

ПОНОМАРЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЛАБОРАТОРНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГЕОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ И ГЕОХИМИЧЕСКОЙ
ЭВОЛЮЦИИ НЕФТИ НА ПРИМЕРЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ**

Специальность 1.6.11 – Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «НОВАТЭК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР».

Научный руководитель: **Александров Вадим Михайлович** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, зам. генерального директора по геологии и ГРП Общества с ограниченной ответственностью «ТАНДЕМ», г. Тюмень.

Официальные оппоненты: **Кудаманов Александр Иванович** – доктор геолого-минералогических наук, эксперт Отдела сопровождения ГРП Центрального и Восточного Таймыра Управления ГРП – Север Западной Сибири Общества с ограниченной ответственностью «РН-Геология Исследования Разработка», г. Тюмень.

Доломатов Михаил Юрьевич – доктор химических наук, профессор, начальник научно-исследовательской лаборатории углеродных технологий и спектроскопии кафедры технологии нефти и газа Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики», г. Тюмень.

Защита диссертации состоится 24 июня 2026 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.100.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН) по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, аудитория 703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте диссертационного совета 24.1.100.01 при ИПНГ РАН и на сайте: <https://www.ipng.ru/upload/iblock/ee1/89hm8ntdxfw71ijksacegpu9gbpqu65.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат геолого-минералогических наук

Кишанков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с ростом численности населения нашей планеты, а также развитием мировой экономической системы, спрос на нефть в ближайшие десятилетия будет только расти. По данным Института энергетических исследований Российской академии наук и Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации (Прогноз развития энергетики Мира и России до 2040 года) рост потребления жидких видов топлива в Море по базовому сценарию с 2020 года по 2040 год составит порядка 10% и достигнет 5000 млн.т/год.

Это обуславливает необходимость сохранения и увеличения темпов добычи нефти. В настоящее время большинство нефтяных месторождений в России истощены, коэффициент обводненности продукции на некоторых из них достигает 90-97%. Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года, актуальными задачами для недропользователей являются ввод в разработку месторождений, в том числе нетрадиционных видов углеводородного сырья – тяжелой (высоковязкой) нефти и природных битумов; внедрение современных технологий увеличения коэффициента извлечения нефти, а также новых методов геологоразведочных работ для разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и наращивания ресурсной базы является актуальной задачей.

В основе данной работы лежит утверждение, что совершенствование теории формирования месторождений углеводородов (УВ) будет способствовать развитию инновационных технологий увеличения нефтеотдачи и КИН, а также новых подходов в геологоразведочных работах. Диссертация посвящена развитию идей И.И. Нестерова, которые базируются на концепции экзотермических процессов радикальных реакций при формировании залежей нефти (Нестеров и др., 2019). В дополнение к этому выдвинута гипотеза о дискретности геомагнитного поля и его влиянии не только на процессы генерации, но и на процессы геохимической эволюции нефти (Пономарев, 2025), что продемонстрировано в лабораторно-экспериментальной части работы. Геомагнитное поле Земли менялось на протяжении всей геологической истории, в частности, за счет инверсий и экскурсов геомагнитных полюсов.

Полученные результаты являются крайне важными с позиции дополнения современной биогенной теории формирования залежей УВ. Они демонстрируют, что в магнитном поле, предположительно из-за наличия парамагнитных центров (ПМЦ) в нефти, битумоиде и органическом веществе (ОВ) реакции крекинга УВ могут протекать в обход классическим законам термодинамики (при более низких температурах). Экспериментальные данные получены при исследованиях нефти и керн баженовской свиты, которые богаты ОВ и ПМЦ.

Степень разработанности темы. Геологии, нефтеносности и разработке залежей нефти баженовской свиты Западной Сибири были посвящены работы многих исследователей – Ф.Г.

Гурари, А.Н. Гусевой, Ф.К. Салманова, И.И. Нестерова, Г.Р. Новикова, А.А. Трофимука, А.В. Тяна, В.М. Добрынина, Т.В. Дорофеева, Е.А. Гайдебуровой, И.Ф. Гурари, В.Г. Елисеева, Ю.В. Желтова, О.Г. Зарипова, М.Ю. Зубкова, Ю.Н. Карогодина, Л.П. Климушиной, Т.Т. Клубовой, А.Э. Конторовича, Б.В. Корнева, О.Г. Краснова, Н.А. Крылова, А.Р. Курчикова, В.Г. Мартынова, Н.Я. Медведева, Р.И. Медведского, В.Н. Меленевского, В.И. Москвина, А.А. Нежданова, В.Н. Нестерова, В.С. Мелик-Пашаева, Г.Э. Прозоровича, Б.Н. Пьянкова, А.П. Соколовского, Г.М. Таруца, Е.А. Теплякова, А.Я. Хавкина, Э.М. Халимова, И.Н. Ушатинского, М.В. Дахновой, В.С. Славкина и многих других. Существенный вклад в исследование баженовской свиты в 70–80-е годы XX века был внесён научными школами ВНИГРИ, ИГИРГИ, СНИИГГиМС, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, ИГГ АН СССР, ЗапСибНИГНИ, а также рядом других научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений. В XXI веке вопросами нефтеносности и разработке залежей в баженовской свите продолжили заниматься такие организации как ВНИГНИ, ЦРН им. В.И. Шпильмана, ИННГ СО РАН, ПАО «ГЕОТЕК СЕЙСМОРАЗВЕДКА», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Газпромнефть», ПАО «Роснефть», ПАО «Сургутнефтегаз», ПАО «ЛУКОЙЛ», ЗапСибНИИГТ, МГУ им. М.В. Ломоносова, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, ТИУ и другие.

За последнее десятилетие проведено огромное количество работ, направленных на разведку и разработку залежей нефти в баженовской свите. Этими вопросами занимались такие ученые как А.Э. Конторович, А.Р. Курчиков, В.Н. Бородкин, Н.В. Пронина, А.П. Вайтехович, Г.А. Калмыков, В.Ф. Гришкевич, М.Ю. Зубков, В.Г. Эдер, А.Г. Калмыков, А.В. Ступакова, Е.А. Костырева, И.С. Гутман, В.Д. Немова, М.А. Маркин, С.И. Грачев, И.А. Санникова, Ю.А. Карпов, Л.М. Бурштейн, Е.Е. Оксенойд, И.В. Гончаров, Е.В. Пономарева, И.С. Сотнич, А.А. Нежданов, Е.А. Качкина, Е.А. Олейник, Н.С. Балушкина, Е.В. Козлова и другие. И, если вопросы поиска залежей относительно изучены, то вопросы разработки этих залежей и создания новых залежей за счет использования тепловых и волновых МУН вызывают дискуссии.

В данной работе представлены новые материалы и выводы по следующим направлениям:

- Лабораторное моделирование влияния теплового и электромагнитного – СВЧ-воздействия на коллекторские свойства черных аргиллитов баженовской свиты.
- Лабораторное моделирование влияния низкочастотного электромагнитного и теплового в комплексе с магнитным воздействием на геохимические характеристики нефти, битумоида и целостной породы баженовской свиты.
- Масштабирование результатов лабораторных экспериментов (микро-масштаба) до природных (макро-масштабов) с помощью поиска аналогий в природе с целью выработки новых рекомендаций для поиска залежей нефти в баженовской свите на региональном и поисковом этапе геологоразведочных работ.

- Обоснование актуальности развития представлений об изменении свойств углеводородов баженовской свиты под воздействием электромагнитных полей для создания эффективных промышленных технологий разработки залежей.

Целью работы является развитие биогенной теории формирования месторождений нефти, а также изучение влияния геомагнитных полей на процессы генерации и геохимической эволюции нефти.

Задачи исследований исходят из основной цели и могут быть сформулированы следующим образом:

1. Литературный обзор по темам: поисковые критерии нефтеносности баженовской свиты, современные технологии разработки залежей нефти в баженовской свите, теория формирования и разработки залежей нефти в баженовской свите по И.И. Нестерову.

2. Оценка экспериментальных возможностей имеющейся в распоряжении лабораторной базы.

3. Планирование и проведение лабораторных экспериментов по моделированию влияния тепловых и магнитных воздействий на образцы баженовской свиты.

4. Исследование экспериментальных образцов широким комплексом современных лабораторных методов: компьютерная рентгеновская микротомография (микро-КТ), газовая хроматография, изотопная масс-спектрометрия, ЭПР-спектрометрия и другие.

5. Анализ и статистическая обработка полученных результатов.

6. Обобщение полученных результатов в контексте технологий совершенствования представлений о биогенной теории формирования месторождений УВ.

Научная новизна

1. Впервые представлена гипотеза влияния геомагнитных полей в результате инверсий и экскурсов на процессы генерации и геохимической эволюции нефти, которая подтверждена результатами лабораторного моделирования.

2. Впервые экспериментальным путем установлено, что постоянное магнитное поле (напряженность 50 мТ) в комплексе с температурным воздействием (270 °С) увеличивает выход легких УВ при пиролизе НАWK.

3. Впервые зафиксировано, что в результате воздействия на нефть переменным электромагнитным полем частотой 50 Гц происходит изотопное фракционирование ^{13}C в нормальных алканах, а также биомаркерах: пристан и фитан.

4. Впервые в результате эксперимента по нагреву при постоянном магнитном поле и температурном воздействии установлено, что в битумоиде образцов, прогретых в магнитном поле, наблюдается снижение нефтяной фракции УВ (площадь нефтяного горба значительно

меньше), геохимические характеристики ОЕР и СРІ также показали статистически значимые отличия.

5. Впервые проведен сравнительный анализ влияния теплового и СВЧ-воздействий на различные литотипы баженовской свиты (на примере Салымского месторождения и Гыданского полуострова), зафиксированы изменения в структуре пустотного пространства. Сделан вывод, что в результате деформации горных пород при тектонических процессах (сжатии или растяжении), появившееся СВЧ-излучение может оказывать влияние на УВ.

Теоретическая значимость работы связана с развитием концепции И.И. Нестерова о радикальных реакциях при формировании месторождений УВ. В дополнение к этой концепции представлена новая гипотеза о влиянии геомагнитных инверсий и экскурсов на процессы формирования залежей УВ. В общей совокупности развитие и проверка этих гипотез служат развитию биогенной теории формирования залежей УВ.

Практическая значимость работы заключается в том, что в будущем, основываясь на понимании фундаментальных процессов формирования залежей УВ, появится возможность воссоздания процессов генерации УВ техногенным путем и/или активации энергетического потенциала закупоренных УВ (изолированных в капиллярах обводненных месторождений), что приведет к повышению КИН.

Представленные в работе результаты исследований были использованы в отчете по гранту РФФИ № 18-35-00070 по теме: «Исследование электрофизического воздействия на нефтегазогенерационный потенциал и коллекторские свойства керогеносодержащих низкопроницаемых горных пород, на примере керна баженовской свиты» (руководитель проекта – А.А. Пономарев).

Методы исследований и фактический материал

На первом этапе, для обоснования актуальности работы и планирования экспериментов, был использован литературный анализ. Оценка влияния тепловых и магнитных воздействий на характеристики образцов баженовской свиты проводилась с помощью экспериментального метода сравнительного анализа. В работе представлено несколько экспериментов:

1. Лабораторное моделирование влияния СВЧ-излучения на коллекторские свойства пород баженовской свиты.
2. Лабораторное моделирование влияния термического воздействия на коллекторские свойства пород баженовской свиты.
3. Лабораторное моделирование влияния термического воздействия в магнитном поле на геохимические характеристики пород баженовской свиты.
4. Лабораторное моделирование влияния низкочастотного электромагнитного поля на геохимические характеристики нефти баженовской свиты.

5. Лабораторное моделирование влияние геомагнитных полей на процессы генерации УВ из ОВ.

Образцы после экспериментов исследовались комплексом высокотехнологичных и современных методов анализа: газовой хроматографией, изотопной масс-спектрометрией, ЭПР-спектрометрией, микро-КТ и другими. Статистическая обработка результатов анализов проводилась по методу t-критерия Стьюдента, в результате которой были получены статистически значимые выводы об изменениях в характеристиках экспериментальных образцов. Последующий литературный анализ позволил оценить влияние тепловых и магнитных воздействий на характеристики образцов баженовской свиты и сформулировать выводы по проведенным исследованиям.

Материалом для проведения исследований являлись:

1. Черные плотные аргиллиты баженовской свиты (скв. № 301, Салымская площадь, интервал отбора 3005-3008 м);
2. Нефть баженовской свиты (скв. № 308-Р, Салымская площадь, интервал отбора 2873-2940 м);
3. Образцы керн (6 литотипов) баженовской свиты Гыданского полуострова – материал предоставлен ООО «НОВАТЭК НТЦ».

Основные защищаемые положения

1. Термическое и СВЧ воздействия на керн баженовской свиты в значительной степени изменяют структуру пустотного пространства. Трансформация пустотного пространства связана с крекингом ОВ, а также литолого-геохимическими характеристиками пород. СВЧ-излучение может возникать в зонах с дизъюнктивными нарушениями при тектонической активности региона, способствуя генерации УВ.

2. Низкочастотное электромагнитное поле и постоянное магнитное поле в комплексе с термическим воздействием обуславливают распад сложной нефтяной фракции нефти и битумоида, обеспечивая статистически значимые изменения в геохимических параметрах, при этом концентрация ПМЦ асфальтенов не меняется. Разрыв высокоэнергетических связей -С-С-нафтяной фракции объясняется каталитическими свойствами ПМЦ при взаимодействии с магнитным полем, которые обуславливают химические реакции, противоречащие законам классической термодинамики (в обход энергетического барьера разрыва связей -С-С-).

3. Постоянное магнитное поле оказывает влияние на процессы генерации УВ (увеличение легких фракций УВ) при прогреве дезинтегрированных образцов при температуре 270°C. Геохимические параметры S₁, S₃, PI и др., полученные в результате пиролиза, в образцах, прогретых в магнитном поле, имеют большие значения, нежели в дублерах без магнитного поля.

Личный вклад автора заключается в выполнении следующих исследований:

1. Планирование и частичное участие в проведении эксперимента по воздействию низкочастотным электромагнитным полем частотой 50 Гц и напряженностью 0,8 Тл на нефть баженовской свиты.

2. Планирование и проведение эксперимента по прогреву до температур 310°C черных аргиллитов баженовской свиты в постоянном магнитном поле напряженностью 50 мТл и без магнитного поля.

3. Планирование и проведение эксперимента по прогреву до температуры 500°C черных аргиллитов баженовской свиты.

4. Планирование и проведение эксперимента по СВЧ-воздействию на черные аргиллиты баженовской свиты.

5. Планирование и проведение эксперимента по прогреву 24 образцов (12 образцов в магнитном поле и 12 образцов-дублеров без магнитного поля).

6. Полностью самостоятельные исследования по оценке изменений в структуре пустотного пространства экспериментальных образцов керна методом микро-КТ: оптимизация режимов сканирования и реконструкции, расчет емкостных свойств, 3D-моделирование и интерпретация томографических изображений.

7. Самостоятельная интерпретация первичных сырых данных газовой хроматографии (разметка хроматограмм по компонентам и времени выхода, расчет компонентного состава, анализ и выявление визуальных отличий в хроматограммах экспериментальных образцов).

8. Самостоятельная интерпретация результатов изотопной масс-спектрометрии, ЭПР-спектрометрии, пиролиза по экспериментальным образцам.

9. Статистический анализ по методу t-критерия Стьюдента по комплексным исследованиям экспериментальных образцов.

10. Обобщение результатов исследования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечена использованием для исследований современных методов анализа и приборной базы: газовая хроматография («Хроматек», Кристалл 5000), изотопная масс-спектрометрия («Thermo Fisher Scientific», Delta V Advantage), компьютерная рентгеновская микротомография («BRUKER», Skyscan 1172), ЭПР-спектрометрия («BRUKER», ElexSys 680 – W- диапазон, СВЧ=94 ГГц; ESP-300 – X-диапазон). Также достоверность результатов связана с оценкой статистической значимости полученных результатов по методу t-критерия Стьюдента.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта №18-35-00070 Российского фонда фундаментальных исследований. Результаты работы обсуждались на следующих мероприятиях: Международном научном форуме молодых ученых «Наука будущего – наука

молодых» секция «Науки о Земле и рациональное природопользование» (Севастополь, 2015); IX научно-практической конференции молодых специалистов «Салмановские чтения» (Тюмень, 2011); VI конференции молодых ученых и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (Тюмень, 2016); XX международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016); XI межрегиональной конференции молодых специалистов РОСНЕФТЬ (Москва, 2016); XVII конференции молодых специалистов, работающих в организациях, осуществляющих деятельность, связанную с использованием недр на территории ХМАО-Югры (Ханты-Мансийск, 2017); Всероссийская конференция «Состояние и использование ресурсной базы углеводородного сырья Западной Сибири» (Тюмень, 2017); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2018); XXII научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири» (Ханты-Мансийск, 2018); Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности XX» (Тюмень, 2018); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2020); Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 2020); Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию начала добычи первой башкирской нефти (Уфа, 2022); Международной научно-практической конференции «Научная территория: технологии и инновации» (Тюмень, 2022).

По теме исследования опубликовано 14 научных работ, из них 5 в журналах, рекомендованных ВАК, 6 работ в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 3 работы в других научных изданиях.

Благодарности

Данная работа посвящена памяти д.г.-м.н. Нестерову И.И. (первому научному руководителю этой диссертации). Благодарность выражается моему научному руководителю к.г.-м.н. Александрову Вадиму Михайловичу. А также всем моим научным друзьям и наставникам из КФУ (д.ф.-м.н. Гафурову М.Р.), МГУ (к.г.-м.н. Коросту Д.В., к.г.-м.н. Калмыкову А.Г.), ИПНГ РАН (д.г.-м.н. Абуковой Л.А., к.г.-м.н. Кишанкову А.В., д.г.-м.н. Шустеру В.Л.), ТИУ (Кобылинскому Д.А.), ТюмГУ (к.т.н. Григорьеву Б.В.), ООО «НОВАТЭК НТЦ» (Корытову В.С.), а также остальным сопричастным к моему научному становлению, без которых выполнение работы было бы невозможно. Также благодарность выражается покойному д.г.-м.н. Курчикову А.Р., светлая память.

Объем и структура работы

В первой главе рассмотрены природные геомагнитные поля и представлена гипотеза об их влиянии на процессы генерации и геохимической эволюции УВ.

Совершенствование представлений о процессах формирования месторождений УВ по сей день является актуальной задачей, особенно с позиции поиска новых залежей УВ, а также при разработке инновационных технологий по повышению КИН. В связи с этим была сформулирована гипотеза о влиянии на процессы генерации и геохимической эволюции залежей УВ природных геомагнитных полей (большая роль отводится процессам инверсий и экскурсов геомагнитных полюсов) (Ponomarev et al., 2022). Для фундаментального обоснования этой гипотезы использовалась концепция И.И. Нестерова о роли ПМЦ в процессах формирования залежей УВ, описывающая последовательность радикальных реакций, концептуальная схема которых приведена ниже (Рисунок 1) (Пономарев, 2019).

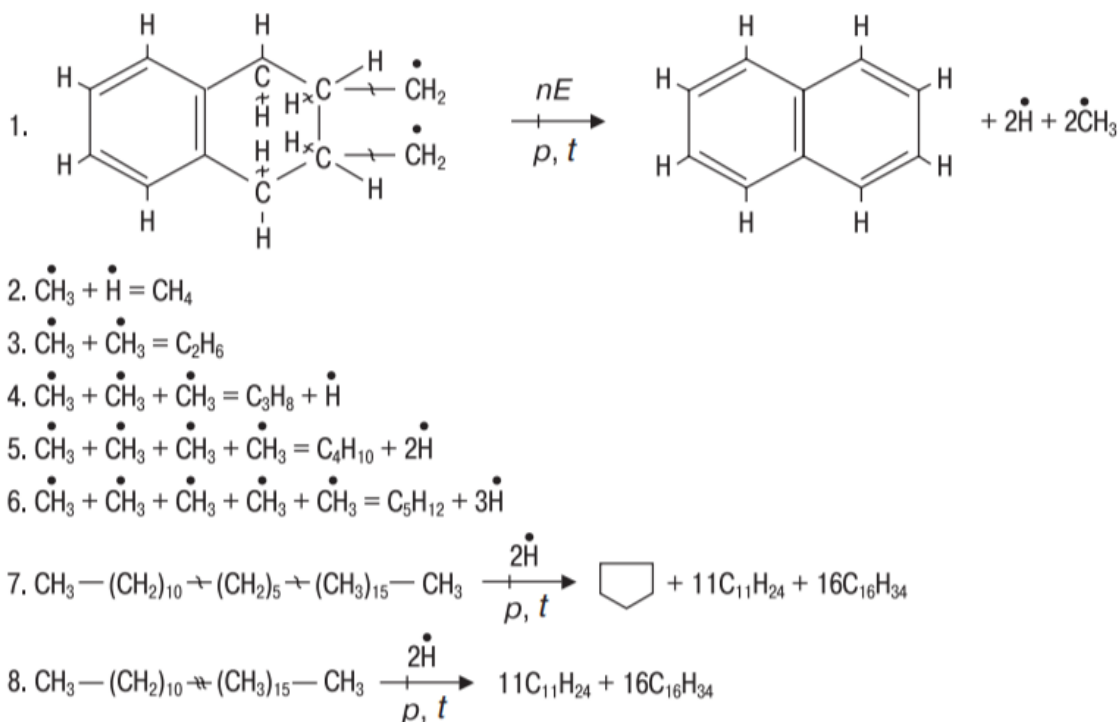


Рисунок 1 – Схема образования газообразных и жидких УВ из твердого ОВ с ПМЦ, расположенными на концах алифатических цепей молекул (Нестеров, 2015)

Согласно концепции И.И. Нестерова изменение геомагнитной обстановки в сочетании с определенными термобарическими условиями создает предпосылки, благоприятные для активации цепных экзотермических радикальных реакций, которые в последствии приводят к

разрыву высокоэнергетических связей -С-С- в исходном ОВ. Важно заметить, что И.И. Нестеров был сторонником биогенной теории *in situ*, т.е. он отвергал миграцию УВ на большие расстояния и считал, что УВ образовались там же, где находятся в текущий момент времени на месторождениях.

Глубокое погружение в концепцию И.И. Нестерова потребовало критического литературного обзора по теме дискретности (изменчивости во времени) геомагнитных полей, в результате которого выделены следующие условия её появления: 1) инверсия геомагнитных полюсов Земли; 2) тектонические дислокации; 3) тектонические процессы и зоны с дизъюнктивными нарушениями; 4) магнитные аномалии (связанные с выступлениями фундамента и палеовулканами).

Наиболее значимым оказалось явление планетарного масштаба – инверсии геомагнитных полюсов Земли. Анализ показал, что на геомагнитных полюсах напряженность магнитного поля примерно в два раза выше, чем на геомагнитном экваторе. Поэтому во время смены геомагнитных полюсов могла проявляться дискретность геомагнитных полей. Также сделано предположение, что на условной глубине 3000 м на геомагнитных полюсах напряженность поля в значительной степени выше, чем на поверхности Земли.

На основании полученной информации было спланировано и реализовано исследование воздействия широкого комплекса излучений: магнитного, электромагнитного и СВЧ, на нефть и керн баженовской свиты.

Во второй главе описано лабораторное моделирование влияния термического и СВЧ излучений на коллекторские свойства пород баженовской свиты.

Известно, что при сжатии, растяжении и трении горных пород происходит электромагнитное излучение широкого спектра: от СВЧ до рентгеновского (Закиров и др., 2023). В связи с этим для проверки гипотезы о влиянии природных геомагнитных полей на процессы формирования залежей УВ был проведен сравнительный анализ эффектов трансформации пустотного пространства в нефтематеринских породах баженовской свиты для различных литотипов (на примере Салымского месторождения и Гыданского полуострова).

На рисунке 2 представлены результаты анализа методом микро-КТ образцов, прогретых с шагом в 100°C (от комнатной температуры до 500°C).

Термическое воздействие на черные аргиллиты баженовской свиты привело к образованию трещин в результате авто-флюидоразрыва, тем самым увеличив пористость и долю более крупных пор (Пономарев, 2020).

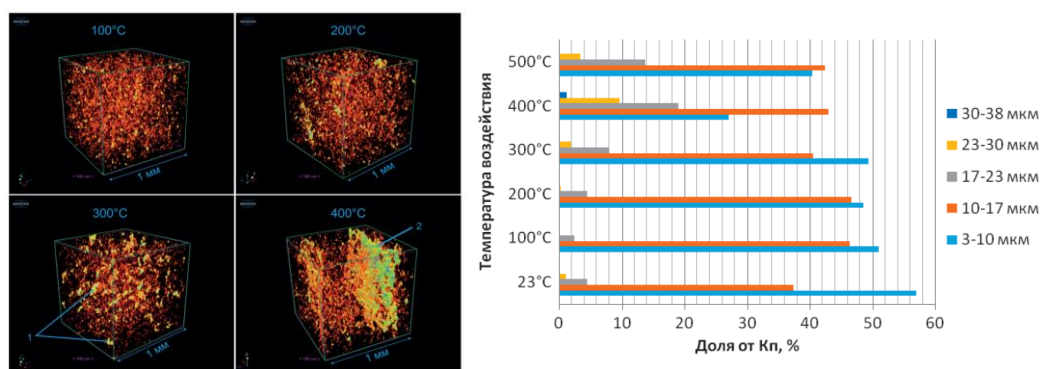


Рисунок 2 – Результаты анализа данных микро-КТ образцов черных аргиллитов бажендовской свиты, прогретых до 500°C. 1 – «конкреции» пустот, 2 – трещины (Пономарев и др., 2021)

Также был проведен эксперимент по СВЧ-воздействию на черные аргиллиты бажендовской свиты. В качестве СВЧ-излучателя использовалась бытовая микроволновая печь со следующими характеристиками: частота – 2450 МГц, мощность – 700 Вт. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3 (Пономарев, 2019).

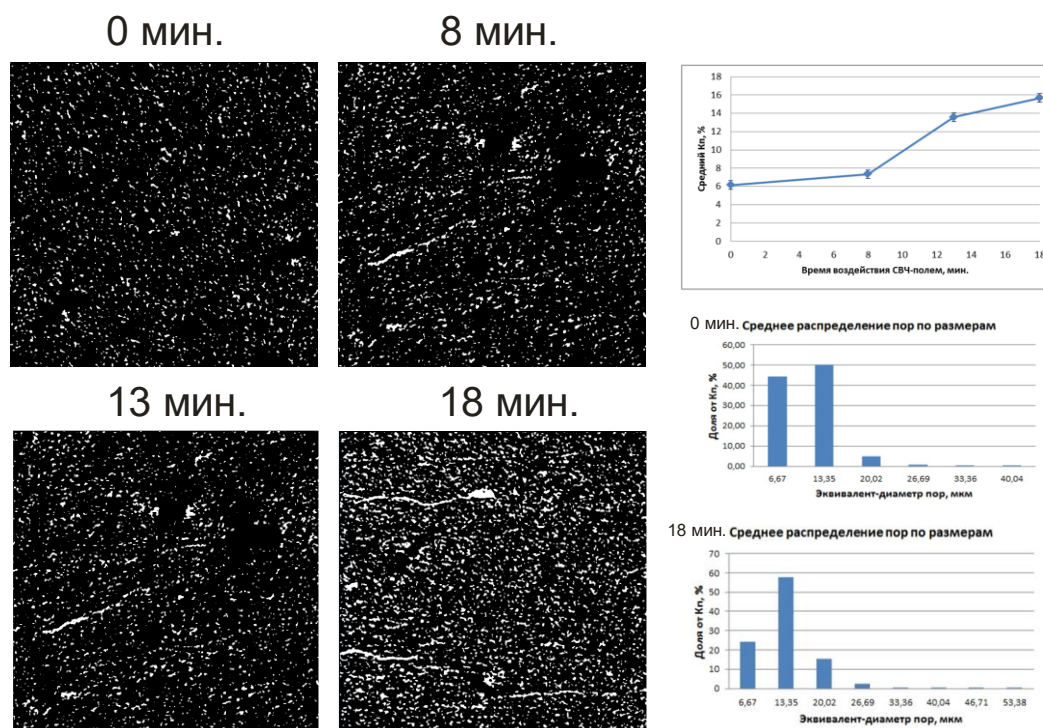


Рисунок 3 – Результаты анализа данных микро-КТ образцов черных аргиллитов бажендовской свиты после СВЧ-воздействия (слева – бинаризованное пустотное пространство, область интереса – квадраты с ребром 2 мм; справа – количественные расчеты)

Результаты экспериментов показали, что термическое и СВЧ воздействия на черные аргиллиты бажендовской свиты оказывают схожие эффекты, которые заключаются в увеличении пористости, увеличении размера пор и образовании трещиноватости. Вероятно, геометрия трансформации пустотного пространства при данных типах воздействия контролируется

пространственным и количественным содержание органического углерода в породе. Развитие технологий увеличения нефтеотдачи в баженовской свите с помощью СВЧ-воздействия на пласт выглядит перспективным.

С целью оценки эффектов воздействия на разные литотипы баженовской свиты был проведен дополнительный эксперимент, результаты которого представлены в таблице 1 (Фазлиахметов, Пономарев, 2020).

Таблица 1 – Результаты эксперимента по термическому и СВЧ-воздействиям на разные литотипы баженовской свиты

№ образца	Фото образца	Литологическое описание	Примечание	Отличия после воздействия
1		Глинисто-известковая порода серая, с примесью алевроитового материала	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Не очевидны
1.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	
2		Глинисто-известковая порода темно-серая	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Не очевидны
2.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	
3		Глинистая порода темно-серая, с примесью алевроитового материала, с глобулами пирита	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Наблюдается увеличение количества и раскрытости трещин
3.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	
4		Карбонатно-глинистая порода, серая	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Не очевидны
4.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	
5		Кремнесто-глинистая порода (силицит) темно-серая	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Не очевидны
5.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	
6		Аргиллит (кероген-кремнево-глинистая порода)	Прогрев 1,5 часа при температуре 400°C	Наблюдается увеличение количества трещин
6.1			СВЧ-воздействие 5 минут + 10 минут	

В результате эксперимента было получено и проанализировано 30 цифровых моделей образцов баженовской свиты на стадиях до и после воздействий: 12 моделей – образцы в исходном состоянии; 6 – после прогрева при 400° С; 6 – после 5 минут СВЧ-воздействия; 6 – эти же образцы (5 минут воздействия) после повторного СВЧ-воздействия в течении 10 минут.

При интерпретации цифровых моделей в 8 образцах (1, 1.1, 2, 2.1, 4, 4.1, 5, 5.1) значимых изменений не обнаружено; наиболее выраженные отличия после воздействий наблюдались в 2 образцах (3, 3.1). Для 2 образцов (6, 6.1) отмечалось увеличение количества трещин с неочевидным изменением раскрытости. На рисунках 4 и 5 приведены томографические срезы цифровых моделей образцов на разных стадиях воздействий, для которых зафиксированы наиболее выраженные изменения.

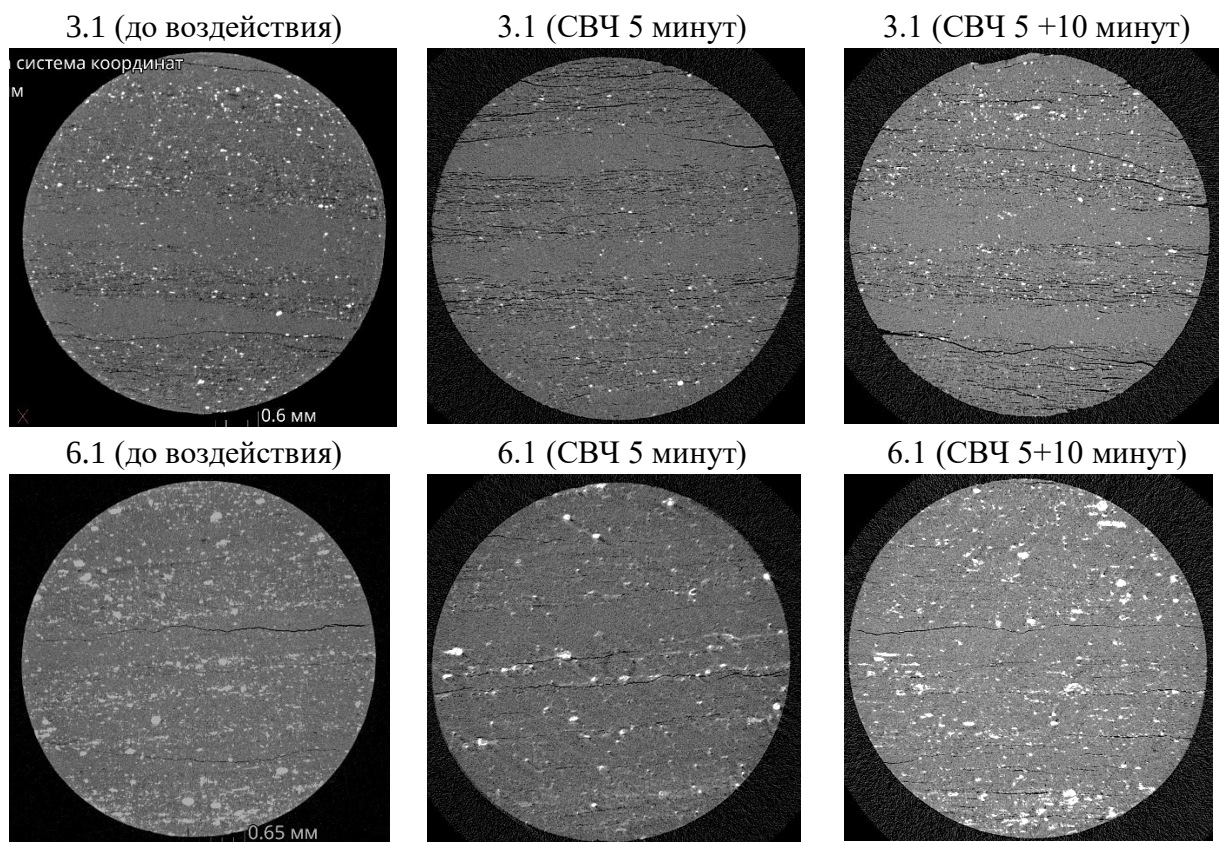


Рисунок 4 – Срезы цифровых моделей образцов 3.1, 6.1 до и после СВЧ-воздействия

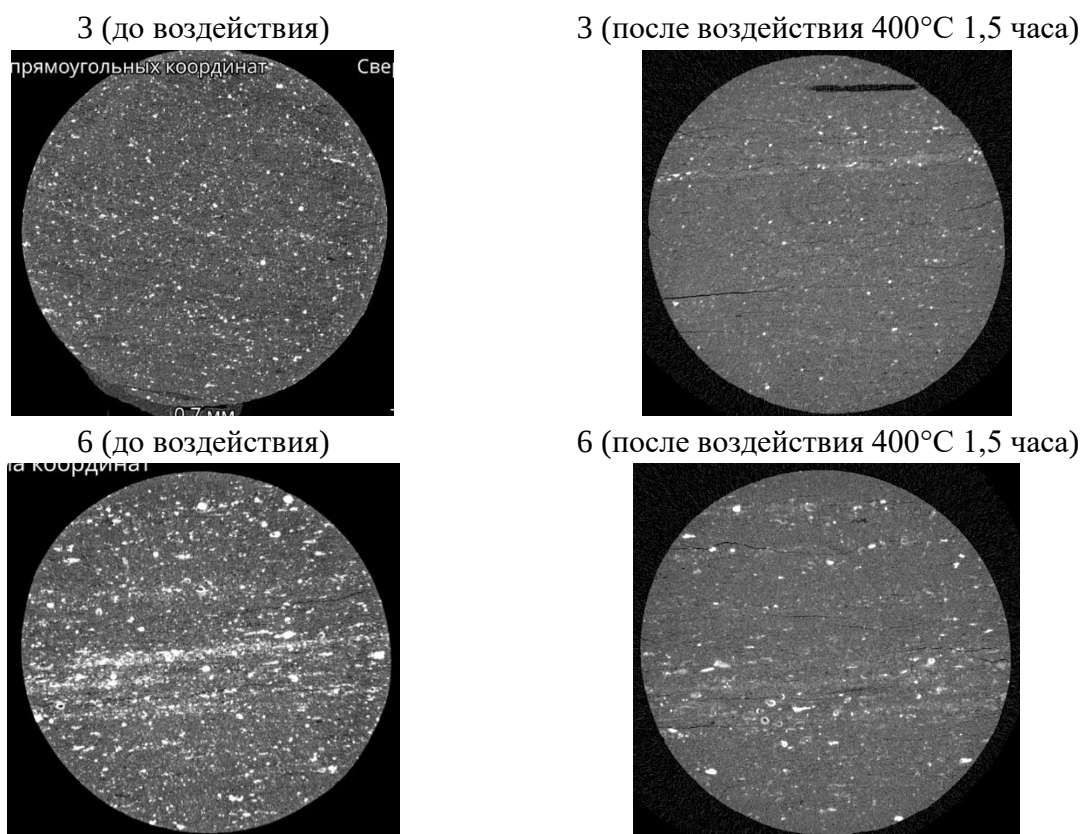


Рисунок 5 – Срезы цифровых моделей образцов 3 и 6 до и после теплового воздействия

В отечественных и международных литературных источниках пишут, что СВЧ-воздействие на нефтематеринские породы является (Скударь и др., 2023) привлекательным инновационным методом, однако нигде на промысле еще не был реализован. В сравнении с термогазовым воздействием СВЧ-воздействие является экологически чистой технологией, обладает широким диапазоном излучения, которое при правильной калибровке способно проникать в глубь пласта и прогревать значительные области. Но в обсаженных металлом скважинах СВЧ-воздействие не эффективно, т.к. не может проникать сквозь обсадные колонны. Возможно, именно поэтому оно не внедрено на промысле. Однако следует учитывать, что технологии строительства скважин, как и технологии конфигурации компонентов СВЧ-излучателей активно развиваются. В этом плане представленные в данной главе идеи являются хорошим заделом для развития технологий СВЧ-воздействия на пласт.

Особенно ценным является задокументированный факт того, что СВЧ-воздействие, как и прогрев пород, трансформирует пустотное пространство и зависит от литотипа нефтематеринских отложений. Показано, что наибольшие эффекты наблюдаются в глинисто-алевролитовых породах и аргиллитах.

Говоря о влиянии СВЧ-излучения на геологические объекты следует отметить, что оно может возникать при трении горных пород друг о друга, т.е. вблизи дизъюнктивных нарушений

во время тектонической активности. Возникающее СВЧ-излучение оказывает различное влияние на процессы генерации УВ в зависимости от литотипов нефтематеринских горных пород.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния электромагнитных и магнитных полей на процессы геохимической эволюции нефти баженовской свиты.

Представленные результаты экспериментальных работ по моделированию влияния природных геомагнитных полей (наличие которых в осадочном чехле подтверждено, но не охарактеризовано) на процессы генерации и геохимической эволюции нефти в нефтематеринских породах будут способствовать выработке новых поисковых критериев месторождений нефти, а также повысят перспективы использования электромагнитных полей в качестве методов увеличения нефтеотдачи.

Первая серия экспериментов была направлена на оценку изменений геохимических характеристик баженовской нефти в результате электромагнитного воздействия частотой 50 Гц и напряженностью $\approx 0,8$ Тл в течение 60 минут. Каждые 10 минут проводился отбор проб для анализов методами газовой хроматографии, изотопной масс-спектрометрии и ЭПР-спектрометрии, результаты которых представлены на рисунке 6 (Ponomarev et al., 2022).

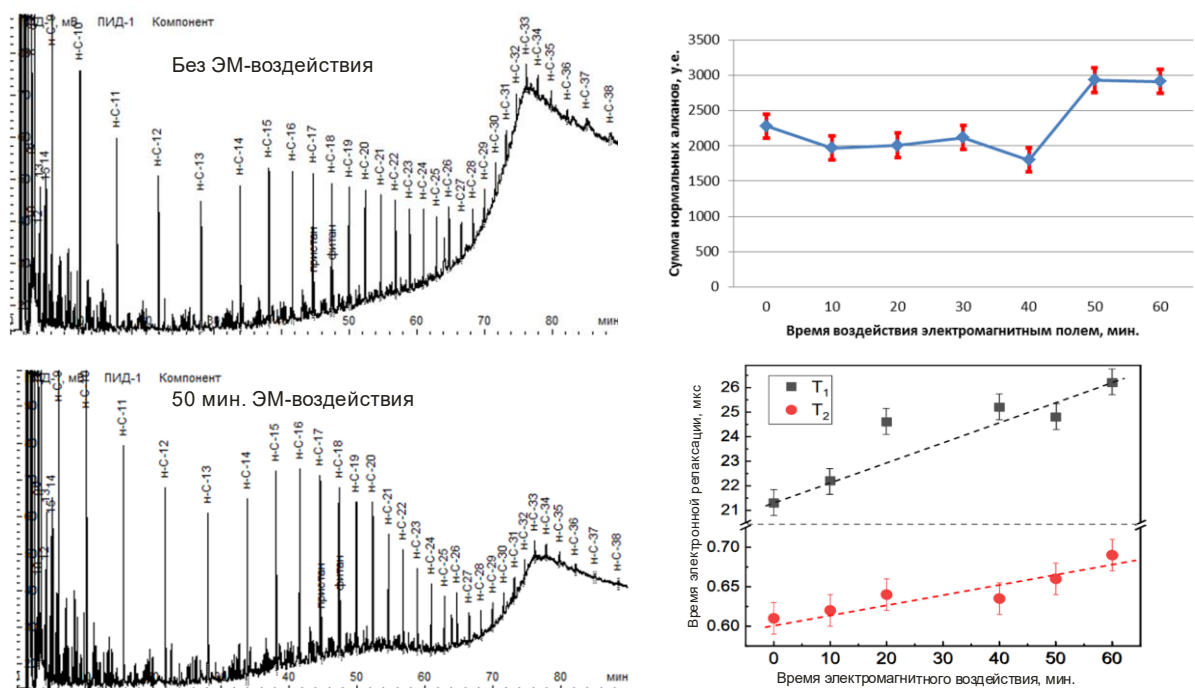


Рисунок 6 – Результаты анализа экспериментальных образцов баженовской нефти методами газовой хроматографии и ЭПР-спектрометрии.

Значительные изменения в компонентном составе нефти наблюдаются после 40-минутного воздействия электромагнитным полем. Через 50 минут воздействия на хроматограмме наблюдается отчетливое уменьшение нафтенового горба и увеличение концентрации нормальных алканов. Исследование образцов методом ЭПР-спектрометрии показало, что

концентрация ПМЦ свободного радикала не меняется. Отмечается хорошая корреляция времени электронной релаксации T_1 , T_2 со временем электромагнитного воздействия (Murzakhanov et al., 2023). Это свидетельствует о том, что крекинг асфальтенов не происходит, но при этом нефтяные соединения, расположенные близко к свободному радикалу, трансформируются в более простые алканы.

Результаты исследования образцов методом изотопной масс-спектрометрии представлены на рисунке 7.

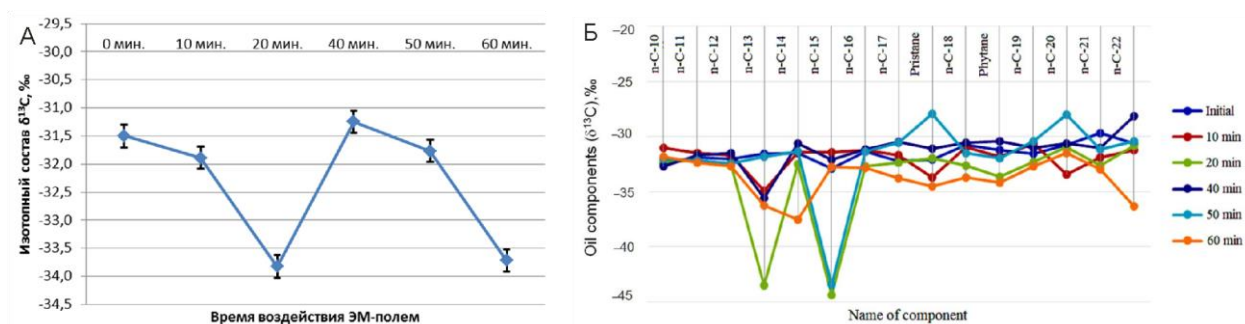


Рисунок 7 – Изменение изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ нефти (А) и компонентов нефти (Б) в результате электромагнитного воздействия

Последующая статистическая обработка результатов газовой хроматографии и изотопной масс-спектрометрии была проведена с помощью t-критерия Стьюдента. Максимальная вероятность отличий компонентного состава нефти без воздействия и с электромагнитным воздействием составляет порядка 82% (или 18% вероятность совпадений) и достигается через 40 минут воздействия. Вероятность разного изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ исследуемых компонентов нефти достигает 100% на 60 минуте. Таким образом, в результате электромагнитного воздействия происходит изотопное фракционирование ^{13}C , что может быть связано с изотопным магнитным эффектом (Бучаченко, 2007).

Второй эксперимент был направлен на оценку влияния постоянного магнитного поля на процессы генерации и геохимической эволюции нефти. В ходе эксперимента проводился прогрев черных аргиллитов баженовской свиты (массой ≈ 50 грамм) в магнитном поле напряженностью 50 мТ и без магнитного поля. Битумоидный коэффициент и компонентный состав битумоида оценивались методом газовой хроматографии. Температура воздействия не превышала 310°C , так как используемые ферритовые магниты теряют свои свойства при нагреве свыше 350°C . Результаты статистической обработки данных газовой хроматографии (Ponomarev et al., 2022) по t-критерию Стьюдента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты теста t-Стьюдента при сопоставлении геохимических характеристик

№	Критерий	Вероятность совпадения, %	Вероятность отличия, %
1	n-C23/24	12	88
2	n-C24/25	22	78
3	n-C25/26	3	97
4	n-C26/27	8	92
5	n-C27/28	48	52
6	n-C28/29	92	8
7	n-C29/30	19	81
8	n-C30/31	93	7
9	ОЕР	7	93
10	СРІ	2	98
11	Нафтенy	13	87

По факту эксперимента сделаны следующие выводы:

1. Значения битумоидного коэффициента β в образцах (в 3 из 3 случаях), прогретых в магнитном поле, больше, чем в образцах, прогретых при таких же условиях без магнитного поля. Разница значений β составляет от 0,36 до 1,9 %;

2. Исследования методом газовой хроматографии экспериментальных образцов (5 пар) показали, что такие геохимические характеристики, как n-C23/24, n-C25/26, n-C26/27, n-C29/30, ОЕР, СРІ, сумма нафтенy (нафтенyй горб) в образцах, прогретых в магнитном поле и без, при прочих равных условиях, отличаются с вероятностью 80-98% (см. таблицу 1);

3. В 4 случаях из 5 содержание нафтенyй фракции в образцах, прогретых в магнитном поле, меньше, чем в образцах без магнитного поля.

Полученные результаты исследований побудили к выработке и обоснованию новых рекомендаций для поиска месторождений нефти в баженовской свите на региональном и поисковом этапах геологоразведочных работ (Ponomarev et al., 2021).

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния постоянного магнитного поля на процессы генерации нефти в баженовской свите.

В результате описанного выше эксперимента по тепловому и магнитному воздействиям на черные битуминозные аргиллиты баженовской свиты было получено недостаточно статистических данных для исследований процессов генерации, что связано с ограниченными возможностями лаборатории. Поэтому был проведен аналогичный эксперимент, но с достаточной статистически значимой выборкой – 26 образцов черных аргиллитов баженовской свиты были исследованы методом пиролиза по технологии HAWK. Схема эксперимента представлена на рисунке 8.

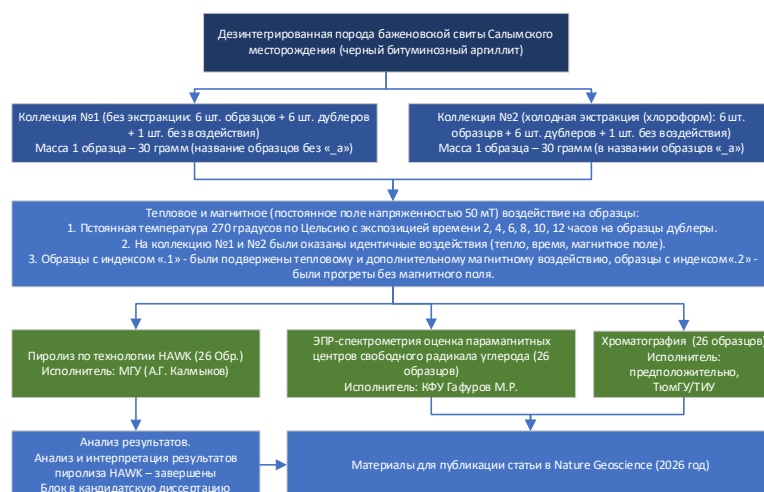


Рисунок 8 – Схема эксперимента по оценке влияния постоянного магнитного поля на процессы генерации УВ

Анализ параметров пиролиза образцов, прогретых в магнитном поле и без магнитного поля, при прочих равных условиях, проводился с помощью t-критерия Стьюдента.

Для дополнительной проверки подтвержденных значимых отличий была проведена оценка средних значений в выборках, а также построены графические сопоставления с линией равных значений.

В таблице 3 представлены результаты статистической обработки параметров пиролиза в выборках, а также оценка средних значений.

Таблица 3 – Результаты статистической обработки исследуемых параметров и коллекций (с экстракцией и без) после воздействий: «1» -прогрев и магнитное поле, «2» - прогрев

Коллекция	С экстракцией				Без экстракции			
Тип теста	F-Test	T-Test	Ср.знач. «1»	Ср.знач. «2»	F-Test	T-Test	Ср.знач. «1»	Ср.знач. «2»
S0	0,17	0,36	0,05	0,06	0,86	0,15	0,16	0,09
S1	0,55	0,22	0,34	0,25	0,57	0,10	1,91	1,23
S2	0,15	0,27	19,04	18,24	0,89	0,17	25,63	24,84
S3	0,16	0,26	0,88	0,80	0,02	0,05	1,68	1,25
TOC	0,80	0,43	5,91	5,93	0,73	0,27	7,56	7,30
Tmax	0,27	0,23	440,50	441,33	0,28	0,12	439,67	440,50
HI	0,44	0,24	321,67	306,17	0,81	0,48	340,83	341,67
OI	0,12	0,25	14,33	13,00	0,03	0,04	22,00	16,17
PI	0,69	0,24	0,02	0,02	0,61	0,09	0,07	0,05
CC	0,99	0,50	6,55	6,54	0,84	0,33	7,84	7,53
AI	0,80	0,43	4,85	4,87	0,73	0,27	6,20	5,99
OSI	0,54	0,29	6,00	4,83	0,38	0,09	26,17	16,83
CaCO3	0,98	0,50	54,54	54,54	0,84	0,33	65,35	62,78
S3CO	0,02	0	0,56	0,78	0,78	0,35	0,67	0,64
S3'	0,96	0,35	3,99	4,32	0,51	0,14	2,09	2,26
S3'CO	0,67	0,21	0,63	0,56	0,19	0,24	0,60	0,65
S4CO2	0,35	0,11	99,85	104,98	0,71	0,50	121,18	121,22
S4CO	0,19	0,21	34,52	33,31	0,48	0,14	42,30	39,53
S5	0,98	0,48	235,49	235,19	0,83	0,33	284,99	273,45
GOC	0,17	0,26	1,71	1,64	0,79	0,11	2,44	2,30
NGOC	0,76	0,27	4,20	4,29	0,67	0,37	5,12	5,00
TOC (-S1)	0,76	0,41	5,87	5,90	0,70	0,31	7,37	7,18
OI	0,05	0,11	23,67	26,33	0,12	0,01	30,67	25,00

GOC – Generative OC

NGOC – Non Generative OC

OI – Oxygen Index

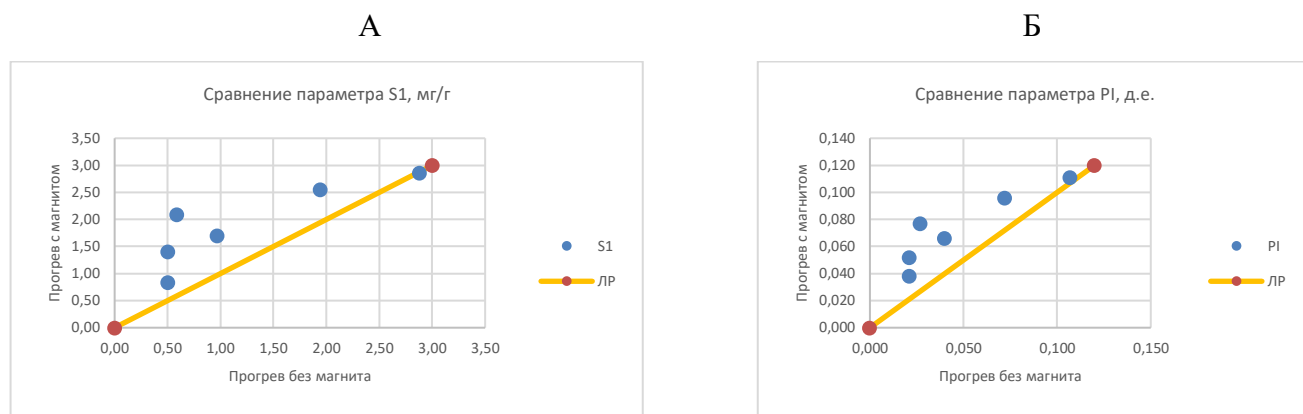


Рисунок 9 – Пример сравнения параметров пиролиза в коллекции «без экстракции»: А – сравнение параметра S1, Б – сравнение параметра PI

В коллекции экспериментальных образцов, для которых отмечались статистически значимые отличия параметров пиролиза, повышенные значения имела группа образцов, подвергшихся прогреву в магнитном поле. Повышенные значения S1 и S3 в настоящий момент объясняются недостаточной изученностью химических реакций в ОВ в результате теплового и магнитного воздействий. Эти эффекты химических реакций обусловлены наличием ПМЦ и стабильных изотопов с магнитным эффектом. Данное предположение можно обосновывать так: магнитное поле может оказывать эффект только на атомарно-молекулярные соединения, способные трансформировать свою электронную оболочку. В образцах, которые не были экстрагированы хлороформом, концентрация ПМЦ в смолах и асфальтенах и частично в ОВ в значительной степени больше. Именно поэтому эффекты от воздействия магнитного поля наиболее выражены в коллекции «без экстракции».

Влияние экстракции на эффекты трансформации ОВ и битумоида наиболее ярко выражено в следующих основных параметрах пиролиза: S0, S1, S3, HI, OI, PI, OSI и их производных. Примечательно, что изменения зафиксированы не только в характеристиках УВ-составляющей, но и в характеристиках окислительных реакций. Эксперимент, описанный в данной главе, в Мировой практике был проведен впервые, что следует из анализа литературных источников.

Представленные результаты пиролиза свидетельствуют о том, что химические реакции в ОВ после воздействий теплового и магнитного полей отличаются.

При этом основные параметры, отвечающие за количество нефтеподобных УВ, в коллекции образцов, прогретых в магнитном поле, значительно выше, чем без магнитного поля. В настоящее время экспериментальные образцы переданы на исследования ЭПР-спектрометрией и газовой хроматографией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе данной работы лежит концепция И.И. Нестерова о формировании залежей нефти в баженовской свите при участии радикальных реакций, инициируемых изменением природных геомагнитных полей. Эволюция представлений о процессах формирования залежей нефти в баженовской свите позволит в будущем создать эффективные технологии для ее разработки.

Развивая идеи И.И. Нестерова впервые в Мire была выдвинута гипотеза о дискретности природных геомагнитных полей в результате геомагнитных инверсий. В процессе углубленного изучения отечественной и зарубежной литературы по данной теме был установлен важный факт о том, что дискретность магнитного поля помимо инверсии геомагнитных полюсов может быть связана с тектоническими дислокациями, например, при формировании складок, в результате которых могут возникать электромагнитные поля широкого спектра от СВЧ до рентгеновского излучения.

Для подтверждения данной гипотезы была спланирована и реализована серия экспериментальных работ. В первую очередь необходимо было понять действует ли вообще магнитное поле на процессы генерации и геохимической эволюции нефти, битумоида и ОВ. Результаты эксперимента со статистически значимым набором данных представлены в четвертой главе.

Подытоживая результаты экспериментов, можно констатировать следующее:

1. Термическое и СВЧ воздействия на керн баженовской свиты в значительной степени меняют структуру пустотного пространства, трансформация которого контролируется литолого-геохимическими характеристиками пород. СВЧ-излучение может возникать в зонах дизъюнктивных нарушений при тектонической активности региона, способствуя генерации УВ.

2. Низкочастотное электромагнитное поле и постоянное магнитное поле в комплексе с термическим воздействием обуславливают распад сложной нафтенной фракции нефти и битумоида, обеспечивая статистически значимые изменения геохимических параметров. При этом концентрация ПМЦ асфальтенов остается неизменной. Разрыв высокоэнергетических связей -С-С- нафтенной фракции объясняется каталитическими свойствами ПМЦ при взаимодействии с магнитным полем, которые приводят к химическим реакциям, противоречащим законам классической термодинамики (в обход энергетического барьера разрыва связей -С-С-).

Доказано влияние постоянного магнитного поля на процессы генерации УВ (увеличение легких фракций УВ) при прогреве дезинтегрированных образцов при температуре 270°C. В образцах, прогретых в магнитном поле, геохимические параметры (S1, S3, PI и др.), полученные в результате пиролиза, имеют большие значения, нежели в дублерах без магнитного поля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Нестеров, И. И. Экспериментальные исследования радикальных реакций преобразования углеводородного сырья / И. И. Нестеров, В. М. Александров, **А. А. Пономарев**, М. Д. Заватский, Е. И. Лободенко, Д. А. Кобылинский, М. А. Кадыров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2019. — № 4. — С. 57–69.
2. **Пономарев, А. А.** Механизм крекинга углеводородов в электромагнитных полях — к вопросу об образовании баженовской нефти / **А. А. Пономарев** // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2019. — № 1. — С. 14–18.
3. **Пономарев, А. А.** Методика косвенной оценки наличия нефтегенерации в глинисто-битуминозных породах под воздействием СВЧ-волн / **А. А. Пономарев** // Технологии нефти и газа. — 2019. — № 2. — С. 28–31.
4. Закиров, Н. Н. Роль электромагнитных полей в развитии процессов нефтегазогенерации в нетрадиционных породах-коллекторах / Н. Н. Закиров, В. М. Александров, **А. А. Пономарев** // Нефтегазовое дело. — 2023. — Т. 21, № 5. — С. 19–28.
5. **Пономарев, А. А.** Научно-детерминистические предпосылки для исследования влияния геомагнитных инверсий и экскурсов на процессы формирования залежей углеводородов / **А. А. Пономарев** // Нефтяное хозяйство. — 2025. — № 3. — С. 38–43.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

6. Murzakhanov, F. Conventional and high-field pulsed EPR experimental studies on Bazhenov oil formation under the influence of 50 Hz electromagnetic field / F. Murzakhanov, **A. A. Ponomarev**, M. A. Khelkhal, O. Amziane, A. V. Vakhin, M. R. Gafurov // Fuel. — 2023. — Vol. 334. — Article 126580.
7. **Ponomarev, A. A.** Controversial issues of hydrocarbon field formation and the role of geomagnetic fields / **A. A. Ponomarev**, M. A. Kadyrov, V. Y. Vaganov, V. A. Cheymetova, V. M. Aleksandrov, A. V. Morev // International Journal of Geophysics. — 2022. — Vol. 2022. — P. 1–12.
8. **Ponomarev, A. A.** Impact of geomagnetic fields on the geochemical evolution of oil / **A. A. Ponomarev**, M. R. Gafurov, M. A. Kadyrov, O. A. Tugushev, D. A. Drugov, Y. V. Vaganov, M. D. Zavatsky // Processes. — 2022. — Vol. 10, Iss. 11. — Article 2376.
9. **Ponomarev, A. A.** Magnetic field impact on geochemistry of soluble organic matter when heat-treating oil shales and search for analogies in nature / **A. A. Ponomarev**, M. A. Kadyrov, M. R. Gafurov, M. D. Zavatsky, V. O. Naumenko, T. S. Nurullina, Y. V. Vaganov // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. — 2022. — Vol. 129. — Article 103306.

10. **Пономарев, А. А.** Применение рентгеновской микротомографии керна в нефтепромысловой геологии / **А. А. Пономарев**, М. Д. Заватский, Т. С. Нуруллина, М. А. Кадыров, К. А. Галинский, О. А. Тугушев // Георесурсы. — 2021. — Т. 23, № 4. — С. 34–43.
11. **Ponomarev, A. A.** A new set of search criteria for oil deposits in oil-bearing sediments based on geochemical and geophysical information / **A. A. Ponomarev**, V. M. Alexandrov, D. A. Kobylinskiy, M. A. Kadyrov, Y. V. Vaganov, D. S. Leontev, A. Tajik // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2021. — Vol. 208. — Article 109794.

Публикации в прочих изданиях

12. Скударь, Д. Ю. Электрофизические воздействия на керогеносодержащие низкопроницаемые породы / Д. Ю. Скударь, **А. А. Пономарев**, Т. С. Нуруллина // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева. — 2023. — С. 214–216.
13. **Пономарев, А. А.** Оценка влияния нефтегазогенерационных процессов на коллекторские свойства нефтематеринских отложений с использованием компьютерной рентгеновской микротомографии / **А. А. Пономарев** // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. — 2020. — С. 239–243.
14. Фазлиахметов, А. М. Сравнительный анализ применения методов рентгеновской микротомографии и оптической микроскопии при изучении обломочных пород сложного состава / А. М. Фазлиахметов, **А. А. Пономарев** // Геологический вестник. — 2020. — № 3. — С. 76–83.