

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Серго Орджоникидзе

На правах рукописи
УДК 550.832

МУХИДИНОВ Шухрат Валиджонович

**ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЗРЕЗЕ БУРЯЩИХСЯ СКВАЖИН
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА
(на примере Вынгаяхинского месторождения Западной Сибири)**

Специальность **25.00.10**
**Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Лухминский Борис Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Стрельченко Валентин Вадимович

кандидат технических наук
Еникеев Борис Николаевич

Ведущая организация: ООО «Арктик-ГЕРС»

Защита состоится «22» декабря 2011 г. в 15:00 часов на заседании Диссертационного Совета Д.212.121.07 в Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117485 г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, РГГРУ, аудитория 6-38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ и на сайте ВАК.

Автореферат разослан «22» ноября 2011 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета
доктор физико-математических наук,
профессор



А.Д. Каринский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В современных условиях эффективность геологоразведочных работ на нефть и газ во многом зависит от полноты и достоверности получаемой информации в процессе бурения скважин. На сегодняшний день такая задача решается комплексом методов геолого-технологических исследований (ГТИ) бурящихся скважин. ГТИ, в частности анализ бурового раствора и шлама доставляют самую первую информацию о разрезе: о наличии коллекторов, о нефте- и газопроявлениях и т.д. Полнота и качество исследования шлама особенно важны при анализе сложных коллекторов и разведке труднодоступных и трудноизвлекаемых запасов. Важна роль ГТИ при проходке горизонтальных скважин, где каротаж существенно затруднен.

В последние годы наблюдается бурное развитие и широкое применение методов ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Разработаны приборы для лабораторных исследований образцов пород (керна и шлама). Ведущими фирмами мира созданы и широко используются приборы для ядерно-магнитного каротажа (ЯМК). Можно сказать, что ЯМР и ЯМК заняли весьма достойное место в комплексе ядерно-геофизических методов исследования горных пород. Высокая точность, экспрессность и информативность метода ЯМР в определении основных петрофизических параметров – пористость, проницаемость, насыщенность флюидами и т.д., обуславливает целесообразность разработки и реализации этой технологии для оперативных исследований нефтегазоносных отложений в разрезе бурящихся скважин.

Цель работы: Разработка технологии оперативных исследований разреза отложений на основе использования метода ЯМР в процессе бурения скважины для повышения геологической информативности и эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ на примере Вынгайхинского месторождения Западной Сибири.

Основные задачи работы:

1) Осуществить анализ теоретических и практических возможностей применения скважинного и лабораторного метода ЯМР на основе отечественного и зарубежного опыта для изучения разреза скважин, а также петрофизических свойств горных пород и флюидов;

2) Осуществить экспериментальную проверку оценки свойств горных пород на разномасштабных источниках петрофизической информации (керна, шлам), изучения характеристик промывочной жидкости и пластовых флюидов посредством метода ЯМР;

3) Разработать технологию оперативных ЯМР – исследований свойств горных пород и флюидов и реализовать ее в составе комплекса ГТИ бурящихся скважин на Вынгаяхинском нефтегазовом месторождении Западной Сибири, где этот метод ранее не применялся.

Научная новизна работы:

Впервые для Вынгаяхинского нефтегазового месторождения Западной Сибири при разработке технологии оперативных исследований разреза отложений бурящихся скважин на базе метода ЯМР, получено следующее:

1. Для аркозовых песчано-алевролитовых пород месторождения установлена зависимость значений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) (открытой и эффективной пористости, остаточной водонасыщенности и проницаемости) пород, полученных по шламу, от размера его частиц. Для объективной оценки этих параметров методом ЯМР минимальный размер шламовых частиц должен быть не менее 2 мм;

2. Установлено, что значения открытой и эффективной пористости, остаточной водонасыщенности по представительному шламу отличаются от определений по керну систематически, что позволяет использовать петрофизическую калибровку по керну для достоверных оценок ФЕС горных пород по шламу. Разработанные автором подходы позволяют достоверно определять параметры ФЕС по шламу в разрезе неокомских и ачимовских отложений Вынгаяхинского, а также и соседних месторождений непосредственно в процессе строительства новых скважин;

3. Показано, что метод ЯМР позволяет определять присутствие нефти в глинистом буровом растворе исключительно на водной основе при концентрации нефти не менее 0,4 г/л. Это дает возможность определить момент вскрытия продуктивного пласта-коллектора и прогнозировать его характер насыщения;

4. Для аркозовых песчаников отложений исследуемого месторождения установлена взаимосвязь между магнитной восприимчивостью и временами релаксации горных пород. Полученная взаимосвязь определяет эффек-

тивность проведения ЯМР (ЯМК), а также определяет геолого-технические условия его проведения в скважинах Вынгаяхинского месторождения

Основные защищаемые положения:

для Вынгаяхинского месторождения Западной Сибири:

1. Созданная методика, базирующаяся на обоснованном отборе и подготовке образцов горных пород к ядерно-магнитным исследованиям, обеспечивает получение достоверных амплитудно-релаксационных характеристик ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) по шламу;

2. Разработанная методика ЯМР по определению параметров фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) (пористости, водо- и нефтенасыщенности, проницаемости) на образцах малых размеров, основанная на независимости результатов ЯМР – исследований от размера и формы образцов каменного материала, позволяет восполнить потерю геолого-геофизической информации за счет некондиционного керна или даже при его отсутствии;

3. Реализованная технология оперативных исследований нефтегазоносных отложений, базирующаяся на использовании метода ЯМР в процессе бурения скважины, обеспечивает оперативное выделение в разрезе скважины пластов-коллекторов с оценкой их насыщения, локализацию интервалов отбора керна, испытания пластов и перфорации, а также обоснование для интерпретации данных ГИС.

Практическая значимость работы заключается в повышении эффективности геолого-геофизических исследований на поисково-разведочном и эксплуатационном этапе геологоразведочных работ на Вынгаяхинском месторождении на основе реализации разработанной технологии оперативных ЯМР – исследований нефтегазоносных отложений в разрезе бурящихся скважин.

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались на: IX международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2009 г.); VII международной научно-практической конференции молодых специалистов «Геофизика – 2009» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Ядерно-геофизические методы в комплексе ГИС при контроле разработки нефтяных и газовых месторождений» (г. Бугульма, 2010 г.); Научно-практическом семинаре «Петрофизическое обеспе-

чение геофизических исследований бурящихся скважин» (Республика Куба, 2010 г.); X международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2011 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития ядерно-магнитных методов исследований нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов» (г. Тверь, 2011 г.).

Публикации: По теме диссертации опубликовано 8 работ (2 в журналах рекомендованных ВАК РФ)

Фактический материал. В основу диссертационной работы положены исследования, проведенные автором в ОАО «Газпромнефть – Ноябрьск-нефтегазгеофизика» (2006 – 2008 гг.), в ФГУП ГНЦ РФ ВНИИгеосистем и РГГРУ им. Серго Орджоникидзе (2008 – 2011). Был обработан, проанализирован и обобщен фактический материал по ГИС, ГТИ, ИПТ и результатам исследования керна. Проанализированы геолого-петрофизические характеристики пород-коллекторов Вынгайхинского месторождения, методические основы проведения ГИС, ГТИ и петрофизических исследований, обработки и интерпретации их данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы – 124 страниц текста, 32 рисунка. Список литературы содержит 100 наименований, в т.ч. 24 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.физ-мат.н., профессору Б.Е. Лухминскому за неизменное внимание, ценные советы и конструктивные замечания, а также ведущим научным сотрудникам ФГУП ГНЦ РФ ВНИИгеосистем к.т.н. Я.Л. Белораю и к.т.н. И.Я. Кононенко за предоставленную возможность экспериментальных исследований, неоценимую помощь и консультации на всех стадиях проведенных работ и написания диссертации.

Автор выражает свою искреннюю признательность ученым и специалистам д.т.н. А.М. Блюменцеву, к.т.н. Б.Ю. Мельчуку, к.т.н. А.В. Барановской за плодотворные советы и ценные замечания, а также С.В. Ибрагимовой за помощь в сборе и первичной обработке геолого-геофизических материалов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследований, научная новизна работы, практическая значимость.

В главе I представлен обзор современного состояния оперативных геолого-геофизических и петрофизических исследований нефтегазоносных отложений бурящихся скважин. Проведен анализ существующих методов оперативных исследований разреза, проводимых в процессе строительства нефтегазовых скважин.

Оперативные геолого-геохимические и петрофизические исследования разреза бурящихся скважин, позволяющие своевременно решать целый ряд геологических задач и осуществлять обеспечение геофизических исследований скважин данными прямых методов, входят в состав комплекса геолого-технологических исследований (ГТИ) и относятся к числу важных научно-практических направлений, разработка и модернизация которых необходима для повышения поисково-разведочных работ на нефть и газ. В развитии данного направления внесли свой вклад Адлер М.Г., Александров Б.Л., Белорай Я.Л., Головин Б.А., Горбунов В.Ф., Горбачев Ю.И., Дахнов В.Н., Добрынин В.М., Кононенко И.Я., Кожевников С.В., Лукьянов Э.Е., Марьянова Е.В., Морозов С.И., Мельников И.Г., Мелик-Шахназаров А.М., Махов А.А., Моисенко А.С., Неретин В.Д., Нестерова Т.Н., Никулин Б.А., Петерсилье В.И., Саулей В.И., Стрельченко В.В., Толстолыткин И.П., Чекалин Л.М., Шакиров А.Ф., Яковлев С.И. и др.

На основе существующей техники и технологии комплекса ГТИ, применяемого на Вынгаяхинском месторождении был проведен анализ информативности решения геологических задач в процессе строительства скважин. Анализ позволяет сделать следующий вывод:

1. Геологическое (петрофизическое) обеспечение ГТИ по объему, качеству и количеству значительно уступает технологическому;
2. Принципиальная ограниченность технико-методических средств геологического обоснования ГТИ не обеспечивает современный уровень решения основных задач строительства нефтяных скважин;
3. Методическая и петрофизическая базы геологического обеспечения ГТИ весьма ограничены, а технологическое её оснащение недостаточно;

4. В геологической части ГТИ практически не реализованы современные достижения оперативных петрофизических исследований на базе передовых техники и технологий.

Анализ современного состояния проблемы оперативного изучения нефтегазоносных отложений разреза бурящихся скважин позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются состояние развития метода ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) в изучении свойств пород-коллекторов и насыщающих флюидов.

Геофизическое применение ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) для изучения разреза скважин базируется на петрофизическом использовании уникального физического метода ЯМР ядер водорода – протонов, содержащихся в воде, углеводородах, пластовой воды и нефти. В настоящее время ЯМР (ЯМК) служит единственным геофизическим методом, который оценивает подвижность флюида, разделяет свободную и связанную воду, подвижную и вязкую нефть.

На сегодняшний день метод ЯМР позволяет определять целый ряд важных для разведки и разработки нефтегазовых месторождений параметров горных пород и флюидов, в том числе общая, открытая, закрытая и эффективная пористости, нефтеводонасыщенность пород, проницаемость, размер пор, гидрофильность и гидрофобность коллекторов, вязкость флюидов.

В настоящее время наблюдается бурное развитие и широкое применение ЯМК в сильном поле постоянных магнитов. С целью установления связи ядерно-магнитных свойств пород с их фильтрационно-емкостными характеристиками и видом заполняющего породу флюида развитие наблюдается в области лабораторных методов ЯМР в сильном магнитном поле. В этом направлении достигнуты значительные успехи, как в области теории, так и в области практического применения метода ЯМР в лабораторных условиях и в условиях скважин (ЯМК).

Развитие аппаратурной и технологической базы ЯМР носит общемировой масштаб. Совершенствование скважинных ЯМР – исследований привело к расширению объема получаемой информации. Согласно зарубежным источникам наиболее важным достижением в области развития ЯМР является разработка аппаратуры, позволяющей, благодаря измерениям на разных

частотах, осуществлять одновременно измерение пары параметров T_2 -D, T_2 - T_1 (T_1 , T_2 – время продольной и поперечной релаксации, соответственно; D – диффузия молекул порового флюида) на разных областях от стенки скважины. Применение такой модификации ЯМК (4D NMR) позволяет не только выделить коллекторы в разрезе скважин и определить их пористости и содержания свободного флюида, но и дает возможность оценивать состав и вязкость пластового флюида в промытой зоне и более удаленных областях коллектора, т.е. оценивать динамику проникновения. За рубежом аналогичные подходы применяются и при лабораторных исследованиях керна.

Другим достижением в области аппаратурно-технической базы ЯМР является разработка магниторезонансной томографии (Magnetic Resonance Imaging – MRI), получившая широкое распространение в медицине. MRI – исследования позволяют без разрушения образца получать изображение порового пространства в последовательности сечений исследуемого объекта, а совокупность полученных изображений представить в виде трехмерной картины поровой системы. Визуализация порового пространства дает возможность непосредственно наблюдать за движением в поровом пространстве коллектора смешивающихся и несмешивающихся флюидов, а также за процессом вытеснения одного флюида другим.

За рубежом исследование образцов пород методами ЯМР уже давно вошло в комплекс петрофизических исследований. В отличие от этого в России этот метод до сих пор входит в дополнительный комплекс петрофизических исследований.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что возможности метода ЯМР используются не полностью. Это обуславливается тем, что, во-первых, отсутствует стандартная аппаратура, которой могли бы быть оснащены основные петрофизические лаборатории, во-вторых, нет стандартной методики ЯМР – исследования разноразмерных образцов горных пород, в частности шлама богатейшего геологического материала, поступающего из скважины в процессе бурения.

Следует отметить, что еще в 1980-е годы В.Д. Неретиным, Я.Л. Бело-раем и др. была показана возможность определения коллекторских свойств пород посредством ЯМР – исследований шлама. По причине отсутствия стандартной аппаратуры и технологии в практику геофизических исследова-

ний этот метод не вошел. Большой вклад в развитие метода ЯМР внесли С.М. Аксельрод, Я.Л. Белорай, А.А. Злобин, И.Я. Кононенко, Е.М. Митюшин, В.Г. Топорков, Б.И. Тульбович и др., зарубежом – W. Kenyon, N.Heaton, R.Kleinberg, M. Miller, A.Timur, R.Brown, K. Mirotnich, S. Kryuchkow, K. Strack. В работе последних зарубежных исследователей описана аппаратура MR-MLTM и методика исследования образцов шлама. Эта аппаратура портативная весом 25 кг и может применяться, как в лаборатории, так и непосредственно на скважине. В России для ЯМР анализа горных пород и флюидов применяются аппаратуры отечественного и зарубежного производства такие как «Bruker» (Германия), «Magan Ultra», «CoreSpec» (США), «Протон» (Россия – Беларусь), MST-05 (г. Екатеринбург, Россия).

В главе III приводится физико-литологическая характеристика пород-коллекторов Вынгайхинского месторождения.

Продуктивный разрез Вынгайхинского месторождения, включающий пласты групп БП₁₁, БП₁₂, БП₁₆₋₁₇, Ю₀ и Ю₁, относится к терригенному типу и включает следующие литологические разности - песчаники и алевролиты слабоглинистые и глинистые, песчаники с переслаиванием глинисто-алевритистых разностей, аргиллиты и глины, а также плотные прослои, представленные песчаниками и алевролитами с высоким содержанием карбонатного вещества. Коллекторами в изучаемом разрезе являются песчаники и алевролиты мелко- и среднезернистые с включением глинистого материала, преимущественно в рассеянной, реже в слоистой форме.

Физические свойства пород **пласта БП₁₁⁰** изучены по 26 скважинам, но лишь из 9 скважин были отобраны породы, часть которых можно отнести к коллекторам. Пористость коллекторов пласта БП₁₁⁰ изучена на 31 образце керна по керосину и на 31 образце по воде. Средние значения пористости по керосину в пропластках-коллекторах по скважинам изменяются от 14,1 до 20,1 % (при среднем значении 17,5 %). Среднее значение пористости по воде для пропластков составляет 18,7 %, проницаемости в области коллекторов составляет 4,14 мД, водоудерживающей способности 69,5 %. Коллектора пласта БП₁₁⁰ по классификации А.А Ханина относятся к IV-VI классу пород-коллекторов.

Пласт БП₁₁¹ является основным объектом разработки. По соотношению породообразующих минералов песчаники аркозовые, в среднем с со-

держанием кварца 28,4 %, полевого шпата 51,6 %, обломков пород 15 %, слюды 5 %. Цемент преимущественно гидрослюдисто-каолинит-хлоритовый (6-25 %), иногда гидрослюдисто-хлоритовый. В единичных порах присутствует кальцит.

Значения проницаемости в пропластках-коллекторах изменяются от 0,1 мД до 172,7 мД, среднее значение проницаемости – 16,78 мД, а значения открытой пористости по керосину для пропластков-коллекторов изменяются от 14,0 до 23,3 %, среднее составляет 18,25 %, а значения пористости по воде для тех же пропластков, изменяются от 13,3 до 24 %, среднее значение пористости равно 19,3 %. Среднее значение водоудерживающей способности составляет 57,9%. Коллектора пласта БП₁₁¹ по классификации А.А Ханина относятся к III-V классу.

Коллектора пласта БП₁₂¹ представлены как алевролитами, так и песчаниками. Минеральный состав – кварц 35-40 %, полевые шпаты 40-50 %, обломки пород 10-15 %, слюда 2-10 %. Цемент в количестве от 10-15 % до 30-40 % (для более карбонатных), по типу соответственно, пленочно-поровый, базальный и порово-базальный. В составе некарбонатных разностей в порах отмечается каолинит (1-4 %), кальцит (10-12 %), в карбонатных основным является кальцит (30-35 %). Пленки по составу гидрослюдисто-хлоритовые, прерывистые.

Средние значения проницаемости в пропластках-коллекторах по скважинам изменяются от 0,2 мД до 28,9 мД, среднее значение проницаемости составляет 9,4 мД. Средние значения пористости в выделенных пропластках-коллекторах составляют 17,7 % по керосину и 18,1 % по воде. Водоудерживающая способность в среднем для пласта составляет 46,2 %. По классификации А.А. Ханина породы-коллектора пласта БП₁₂¹ относятся к IV-V классу, доминируют породы V класса.

Пласт БП₁₂². Минералогический состав: кварц – 30-35 %, полевые шпаты - 45-50 %, обломки пород - 10 %, слюда - 10-12 %. Цемент по типу конформно-порово-пленочный до конформно-пленочно-порового, распределен неравномерно. Пленки, в основном, тонкие прерывистые, по составу хлоритовые.

Количественное содержание кварца по скважине 2162 составляет 31,4 %, полевого шпата – 48,7 %, обломков горных пород - 10 %, слюды – 9,8 %, акцессорные минералы 0,1%.

Средние значения проницаемости в пропластках-коллекторах изменяются от 1,5 мД до 19,3 мД, и составляют в среднем 5,9 мД. Пористость коллекторов пласта БП₁₂² изучена на 51 образце керна. Средние значения пористости (по воде) в пропластках, отнесенных к коллекторам, изменяются от 16,6 до 18,5 %, при среднем 17,4 %. По классификации А.А. Ханина породы-коллектора пласта БП₁₂² относятся к V и VI классу.

Ачимовские отложения (пласты БП₁₆ и БП₁₇). Доминирующими пороодообразующими минералами являются полевые шпаты (57-64 %), в меньшем количестве присутствует кварц (24 %-27 %), обломки различных горных пород (5 %-7 %) и слюды (5 %-8 %).

Фильтрационно-емкостные свойства **пласта БП₁₆** лабораторными исследованиями охарактеризованы в 12 скважинах. Средние значения проницаемости в пропластках-коллекторах изменяются от 0,14 мД до 4,9 мД и составляют в среднем 1,45 мД. Значения пористости по керосину в тех же пропластках изменяется от 14,9 до 19,2 %, среднее значение составляет 16,9 %, по воде среднее 17,6 % (от 15,7 до 19,5%). Значения водоудерживающей способности пропластков-коллекторов изменяется от 42,9 % до 79,5 % и в среднем для пласта составляет 58,4 %. По классификации А.А. Ханина породы-коллектора пласта БП₁₆ относятся к V-VI классу.

Фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов **пласта БП₁₇** определены по керну пяти скважин. Средние значения проницаемости в пропластках-коллекторах изменяются от 0,13 мД до 1,1 мД, и составляет в среднем 0,32 мД. Средние значения пористости (по керосину) в пропластках-коллекторах изменяются от 15,0 до 16,4 %, в среднем 15,8 %. По воде средняя пористость в пропластках изменяется от 15,0 до 18,2% и в среднем составляет 16,2 %. Значения водоудерживающей способности в пропластках-коллекторах изменяется от 57,8 % до 81,7 %, и в среднем для пласта составляет 72,3 %. По классификации А.А. Ханина породы пласта БП₁₇ относятся к V-VI классу коллекторов.

Отложения баженовской свиты охарактеризованы керновым материалом в 8 скважинах рассматриваемого участка – 31Р, 37Р, 38Р, 51Р, 352Р,

355Р, 551 и 3008. С отбором керна по пласту было пройдено 141,7 м, линейный вынос составил 100,4 м.

Пласт Ю₀ Минеральный состав пород баженовской свиты (по данным РСА) включает каолинит от 25 до 45%, хлорит от 10 до 55%, гидрослюды от 35 до 45% и смешанослойные образования 10-20%. По всем показателям, исследуемые образцы принадлежат к неколлекторам.

Пласт Ю₁¹ Средние значения проницаемости в пропластках-коллекторах пласта Ю₁¹ изменяются от 0,24 мД до 126 мД, и в среднем составляет 32,97 мД. Средние значения пористости по керосину в тех же пропластках изменяются от 15,1 до 19,1 %, при среднем по пласту – 17,1 % и среднее 18,1 % (16,6-20,1%) по воде. Среднее значение водоудерживающей способности составляет 30,1 %. По классификации А.А. Ханина породы-коллектора пласта Ю₁¹ относятся к III-V классу.

Глава IV посвящена разработке технологии, базирующейся на использовании метода ЯМР для оперативного исследования нефтегазоносных отложений бурящихся скважин, на примере Вынгайхинского месторождения.

Разработка указанной технологии включает обоснованный выбор состава, структуры и создание основных элементов в соответствии с геолого-технологическими особенностями изучения месторождения.

Для информативного и эффективного применения технологии оперативных ЯМР – исследований разреза бурящихся скважин на разных стадиях геологоразведочных работ оптимизированы и созданы функциональные элементы, в том числе:

- параметрический ряд оперативных ЯМР – исследований горных пород и флюидов;
- структурная схема функционирования технологии оперативных ЯМР – исследований;
- аппаратно-техническая база ЯМР;
- методическая система подготовки и проведения ЯМР – исследований, а также определения петрофизических и геофизических параметров по шламу в реальном времени строительства нефтегазовых скважин;
- метрологическая база обеспечения качества измерений и определений ядерно-магнитных и петрофизических характеристик горных пород и флюидов.

Петрофизические параметры нефтегазоносных пластов-коллекторов и вмещающих пород в значительной мере определяют геолого-экономическую ценность разведанных залежей и месторождений. Согласно инструкции ГКЗ, при поисках и разведке месторождений нефти и газа оцениваются основные параметры и свойства выявленных перспективных и продуктивных коллекторов, в том числе общая и открытая пористость, водо- и нефтенасыщенность, проницаемость.

В связи с этим, проведен сравнительный анализ основных параметров нефтегазоносных пород, определяемых при традиционных и нетрадиционных петрофизических и геофизических исследованиях разрезов скважины, по результатам которого выполнен рациональный выбор параметрического ряда оперативных ЯМР – исследований, необходимого и достаточного для решения основных геолого-геофизических задач бурящихся скважин. Согласно этому в параметрический ряд оперативных исследований входят общая, открытая и эффективная пористости, остаточная водонасыщенность и проницаемость пород-коллекторов.

Разработана структурная схема функционирования технологии оперативных ЯМР – исследований разреза бурящихся скважин, предусматривающая узел отбора и подготовки образцов каменного материала и флюидов (1), модуль ЯМР – измерений (2), программно-управляемый и вычислительный комплекс (3), система комплексной геологической интерпретации (4) и узел выдачи оперативных заключений и рекомендаций (5).

Формирование структуры технологии оперативных ЯМР – исследований обусловлено ее назначением, составом и параметрическим комплексом, а также учетом геолого-технологических особенностей функционирования и реализации при оперативных исследованиях нефтегазоносных отложений бурящихся скважин.

Функционирование структурных составляющих технологии оперативного ЯМР – анализа разреза бурящихся скважин призвано оптимизировать оперативное исследование вскрытых продуктивных отложений в реальном времени.

Выбор аппаратурно-технического средства технологии проводился с учетом основных задач и требований оперативных исследований нефтегазо-

вых скважин, а также анализа технических характеристик аппаратуры и оборудования ЯМР отечественного и зарубежного производства.

Сравнительный анализ технических средств, применяемых в геолого-геофизической практике, показал, что для оперативных исследований поисковых и разведочных скважин наиболее перспективно использовать аппаратуру типа «Протон – 20» петрофизического назначения. Для релаксометра ЯМР типа «Протон – 20» характерны: высокая чувствительность и точность измерений; производительность, экспрессность измерений и обработки результатов; долговременная стабильность и эксплуатационная надежность; а также портативность и транспортабельность.

В качестве метрологического обеспечения оперативных ЯМР – исследований горных пород и флюидов были выбраны разработанные во ВНИИгеосистем аттестованные государственные стандартные образцы объемного влагосодержания (пористости) типа ГСО ЯМР 2468-82 и государственные стандартные образцы объемного водородсодержания полифазных флюидов типа ГСО ИЯМР 5262-90 – 5264-90.

Разработка блока методического обеспечения технологии оперативных ЯМР – исследований на базе выбранного аппаратурно-технического средства, в частности релаксометра ЯМР типа «Протон – 20» предусматривала:

- проведение петрофизического обоснования ЯМР – определений основных петрофизических свойств пород-коллекторов Вынгайхинского месторождения;
- создание методики обоснованного отбора и подготовки образцов шлама к ЯМР – анализу;
- разработку методики получения геологической информации в процессе бурения на основе ЯМР – определений параметров ФЕС (пористости, водо- и нефтенасыщенности, проницаемости) по образцам малых размеров (шлам), а также ЯМР – тестирования промывочной жидкости.

Петрофизическое обоснование оперативных ЯМР – исследований горных пород отложений Вынгайхинского месторождения проводилось с целью обеспечения корректных определений параметров ФЕС. Такая задача решалась путем исследования коллекции представительного керна и установления корреляционных связей между амплитудно-релаксационными характеристиками ЯМР и свойствами пород.

Поскольку амплитуда сигнала ЯМР, пропорциональна объему водородсодержащей жидкости, насыщающей пористую среду, при 100%-ном ее заполнении характеризует открытую (общую) пористость исследуемой породы, поэтому метод ЯМР относится к прямым способам определения пористости горных пород.

В диссертации показано сопоставление результатов определения открытой пористости пород на коллекции из 51 образца керна, отобранных из отложений Вынгаяхинского месторождения, методом ЯМР и гидростатического взвешивания. При этом рассчитанная абсолютная погрешность ЯМР – определений этого параметра не превышает 0,5 %, что соответствует допустимой погрешности определения пористости методом гидростатического взвешивания.

Петрофизическое обоснование ЯМР – определений содержания связанной воды образцов пород Вынгаяхинского месторождения заключалась в установлении экспериментальной взаимосвязи параметров релаксационного отношения (r_s) и содержания связанной воды (K_{eo}).

Такая задача решалась путем сопоставления вычисленных величин релаксационного отношения r_s со значениями содержания связанной воды, полученных методом капиллярметрии для одних и тех же образцов представительного керна.

В результате для Вынгаяхинского месторождения установлена зависимость $K_{eo} = f(r_s)$, которая служила основой определения содержания связанной (остаточной) воды горных пород методом ЯМР.

На основе этого методом ЯМР исследована коллекция керна из 51 образца, полученная из неокомских отложений Вынгаяхинского месторождения. Оценка достоверности результатов определения остаточной водонасыщенности $K_{во}$, полученных методом ЯМР на керне проводилась путем сопоставления этих данных с результатами капиллярметрии. Коэффициент корреляции при этом составляет 0,97.

Оценка методом ЯМР коэффициента эффективной пористости, характеризующего объем порового пространства, занятый подвижной жидкостью основана на использовании уравнения $K_{эф} = K_n(1 - K_{eo})$.

Обоснование соотношения $K_{пр} = В [K_{по}^{4,4} / 100 (1 - K_{эф}/K_{по})^2]^t$, предложенного А. Тимуром для оценки проницаемости пород-коллекторов

Вынгаяхинского месторождения заключалась в определении региональных коэффициентов B и t , зависящих от литологических типов пород.

Определение этих коэффициентов проводилось путем сопоставления значений проницаемости керна, полученной по газу с результатами оценки открытой и эффективной пористости, определенной методом ЯМР на этих же образцах. Установлено, что для аркозовых песчаников Вынгаяхинского месторождения значения коэффициентов B и t составляют 0,0045 и 1,49, соответственно.

Для эффективности проведения ЯМР – измерений, а также прогнозирования геолого-технических условий ЯМК на коллекции керна из 51 образца отложений Вынгаяхинского месторождения была измерена магнитная восприимчивость и установлена взаимосвязь с ЯМР – характеристиками.

Полученные результаты ЯМР – определений открытой и эффективной пористости, остаточной водонасыщенности и проницаемости, полученные на керне методом ЯМР с использованием обоснованных связей и уточненных зависимостей, указывают на то, что значения этих параметров с удовлетворительной точностью соответствуют величинам, определенным стандартными методами петрофизических исследований.

Необходимо отметить, что петрофизическая информация о свойствах пород-коллекторов, вскрытых в процессе бурения скважины, может быть получена по образцам шлама. Получение такой информации по шламу наиболее перспективно в связи с возможностью сплошного анализа разреза пройденных скважиной горных пород. Вместе с тем, объектовые и масштабные особенности шлама обуславливают создание подходов и способов получения достоверной информации при его ЯМР – исследовании.

На основе специальных особенностей ЯМР – измерений шлама создана методика обеспечивающая получение достоверной информации о свойствах пород-коллекторов Вынгаяхинского месторождения. При создании алгоритма и методики оперативного ЯМР – анализа шлама потребовалось решить ряд ключевых вопросов, обусловленных объектовыми, методическими и техническими особенностями исследования шлама, а именно:

- выбор размеров исследуемой фракции шлама;
- необходимое состояние исследуемой пробы шлама;
- влияние примесей в пробе и т.п.;

- вклад поверхностной воды частиц шлама на сигнал ЯМР;
- корректная привязка шлама к глубине.

Считается, что метод ЯМР позволяет определять параметры ФЕС по шламу размером частиц не менее 3 мм (В.Д. Неретин, Я.Л. Белорай). С целью определения представительной фракции шлама для ЯМР – оценки основных параметров ФЕС терригенных пород Вынгаяхинского месторождения, были проведены экспериментальные исследования.

Эксперимент заключался в том, что из 14 исследованных методом ЯМР образцов керна Вынгаяхинского месторождения с помощью дробилки был получен шлам разной фракции. Каждая проба (фракция) шлама исследовалась методом ЯМР. Результаты определения ФЕС по шламу были сопоставлены с данными по исходным кернам.

В результате экспериментальных ЯМР – исследований разной фракции шлама для аркозовых алевро-песчаных пород отложений Вынгаяхинского месторождения установлена зависимость параметров ФЕС от размера частиц шлама. Согласно получаемой погрешности при ЯМР – определении пористости (**Рис.1**), для объективной оценки значений ФЕС по шламу методом ЯМР необходимо отбирать шлам размером частиц не меньше 2 мм.

Для оперативных ЯМР – исследований необходимо использовать свежееотбренные и естественнонасыщенные образцы шлама, что повышает геологическую представительность (при прочих равных условиях) по сравнению с подсушенным или сухим шламом и производительность его ЯМР – анализа. Второе объясняется тем, что исключается необходимость операций досухи и последующего насыщения этих образцов, тогда как их естественные свойства, структура и насыщение в значительной мере сохраняются.

При подготовке отобранных проб шлама рекомендуется определенная последовательность операций по промывке, фракционированию, привязке, магнитному сепарированию, герметизации и т. п.

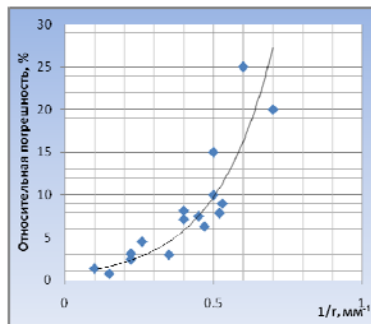


Рис.1. Зависимость получаемой погрешности при определении пористости методом ЯМР от размера частиц шлама (r)

Наличие в шламе металлических примесей, влияющих на результаты анализа, потребовало проведение предварительной сепарации шлама от них.

Одной из основных особенностей ЯМР – исследований шлама является существенное отличие размеров шламовых частиц, большая поверхность при малом объеме и разнообразной форме. Широкий диапазон изменения этих факторов и различное их влияние на определяемые петрофизические параметры исследуемых пород-коллекторов обусловили необходимость раздельной оценки объемов порового пространства частиц шлама, и межчастичной среды. При раздельном определении объемов образца породы и его порового пространства основная сложность оценки коллекторских свойств по шламу (пористость, проницаемость, насыщенность и т. п.) обусловлена трудностью и необъективностью удаления водородсодержащей жидкости (вода, УВ) с внешней поверхности частиц образца (шлама) и определения объема поровой жидкости. Установлено, что такая задача решается путем гравитационного вытеснения поверхностной водородсодержащей жидкости более тяжелой жидкостью, которая не содержит протонов, дающих сигнал ЯМР. В качестве такой жидкости использовалась фторорганическая жидкость типа М-1 с удельным весом $1,9 \text{ г/см}^3$.

Привязка отобранных проб шлама к глубине в процессе бурения скважин производится службами ГТИ путем сопоставления данных газового каротажа и люминесцентно-битуминологического анализа (ЛБА). Однако при неудовлетворительном качестве данных газового каротажа, привязка шлама осуществляется после проведения комплекса ГИС, путем сопоставления литологических колонок, построенных по литологическому описанию шлама и ГИС, что снижает оперативность исследований. Поэтому для повышения точности привязки шлама к глубине в режиме реального времени предлагается использовать результаты ЯМР – анализа шлама, в том числе полученной пористости и данных продолжительности бурения («буровой пористости»), предложенной Э.Е. Лукьяновым и В.В. Стрельченко, наряду с газовым каротажем.

С целью оптимизации режимных параметров бурения для получения достоверных результатов скорости проходки, по которой рассчитывается

«буровая пористость», были изучены упруго-прочностные и механические свойства пород Вынгайхинского месторождения.

Разработка методики ЯМР – определений параметров ФЕС пород по шламу при оперативном исследовании разреза бурящихся скважин Вынгайхинского месторождения, в основном, опирается на:

- теоретические и экспериментальные связи петрофизических и ядерно-магнитных характеристик горных пород, установленных на представительной коллекции образцов керна;

- экспериментальные и корреляционные связи типа «шлам – керн», учитывающие объектовые, масштабные и других особенностей шламовых ЯМР – исследований.

Определительский комплекс оперативных ЯМР – исследований шлама включает практические методики оценки открытой и эффективной пористости, остаточной водонасыщенности и проницаемости коллекторов, которые обеспечивают выделения перспективных пластов-коллекторов, интервалов для отбора керна, проведения ГИС, опробования пласта и перфорации в процессе бурения скважины.

С целью определения перечисленных параметров ФЕС на образцах малых размеров (шлам) были проведены экспериментальные работы. Эксперимент заключался в том, что из 14-ти представительных образцов керна, с известными значениями ФЕС, путем дробления были получены пробы шлама, которые исследовались методом ЯМР.

Методика определения открытой пористости коллекторов посредством ЯМР по шламу, с учетом объектовых, масштабных и других факторов шламовых исследований, базируется на представлении о том, что при полном насыщении порового пространства частиц шлама водородсодержащей жидкостью ее объем соответствует объему этого пространства. Получаемая амплитуда сигнала ЯМР, пропорциональная количеству такой жидкости, характеризует пористость (емкость) исследуемого образца шлама с учетом коэффициента заполнения измерительной пробирки горной породой.

Для практического ЯМР – определения пористости горной породы по шламу необходимо отдельно оценить объем пор в частицах шлама и

объем твердой фазы этих частиц. В диссертации подробно изложена методика оценки пористости шлама методом ЯМР с учетом его особенностей.

Учитывая особенности образцов произвольной формы, методом ЯМР были исследованы экспериментальные образцы шлама. Результаты ЯМР – определений пористости шлама сопоставлялись с данными по исходному керну. Графическое сопоставление результатов ЯМР – определений открытой пористости приведено на **рис.2.**

По результатам сопоставлений пористости по шламу и исходному керну видна хорошая сходимость значений. Это указывает высокий коэффициент корреляции – 0,99.

Установлено систематическое отклонение значений пористости пород по образцам малых размеров от значений пористости по керну для терригенных отложений Вынгаяхинского месторождения. Полученная корреляционная связь типа «шлам-кern» служит для петрофизической калибровки при ЯМР – определений пористости по шламу.

Методика ЯМР – определения остаточной водонасыщенности пород-коллекторов по шламу с учетом объектовых и других особенностей нестандартных образцов малых размеров, в целом аналогична методике определения этого параметра по керну. Определение содержания связанной воды посредством ЯМР – измерений экспериментальных шламовых образцов Вынгаяхинского месторождения проводилась с использованием, установленной по керну взаимосвязи между значениями релаксационного отношения τ_s и содержанием связанной воды ($K_{св}$). Полученные значения содержания связанной воды по шламу сопоставлялись с результатами определения этого параметра по исходному керну (**рис.3.**).

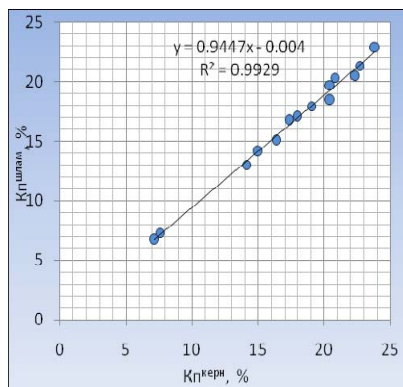


Рис.2. Сопоставление открытой пористости шлама с пористостью керна по данным ЯМР - определений

По сопоставлению видно систематическое завышение определяемых значений остаточной водонасыщенности по шламу и при этом наблюдается достаточно тесная корреляционная связь ($R=0.96$).

Причина систематического отклонения значений ФЕС по шламу от величин исходного керна объясняется особенностями шлама при его ЯМР - анализе и описывается в самой диссертации.

Методика оценки эффективной пористости коллекторов по данным ЯМР - анализа шлама основана на представлении о том, что водородсодержащий флюид в поровом пространстве различается по своей подвижности, причем подвижная его составляющая определяется как:

$$K_{эф} = K_{по} (1 - K_{во}),$$

где $K_{по}$ и $K_{во}$ - коэффициенты открытой пористости и остаточной водонасыщенности, определенные методом ЯМР.

Поэтому практический алгоритм методики оценки эффективной пористости, таким образом, предусматривает последовательное выполнение операций по определению $K_{по}$ и $K_{во}$. Среднеарифметическая погрешность такой оценки коэффициента эффективной пористости, обусловленная суммой погрешностей определения коэффициентов $K_{по}$ и $K_{во}$.

Практическая методика оценки коэффициента проницаемости $K_{пр}$ по образцам шлама реализуется с использованием предложенного А.Тимуром уравнения и установленных на представительной выборке керна региональных коэффициентов (B и t) для пород Вынгайхинского месторождения, с учетом особенностей шламовых исследований.

Другим источником прямой информации о разбурываемых отложениях служит промывочная жидкость. При разбурывании продуктивных пластов

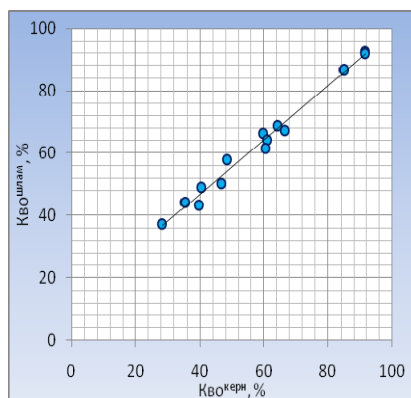


Рис.3. Сравнение значений остаточной водонасыщенности по шламу и исходному керну по данным метода ЯМР для отложений Вынгайхинского месторождения

нефть и газ, находящееся в порах коллектора, поступают в буровой раствор, изменяя его свойства, и выносятся с ним на поверхность.

Обнаружение следов нефти в промывочной жидкости основано на использовании глинистого раствора исключительно на водной основе и изучении амплитудно-релаксационных особенностей метода ЯМР.

В связи с этим был проведен эксперимент, который заключался в ЯМР – тестировании глинистого раствора аналогичного раствору, применяемого для бурения скважин на Вынгаяхинском месторождении. После получения спектральных и временных характеристик ЯМР для «чистого» бурового раствора в исследуемую пробу раствора добавлялась нефть, имитируя вскрытие продуктивного пласта-коллектора. Каждая проба раствора с определенной концентрацией нефти в ней исследовалась методом ЯМР.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента установлено, что метод ЯМР позволяет определять присутствие нефти в глинистом буровом растворе при концентрации нефти не менее 0.4 г/л. Это позволяет определить момент вскрытия продуктивного коллектора в процессе бурения.

В результате проведенных исследований и на основе опыта опробования был также разработан оптимальный алгоритм комплексной методики оперативного анализа шлама с использованием вышеприведенной структурно-функциональной схемы технологии.

В главе V рассмотрены результаты реализации технологии оперативных ЯМР – исследований горных пород и флюидов отложений бурящихся скважин Вынгаяхинского месторождения.

Основными задачами оперативных исследований были выделение в разрезе скважины всех типов пород-коллекторов, оперативная оценка значений ФЕС пород-коллекторов, оптимизация геолого-геофизических и технологических работ (оптимизация режимных параметров бурения, выбор интервалов отбора керна, проведения ГИС, ИПТ и перфорации).

С целью решения перечисленных задач посредством разработанной технологии проведены оперативные ЯМР – исследования разреза скважины № 2183st2 в интервале пласта БП11-1 (2520 – 2570 м.) Вынгаяхинского месторождения. Исследуемый интервал представлен мелко- и среднезернистыми кварцевыми песчаниками серого, светло-серого цвета на глинисто-карбонатном цементе порово-базального типа.

Посредством техники и методики разработанной технологии оперативных ЯМР – исследований в процессе бурения скважины в интервале пласта БП11-1 были выделены 4 пласта-коллектора. После чего был проведен комплекс ГИС.

Сравнительный анализ результатов интерпретации ГИС и оперативных ЯМР – исследований показывает хорошую сходимость заключений по исследуемой скважине.

Посредством технологии оперативных ЯМР были исследованы ачимовские отложения пробуренные скважиной № 690 Вынгайхинского месторождения.

Сопоставление результатов оперативных ЯМР – исследований и ГИС показывают, что, несмотря на хорошую сходимость открытой пористости, наблюдается расхождения в значениях остаточной водонасыщенности и проницаемости. При этом остаточная водонасыщенность по ГИС ниже, чем по ЯМР, а проницаемость по ГИС – на порядок завышена. Несоответствие значений проницаемости привело к проведению ИПТ, результат которого подтвердил данные оперативных ЯМР – исследований, тем самым определил его эффективность как геологическую, так и экономическую.

В диссертации также показана эффективность ЯМР – анализа шлама с целью восполнения потери петрофизической информации при нехватке керна или даже при его отсутствии.

В заключении изложены основные результаты работы:

Впервые для отложений Вынгайхинского месторождения Западной Сибири при разработке технологии оперативных исследований разреза бурящихся скважин на основе метода ЯМР было получено следующее:

1. Проведено петрофизическое обоснование ЯМР – определения основных параметров ФЕС горных пород.
2. Экспериментальными ЯМР – исследованиями установлена зависимость открытой и эффективной пористости, остаточной водонасыщенности и проницаемости пород по шламу от размера его частиц. Полученная зависимость позволила определить минимальный размер представительной фракции шлама для аркозовых песчаников отложений Вынгайхинского месторождения.

3. Создана методика обеспечения получения достоверных ЯМР – характеристик горных пород по шламу, базирующаяся на специальных особенностях его ЯМР – анализа.

4. Разработана методика ЯМР – определений параметров ФЕС (пористости, водо- и нефтенасыщенности, проницаемости) по образцам малых размеров (шлам), позволяющая восполнить потерю петрофизической информации при дефиците ядерного материала.

5. Показано, что метод ЯМР позволяет обнаружить следы нефти в глинистом буровом растворе на водной основе, что дает возможность при непрерывном ЯМР – тестировании его, определить момент вскрытия продуктивного пласта.

6. Исследованная на керне магнитная восприимчивость пород Вынгайхинского месторождения позволяет определять эффективность ЯМР и прогнозировать геолого-технические условия ЯМК.

7. Разработана технология оперативных ЯМР – исследований разреза отложений бурящихся скважин на примере Вынгайхинского месторождения Западной Сибири.

8. Показана эффективность реализации разработанной технологии при решении оперативных задач бурящихся скважин, в том числе: оперативное выделение пластов-коллекторов; оценка их коллекторских свойств и насыщения; оперативные рекомендации по локализации интервалов отбора керна, проведения ГИС, ИПТ, и перфорации.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах

1. Мухидинов Ш. В., Ибрагимова С. В. Петрофизические исследования в процессе бурения скважин для обеспечения геологической интерпретации данных ГИС // **НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 7 (186). С. 95 – 101.**

2. Мухидинов Ш. В., Ибрагимова С. В. Петрофизическое обеспечение интерпретации данных ГИС на основе дифференциального подхода // **НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 8 (187). С. 49 – 55.**

3. Мухидинов Ш.В. «Технология оперативных исследований нефтегазоносных отложений бурящихся скважин на основе метода ЯМР» // Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспекти-

вы развития ядерно-магнитных методов исследований нефтегазовых и рудных скважин, каменного материала и флюидов» (г. Тверь, 2011 г.).

4. Мухидинов Ш.В., Каримов М.А., «Петрофизические исследования в процессе бурения нефтегазовых скважин» // Доклады научно-практического семинара «Петрофизическое обеспечение геофизических исследований бурящихся скважин» (Республика Куба, 2010 г.).

5. Мухидинов Ш.В. «Петрофизические исследования бурового шлама и образцов керна для комплексной интерпретации данных ГТИ-ГИС» // Доклады VII международной научно-практической конференции молодых специалистов (г. Санкт-Петербург, 2009 г.);

6. Мухидинов Ш.В. «Петрофизическое обеспечение комплексной интерпретации данных ГТИ и ГИС при разведке и разработке месторождений нефти и газа» // Доклады IX международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2009 г.);

7. Мухидинов Ш.В. «Применение метода ЯМР для определения глинистости горных пород и состава глинистого материала» // Доклады X международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2011 г.);

8. [Белорай Я.Л.], Кононенко И.Я., Мухидинов Ш.В. «Технология оперативного контроля разработки нефтегазовых залежей» // Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Ядерно-геофизические методы в комплексе ГИС при контроле разработки нефтяных и газовых месторождений. Современное состояние и перспективы развития» (г. Бугульма, 2010 г.).

Подпись автора: _____ / Ш.В. Мухидинов /