Уникальные возможности метода для изучения горных пород связаны с его богатой петрофизической основой, позволяющей получать информацию трех видов: о количестве флюидов в породе (пористость и ее компоненты); о свойствах этих флюидов (на основе коэффициента диффузии); о размерах пор, содержащих эти флюиды (определяют широкий комплекс свойств пород, например, проницаемость и электропроводность).

Однако реализация этих возможностей ограничивается проблемами обработки зарегистрированных релаксационных кривых и объемом извлекаемой из спектров ЯМК информации.

Первой проблемой является корректное получение спектров ЯМК из зарегистрированных релаксационных кривых, что само по себе является нетривиальной задачей. При исследованиях скважин она осложняется как невысокой амплитудой информативных сигналов спин – эхо (уровень нановольт – микровольт), так и высоким уровнем шума, связанным с измерительным трактом аппаратуры и условиями проведения измерений (проводящие буровые растворы, высокая (до 120 – 150 °С) температура). Если при лабораторных ЯМР - исследованиях керна уменьшить уровень шума и повысить соотношение сигнал/шум удастся путем многократных повторных измерений, то в процессе движения прибора по стволу скважины это невозможно: каждая зарегистрированная релаксационная кривая уникальна и соответствует своей глубине.

Второй проблемой является наиболее полное извлечение информации о свойствах горной породы из спектров ЯМК. Хотя спектр ЯМК качественно соответствует распределению пористости по размерам пор, на практике из него, как правило, рассчитывается ограниченный набор параметров и не реализуются все возможности по извлечению информации.

Поэтому задача разработки современных подходов к обработке и интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа является актуальной.

Цель работы

Разработка методик, алгоритмов и программ обработки данных ядерно-магнитного каротажа, учитывающих сложные условия измерений и, соответственно, повышенный уровень шума, позволяющих при этом использовать широкие возможности метода ЯМК в искусственном магнитном поле для характеристики разрезов нефтяных и газовых скважин.

Основные задачи исследований

1. Анализ существующих методов и подходов к обработке данных ядерно-магнитного каротажа.
2. Выбор алгоритмов обработки первичных данных и анализ факторов, влияющих на точность и устойчивость решения.
3. Обоснование и разработка методик интерпретации результатов ЯМК с применением капиллярно-решеточной модели порового пространства.
4. Создание программно-методического обеспечения для обработки и интерпретации данных ЯМК.
5. Опробование и внедрение в производство разработанной технологии и программного обеспечения.

Методика исследования

1. Анализ и обобщение зарубежного и отечественного опыта в области применения метода ядерно-магнитного резонанса в геофизических исследованиях.
2. Использование аппарата математического моделирования.
3. Опытные-методические и промышленные испытания программно-методического комплекса.
4. Сопоставление результатов обработки с данными керна и испытаний.

Достоверность научных выводов и результатов подтверждена методами математического моделирования, прямым сравнением данных, полученных в результате каротажа с данными петрофизических исследований керна, а также опытом производственного применения разработанного программно-методического обеспечения.

Научная новизна

1. Предложен подход к обработке данных ядерно-магнитного каротажа с использованием итерационных алгоритмов регуляризации, что позволило не только автоматизировать процесс обработки первичных данных метода и обеспечить получение корректных результатов при повышенном уровне шума.
2. Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения капиллярно-решеточной модели порового пространства, в основе которой лежит распределение пор по размерам, для обработки данных ядерно-магнитного резонанса в геофизических исследованиях на частотах в диапазоне от 600кГц до 1МГц.

3. Применен новый подход к интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле, использующий капиллярно-решеточную модель для определения абсолютной проницаемости и электропроводности.

4. На основе предложенных подходов разработан и внедрен в производство программно-методический комплекс для обработки первичных данных ядерно-магнитного каротажа «NMR Processor».

5. Показана эффективность применения предлагаемых алгоритмов и методик для оценки пористости (общей эффективной и связанной), проницаемости и электропроводности для песчано-глинистых и карбонатных пород-коллекторов.

Защищаемые положения

1. Использование предложенного итерационного алгоритма регуляризации для обработки данных ядерно-магнитного каротажа позволяет корректно определять распределение пористости по временам релаксации и на его основе получать достоверную оценку петрофизических характеристик исследуемых горных пород при повышенной зашумленности исходных данных.

2. Применение капиллярно-решеточной модели поровой среды позволяет расширить возможности применения метода ядерно-магнитного каротажа за счет увеличения числа определяемых петрофизических характеристик горных пород.

Основными защищаемыми результатами являются

1. Технология, включающая методики, алгоритмы и программы, обеспечивающие возможность автоматизированной и корректной обработки первичных данных ядерно-магнитного каротажа, в том числе и при повышенном уровне шума.

2. Методика интерпретации данных ЯМК с использованием капиллярно-решеточной модели, применяемая для определения проницаемости и электропроводности исследуемых горных пород.

Практическая значимость работы

Проведенные автором исследования позволили разработать и внедрить в производство программно-методический комплекс для обработки данных ядерно-магнитного каротажа «NMR Processor». Как необходимый элемент он входит в состав единственной на момент написания работы отечественной промышленной технологии ЯМК в искусственном магнитном поле, разработанной в ООО «Нефтегазгеофизика». По этому направлению была обеспечена конкурентоспособность российского геофизического сервиса на отечественном рынке.

Внедрение результатов работы

Программно-методический комплекс для обработки данных ядерно-магнитного каротажа «NMR Processor» зарегистрирован Роспатентом как

программа для ЭВМ (свидетельство № №2003612705). С использованием программно – методического комплекса проведена обработка данных ЯМК в более чем 700 скважинах на лицензионных участках практически всех крупных нефтегазодобывающих компаний, работающих на рынке России.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на: XVI Губкинских чтениях «Развитие нефтегазовой геологии – основа укрепления минерально-сырьевой базы» (г. Москва, 2002г.); научно-практической конференции «Ядерная Геофизика 2002» (г. Тверь, 2002г.); XII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ООО ТюменНИИгипрогаз «Проблемы развития газовой промышленности Западной Сибири – 2002» (г. Тюмень, 2002г.); международном ежегодном симпозиуме SCA (U.S.A., California, Monterey, 2002г.); всероссийском научно-практическом семинаре «Состояние петрофизического обеспечения ядерно-геофизических, акустических и других методов ГИС» (г. Тверь, 2005г.); V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «ГЕОФИЗИКА-2005» (г. Санкт-Петербург, 2005г.); VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «ГЕОФИЗИКА-2009» (г. Санкт-Петербург, 2009г.); всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследований нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов» (г. Тверь, 2011 г.), научно – практической конференции «Современное состояние промысловой геофизики в России и за рубежом» (г. Дубна, 2013г); всероссийской научно-практической конференции «Ядерно-магнитные скважинные и аналитические методы в комплексе ГИС при решении петрофизических, геофизических и геологических задач на нефтегазовых месторождениях» (г. Тверь, 2014г).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, 4 из которых в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено 1 свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

Автором предложены, обоснованы и реализованы устойчивые итерационные алгоритмы обработки первичных данных ЯМК, в том числе при повышенной зашумленности исходных данных.

Опробован и программно реализован новый способ интерпретации данных ЯМК, позволяющий определять проницаемость и параметр пористости горных пород на основе единой капиллярно-решеточной модели.

Непосредственно автором разработан программно-методический комплекс «NMR Processor», обеспечивающий получение достоверной

информации о коллекторских свойствах пластов по данным ЯМК при различных геолого-технологических условиях.

Фактический материал

В основу диссертационной работы положены исследования, проведенные автором в ООО «Нефтегазгеофизика» с 2002 по 2015 годы. В процессе работы над диссертацией было обработано, проанализировано и обобщено большое количество скважинных материалов. В общей сложности были использованы данные нескольких сотен скважин различных месторождений, практически из всех нефтегазоносных провинций РФ. Также в работе были использованы данные петрофизических исследований коллекций керна.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы 117 страниц текста, 48 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 80 наименований, в том числе 32 на английском языке.

Благодарности

Создание программно-методического комплекса было бы невозможным вне рамок отечественной технологии ЯМК в искусственном магнитном поле, разработанной под руководством д.т.н. Е.М. Митюшина и генерального директора ООО «Нефтегазгеофизика» д.т.н. Р.Т. Хаматдинова.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, д.ф.-м.н. В.А. Мурцовкину за постановку темы и помощь в процессе работы над диссертацией. Автор считает приятным долгом выразить благодарность коллегам отдела ядерно-магнитного каротажа ООО «Нефтегазгеофизика» - зав. отделом, к.ф.-м.н С.С. Сошину, к.т.н. А.В. Малинину, С.Ю. Тарасову, Д.Р. Лободе и всем коллегам, которые своим участием в совместных исследованиях, ценными советами и замечаниями оказали неоценимую помощь автору в этой работе. Также автор благодарит д.г.-м.н. В.Г. Топоркова за предоставленные для выполнения работы данные по керновому материалу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, основные задачи исследований, методы их решения, защищаемые положения. Показана научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе кратко рассмотрены физические основы метода ядерно-магнитного резонанса, импульсные последовательности, процесс регистрации сигнала спин-эхо и свойства пластовых флюидов. Проведен анализ современного состояния проблемы обработки первичных данных метода ЯМР в геофизике и определения с его помощью петрофизических характеристик. Определена цель и основные задачи исследования.

В 1946 году Ф. Блох (F. Bloch) и Э.М. Парселл (E.M. Purcell) независимо друг от друга разработали метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в конденсированных средах. За своё открытие в 1952 году они были удостоены Нобелевской премии. Метод быстро стал незаменимым средством структурного химического анализа. В настоящее время он широко используется в биологии, медицине, геофизике – везде, где требуется исследование строения вещества, его состава, характера химических связей и т.п.

Отечественные разработки по применению методов ЯМР в геофизике проводились с 60-х годов прошлого века во ВНИИЯГГе (с 1986г. – ВНИИГеоинформсистем – В.Д. Неретин, Я.Л. Белорай, И.Я. Кононенко и др.), АЗИНефтехиме, ЮжВНИИГеофизике (С.М. Аксельрод, В.И. Даневич, Е.М. Митюшин, В.Ю. Барляев и др.), ГАНГ (В.Д. Неретин), Ленинградском университете (Б.М. Бородин и др.), ЗапСибНИИГеофизике (С.В. Анпенов, В.С. Модин, Г.В. Такканд). Наибольшее практическое применение получили аппаратные разработки ПО «Татнефтегеофизика» (В.Д. Чухвичев, В.С. Дубровский, В.М. Мурзакаев и др.) – методом ЯМК в магнитном поле Земли исследованы тысячи скважин в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

С появлением в 2002 году прибора, использующего поле постоянных магнитов в ООО «Нефтегазгеофизика» (Р.Т. Хаматдинов, Е.М. Митюшин, В.Ю. Барляев, и др.), отечественная технология ЯМК вышла на новый уровень. Прибор использует конструктивно новую схему полей, создаваемых редкоземельным магнитом. К настоящему времени в ООО «Нефтегазгеофизика» реализованы центрированный, прижимной, автономный варианты приборов ЯМК для исследования скважин различного диаметра (Р.Т. Хаматдинов, Е.М. Митюшин, В.Ю. Барляев, С.С. Сошин, А.С. Грузомецкий и др.).

За рубежом впервые метод ядерного магнитного резонанса в искусственном поле был использован в коммерческих скважинных приборах компаниями Numar и Schlumberger в конце XX века. В настоящее время подобной технологией располагает лишь ограниченное число ведущих мировых компаний.

В основе метода лежит наблюдение эффектов, вызванных взаимодействием ядер, обладающих магнитным моментом, с окружающими их микрочастицами при воздействии на всю систему постоянного и переменного магнитных полей. Под действием внешнего постоянного магнитного поля H_0 ядра стремятся сориентироваться так, чтобы направление их магнитного момента совпало с вектором магнитного поля H_0 . Для наблюдения эффекта ядерного магнитного резонанса вектор ядерной намагниченности переводится в поперечную плоскость. Это достигается путем наложения дополнительного осциллирующего магнитного поля H_1 , перпендикулярного H_0 с частотой равной Ларморовской частоте. В тот момент, когда внешнее магнитное поле

перестает воздействовать на систему, вектор ядерной намагниченности начинает возвращаться к своему начальному состоянию.

Для регистрации эффекта ЯМР в искусственном поле при исследовании скважин используется импульсная последовательность Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ). В результате получают сигнал ЯМР–релаксации (релаксационную кривую), который принято считать первичными данными метода. При обработке релаксационных кривых может быть получена различная петрофизическая информация: коэффициент пористости, распределение пористости по размерам пор, проницаемость и другие.

Основная задача обработки первичных данных ЯМК состоит в получении спектров времен релаксации. Используемые на практике методы обработки данных ЯМР в геофизике до последнего времени были основаны на экспоненциальном анализе. При решении задач обработки данных ЯМР, полученных в сильных магнитных полях, современные исследователи ориентируются на методы инверсии, включающие процесс регуляризации. Подобные методы позволяют получить наиболее корректный результат и повысить стабильность полученного решения.

Во второй главе рассмотрены особенности обработки первичных данных ядерно-магнитного каротажа. Предложен итерационный алгоритм обработки первичных данных ЯМК. Проведен анализ и оценка качества полученного решения.

Как было отмечено, основной задачей, которую необходимо решить при обработке первичных данных каротажа, является расшифровка первичного сигнала – релаксационной кривой. С математической точки зрения эта процедура сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\int_{T_{2\min}}^{T_{2\max}} B(T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} dT_2 = A(t) \quad (1)$$

т.е. к нахождению распределения $B(T_2)$. Здесь $A(t)$ – сигнал ЯМР релаксации; t – время; $T_{2\min}$ и $T_{2\max}$ – соответственно, минимальное и максимальное время поперечной релаксации. Это уравнение относится к классу так называемых некорректно поставленных задач. Они характеризуются тем, что сколь угодно малые изменения исходных данных могут приводить к произвольно большим изменениям решений. Для решения данного уравнения предлагается использовать метод регуляризации А.Н.Тихонова, специально разработанный для подобных задач.

Как видно из формулы (1), в искомом интеграле требуется задать пределы – интервал поиска решения. Также при решении задачи методом регуляризации необходимо задать степень устойчивости решения к малым

изменениям исходных данных – параметр регуляризации. От того, насколько правильно заданы эти параметры, зависит точность полученного решения.

При определении интервала поиска решения исходим из того, что его левая граница T_{2min} определяется минимальными временами релаксации, входящими в результирующий сигнал, а также используемой при измерении раздвижкой (T_E). Поскольку короткие компоненты всегда в разной степени присутствуют в сигнале ЯМР – релаксации и их всегда необходимо учитывать. При обработке первичных данных величину T_{2min} принимают постоянной для выбранных параметров измерения и далее в процессе расчета не варьируют. Правая же граница интервала – величина не постоянная и может значительно варьироваться. Для каждой породы максимальное время определяется наиболее крупными порами, а также типом насыщающего их флюида. Значения правой границы интервала колеблются от десятков до нескольких тысяч миллисекунд.

Таким образом, задача определения интервала поиска решения сводится к определению его правой границы (T_{2max}). В данном случае невозможно решить задачу, задав заведомо больший интервал поиска решений, поскольку в этом случае расширяется область эквивалентности. Может быть найдено решение, интегрально соответствующее первичным данным, но содержащее лишние взаимно-компенсирующиеся составляющие. Поэтому при поиске T_{2max} автором применяется достаточно сложный итерационный подход.

На рисунке 1 приведена блок-схема, обобщенно описывающая процесс определения максимального времени релаксации. Определение длины спектра (T_{2max}) проводится в несколько этапов. В первую очередь, выполняется ее предварительная оценка. Предварительная оценка необходима для задания алгоритму регуляризации корректных начальных условий и состоит в том, что проводится аппроксимация исходного сигнала экспоненциальной функцией, для которой определяется время спада, которое и служит первичной оценкой для T_{2max} .

Затем, используя метод регуляризации, определяется спектр времен релаксации. Метод регуляризации позволяет свести решение уравнения (1) к решению интегрального уравнения второго рода, которое может быть решено обычным методом квадратурных формул, результатом решения является искомый спектр времен релаксации. Полученный на данном этапе спектр с математической точки зрения соответствует исходным данным, но не всегда является таковым с точки зрения физики процесса. Например, он может оказаться слишком длинным и содержать отрицательные по величине компоненты. Для того чтобы привести спектр к правильному виду, следует изменить интервал поиска решения – увеличить или уменьшить его в зависимости от полученных данных. Сначала к полученному спектру применяется коррекция времени T_{2max} по пористости.



Рис. 1. Блок – схема алгоритма определения максимума спектра

Коррекция по пористости основана на предположении о том, что интегрально спектр времен релаксации является неубывающей функцией, и если в нем при каком-либо значении времени релаксации T_2 достигается значение пористости, большее либо равное полной пористости, то оставшаяся часть спектра не является необходимой его составляющей, а представляет собой неинформативный «хвост». Полная пористость в данном случае определяется достаточно просто – как амплитуда зарегистрированной релаксационной кривой. Таким образом, время поперечной релаксации T_2 , при котором спектр достигает полной пористости, принимают в качестве T_{2max} и снова применяют алгоритм регуляризации.

Дальнейшая коррекция спектра сводится к тому, чтобы привести амплитуду последней его точки в ноль с заданной точностью. Результаты добиваются последовательным изменением максимального времени T_{2max} в зависимости от положения последних точек спектра относительно нуля. Например, если амплитуда последней точки спектра положительна, то максимальное время увеличивают на небольшую величину и снова проводят регуляризацию, пытаясь таким образом получить «завершенный» спектр. Таким образом, путем последовательной итерационной коррекции выбирается решение, наиболее соответствующее описываемому физическому процессу.

Решение должно быть достаточно точным, чтобы не потерять отдельные детали спектра и тем самым не ухудшить разрешающую способность метода. В то же время нельзя задать слишком высокую точность, так как при этом присутствующий в сигнале шум может быть интерпретирован как полезный сигнал. Степень точности решения характеризуется параметром регуляризации – α . При больших значениях параметра регуляризации спектр становится слишком сглаженным и не отражает реальной картины распределения. В то же время при заниженных значениях, когда возрастает влияние шума на результирующий спектр, в нём появляются дополнительные моды, а также некоторая «изрезанность», что также является ошибкой. Очевидно, что точность, с которой возможно восстановить спектр, определяется величиной шума, наложенного на полезный сигнал, а также параметрами примененной импульсной последовательности – раздвижкой между сигналами спин-эхо и числом зарегистрированных точек.

Существует достаточно большое количество методов выбора параметра регуляризации, но в данном случае необходимо найти такой, который сводит к минимуму критические ошибки в определении спектра и позволяет производить обработку большого объема данных в автоматическом режиме без применения последующей коррекции оператором. После анализа методов определения α , позволяющих при различных условиях добиться хороших результатов, автором был выбран наиболее устойчивый из них. Остальные рассмотренные методы также показали хорошие результаты при небольших значениях уровня шума, но давали сбои при шумах, характерных для данных каротажа.

Прежде всего, на основании практического опыта было установлено, что параметр регуляризации зависит как от уровня шума на релаксационной кривой, так и от длины спектра. Величина среднего квадратичного отклонения (СКО) шума определяется используемой для регистрации сигнала ЯМР аппаратурой и также зависит от условий измерения – в первую очередь от проводимости бурового раствора и температуры. Длина спектра обусловлена литологическим составом исследуемых горных пород, насыщающим флюидом и прочими факторами. Поскольку обе эти величины поддаются оценке, задача

сводится к получению зависимости параметра регуляризации от величины СКО шума и длины спектра.

Решение поставленной задачи было проведено на основе математического моделирования спектров ЯМР с контролем по СКО наложенного шума и их последующей обработки с выбором подходящего параметра регуляризации. Полученные результаты были обобщены, систематизированы, и на их основании разработан подход к определению параметра регуляризации, удовлетворяющий поставленным условиям.

Для определения вида зависимости параметра регуляризации от СКО шума была проведена обработка модельных спектров и определены характерные значения параметра регуляризации при различных уровнях шума.

При моделировании спектров времен релаксации использовались комбинации мод с нормальным распределением. Спектры различной формы преобразовывались в релаксационные кривые, на которые затем накладывался белый шум заданной величины. После этого с использованием алгоритма регуляризации исходные спектры были восстановлены. В процессе восстановления при выборе параметра регуляризации учитывались два основных условия. Во-первых, восстановленный спектр должен совпадать с заданным по виду. То есть количество и положение мод должны быть одинаковыми на обоих спектрах. Во-вторых, они должны быть равны по пористости. По результатам исследований получены зависимости параметра регуляризации от СКО шума для разных спектров с различными значениями T_{2max} .

Проверка полученных методик проводилась с помощью моделирования различных сигналов ЯМР – релаксации и последующего восстановления модельных спектров в автоматическом режиме с использованием полученных зависимостей. Моделировались произвольные разрезы (массивы данных), а затем восстанавливались с использованием разработанного программного обеспечения. Примеры восстановления спектров приведены на рисунке 2.

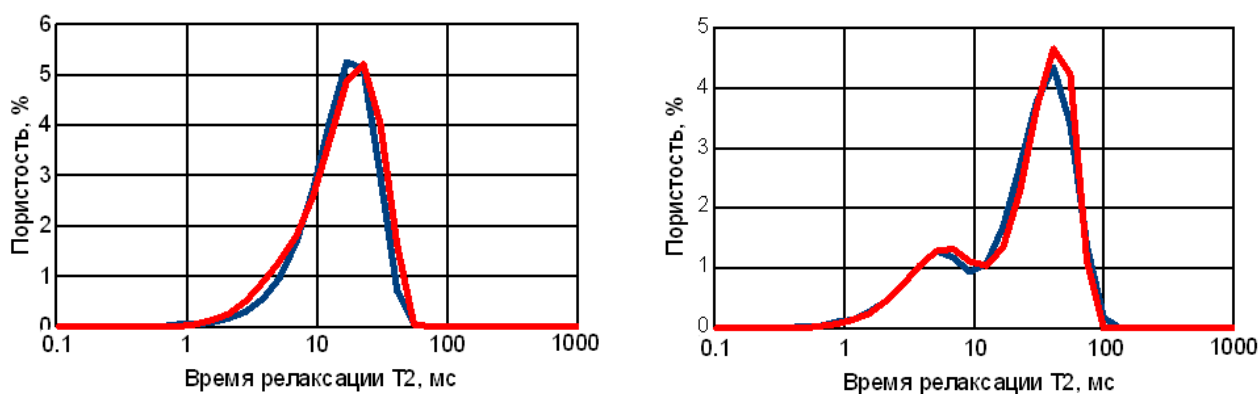


Рис. 2. Примеры восстановления спектров

Синим цветом на графиках показан смоделированный спектр, а красным – восстановленный. Восстановление приведено при характерном для каротажных данных в нормальных условиях СКО шума порядка 1% пористости. Приведенный пример показывает, что предлагаемые алгоритмы обработки первичных данных ЯМК позволяют восстанавливать распределение пористости по временам поперечной релаксации с достаточной точностью. Это касается как вида спектра, его общей длины и количества мод, так и интегральных количественных характеристик. В процессе тестирования алгоритмов установлено, что при приведенном уровне СКО шума средняя погрешность определения пористости не превышает 1.5% в экстремальных случаях, а в среднем составляет 0.8%.

Как видно, при применении предложенных алгоритмов достигаются приемлемые значения погрешностей при восстановлении спектров при уровне шума, соответствующем применяемой в настоящий момент скважинной аппаратуре.

Предложенное решение позволяет проводить обработку в автоматическом режиме и сводит необходимость вмешательства оператора к минимуму, что немаловажно при больших объемах данных. Помимо скорости обработки данных в автоматическом режиме исключает субъективный фактор при определении спектра времен релаксации, что позволяет успешно использовать этот подход при обработке данных ЯМК в производственных условиях.

В третьей главе рассмотрено применение капиллярно-решеточной модели порового пространства при определении фильтрационно-емкостных характеристик (проницаемость) и характеристик электропроводности горных пород (параметр пористости, сопротивление) по данным ЯМК. Проведен анализ применения методики на данных керна и каротажа.

Одним из достоинств метода ЯМК при изучении свойств горных пород является возможность получения информации о распределении пористости по размерам пор. Это позволяет не только определять общую пористость пород, но и разложить ее на компоненты по механизму удержания флюида в порах: микропористость глин, пористость, заполненную капиллярно связанной водой, и пористость со свободным флюидом (с выделением каверновой составляющей). Распределение пор по размерам также является основным фактором, определяющим такие процессы переноса, как фильтрация и электропроводность.

В работе показана возможность оценки петрофизических характеристик горных пород непосредственно по спектрам времен релаксации намагниченности порового флюида, учитывая особенности их распределения.

Использованная в работе модель относится к классу так называемых решеточных моделей порового пространства. Основной ее особенностью

является то, что фильтрационные характеристики и характеристики электропроводности описаны в рамках единой модели. Отличие этой капиллярно-решеточной модели от аналогичных моделей подобного типа заключается в способе учета распределения пор по размерам. Этот способ основан на том, что пористая среда разбивается на большое число одинаковых по размеру ячеек. Структура пор во всех ячейках одинакова. Отличие между ячейками заключается лишь в размере δ соответствующих им пор, который для всех пор в пределах одной ячейки является постоянным. В разных ячейках поры могут существенно отличаться между собой по размерам. Распределение размеров пор по ячейкам носит случайный характер и описывается некоторой функцией $f(\delta)$, которая по своему физическому смыслу представляет собой плотность вероятности того, что в произвольной ячейке поры имеют размер δ .

Основная особенность метода ядерно-магнитного резонанса, позволяющая использовать капиллярно-решеточную модель для определения петрофизических характеристик, состоит в том, что время поперечной релаксации в поре пропорционально ее размеру. Плотность вероятности $f(\delta)$ в данном случае определяется непосредственно по спектру времен поперечной релаксации.

Чтобы на практике воспользоваться капиллярно-решеточной моделью для расчета проницаемости по данным ЯМР, необходимо знать связь времен поперечной релаксации T_{2i} с размерами капилляров δ_i . В работе показано, что эта зависимость может быть описана соотношением:

$$\delta_i \approx 4\rho T_{2i} \quad (2)$$

где ρ - поверхностная релаксационная активность.

Таким образом, по данным ядерно-магнитного резонанса, возможно получить распределение пористости по размерам для дальнейшего использования при расчете петрофизических характеристик с использованием капиллярно-решеточной модели.

Исходя из этих представлений, по соответствующим соотношениям, определяется значение параметра пористости и коэффициента проницаемости.

В диссертационной работе автором рассматривается применение данной модели для определения параметра пористости и проницаемости по спектру времен поперечной релаксации. Для того чтобы проанализировать результаты применения предложенной методики, было проведено сравнение полученных результатов с другими методами, используемыми при аналогичных условиях.

В настоящий момент на практике для интерпретации данных ЯМК используются эмпирические подходы, учитывающие интегральные или усредненные параметры спектральных распределений сигнала ЯМК, такие, например, как доли свободной и связанной воды или среднее логарифмическое время поперечной релаксации намагниченности флюидов T_2 . Для того чтобы

определить проницаемость по данным ЯМР в рамках традиционного подхода, используется модель Тимура-Коатеса и модель среднего логарифмического времени релаксации T_2 .

Для тестирования возможностей определения проницаемости были исследованы вышеназванные подходы и предлагаемая капиллярно-решеточная модель. На рисунке 3 приведено сопоставление результатов определения проницаемости и параметра пористости по данным ЯМР в сравнении с прямыми измерениями.

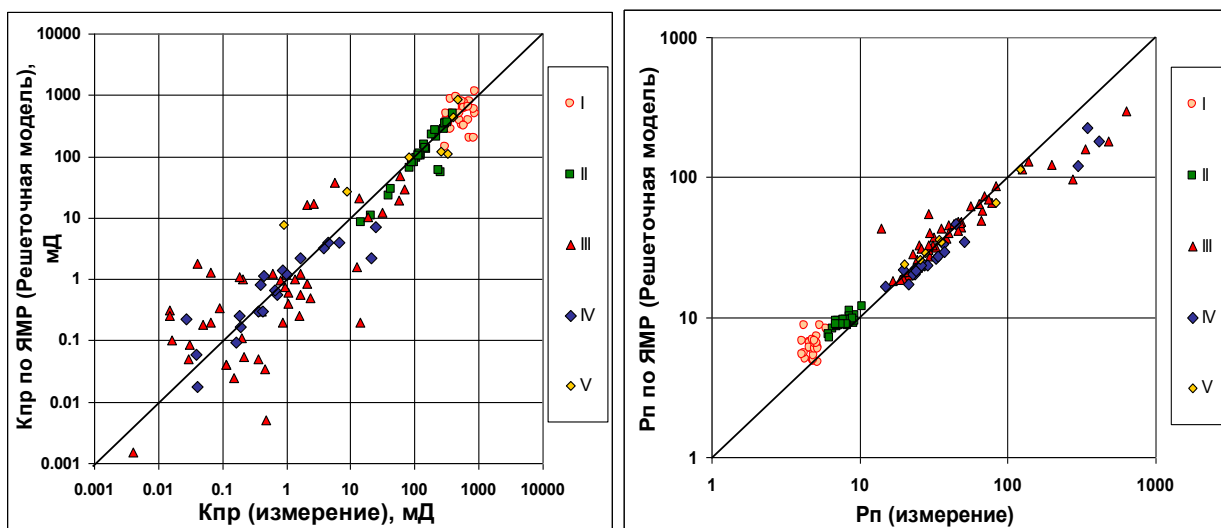


Рис. 3. Определение проницаемости и параметра пористости с использованием капиллярно-решеточной модели. I – IV – Западно-Сибирская НГП (I – сеноманские, II – неокомские, III – юрские, IV – ачимовские отложения); V – Тимано-Печорская НГП (отложения среднего девона).

Следует отметить, что существенным обстоятельством при использовании модели Тимура-Коатеса и модели среднего логарифмического времени релаксации является значительная вариабельность эмпирических констант, входящих в расчетные соотношения для проницаемости. Кроме того, при использовании модели Тимура-Коатеса возникают определенные трудности, связанные с выбором отсечек, разделяющих воду на свободную, капиллярно связанную и воду глин.

Для всех моделей определялся коэффициент корреляции. Наилучшие результаты показали модель среднего логарифмического T_2 и капиллярно-решеточная модель, для которой коэффициент корреляции составил 0,85. При проведении сравнительных исследований было выявлено, что определение проницаемости с использованием этих двух моделей в большинстве случаев дает наилучший результат.

Проверка возможности использования модели для расчета электрического сопротивления проводилась на тех же образцах горных пород. Для них было проведено сравнение рассчитанных значений параметра пористости (P_{Π}) с результатами его прямых измерений на образцах керна. Из рисунка видно, что параметр пористости, определенный с использованием капиллярно-решеточной модели, показывает в целом неплохую сходимость (коэффициент корреляции 0.94), лишь несколько занижая P_{Π} в области высоких значений.

В качестве примера, иллюстрирующего новые возможности использования метода ЯМР, на рисунке 4 приведено восстановление петрофизической зависимости параметра пористости от коэффициента пористости (k_{Π}) для одной из исследованных коллекций образцов горных пород.

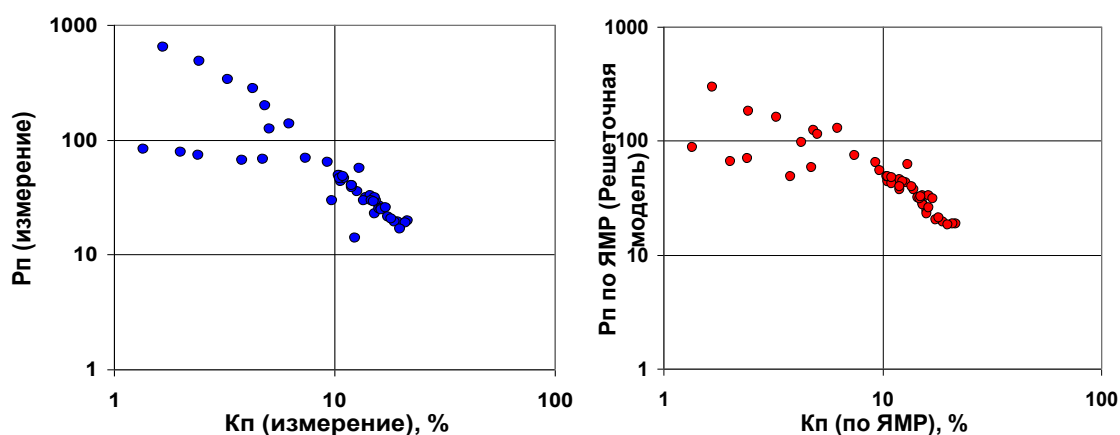


Рис. 4. Восстановление зависимости $P_{\Pi} - K_{\Pi}$

На рисунке справа приведены результаты, полученные исключительно методом ЯМР, слева – с помощью лабораторных петрофизических измерений. В данном случае одно измерение, проведенное на ЯМР-релаксометре, позволяет определить сразу обе величины – пористость и параметр пористости образца. Сама по себе возможность получения таких данных двумя независимыми методами является в своем роде уникальной. При сопоставлении графиков видно, что в обоих случаях их характер совпадает и капиллярно-решеточная модель позволяет достаточно хорошо определять параметр пористости. На данном примере можно увидеть, что оба метода разделяют зависимость на две ветви, позволяя выделить породы разных типов.

Предложенную методику расчета сопротивления горных пород по спектрам T_2 следует использовать только в случае полностью водонасыщенных горных пород. Если же часть пор заполнена непроводящими ток углеводородами, решеточная модель даст заниженное значение сопротивления, поскольку сигнал от них, присутствующий в спектре T_2 наряду с сигналом от

воды, будет учтен при расчете электропроводности, что приведет к ее увеличению (рис. 5).

На каротажной диаграмме в пятой колонке приведена остаточная нефтенасыщенность по данным ЯМК с привлечением дополнительных режимов измерения. В шестой колонке – удельное электрическое сопротивление, определенное по данным метода ЯМК с использованием капиллярно-решеточной модели, в сравнении с данными индукционного каротажа (ИК).

Как видно, в пластах с углеводородами ЯМК действительно показывает заниженные значения сопротивления по отношению к сопротивлению определенному по ИК. Это обстоятельство может быть использовано в качестве признака продуктивного пласта.

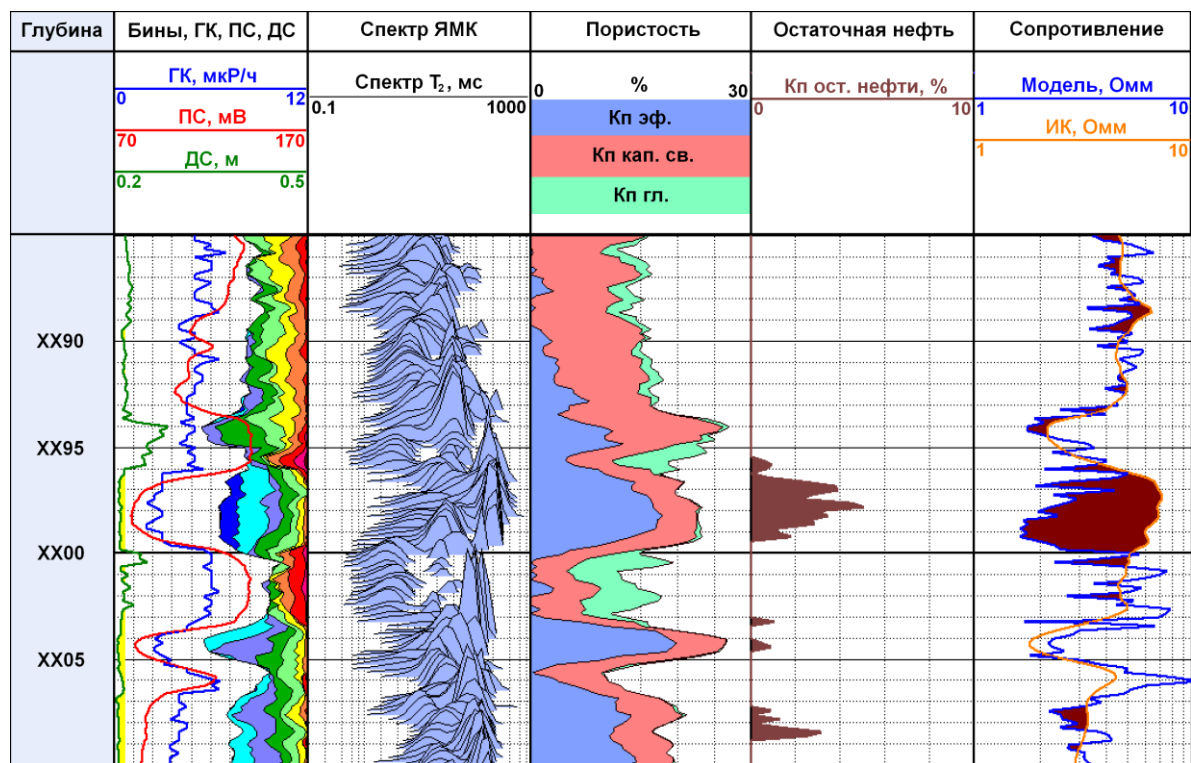


Рис. 5. Пример выделения нефтенасыщенного пласта при расхождении результатов определения сопротивления по данным индукционного и ядерно-магнитного каротажей (последняя колонка).

Представленные в диссертационной работе результаты лабораторных и скважинных исследований указывают, что рассмотренная капиллярно-решеточная модель позволяет описывать электропроводящие и фильтрационные свойства песчано – глинистых горных пород, используя данные метода ядерно-магнитного резонанса. Модель обнаруживает неплохую сходимость с экспериментальными данными в достаточно широком диапазоне проводимостей и проницаемостей пород разного литологического состава.

Возможность использования единой модели порового пространства для описания разных по своей физической природе процессов – электропроводности и фильтрации – служит, в определенной степени, свидетельством ее внутренней непротиворечивости. Это, в свою очередь, позволяет надеяться, что развиваемые на ее основе подходы смогут быть использованы для расчетов и других характеристик горных пород, таких, например, как кривые капиллярного давления, насыщенность, фазовые проницаемости.

В четвертой главе описан разработанный программно-методический комплекс «NMR Processor». Приведены результаты его опробования на скважинных материалах и сравнения с зарубежными аналогами. Показаны результаты внедрения комплекса в производство и перспективы его дальнейшего развития.

На основании предложенных подходов, методик и алгоритмов автором был разработан программно-методический комплекс «NMR Processor» для обработки данных ядерно-магнитного каротажа (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003612705).

Программно-методический комплекс предназначенся как для обработки, так и для интерпретации данных ЯМК. Обработка основывается на получении спектров времен релаксации и определении по ним основных петрофизических характеристик. Определение петрофизических характеристик осуществляется как по общепринятым традиционным методикам, так и по капиллярно-решеточной модели порового пространства.

Основные расчетные возможности комплекса:

- Работа с релаксационными кривыми: предварительная фильтрация сигнала с помощью НЧ-фильтра и с помощью Wavelet –фильтра; введение поправок на условия измерения;
- Расчет спектров времен релаксации: определение дифференциальных, интегральных и парциальных спектров и процедуры работы с ними;
- Расчет ФЕС: определение бинов, общей пористости, разделение общей пористости на составляющие - пористость глин, эффективная пористость, капиллярно-связанная вода; расчет проницаемости по модели Тимура-Коатеса; расчет проницаемости по модели среднего T_2 ;
- Расчет ФЕС с использованием капиллярно-решеточной модели проницаемости, параметр пористости, электропроводность;

С целью проверки работоспособности алгоритмов обработки было проведено их исследование на устойчивость в отношении к воздействию внешних негативных факторов. Также проанализированы погрешности определяемых с помощью программы характеристик.

В работе приведены результаты обработки данных ЯМК с использованием программы «NMR Processor», демонстрирующие работу программы в различных условиях – от относительно простых (песчано – глинистые разрезы и пресные буровые растворы) до экстремальных (низкопоровые карбонаты, высокоминерализованный буровой раствор, увеличенная температура). Во всех случаях наблюдается хорошее соответствие петрофизических характеристик, определяемых по результатам каротажа, с данными керна.

Один из примеров обработки данных ЯМК приведен на рисунке 6. Наиболее хорошее соответствие с данными керна наблюдается для общей и эффективной пористости и производной от них неснижаемой водонасыщенности (5 и 6 колонка). В программном комплексе эти параметры рассчитываются путем интегрирования полного или части спектра и наименее чувствительны к погрешностям определения спектров.

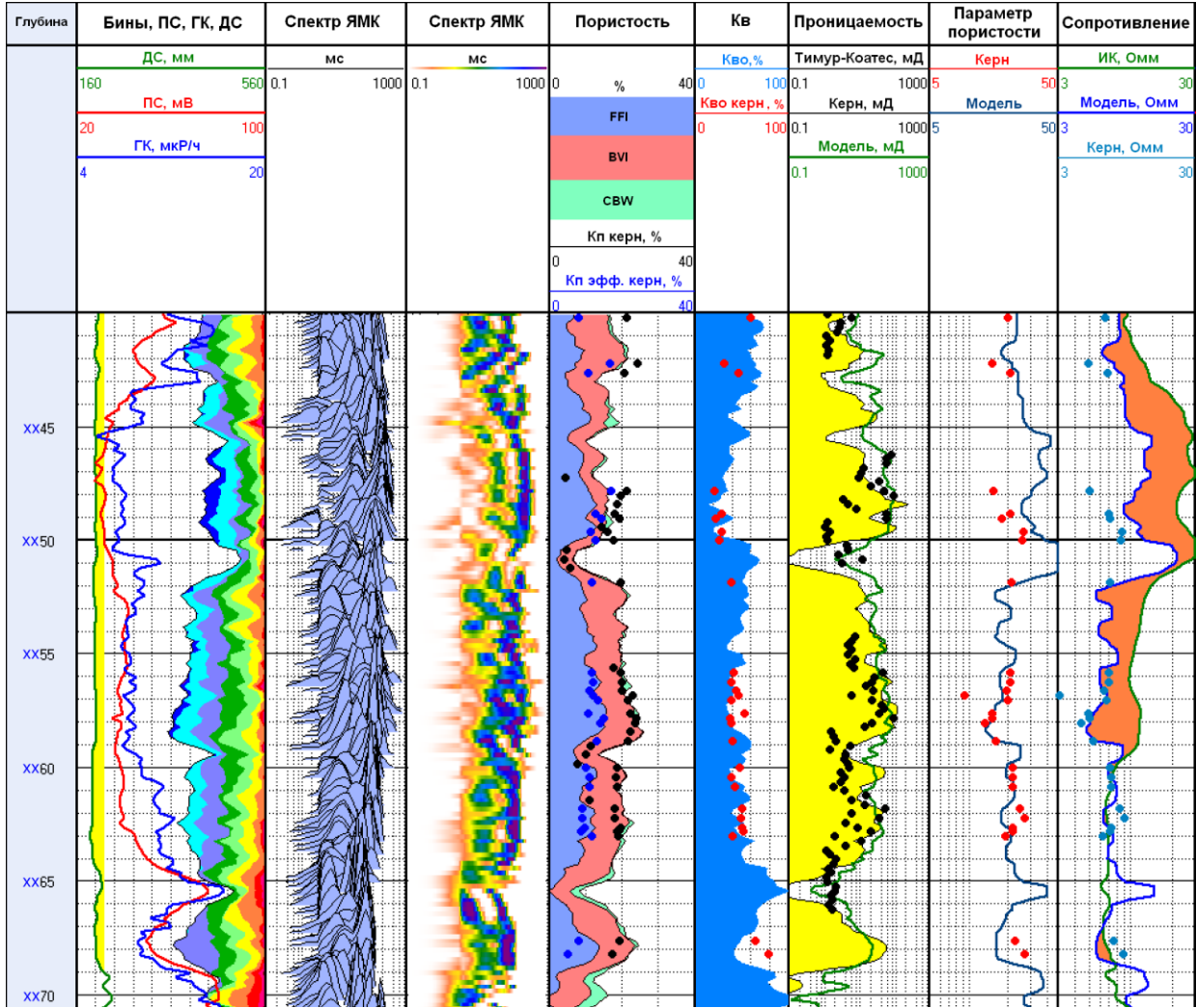


Рис. 6. Сопоставление данных обработки ЯМК с данными по керну

Отмечается хорошее соответствие с результатами прямых определений на керне в термобарических условиях «нестандартного» для ЯМК параметра пористости, рассчитанного из спектров ЯМК с использованием капиллярно – решеточной модели (8 колонка).

В последней колонке диаграммы приведена теоретическая кривая удельного электрического сопротивления водонасыщенного разреза по ЯМК (рассчитанная из параметра пористости по ЯМК) и измеренная кривая сопротивления по индукционному каротажу. Зоны расхождения кривых (выделены заливкой) указывают на присутствие углеводородов, что позволяет выделить залежь и обосновать контакт углеводороды/вода.

Приведенный пример наглядно демонстрирует новые возможности метода ядерно-магнитного каротажа, которые удастся раскрыть, применяя решения, предложенные в диссертационной работе.

Часто данные каротажа имеют высокий уровень шума (рис. 7).

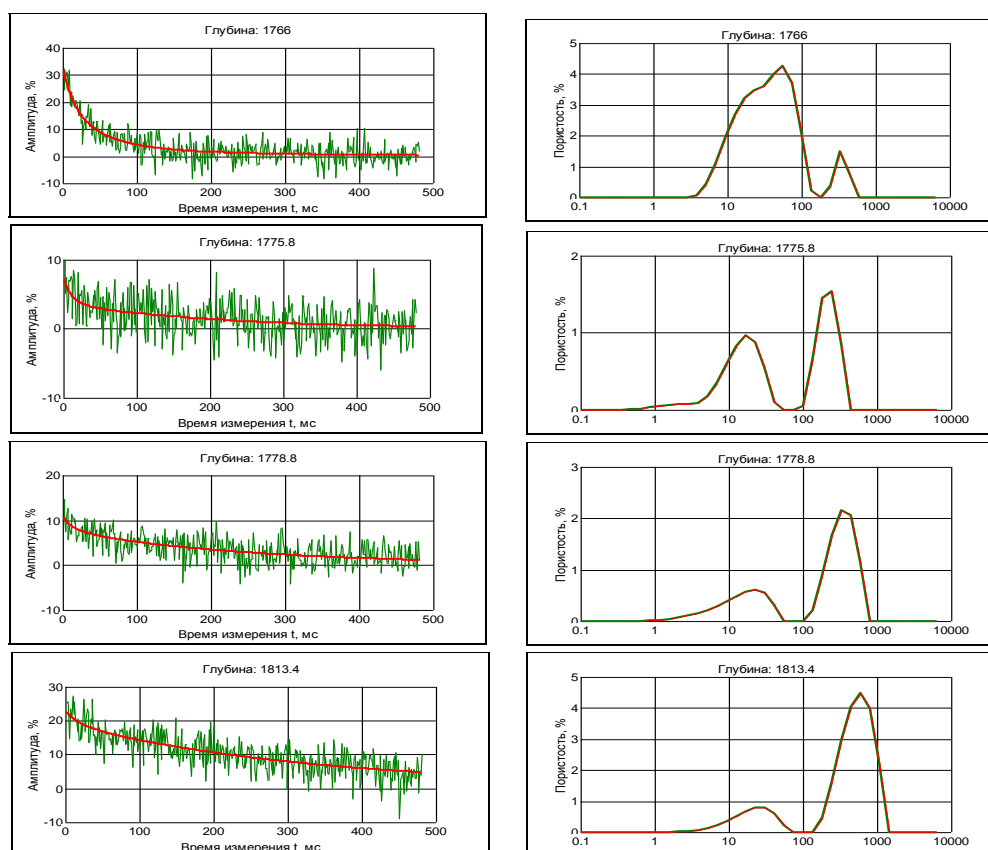


Рис.7 Релаксационные кривые и спектры ЯМК

Это связано с негативным влиянием условий измерений: высокие температуры и проводимость бурового раствора. В некоторых случаях релаксационные кривые даже не удастся полностью зарегистрировать. Однако все это не помешало качественно и без последующей ручной коррекции провести обработку первичных данных каротажа.

На рисунке 8 показан низкопористый разрез, сложенный доломитами различных типов. Возможности ЯМК в подобных объектах снижаются, что связано с низким соотношением «сигнал/шум», затрудняющим корректное определение спектров времен релаксации из неконтрастных зашумленных релаксационных кривых. Помимо этого, негативный эффект для ЯМК усиливается влиянием скважины.

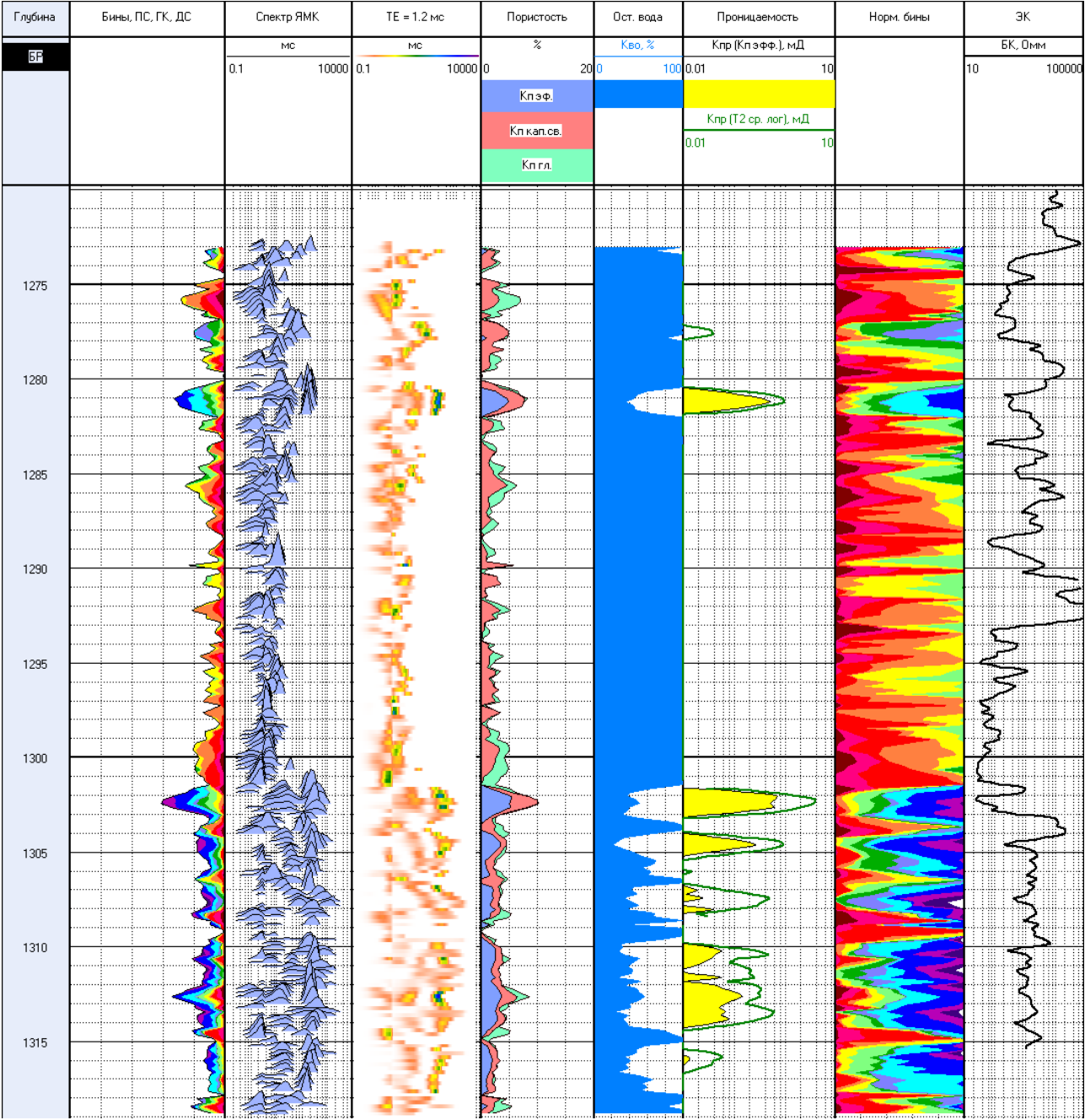


Рис. 8. Низкопористый разрез

Тем не менее, данные, полученные в таких условиях, поддаются обработке. На приведенном примере видно, что при одинаковом уровне пористости (т.е. величине сигнала) удалось четко выделить продуктивные

пласты, обладающие эффективной пористостью. Перспективность выделенного по спектрам ЯМК интервала подтверждена испытаниями в колонне в интервале 1301 – 1315 м, где получен приток газа.

В целом опробование показало широкие методические возможности и высокую технологичность программы «NMR Processor» при обработке данных ЯМК. В настоящее время программа активно используется на производстве. В ООО «Нефтегазгеофизика» она является основным инструментом, применяемым для обработки данных ЯМК. Можно уверенно сказать, что программа успешно проходит испытания в жестких производственных условиях, доказательством чего служит объем обработанной за это время скважинной информации.

На рисунке 9 приведена гистограмма, показывающая объем работ, выполненных при использовании программы обработки «NMR Processor». Как видно, объем работ в последние годы значительно вырос, увеличилось и разнообразие исследуемых отложений. За это время были обработаны различные типы разрезов во многих НПП. В процессе производственных работ проводилось сопоставление с результатами, полученными по другим методикам, а также с данными, полученными по керну. Проведенные исследования позволяют сделать положительные выводы о работоспособности и производственной пригодности программы.

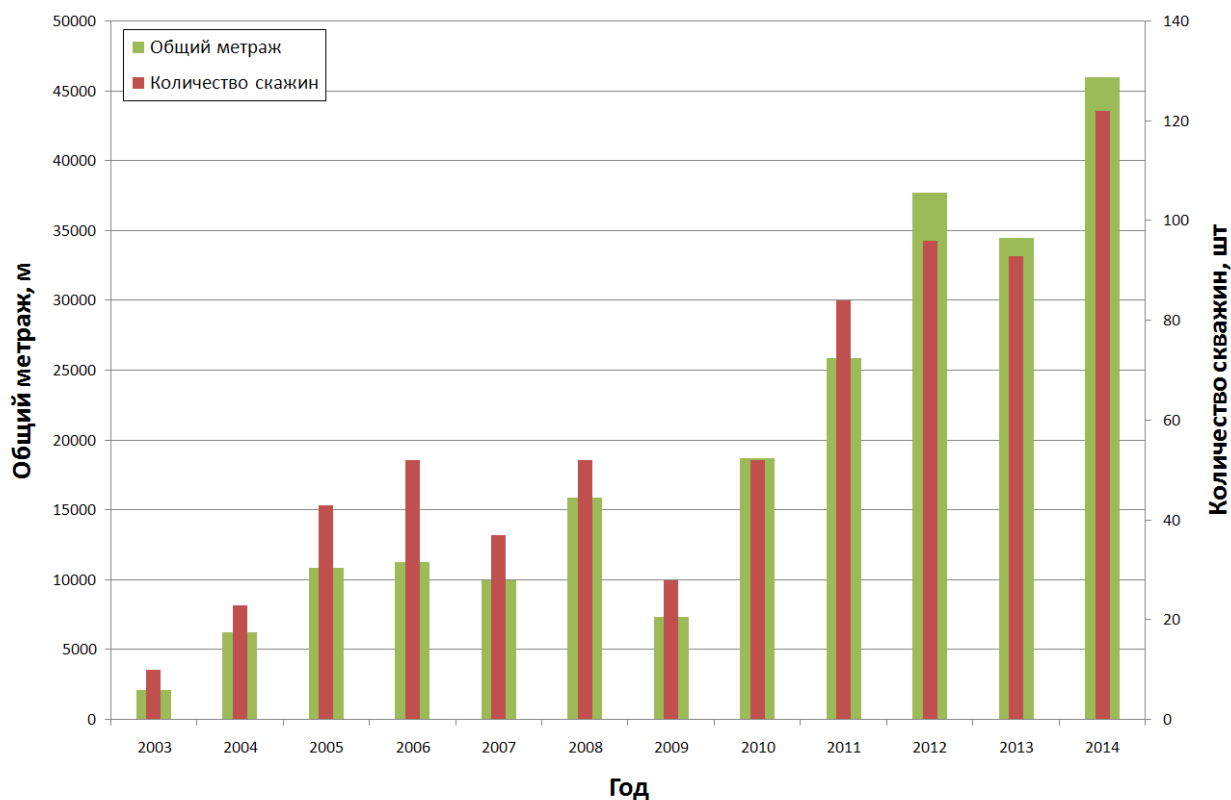


Рис. 9. Статистика работ проведенных методом ЯМК

Дальнейшее развитие программно-методического комплекса в первую очередь определяется развитием и усовершенствованием скважинной аппаратуры и связано с разработкой новых методик обработки данных каротажа. Так, при вводе в строй нового прибора, позволяющего использовать несколько частот при измерении на одной точке глубины, появляется возможность применения принципиально новых методических возможностей – многомерных ЯМР – исследований, которые открывают новые возможности для интерпретации данных каротажа.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные выводы и результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Проведен анализ существующих методов и подходов к обработке данных ядерно-магнитного каротажа, на основании которого сформулированы основные требования, предъявляемые к обработке первичных данных, и выбраны методы решения поставленной задачи.

2. Разработан итерационный алгоритм обработки первичных данных с использованием метода регуляризации, позволяющий восстанавливать распределение пористости по временам поперечной релаксации с требуемой точностью и устойчивостью.

3. Опробован подход к интерпретации данных ядерно-магнитного каротажа с использованием капиллярно-решеточной модели. На примере оценки электропроводности и проницаемости показано, что использование модели позволяет расширить возможности использования ЯМК для оценки петрофизических характеристик.

4. Разработан программно-методический комплекс «NMR Processor», предназначенный для обработки данных ядерно-магнитного каротажа. Комплекс позволяет проводить обработку первичных данных ЯМК в автоматическом режиме с требуемой точностью.

5. Опыт опробования и внедрения в производство программно-методического комплекса «NMR Processor» показали, что созданный комплекс позволяет качественно и эффективно решать поставленные задачи и по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам. Продемонстрирована возможность его применения в сложных условиях при повышенном уровне шума.

Список опубликованных научных работ:

Публикации в ведущих изданиях согласно перечню ВАК:

1. Топорков В.Г., Мурцовкин В.А., Зеленов А.С., Тарасов С.Ю. Изучение формирования остаточной водонасыщенности в гидрофильных и гидрофобных коллекторах методом ядерно-магнитного резонанса // Каротажник. – 2003. – № 110. – С. 85–97.

2. Барляев В.Ю., Барташевич В.В., Громцев В.К., Зеленов А.С., Митюшин Е.М., Хаматдинов Р.Т. Расширение возможностей производственного применения российской технологии ядерно-магнитного каротажа в искусственном поле // Каротажник. – 2006. – № 2–4 (143–145). – С. 97–108.

3. Мурцовкин В.А., Зеленов А.С. Расчет электропроводности и проницаемости горных пород по данным ядерно-магнитного каротажа // Каротажник. – 2006. – № 2–4 (143–145). – С. 108–120.

4. Зеленов А.С., Иванов Ю.Л. Исследование влияния градиента магнитного поля на результаты измерений методом ядерно-магнитного резонанса // Каротажник. – 2015. – № 254. – С. 42–52.

Публикации в других изданиях:

5. Toporkov V.G., Murtsovkin V.A., Zelenov A.S., Tarasov S.Y. The Study of Residual Water Saturation Formation in Hydrophilic and Hydrophobic Reservoirs by NMR Method // International Symposium of the Society of Core Analysts. – Monterey, California, 2002. – Paper 2002-44.

6. Зеленов А.С., Иванов Ю.Л. Особенности применения метода ядерно-магнитного резонанса в градиентном магнитном поле // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Ядерно-магнитные скважинные и аналитические методы в комплексе ГИС при решении петрофизических, геофизических и геологических задач на нефтегазовых месторождениях» – Тверь, 2014. – С. 181–192.

7. Зеленов А.С., Малинин А.В. Оценка нефтенасыщенности поровых коллекторов по данным ЯМК с использованием капиллярно-решеточной модели // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследования нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов». – Тверь, 2011. – С. 190–197.

8. Иванов Ю.Л., Митюшин Е.М., Барляев В.Ю., Сошин С.С., Зеленов А.С. ЯМР-релаксометр для анализа свойств керновгорных пород, шлама и флюидов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследования нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов». – Тверь, 2011. – С. 278–290.

9. Мурцовкин В.А., Зеленов А.С. Расчет электропроводности и проницаемости горных пород по данным метода ядерно-магнитного резонанса // Тезисы докладов всероссийского научно-практического семинара «Состояние петрофизического обеспечения ядерно-геофизических, акустических и других методов ГИС». – Тверь, 2005. – С. 65–70

10. Мурцовкин В.А., Зеленов А.С. Определение проницаемости методом ЯМК в сильном магнитном поле // Тезисы докладов XVI Губкинских чтений. – Москва, 2002. – С. 33.

11. Мурцовкин В.А., Зеленов А.С. Особенности представления и геофизической обработки данных ЯМК в сильном магнитном поле // Тезисы докладов научно-практической конференции «Ядерная Геофизика 2002». – Тверь, 2002. – С. 37.

12. Зеленов А.С. Использование капиллярно-решеточной модели порового пространства для определения петрофизических характеристик горных пород по данным метода ядерно-магнитного резонанса // Тезисы докладов VII международной научно-практической конференции молодых специалистов «Геофизика 2009». – Санкт-Петербург, 2009. – С. 397–399.

13. Зеленов А.С. Определение фильтрационно-емкостных характеристик горных пород с помощью метода ядерно-магнитного резонанса в сильном поле // Тезисы докладов V международной научно-практической геолого-геофизической конференции молодых ученых и специалистов «Геофизика 2005». – Санкт-Петербург, 2005. – С. 105–106.

14. Зеленов А.С., Тарасов С.Ю. Влияние свойств поверхности пор на определение петрофизических характеристик горных пород методом ядерно-магнитного резонанса // Тезисы докладов XII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности Западной Сибири - 2002». – Тюмень, 2002. – С. 38.

Свидетельство:

15. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «NMR Processor» №2003612705, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.12.2003 / Зеленов А.С., Мурцовкин В.А., Пантюхин В.А., Лобода Д.Р., Велижанин В.А., Тарасов С.Ю., Шеин Ю.Л.

Соискатель

Зеленов А.С.