

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Вайтехович Анастасия Петровна

**Петрографический состав органического вещества баженовской
высокоуглеродистой формации Западно-Сибирского НГБ**

Специальность: 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Пронина Наталия Владимировна

Москва - 2026

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Характеристика баженовской высокоуглеродистой формации и условий ее формирования.....	10
1.1. Особенности стратиграфии района исследования.....	12
1.2. Тектоническое строение.....	17
1.3. История геологического развития.....	21
1.4. Палеогеография.....	22
1.5. Биопродуценты органического вещества БВУФ.....	27
1.6. Нефтегазоносность.....	30
Глава 2. Методика исследования органического вещества БВУФ.....	34
2.1. История изучения органического вещества баженовской формации.....	34
2.2. Углететрографические исследования.....	38
2.3. Пиролитические исследования.....	39
2.4. Лабораторное моделирование катагенеза.....	40
Глава 3. Мацеральный состав органического вещества БВУФ.....	42
3.1. Альгинит.....	42
3.2. Битуминит.....	44
3.3. Онихиты.....	46
3.4. Известковые диноцисты и радиолярии.....	60
3.5. Биокласты.....	63
Глава 4. Признаки трансформации органического вещества БВУФ.....	67
4.1. Изменения в естественных образцах.....	67
4.2. Изменения, наблюдаемые в ходе искусственного преобразования.....	73
Глава 5. Оценка степени зрелости органического вещества БВУФ.....	81
5.1. Пиролитические показатели зрелости органического вещества БВУФ.....	82
5.2. Оптические показатели зрелости органического вещества БВУФ.....	86
5.3. Латеральная катагенетическая зональность БВУФ.....	95
Заключение.....	101
Список литературы.....	103

Введение

Работа посвящена детальному изучению органического вещества и катагенетической зрелости баженовской высокоуглеродистой формации (БВУФ) Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (НГБ). В связи с приближающейся перспективой необходимости вовлечения в разработку «сланцевой нефти» изучение нетрадиционных резервуаров, таких как БВУФ приобретает важное значение.

Актуальность работы. Органическая петрология входит в широкий комплекс исследований органического вещества (ОВ) нефтегазоматеринских или потенциально нефтегазоматеринских толщ. Метод органической петрологии позволяет исследовать органическое вещество ненарушенных пород, что дает полную информацию о типе вещества, генерационном потенциале и прогнозе типа углеводородных флюидов в дополнение к геохимическим методам. ОВ баженовской свиты и ее аналогов подробно изучалось в 70-90-е годы, когда приборная база была скудной, поэтому все вещество рассматривалось исключительно в шлифах в проходящем свете и описывалось как аморфная масса, а замеры показателя отражения (как эталонного метода, применяемого для оценки зрелости) и подавно не проводились. В настоящее время расширение приборной базы и исследование ОВ в простом отраженном и УФ свете позволяет различать микрокомпоненты размером даже 7-10 мкм и проводить замеры показателя отражения различных мацералов.

Район исследования относится к центральной части Западно-Сибирского НГБ и включает Краснolenинскую, Фроловскую, Среднеобскую, Пур-Тазовскую, Надым-Пурскую, Каймысовскую и Гыданскую нефтегазоносные области, в которых располагаются крупнейшие месторождения, такие как Самотлорское, Мамонтовское, Приобское, Фёдоровское, Краснolenинская группа месторождений. Применение комплексных исследований нефтегазоматеринских пород нацелены не только на оценку генерационного потенциала, но начинают использоваться при прогнозе трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), к которым относятся породы баженовской свиты. Поскольку в разных районах Западно-Сибирского НГБ ОВ меняется, поиск критериев оценки его состава и уровня зрелости невозможен без оптических методов исследования. Так, центральные части Западно-Сибирского НГБ, где располагаются крупнейшие нефтяные месторождения, уже в значительной мере истощившие свой потенциал, могут представлять интерес как перспективный полигон по ТРИЗам, для которых понимание состояния ОВ в породе важно. Несмотря на то, что большая доля традиционной нефти уже приближается к стадии истощения в Западной Сибири, необходимо вовлекать в разработку трудноизвлекаемые запасы из высокоуглеродистой формации для приращения ресурсной базы. Для качественной оценки запасов и восстановления тепловой истории развития бассейна важна детальная

информация об исходном органическом веществе, продуцирующем углеводородные флюиды, а также степени зрелости органического вещества.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования является органическое вещество баженовской высокоуглеродистой формации (БВУФ) Западно-Сибирского НГБ. Характеристика ОВ всегда складывается из двух составляющих: мацерального состава ОВ и степени его зрелости. Предметом исследования является мацеральный состав органического вещества БВУФ, который зависит от фациальных особенностей, исходного биоразнообразия (биопродуцентов), и оценка его степени катагенетической преобразованности.

Целью данной работы является выявление особенностей состава органического вещества и изменения его качественных и количественных характеристик в процессе катагенеза.

Задачи:

1. Детальное качественное и количественное описание мацерального состава баженовской высокоуглеродистой формации с применением новейшей номенклатуры органической петрологии.
2. Выявление признаков трансформации органического вещества на разных грациях катагенеза. Составление шкалы сопоставления качественных (цвет мацерала в отраженном свете, цвет люминесцентного свечения мацерала, особенности морфологии, характер распределения в породе, концентрация) и количественных (T_{max} и $R\%$) признаков в естественных и искусственно полученных образцах в процессе гидропиролиза.
3. Обоснование наиболее информативных мацералов как индикаторов степени зрелости органического вещества по показателю отражения, а также верификация и уточнение данных по степени зрелости органического вещества в пределах ранее составленной коллективом кафедры схемы катагенеза.

Фактический материал и личный вклад.

В основу работы положены материалы исследований 25 месторождений с данными керна по 45 скважинам (Рисунок 1). Исследования органического вещества БВУФ проводились по 245 аншлифам, исследованными автором. Данные углепетрографии сопоставлялись с результатами пиролиза по этим же образцам, также автор пользовался литологическими описаниями и палеонтологическими определениями.

При опубликовании полученных результатов, подготовленных совместно с соавторами, вклад соискателя был существенным и заключается в следующем: непосредственно автором выполнены углепетрографические исследования, включая микроскопическое описание мацерального состава, его количественную характеристику, определение зрелости по показателю

отражения битуминита/онихитов/диноцист и иных микрокомпонентов. Автор принимал участие в обработке и обобщении результатов, а также в их геологической интерпретации при оценке условий формирования и зрелости органического вещества нефтегазоматеринских пород.

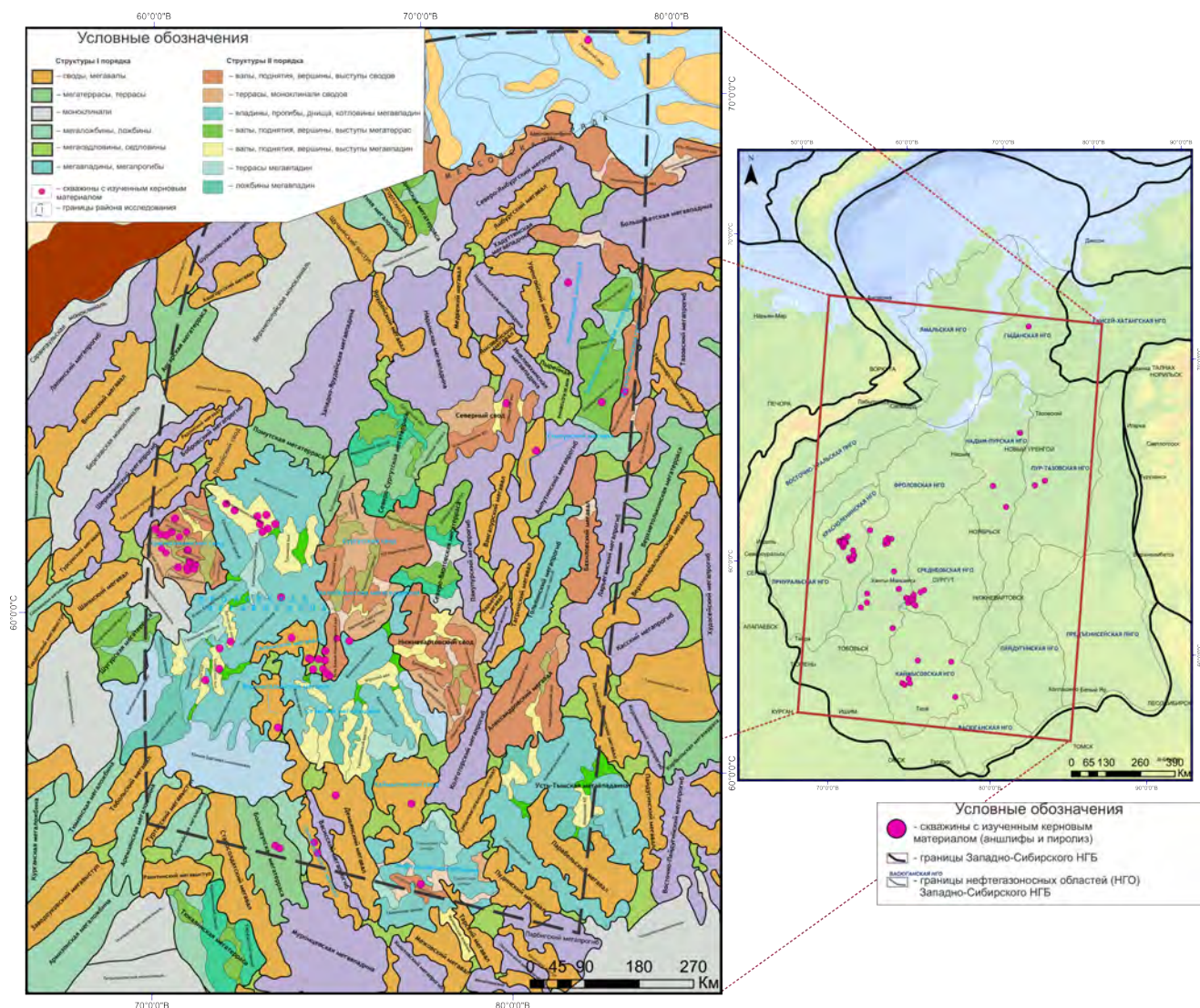


Рисунок 1. Карта фактического материала исследуемого района (основа: Шпильман, 1998)

Методика и методы исследования заключались в комплексировании геолого-геохимической информации по БВУФ. Основу работы составили метод органической петрологии (углепетрографии). Исследования проводились на полированных аншлифах в отраженном белом и ультрафиолетовом (УФ) свете с использованием микроспектрофотометров Craic QDI 302 на базе микроскопа Leica DM 2500P и Craic 508 PV на базе микроскопа Zeiss Axioscope 5. Данный подход позволил провести качественное и количественное определение мацерального состава ОВ в соответствии с современной классификацией Международного Комитета по углепетрографии и органической петрологии (International Committee for Coal and Organic Petrology - ICCP) (ГОСТ Р 55662–2013 (ИСО 7404-3:2009), ГОСТ Р 58221-2018 (ИСО 7404-1:2016), ICCP System, 1994, 1998, 2001; Mastalerz, 2018; Gonçalves et al., 2024) и измерить показатель отражения битуминита (RB, %) и онихитов (Rohh%) – основных нефтематеринских

компонентов БВУФ. Изучить люминесцентные свойства мацералов (альгинита, битуминита, зоокластов) для оценки их генерационного потенциала и стадии преобразования. Для верификации и дополнения петрографических данных был применен пиролитический анализ на приборном комплексе HAWK Resource Workstation (Wildcat Technologies, США). Определялись ключевые параметры: T_{\max} – температура максимального выхода углеводородов, используемая как геохимический индикатор термической зрелости ОБ. Генерационный потенциал (S_2 и водородный индекс (HI)) для оценки количества и качества органического вещества. Для моделирования природных процессов катагенеза и изучения трансформации ОБ использовался метод гидропиролиза. Эксперимент проводился в закрытой системе при температуре 350°C и давлении 350 атм на естественных образцах породы. Это позволило проследить изменения оптических свойств мацералов (цвет, показатель отражения, люминесценция) в контролируемых условиях и выделить критерии главной зоны нефтеобразования. Полученные данные интегрировались с результатами литологических и палеонтологических исследований, что обеспечило комплексный фациально-генетический подход к интерпретации неоднородности БВУФ.

Научная новизна.

Впервые детально в соответствии с актуальной классификацией органического вещества Международного Комитета по углепетрографии и органической петрологии (*ICCP*) описан мацеральный состав баженовской высокоуглеродистой формации и выделены качественные оптические признаки трансформации ОБ, а также проведена оценка степени зрелости по показателю отражения битуминита как главного нефтематеринского мацерала в толще, где отсутствует витринит. Помимо этого, предложено использование показателя отражения зоокластов, а именно онихитов как более часто встречающегося наравне с показателем отражения битуминита.

В ходе исследования был применен и апробирован подход к изучению ОБ нефтегазоматеринских толщ, который пришел изначально из угольной геологии и анализов на концентрированном ОБ и может быть использован для рассеянного ОБ. Неоднородность ОБ БВУФ, связанная с фациальной изменчивостью и исходным биоразнообразием, впервые количественно охарактеризована с выделением пачек с разным мацеральным составом и, как следствие, разным генерационным потенциалом и кинетикой нефтеобразования.

Исследования демонстрируют, что традиционные методы углепетрографии, разработанные для концентрированного ОБ, в целом могут быть применены и для рассеянного ОБ (РОВ). Однако важнейшим элементом микроскопических исследований РОВ является применение люминесцентных методов, позволяющих выявлять даже битумные пленки, которые невозможно

увидеть в простом свете оптического микроскопа. Этот вид исследований расширяет возможности стадийных оценок изменения ОВ пород.

Защищаемые положения.

1. Мацеральный состав органического вещества баженовской высокоуглеродистой формации представлен битуминитом, онихитами (являющимися основными), телальгинитом, ламальгинитом, остатками диноцист и радиолярий, а также разнообразными переотложенными фрагментами витринита и неопределимыми биокластами разной природы, составляющими незначительные количества и являющимися второстепенными. Установлена приуроченность их к различным частям разреза.
2. Процесс трансформации органического вещества происходит в мацералах неодновременно и характеризуется индивидуальным изменением качественных признаков.
3. Количественным критерием преобразованности органического вещества и вмещающих его пород могут быть приняты показатели отражения основных мацералов, которые демонстрируют синхронные изменения в ходе катагенеза и хорошо коррелируются с геохимическими (пиролитическими) параметрами зрелости.

Теоретическая и практическая значимость.

Работа подтверждает эффективность комплексного подхода, основанного на использовании углепетрографических и геохимических методов. Показано, что классическая углепетрография, уже прочно вошедшая в обязательный комплекс аналитических исследований концентрированного ОВ, может быть адаптирована для анализа рассеянного органического вещества нефтегазоматеринских толщ, тем самым расширяя возможности интерпретации их генерационного потенциала.

Выявленные признаки трансформации органического вещества в породах различной степени катагенетической преобразованности получили подтверждение в экспериментах по лабораторному моделированию природных процессов (гидропиролиз). Это позволило обосновать и разработать шкалу оптических признаков, основанную на совокупности ключевых оптических (цвет, отражательная способность мацералов) и геохимических параметров (T_{max} , данные гидропиролиза), обеспечивающую более надежную калибровку бассейновых моделей.

Показано, что углепетрографические методы применимы и к толщам, не содержащим витринита. Использование диагностических оптических признаков битуминита и онихитов позволяет проводить оценку катагенетической зрелости и генерационного потенциала таких пород непосредственно при изучении керна, что особенно важно для оперативных решений на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Использованная методика и полученные результаты могут быть непосредственно внедрены в учебный процесс при подготовке специалистов в области нефтяной геологии и геохимии, а также использованы в учебных курсах по углепетрографии, геохимии органического вещества и бассейновому моделированию.

Степень достоверности результатов.

Все представленные результаты аналитических исследований керна получены с помощью современного лабораторного оборудования. Полученные результаты не противоречат исследованиям, опубликованным в независимых источниках на данную тему.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались на российских и международных совещаниях и конференциях с 2022 по 2026 гг., среди них «Успехи органической геохимии: 2-я Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых, посвященная 120-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР Н. Б. Вассоевича и 95-летию со дня рождения заслуженного геолога РСФСР, проф. С. Г. Неручева» (г. Новосибирск, 2022), «Геохимия и петрография угля, горючих сланцев и битуминозных пород» (г. Сыктывкар, 2023), «Ломоносовские чтения-2023» (г. Москва, 2023), «Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича (г. Новосибирск, 2024), 75th International Committee for Coal and Organic Petrology meeting in Oviedo (г. Овьедо, 2024), «Ломоносовские чтения-2024» (г. Москва, 2024), Научно-практический форум «Современные вопросы литологии, морской геологии, геохимии и петрофизики-2026. Наука. Обучение. Практика» (г. Москва, 2026).

Основные результаты автора по теме диссертации изложены в 6 научных публикациях на русском языке, которые изданы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, и в изданиях из перечня, рекомендованного Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения. Общий объем работы составляет 113 страниц печатного текста, в том числе 74 рисунка, 4 таблицы, список литературы включает 119 наименований.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Наталии Владимировне Прониной за постоянную поддержку, внимательное руководство, высокую вовлечённость и переданный профессиональный опыт. Особая благодарность выражается Александру Христофоровичу Богомолу за содействие, оказанное совместно с Наталией Владимировной, в принятии ключевого решения, позволившего начать данное исследование и

приобрести опыт в области углепетрографии, а также Д.В. Митронову – за переданные знания и консультации. Автор также благодарит Е.Ю. Макарову и М.А. Большакову за значительную поддержку в процессе подготовки диссертационного исследования. Автор признателен Г.А. Калмыкову за предоставленный керновый материал, а также А.Г. Калмыкову и Г.Г. Савостину — за проведение геохимических исследований и совместную работу. Отдельная благодарность выражается Е.В. Соболевой и С.В. Фролову за знания, полученные в ходе основных курсов, а также А.В. Мордасовой — за рекомендации при оформлении графических материалов. Глубокая признательность выражается всему коллективу кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых за доброжелательную творческую атмосферу, конструктивные научные дискуссии и вклад в профессиональное становление автора. Особая признательность выражается заведующей кафедрой А.В. Ступаковой за организационную поддержку и стимулирование своевременного завершения работы. Автор также благодарит всех коллег, оказавших поддержку на протяжении всего пути — от студенческих лет до завершения диссертационного исследования. Отдельная благодарность выражается семье автора за всестороннюю поддержку

Глава 1. Характеристика баженовской высокоуглеродистой формации и условий ее формирования

Объектом исследования является баженовская высокоуглеродистая формация. Баженовская свита была выделена Гурари в 1959 году как пачка марьяновской свиты (Гурари, 1959). В 1960-х годах в стратиграфических схемах она приобрела градацию свиты и появились ее аналоги – мулымьинская, тутлеймская свита, отличающиеся друг от друга литологическими и некоторыми стратиграфическими особенностями. В настоящее время список расширился до яновстанской, даниловской, гольчихинской, марьяновской, на юге и юго-востоке выделяют баганскую и максимоярскую свиты (Рисунок 2) (Рыжкова и др., 2018).

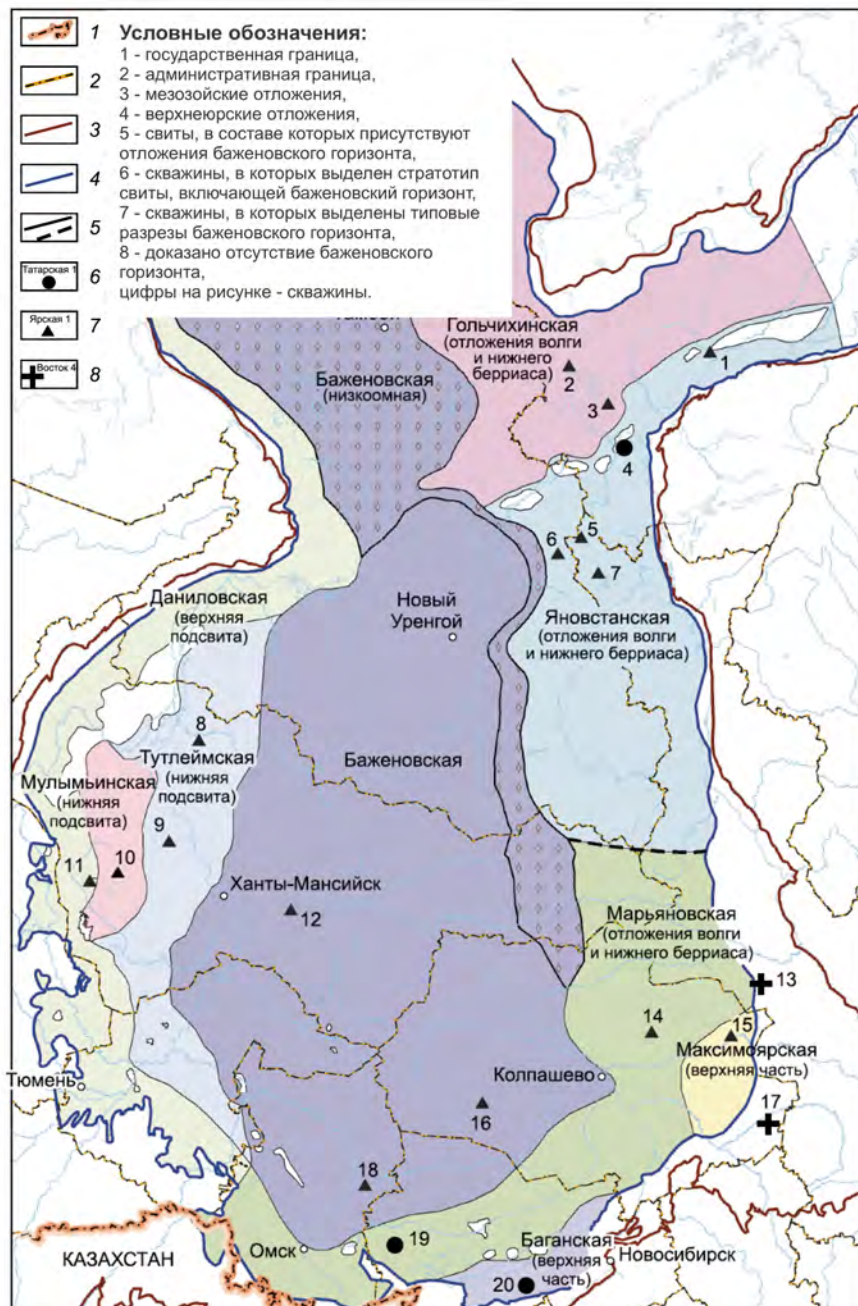


Рисунок 2. Фациально-стратиграфическое районирование отложений баженовского горизонта (Рыжкова и др., 2018)

Существует некоторая терминологическая разобщенность при описании осадочных пород, богатых органическим веществом (ОВ). В известной работе Ю. В. Брэдучана используются такие термины как «битуминозные отложения», «доманикиты», «баженовский горизонт» (Брадучан и др, 1986). В работе И.В. Панченко баженовская свита описывается как черносланцевая толща (Панченко, 2023). Н. Б. Вассоевич для пород с Сорг. От 2,5 до 25% предлагал термин «баженовиты» (Вассоевич, 1967). Впервые термин «высокоуглеродистые» встречается в работах В.Е. Закруткина по докембрию на территории Европейской части СССР в 1982-1989 гг. Я. Э. Юдович дает градацию обогащенных ОВ осадочных пород, разделяя их на низкоуглеродистые с содержанием органического углерода (Сорг.) 1-3%, углеродистые с Сорг. 1-3% и высокоуглеродистые с Сорг. более 10% (Юдович, Кетрис, 1988). Позднее термин «баженовская высокоуглеродистая формация» (БВУФ) в работах Г.А. Калмыкова и др. (Калмыков, 2016; Топчий и др., 2019; Хотылев и др., 2021б; Богатырева и др., 2024) определяется как единый комплекс юрско-меловых пелитоморфных отложений, содержащих аквагенное органическое вещество с концентрацией более 2,5%. Величина граничной концентрации Сорг.=2,5% или аналитического некарбонатного углерода – $C_{нк}$ по Н.Б. Вассоевичу отвечает переходу от более или менее рассеянного ОВ к более или менее концентрированному ОВ (Вассоевич, 1986), Т.К. Баженова считает эти данные устаревшими и предлагает границу между доманикитами и доманикоидами $C_{нк}=5\%$ (Баженова и др., 1998). В данной работе *автор будет пользоваться термином рассеянное органическое вещество* применительно именно к баженовской формации (даже при Сорг. более 15%), учитывая ее сапропелевую природу по сравнению с углями (например, тюменской свиты), где оно имеет концентрированную форму. БВУФ одновременно является и нефтегазоматеринской породой, и пластом-коллектором. Осадконакопление баженовской формации происходило в условиях эпиконтинентального морского бассейна с недокомпенсированным тектоническим прогибанием дна и низкими темпами седиментации, что при ограниченном поступлении терригенного материала способствовало накоплению высокоуглеродистых кремнисто-глинистых осадков (Эдер, Замирайлова, 2023). Формация включает отложения баженовской, тутлеймской и частей мулымьинской, гольчихинской, марьяновской и яновстанской свит.

В последующие годы баженовская свита и её аналоги стали объектом многочисленных исследований, обусловленных их сложным литологическим строением и фациальной изменчивостью. В рамках регионально-геологических и стратиграфических работ рассматривались вопросы распространения и соотношения данных отложений, в исследованиях по нефтегазоносности — их нефтегазоматеринский потенциал. Литологические и литолого-фациальные исследования были направлены на изучение вещественного состава и строения

пород, а геохимические — на характеристику органического вещества и условий его формирования.

1.1. Особенности стратиграфии района исследования

Геологический разрез Западно-Сибирской плиты (Урало-Сибирской молодой платформы) представлен мезозойско-кайнозойской толщей, сложенной спорадически развитыми вулканогенно-осадочными породами триасовой системы, терригенными породами юрской, меловой и палеоген-четвертичной систем, залегающей в основном несогласно на сложном комплексе метаморфических, магматических и осадочных пород архейской и протерозойской акротем и палеозойской эратемы (Милановский, 1996).

В стратиграфическом отношении район исследований охватывает баженовскую, яновстанскую свиты и нижнюю подсвиту тутлеймской свиты (Рисунок 3).

Система	Отдел	Ярус	Региоярус	Горизонт	Свита																
Меловая	Нижний	Берриасский	Рязанский	Баженовский	Федоровская	Даниловская (верхняя подсвита)	Мульминская (нижняя подсвита)	Тутлеймская (нижняя подсвита)	Баженовская			Яновстанская	Баженовская	Баженовская	Баженовская	Марьяновская	Баганская	Баженовская	Марьяновская	Максимовская	
		Титонский	Волжский																		
Юрская	Верхний	Кимериджский		Георгиевский	Лопсинская						Гольчихинская										
		Оксфордский		Васюганский	Маурьянская	Даниловская (нижняя подсвита)	Вогулинская толща Абалакская	Абалакская	Нурминская			Сиговская	Абалакская	Васюганская	Татарская	Татарская	Татарская	Наунакская	Наунакская	Тяжинская	
	Средний	Келловейский									Точинская										
		Батский																			

1 2 3

Рисунок 3. Свиты, выделяемые в составе келловейского яруса среднего отдела юрской системы; оксфордского, кимериджского и титонского ярусов верхнего отдела юрской системы; берриасского яруса нижнего отдела меловой системы Западной Сибири. 1-3 горизонты: 1-баженовский, 2-георгиевский, 3-васюганский (Рыжкова и др., 2018)

Баженовская свита И.В. Панченко и коллективом МГУ (Панченко и др., 2015; Хотылев и др., 2021б) была разделена на 6 пачек (Рисунок 4), которые хорошо выделяются для Красноленинского, Сургутского, Нижневартовского сводов и Фроловской мегавпадины, т.е. для центральной части Западной Сибири, к которой и приурочен регион исследования, на прилегающих территориях пачки теряют свои литолого-геохимические признаки.

Четких границ разделения пачек не выделяется, но при литологическом описании керна существует ряд признаков, характерных для разных пачек. В качестве основы

биостратиграфического расчленения предложены пять радиоляриевых биогоризонтов, которые хорошо сопоставляются с литологическими пачками (Вишневская и др., 2020).

Пачка 1 (нижняя)

Пачка сложена однородными темно-серыми до темно-буровато-серых глинисто-кремнистыми породами, которые в целом по бассейну варьируются по составу от глинисто-кремнистых до кремнисто-глинистых. Для пачки характерно тонкое (от 2–3 до 15 см) переслаивание малоглинистых силицитов и кремнистых радиоляритов, реже встречаются неоднородно карбонатизированные радиоляриты. Важной особенностью является линзовидное строение прослоев радиоляритов (толщиной линз до 5 см), что, вероятно, связано с подвижной гидродинамикой обстановки осадконакопления. Наиболее мощные (до 1 м) прослои радиоляритов приурочены к кровле пачки. В нижней части пачки отмечается наличие коричневатых фосфоритовых конкреций. Породы отличаются сравнительно низким содержанием глинистых минералов (в среднем 5–15%) и насыщенностью органическим углеродом (Сорг.) в среднем 2–5%. Присутствует малая (около 5%) примесь вторичного кальцита и доломита. В породах пачки присутствуют *онихиты*, редкие остатки ростров белемнитов, рыб и раковины лингулид. Примечательной особенностью является то, что выше подошвы пачки практически исчезают ихнофоссилии и меняется состав комплексов фауны. Здесь встречаются вероятно переотложенные остатки ростров белемнитов и брахиопод, характерные для более древних подстилающих отложений. Возраст пачки датируется как ранневожжский на основании комплекса радиолярий с *Parvicingula blowi* (Вишневская и др., 2020) и находок аммонитов *Virgatosphinctoides cf. laticostatus* (Хотылев и др., 2021б, Панченко, 2023).

Пачка 2

Пачка сложена темно-серыми с буроватым оттенком слабоглинистыми углеродистыми силицитами (глинисто-кремнистыми породами). Нормативный минеральный состав от подстилающей пачки 1 практически не отличается. Характерной чертой является наличие прослоев и прослойков (от 0.01 до 1 м) радиоляритов, а также прослоев, обогащенных детритом двустворок, аммонитами, многочисленными остатками радиолярий, рыб (ихтиодетрит) и теутид. Породы могут содержать значимые количества рассеянного кальцита. Пачка является основным и наиболее характерным элементом разреза, наиболее полно отражающим его признаки. В верхней части пачки встречаются *аллохтонные скопления* ("свалы") косточек рыб и *онихитов*. Содержание органического углерода (Сорг) умеренно повышенное и составляет 5–10%, обычно растущее снизу вверх. Содержание глинистых минералов невысокое. Состав и строение пачки контролировались палеорельефом. Наиболее контрастное литологическое и геофизическое выражение пачка имеет на палеоподнятиях (Салымский и Верхнесалымский мегавалы, Сургутский и Нижневартовский своды), где она более глинистая и в слое 2а содержит

характерный комплекс двустворок *Liostrea* – *Inoceramus* – *Buchia* с аммонитами *Dorsoplanites*. Этот комплекс, особенно род *Liostrea*, является маркирующим для пачки 2 в областях подводных поднятий и встречается только там. Текстура слоя подчеркивается белесыми прослоями – остатками раковин. При отсутствии двустворок пачка как таковая может не выделяться и фациально замещаться отложениями пачки 1. Породы содержат большое количество радиолярий, онихитов и ихтиодетрита. Комплекс макрофауны включает двустворок, аммонитов, рыб и теутид. Возраст пачки установлен как верхи нижневолжского (*Paravirgatites sp.*) – средневолжский подъярус (*Dorsoplanites ovalis*, *Epivirgatites bipliciformis*, *Laugeites sp.*) по аммонитам. Мощность пачки 2 высокоизменчива (Хотылев и др, 2021б, Панченко, 2023).

Пачка 3

Пачка сложена высококремнистыми силицитами и радиоляритами, которые чаще всего вторично кальцитизированы либо доломитизированы. Количество кремнистой составляющей значительно превышает долю глинистой компоненты. В разрезе присутствуют тонкие (первые см до первых десятков см) прослой более глинистых (до 20% глин) силицитов. Остатки макрофауны редки и не характерны, за исключением аллохтонных скоплений ихтиодетрита (остатков nekтона — рыб и теутид), которые могут образовывать прослой мощностью до 10 см. Скелеты радиолярий в этой пачке наиболее крупные, высококонические и насчитывают максимальное количество камер (до 10-15). Строение пачки сильно зависит от палеорельефа. На поднятиях в разрезе присутствует существенно большее количество радиоляритовых слоев значительной толщины (до метра и более). В пределах впадин количество радиоляритовых слоев незначительно, либо они отсутствуют вовсе. В породах пачки установлен радиоляриевый комплекс с *Parvicingula jonesi*. Находки аммонитов (*Laugeites aff. groenlandicus*, *Epilaugeites vogulicus*, *Praechetaites ex gr. exoticus*, *Craspedites sp.*) подтверждают возраст пачки как средне–верхневолжский. Мощность пачки 3 в центральной области Западной Сибири в среднем составляет около 3 м и может достигать 7 м. Ее кровля является одновременно кровлей нижней части баженовской свиты (Хотылев и др, 2021б, Панченко, 2023).

Пачка 4

Пачка 4 представляет начало верхней толщи баженовской свиты. Она легко идентифицируется в разрезе благодаря уникальному сочетанию признаков: аномально высокой концентрации органического вещества, высокой естественной радиоактивностью и повышенной глинистостью. Отложения характеризуются латеральной выдержанностью и относительной однородностью. Формирование пачки происходило в условиях медленной седиментации, что привело к образованию конденсированных отложений. Пачка сложена темно-серыми с коричневатым оттенком керогеново-глинисто-кремнистыми породами (высокоуглеродистыми силицитами). Отличительной особенностью является присутствие фаунистических остатков,

представленных преимущественно двустворками родов *Buchia* и *Inoceramus*, а также многочисленными аммонитами. Распределение двустворок неравномерное — от единичных включений в нижней части до практически сплошных ракушняков в верхней. Повсеместно присутствует бурый прослой (до 1 см) пелитизированных/пиритизированных туфов, который хорошо опознается в ультрафиолетовом свете по яркому желтому свечению и является региональным маркером. В центральной части бассейна могут присутствовать альгинитовые слои с градационной слоистостью. Характерны также прослой битума толщиной до 0.5 см в количестве 1–2 на пачку. Верхи пачки могут быть вторично кальцитизированы. Органические остатки включают ихтиодетрит, онихиты и кокколитофорида. Нижняя граница пачки часто фиксируется по костеносным "конденсированным горизонтам". Возрастные определения по комплексам аммонитов (*Craspedites taimyrensis*, *Chetaites chetae* и др.) и радиолярий (зона *Parvicingula rotunda-P. alata*) указывают на верхи волжского яруса - низы рязанского яруса (берриас). Мощность пачки в среднем составляет 3–4 м. На палеоподнятиях толщины больше из-за большего количества раковин двустворок. Пачка 4 в полной мере соответствует пачке 2 («плитчатым аргиллитам») в Салымском типе разреза (Хотылев и др, 2021б, Панченко, 2023).

Пачка 5

Пачка сложена керогеново-глинисто-карбонатно-кремнистыми породами (карбонатно-глинистыми силицитами), обогащенными кокколитофоридами и характеризующимися высоким содержанием органического углерода. Отличительной особенностью пачки является развитие карбонатных образований различного генезиса: от рассеянного биогенного карбоната до многочисленных конкреций, пластовых и линзовидно-пластовых тел вторичных известняков и доломитов. В пределах внутрибассейновых поднятий фиксируются спикуловые известняки с трещинами, выполненными кальцитом. Также могут присутствовать обломочные и переотложенные фосфориты. Пачка демонстрирует значительную латеральную и вертикальную изменчивость. На палеоподнятиях карбонатные нодулы наиболее многочисленны и крупны (до 0.5 м), тогда как во впадинах они единичны или отсутствуют, замещаясь рассеянным карбонатным материалом. В нижних частях разреза отмечаются скопления раковин *Buchia*, вплоть до образования ракушняков. Для верхних частей характерна тонкая сезонная слоистость, связанная с ритмичным развитием кокколитофорид. Возрастные соотношения: Возраст отложений по радиоляриям определяется как верхи верхнего подъяруса волжского яруса – рязанский ярус (берриас), что подтверждается находками аммонитов *Surites sp.*, *Bojarkia cf. bodylevskii* и *Tollia cf. tolli*. Подошва пачки проводится по появлению слоев, насыщенных бухиями и биогенным карбонатом. В кровле фиксируется резкое увеличение содержания пирита (до 20-25%), маркирующее переход к пачке 6. Пачка 5 коррелируется с "кремнисто-известковой" пачкой 3 в Салымском типе разреза (Хотылев и др, 2021б, Панченко, 2023).

Пачка 6

Пачка сложена углеродистыми кремнистыми глинами и глинистыми силицитами. Породы тонко горизонтально-слоистые, бескарбонатные или малокарбонатные, с постоянным присутствием макроскопически диагностируемых остатков рыб (косточек и чешуек). Характерной чертой является интенсивная пиритизация, проявляющаяся в виде рассеянной вкрапленности и пиритизированных биотурбаций (*Chondrites isp.*, *Pilichnus isp.*). Выраженность пиритизации имеет четкую латеральную зональность. Максимальные содержания пирита приурочены к палеоподнятиям и подводным плоскогорьям, где также появляются известняки со структурой «con-in-con», интерпретируемые как очень мелководные образования. В котловинах и центральной части бассейна пиритизация проявляется слабо или отсутствует, что, вероятно, связано с наличием придонных течений в более глубоководных обстановках. Мощность пачки варьирует от 1–2 м в центральных районах до 10 м в зоне развития тутлеймской свиты. Нижняя часть пачки более кремнистая, верхняя - является наиболее глинистым интервалом баженовской свиты с содержанием биогенного кремнезема менее 40% и Сорг 3–8%. Пачка 6 уверенно коррелируется с «глинистой» пачкой 4 баженовской свиты в Салымском типе разреза. Формирование пачки, вероятно, происходило в условиях низкого стояния уровня моря (Хотылев и др, 2021б, Панченко, 2023).

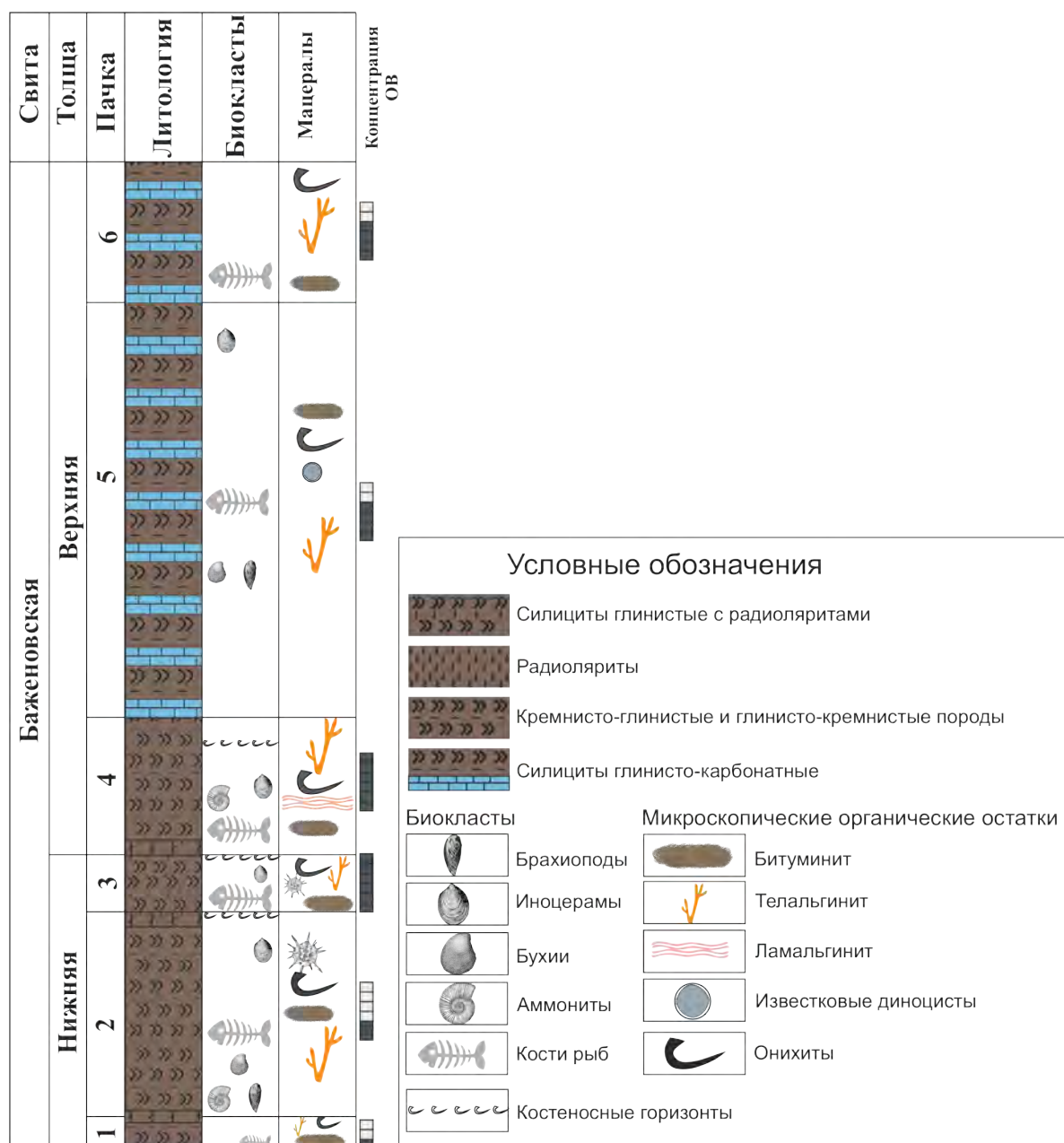


Рисунок 4. Принципиальная схема расчленения баженовской свиты на пачки (в основе Панченко, 2023; Хотылев и др., 2021б)

1.2 Тектоническое строение

Западно-Сибирский бассейн приурочен к одноименной молодой плите, которая имеет гетерогенный фундамент (развиты разновозрастные складчато-глыбовые системы с различным составом пород, строением, характером развития и временем консолидации), представляющий собой асимметричную впадину с депоцентром в северной части, и мезокайнозойский чехол. С запада и северо-запада его обрамляют герциниды Урала и древнекиммерийская складчатая зона Пай-Хоя - Новой Земли, с юга – каледониды, герциниды и салаириды Казахского нагорья и Алтае-Саянской области, с востока – Сибирская платформа и выступ основания Таймыро-Североземельской метаплатформенной области (Рисунок 5) (Милановский, 1996).

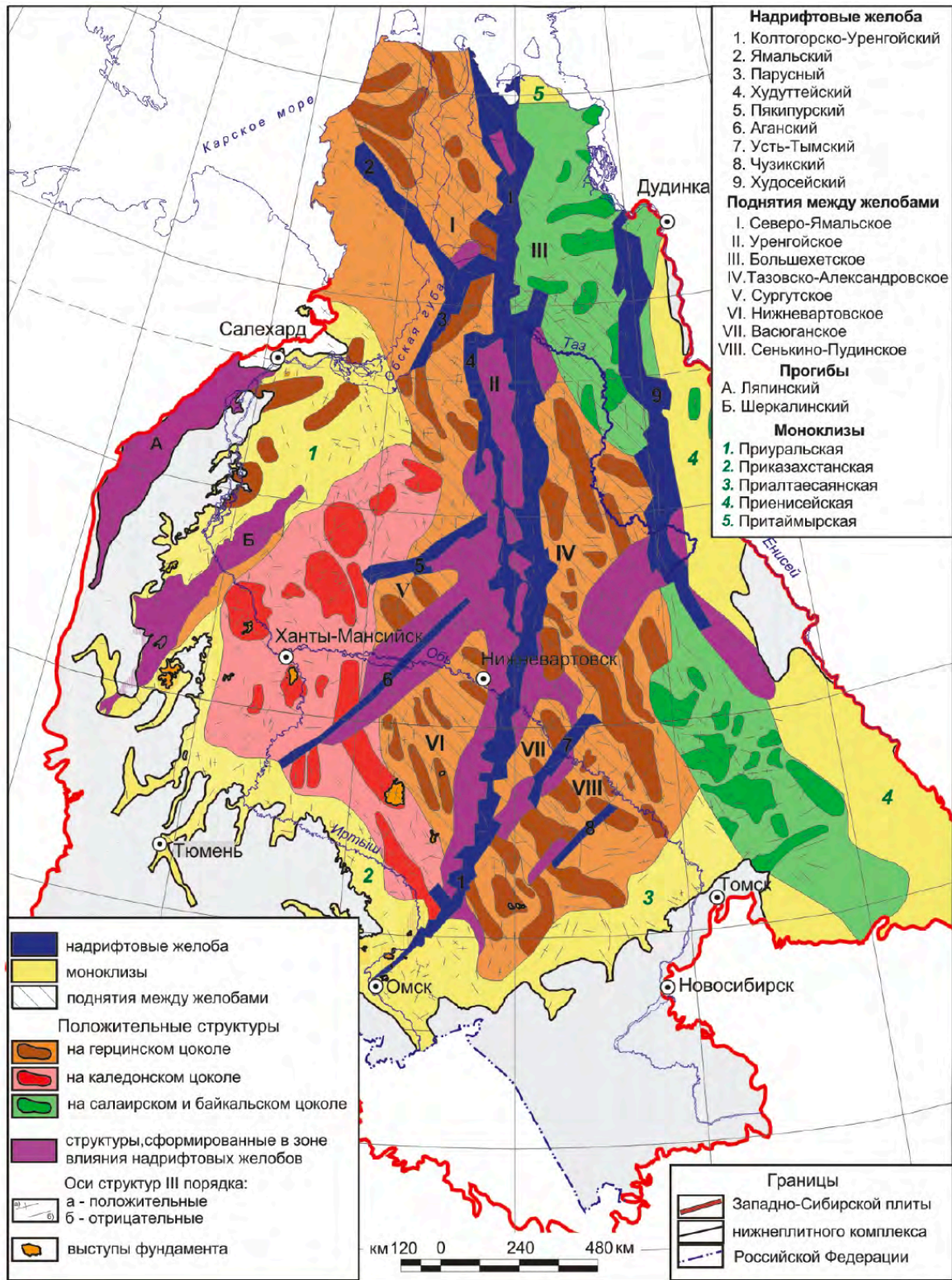


Рисунок 5. Карта тектонического строения нижнеплитного комплекса Западно-Сибирской плиты (Гурари и др., 2005)

Выделяется три комплекса: гетерогенный фундамент, промежуточный комплекс, приуроченный к различным субмеридиональным грабенам, выполненных пермско-триасовыми базальтами, липаритами, и плитный комплекс (Рисунок 5). Последний представляет собой мегасинеклизу с широкими пологими крыльями, мощностью от 0 до 3 км, выклинивающимися к

краям плиты, и более погруженными внутренними частями в центре и на севере плиты (до 6-8 км) (Конторович и др., 1975).

В пределах Западно-Сибирской плиты выделяют региональные структуры – тектонические пояса и тектонические области, объединяющие структуры I и II порядков по ряду признаков. А.Э. Конторович с соавторами (1975) выделяет Внешний пояс и Центральную и Северную тектонические области. В группе структур I порядка выделяются положительные структуры – своды, мегавалы и отрицательные – мегавпадины, мегапрогибы. В группе промежуточных структур I - II порядков выделяют купола сводов и мегавалов, днища мегавпадин и мегапрогибов, склоны сводов и мегавалов, склоны мегавпадин и мегапрогибов. К группе структур II порядка относят куполовидные поднятия, валы, структурные носы и впадины, прогибы, структурные ложбины. К группе структур III порядка – локальные поднятия и локальные прогибания. При описании структур, к которым приурочена изучаемая территория, для центральной части использовалось районирование по тектонической карте под ред. Шпильмана (2008) (Рисунок 6).

Район исследования включает **положительные структуры I порядка:** Салымский мегавал, Верхнесалымский мегавал, Етыпурский мегавал, Пологрудовский мегавал, Демьянский мегавал, Заполярно-Береговая мегатерраса, Большеукская мегатерраса, Красноленинский свод, Сургутский свод, Каймысовский свод, Северный свод, Русско-Часельская гряда, Гыданский свод; **II порядка:** *Усть-Балык-Мамонтовский вал* Сургутского свода; *Ем-Еговская, Каменная вершины, Талинская терраса* Красноленинского свода; *Хадырьяхинский выступ* Заполярно-Береговой мегатеррасы; *Зимний, Ендырский, Эргинский, Верхеляминский валы* Фроловской мегавпадины; *Игольско-Таловый вал* Нюрольской мегавпадины; *Русско-Часельский вал* Русско-Часельской гряды, *Губкинский вал* Северного свода. **Отрицательные структуры I порядка:** Малобалыкская мегаседловина, Нюрольская мегавпадина, Юганская мегавпадина, Фроловская мегавпадина; **II порядка:** *Фаинская котловина* Юганской мегавпадины, *Тундринская котловина* Фроловской мегавпадины.

1.3. История геологического развития

В истории геологического развития Западно-Сибирской плиты исследователями выделены два основных этапа: *рифейско-палеозойский* и *мезозойско-кайнозойский* (Милановский, 1996).

Первый этап охватывает байкальский, салаирский, каледонский и герцинский тектономагматические циклы. К концу палеозойского периода территория Западно-Сибирской плиты представляла собой гетерогенное складчато-глыбовое горное сооружение, входящее в состав Урало-Монгольского складчатого пояса. Фундамент Западно-Сибирской плиты сформировался в результате закрытия Палеоазиатского океана, в котором его различные участки замыкались в разное время, а складчатые сооружения обрамляли более древние микроконтиненты.

На *втором этапе* активно проявились процессы рифтогенеза, во время которых образовалась Западно-Сибирская континентальная раннетриасовая рифтовая система. Процессы активного рифтогенеза происходили в сравнительно короткий отрезок времени – индский, оленекский и анизийский века триаса. Раннетриасовый рифтогенез положил начало устойчивому прогибанию северных и центральных районов территории и образованию Западно-Сибирского седиментационного бассейна. Рифтовая система Западной Сибири представляют собой глубокие грабены, амплитуда сбросов которых на севере достигает до 5 км. Отложения грабенов представлены рифтогенными, вулканогенными и вулканогенно-осадочными формациями. В целом, в раннем и начале среднего триаса изучаемая территория представляла собой горно-складчатую область, где происходил интенсивный вулканизм. Начиная с ладинского века среднего триаса вулканическая активность в Западной Сибири прекратилась. Север территории представлял собой низменную аккумулятивную равнину, в которой выделялись следующие фации (с севера на юг): мелководно-морская, дельтовая, лагунная, озерная, аллювиальная. В это время начинается плитный этап формирования Западно-Сибирского бассейна, в котором выделяется два этапа – раннеплитный и собственно плитный.

Раннеплитный этап (T_2l-J_2) характеризуется повышенной тектонической активностью, относительно высокой скоростью осадконакопления за счет разрушения горно-складчатых систем Урало-Монгольского складчатого пояса и Сибирского кратона. К концу среднеюрского времени территория Западной Сибири представляла собой аккумулятивную равнину с отдельными выступами непленепленизированных горных массивов. Толщина осадков в осевой части рифтовой системы достигала 1500 м, так как она была подвержена наибольшему прогибанию. В результате эвстатических колебаний уровня мирового океана, а также общего погружения территории на этом этапе выделяются несколько трансгрессивных и регрессивных циклов, отразившиеся на общей картине седиментации. Во время трансгрессии накапливались

преимущественно глинистые отложения, насыщенные органикой, во время регрессии – песчано-алевролитовые отложения.

Раннеплитный этап завершается келловейской трансгрессией. С этого времени начинается *плитный этап* развития, который охватил позднеюрский, меловой, раннепалеогеновый периоды. Он характеризуется в основном морским осадконакоплением. В раннеплитном этапе выделяют пять подэтапов - позднеюрский, неокомский, готерив-барремский, апт-сеноманский, турон-датский (Гурари и др., 2005).

В позднеюрском этапе трансгрессия, которая началась в келловее расширилась, и образовалось обширное Западно-Сибирское море с некомпенсированным осадконакоплением. Отложения представляли собой карбонатно-кремнисто-глинистые тонкодисперсные осадки, обогащенные органическим веществом. Неокомское время (берриасс-баррем) характеризуется сносом песчано-алевролитового материала с юго-востока и востока – идет боковое заполнение Западно-Сибирского морского бассейна. Море мелет и сокращается в размерах. В готерив-аптские века регрессия, начавшаяся в неокомское время, достигла своего максимума, и морское осадконакопление наблюдалось лишь в западной части. Апт-сеноманские века характеризуются незначительным увеличением площади бассейна седиментации и импульсным наступлением моря в пределы барремской аккумулятивной равнины. Завершение плитной стадии в турон-среднепалеогеновое время характеризуется трансгрессией.

После обширной и устойчивой трансгрессии на территории Западной Сибири начинается новый этап развития – *регрессивный*, связанный с раскрытием Северного Ледовитого океана.

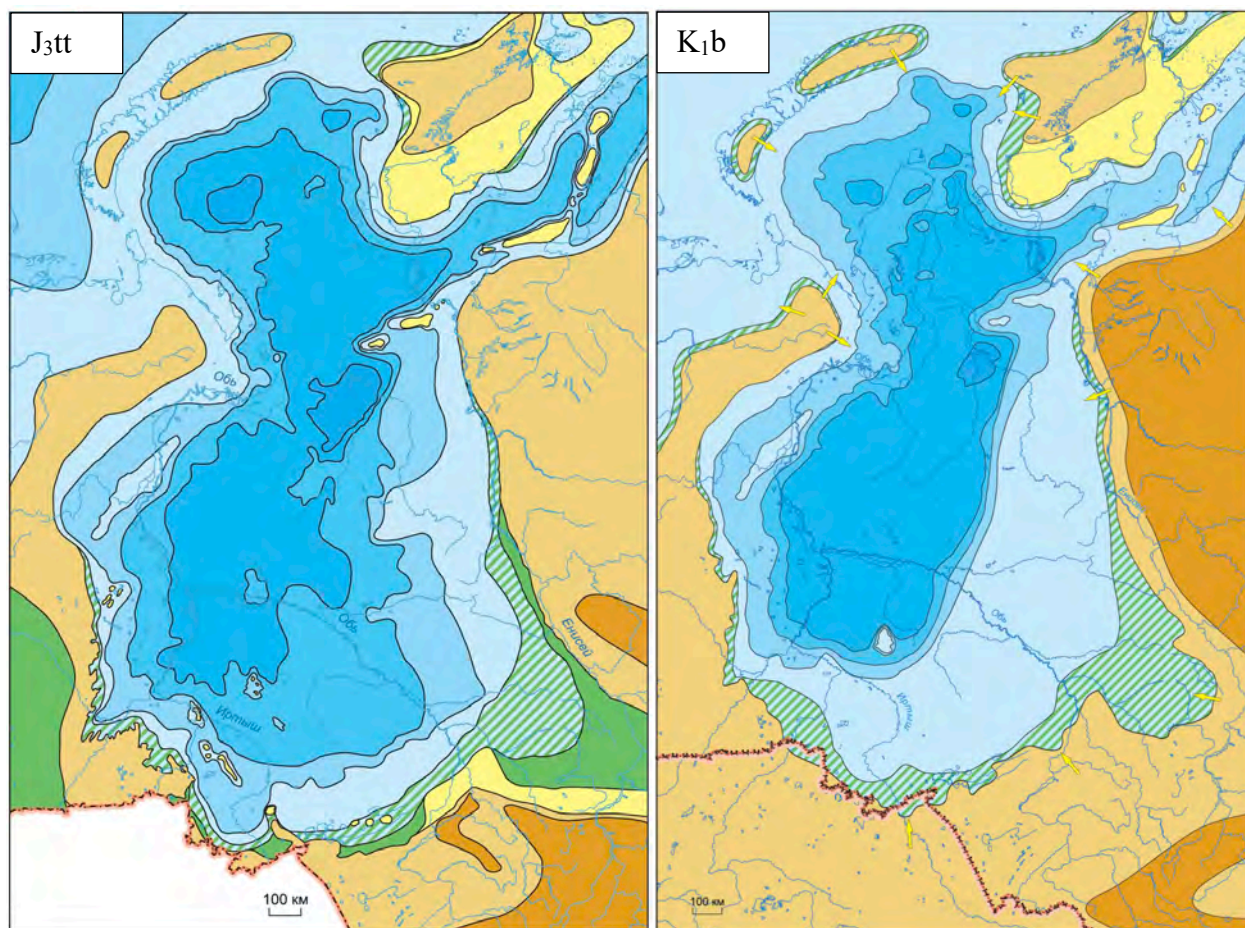
Северная часть Западно-Сибирского бассейна с эоцена начинает испытывать общее воздымание, а южная его часть – погружение. Это приводит к быстрой позднеэоценовой регрессии моря, в результате чего в олигоцене северная и центральная части Западной Сибири превращаются в озерно-аллювиальную равнину. Начиная с позднего эоцена морской режим переместился в южную половину Западно-Сибирского бассейна.

В течение неогенового периода на большей части плиты осадконакопление не происходило в связи с глобальными тектоническими перестройками, вызвавшими воздымание северных, а затем и южных районов плиты.

1.4. Палеогеография

Волжско-берриасское время в Западной Сибири пришлось на конечную стадию крупнейшей в геологической истории Сибири позднеюрско-неокомской морской трансгрессии (Рисунок 7). Уже в кимериджском веке море почти полностью затопило Западно-Сибирскую плиту. Сушей оставались только юго-западные (Северное, Среднее и Южное Зауралье), южные приказахстанские и юго-восточные (Чулымо-Енисейская депрессия) районы плиты. В волжском

и берриасском веках площадь и контуры морского бассейна сохранились такими же, как и в киммеридже, но глубины его значительно возросли (Рисунок 7). Море затопило и все киммериджские острова на северо-западе и юге Западной-Сибирской плиты. Площадь его достигла 2,0 млн. км², из которых около 1 млн. км² были заняты фациями глубокой зоны (Брадучан и др., 1986).



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Палеогеографические области:













- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | — море глубокое глубиной более 400 м; |  | — горы низкие; |
|  | — море глубокое глубиной 200-400 м; |  | — главные направления сноса обломочного материала, |
|  | — море мелкое глубиной 100-200 м; |  | — государственная граница |
|  | — море мелкое глубиной 25-100 м; | | |
|  | — море мелкое глубиной менее 25 м; | | |
|  | — равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем (осадки пойменные, озерно-болотные, русловые, дельтовые, береговых баров, пляжевые); | | |
|  | — равнина низменная, аккумулятивная (осадки русел, пойм, озер и др.) | | |
|  | — равнина денудационно-аккумулятивная; | | |
|  | — равнина возвышенная (денудационная суша), | | |

Рисунок 7. Палеогеографическая схема Западной Сибири, титонский и берриасский века (Конторович и др., 2013; 2014)

Из всех мезозойских и палеогеновых эпиконтинентальных бассейнов Сибири волжско-берриасское море было самым глубоким. Большинство исследователей оценивает глубины этого моря около 300-400 м, в наиболее глубоких частях 500-800 м (Конторович и др., 2013; 2014), однако некоторые считают, что глубины составляли 200-400 м (Брадучан и др., 1986) или даже, что не превышали 200 м (Рисунок 8) (Стафеев и др., 2019). В конце берриаса и особенно в валанжине морской бассейн заметно мелеет. Большие глубины продолжают существовать только в северо-западной его части. Таким образом, образование баженовского горизонта произошло в условиях максимума позднеюрско-неокомской трансгрессии. Геологическая история Западно-Сибирской плиты на протяжении мезозоя и кайнозоя характеризовалась несколькими крупными этапами эволюции седиментационного бассейна, тесно связанными с особенностями ее структуры, тектоническими движениями и изменениями климата. Позднеюрско-валанжинский этап был временем относительного тектонического покоя с минимумом в волжско-берриасское время. За ним последовало некоторое оживление тектонических движений в валанжине и особенно в готерив-барреме. Баженовский горизонт образовался не только при максимуме трансгрессии, но также в условиях относительного тектонического покоя и выравнивания рельефа на плите. Максимум трансгрессии, по мнению некоторых исследователей, имел эвстатическую природу (Брадучан и др., 1986).

Рассмотрим крупнейшие морфоструктуры для волжско-берриасского времени. Внутренняя область плиты – Центральное холмистое плато, представляла собой обширную устойчиво прогибающуюся впадину (Рисунок 8) (Стафеев и др., 2017). Общая площадь впадины составляла более 1 млн. км², глубина наиболее погруженных участков достигала, видимо, 500 м (возможно, и более) ниже уровня моря. В позднем берриасе она уменьшилась по площади, локализовавшись в северо-западной части Западно-Сибирской плиты (Брадучан и др., 1986). Второй главной морфоструктурой Западно-Сибирской плиты был ее внешний пояс, охватывающий Центральное холмистое плато. Его внутренняя, примыкающая к плато зона представляла собой подводные равнины, наклоненные (круто на западе и полого на востоке и на юге плиты) в сторону холмистого плато. Внешняя зона - низменные денудационные равнины, простирающиеся до структур складчатого обрамления. Строение внешнего пояса отчетливо асимметрично: на северо-западе он был уже, круче наклонен и полностью затоплен морем, на юго-западе – очень широкий, пологий, на больших площадях представлял собой денудационно-аккумулятивную равнину, а на востоке это была широкая (400-500 км) подводная равнина, полого наклоненная в сторону плато.

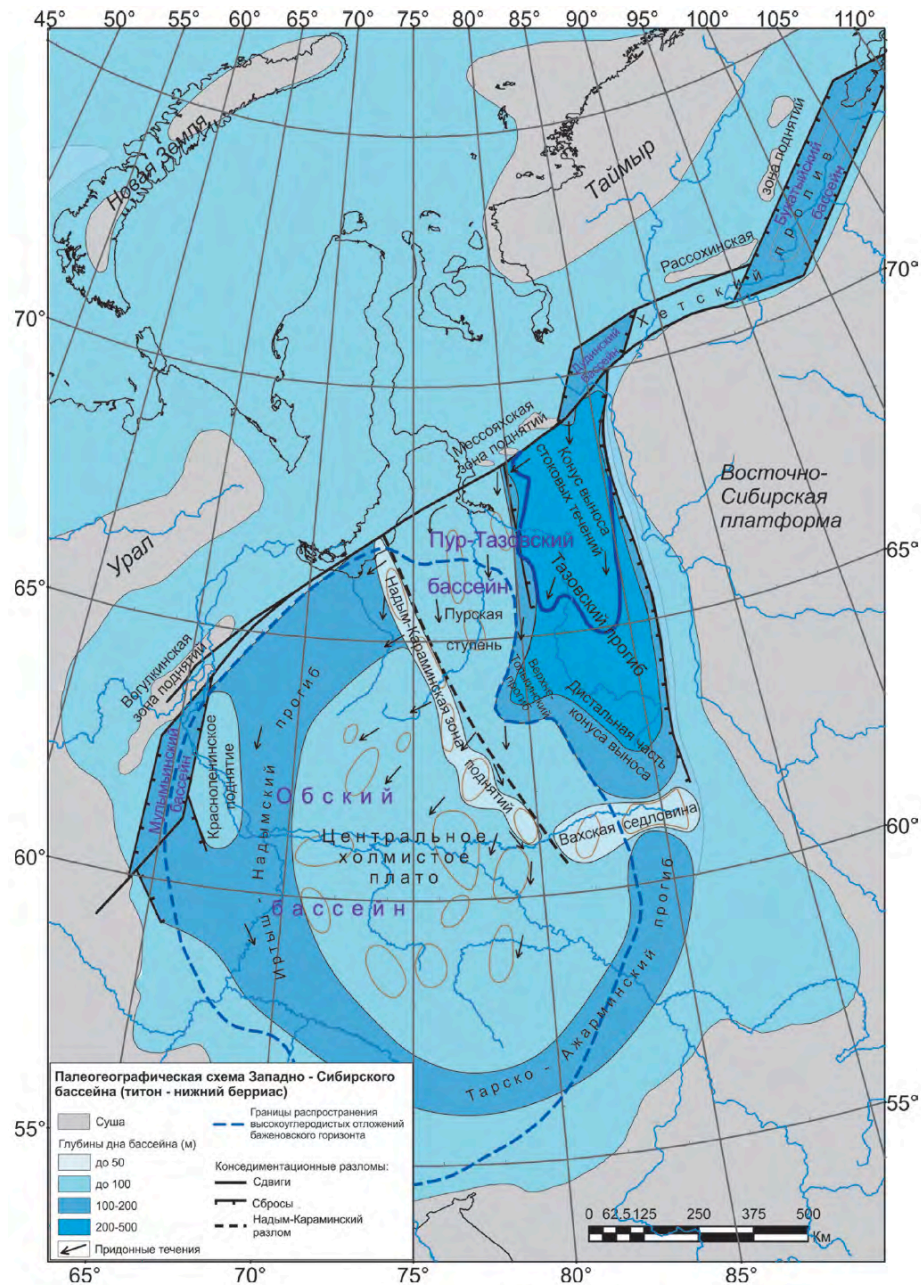


Рисунок 8. Палеогеографическая схема Западной Сибири, титонский и раннеберриасский века (Стафеев и др., 2017)

В рельефе складчатого обрамления в волжско-берриасское время выделялись: холмогорья Палео-Урала (до 500 м), низменная денудационная равнина Казахской складчатой зоны (0-200 м, местами до 500 м), холмогорья и низкогорья Алтае-Саянской складчатой области и Енисейского кряжа (от 200 до 1000 м), а также возвышенное плато (200-500 м) западных районах (Брадучан и др., 1986). Эти области суши были основными объектами денудации и источниками терригенного материала. Особенно много его поступало из Алтае-Саянской области и с Енисейского кряжа, отчего глубокое прогибание прилегающей Чулымо-Енисейской депрессии полностью компенсировалось осадконакоплением в континентальных условиях.

Перечисленные крупнейшие морфоструктуры в волжско-берриасском рельефе Западно-Сибирской плиты и ее обрамления определяли главные черты в размещении основных

фациально-генетических типов отложений на ней. Так, во внутренней области плиты волжско-берриасские отложения достаточно однообразны и представлены глубоководными черными или буровато-черными карбонатно-кремнисто-глинистыми отложениями, обогащенными рассеянным органическим веществом (баженовская, тутлеймская свиты). Лишь на отдельных участках появляются «аномальные разрезы баженовской свиты», где аргиллиты расслаиваются песчано-алевритовыми породами.

На Юганской, Ханты-Мансийской и Надымской впадинах и примыкающих к ним положительных структурах первого и второго порядка осадконакопление характеризовалось резко восстановительной обстановкой. В волжском веке и раннем берриасе на Центральном плато сложились исключительно благоприятные условия для накопления органического вещества. Фациальный состав пород центра и заключенные в них остатки в основном пелагических и семипелагических организмов (аммониты, белемниты, рыбы, радиолярии, кокколитофориды и др.) при однообразии бентоса свидетельствуют об образовании осадков в относительно глубоководном морском бассейне с соленостью вод, близкой к нормальной. Характерно также распределение мощностей отложений: наибольшие мощности (50-60 м) тяготеют к окраинам Центрального плато, в срединной ее части мощность волжско-берриасских отложений не превышает 30 м. Это свидетельствует о том, что на большей площади плиты прогибание не компенсировалось осадконакоплением. Максимальный дефицит имел место в центральном и северо-западном районах. Данные биофациального анализа подтверждают образование осадков в срединной, наиболее глубокой части эпиконтинентального морского бассейна с застойными придонными водами. Глубины моря превышали там 300 м. Соленость вод близка к нормальной, температура поверхностных вод была на севере 16-18 °С и 20-22 °С на юге, придонные воды имели температуру не ниже 8-10 °С. Аэрация придонных вод плохая, местами имело место сероводородное заражение (Брадучан и др., 1986).

На Западной периферии Центрального плато в зоне воздействия холодного придонного течения аэрация глубинных вод была лучшей (Рисунок 9). Там на подводном склоне эпиконтинентального моря осадконакопление шло на глубинах 200-300 м. Соленость вод нормальная, температура их придонных слоев 8-10 °С. Аэрация наддонных вод была в основном затрудненной, но местами за счет придонных течений достаточно хорошей, что обусловило появление там многочисленного и местами достаточно разнообразного микробентоса – фораминифер. Пелагические организмы столь же обильны и разнообразны, как и в осадках больших глубин.

Вдоль обрамления Западно-Сибирской плиты отложения представлены от прибрежно-морских песчано-алевролитовых осадков верхней – средней сублиторали, распространенных во внешней зоне бассейна, до морских алеврито-глинистых осадков глубокой части шельфа в зоне,

прилегающей к Центральному плато. От глубоководных к прибрежным фациям с уменьшением содержания Сорг., кремнезема и карбонатов грубоплитчатые карбонатно-кремнисто-глинистые отложения постепенно сменяются обычными пластичными глинами, переслаивающимися с авлевролитами и песчаниками. Содержание рассеянного органического вещества здесь ниже, чем в отложениях Центрального плато. К периферии плиты оно снижается еще больше. Концентрация С орг и исходного ОВ снижается в краевых частях плиты до 1-2 и 3-10% соответственно. Фоссилии относительно глубоководных отложений внешнего пояса достаточно разнообразны: по-прежнему многочисленны аммониты, рыбы, менее многочисленны или совсем исчезают радиолярии, кокколиты; появляются редкие белемниты. Разнообразным становится и бентос – моллюски, брахиоподы, гастроподы.

Приведенные данные указывают на более мелководные обстановки формирования осадков во внутренней зоне внешнего пояса, чем в Центральном плато, на лучшую, хотя еще и затрудненную аэрацию придонных вод и илов. Осадконакопление происходило здесь в условиях нижней сублиторали на глубинах от 100-150 до 200-300 м. Соленость вод была нормально-морской, температура поверхностных вод на севере плиты 15-18 °С, на юге – 20-22, придонных – около 10-12 °С. Аэрация хорошая, местами затрудненная.

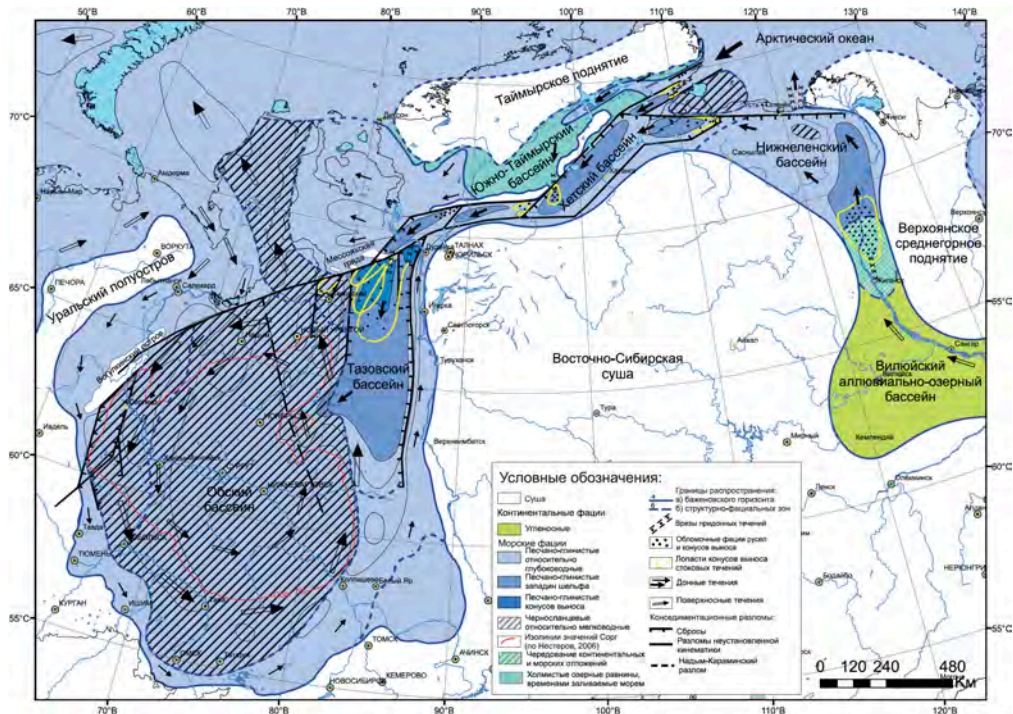


Рисунок 9. Течения арктических морей в титонский и раннеберриасский века (Стафеев и др., 2019)

1.5. Биопродукты органического вещества БВУФ

Отложения у бровки шельфа и на континентальном склоне обогащены органическим веществом, что связано с повышенной биопродуктивностью поверхностных вод, вызванной

апвеллингом, за которым следует вспышка цветения фитопланктона (например, диатомей, динофлагеллят и радиолярий). Катастрофические заморы – гибель больших популяций морских организмов связывается с процессом перекрытия глубинной воды теплой осолоненной. Остатки организмов опускаются на дно, разлагаются и обогащают тонкие илы, развивающиеся на перегибе шельфа в континентальный склон, органическим материалом (Бурлин и др., 1991).

Накопление огромных масс органического вещества в баженовском море было тесно связано с функционированием пелагической экосистемы, ключевым звеном которой являлся **фитопланктон**. Ядро экосистемы формировали разнообразные пелагические продуценты — прежде всего *планктонная альгофлора: празиофиты, кокколитофориды*, а также в меньшей степени *динофлагелляты*; консументы были представлены *радиоляриями, личинками беспозвоночных, ракообразными (зоопланктон), пелагическими костистыми рыбами, аммонитами, белемнитами и палеокальмарами (нектон)*, при участии *бентосных двустворчатых моллюсков, фораминифер и остракод*. По мнению В.А. Захарова, значительные объемы органического вещества обусловлены не столько уникальностью экосистемы, сколько длительным и устойчивым характером ее функционирования. В течение почти 8 млн. лет экосистема сохраняла высокую продуктивность, что обеспечивалось устойчивым круговоротом как живого вещества, так и растворенных биогенных компонентов, поступавших с поверхностным течением из Арктического бассейна и придонными течениями (Захаров, 2006).

Г.М. Парпарова полагала, что главная роль в образовании ламальгинита высокоуглеродистых толщ принадлежала органостенному фитопланктону: акритархи, желто-зеленые, зеленые и синезеленые водоросли, а также в меньшей степени динофлагелляты. Так, Г.М. Парпарова с соавторами для баженовской свиты Западной Сибири по люминесцентно-петрографическим исследованиям (в шлифах) наибольшие содержания в ОВ отнесла синезеленым, зеленые тасманитоподобные и донные водоросли незначительны (Парпарова и др., 1988). Помимо одноклеточных планктонных водорослей акваторию и дно бассейна могли населять многоклеточные бурые водоросли, который также благоприятны для создания большой биомассы в процессе цветения водорослей (Амон и др., 2021).

Механизм образований высокоуглеродистых формаций, или черных сланцев, как описано у В.Г. Эдер, А.Г. Замирайловой (2023), предполагает соблюдение трех необходимых условий (Рисунок 10): высокую биопродуктивность, необходимую для образования большого количества ОВ; осаждение органического материала в условиях пониженного поступления осадка; бескислородные условия придонных вод для предотвращения переработки ОВ бентосом или аэробными микроорганизмами.

Сохранность органического вещества в осадке достигалась за счет низких темпов седиментации и преобладания биогенной седиментации над терригенной, особенно в условиях

морских трансгрессий и удаленности от источников кластического материала. Ограниченное разбавление осадка способствовало концентрации органического вещества в тонкодисперсных кремнисто-глинистых отложениях.

Важнейшим условием являлось формирование восстановительной и аноксической обстановки в придонных водах, что препятствовало аэробной деструкции органического вещества и его переработке бентосными организмами. Стагнация придонных вод и сероводородное заражение, возникавшие в результате захоронения значительных масс органического вещества, дополнительно усиливали его сохранность. Существенную роль играли и локальные факторы — глубина и геометрия бассейна, особенности циркуляции водных масс и строение дна, которые определяли пространственную неоднородность высокоуглеродистых отложений (Эдер, Замирайлова, 2023).



Рисунок 10. Схема условий и факторов, благоприятных для образования высокоуглеродистых формаций в эоконтинентальных морских бассейнах (Эдер, Замирайлова, 2023)

Л. Стасюк в своей работе (Stasiuk, 1993) рассматривает образование битуминита как результат осаждения и последующей трансформации фитопланктонного органического вещества в условиях высокой биопродуктивности и восстановительной придонной среды (Рисунок 11). В его модели ключевую роль играет массовое развитие одноклеточных водорослей, которые в процессе цветения образуют основную часть органического детрита. При осаждении на дно этот материал подвергается интенсивной микробиальной переработке и уплотнению, что приводит к формированию бесструктурной сапропелевой массы, диагностируемой в углепетрографических аншлифах как битуминит.

Нитевидные водоросли, напротив, сохраняют более устойчивые морфологические признаки и при захоронении формируют альгинит с хорошо различимой структурой. Таким образом, степень сохранности и морфологическая выраженность мацералов напрямую зависят от исходного биологического материала и интенсивности микробияльного разложения. Восстановительные и резко восстановительные условия в придонной зоне способствовали консервации органического вещества и ограничивали его аэробную деструкцию, что обеспечивало накопление битуминита в тонкослоистых кремнисто-глинистых осадках.

Схема, предложенная Л. Стасюком (Stasiuk, 1993), наглядно демонстрирует связь между зонами цветения фитопланктона в верхней части водной толщи, процессами микробияльного разложения в толще воды и осадке, а также формированием «битуминитоносных» интервалов в основании разреза. Тем самым подчеркивается генетическая связь между палеобиологическими условиями бассейна, типом первичных продуцентов органического вещества и мацеральным составом органического вещества высокоуглеродистых толщ.

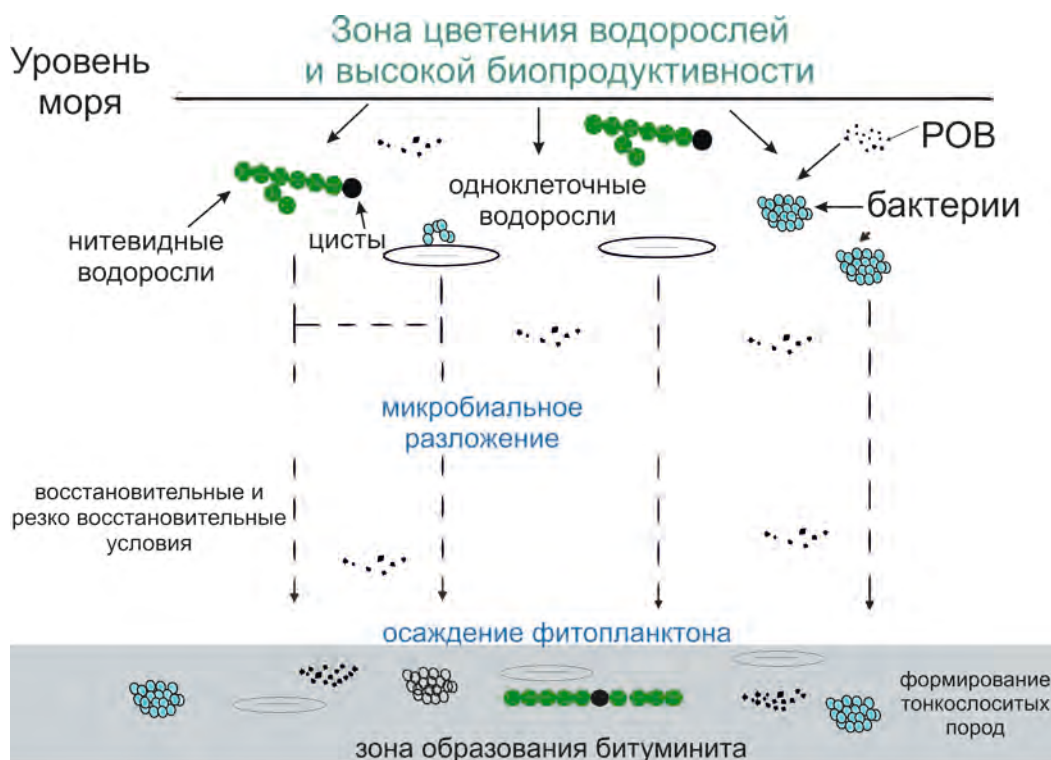


Рисунок 11. Цветение водорослей и формирование мацералов (по Stasiuk, 1993 с изменениями)

1.6. Нефтегазоносность

В нефтегазогеологическом районировании изучаемая территория относится к Западно-Сибирскому нефтегазоносному бассейну к Красноленинской, Фроловской, Среднеобской нефтегазоносным областям (НГО), несколько скважин встречается в Каймысовской, Надым-Пурской, Пур-Тазовской и Гыданской НГО (Рисунок 12).

В Западно-Сибирском НГБ разными исследователями выделяются от четырех до восьми нефтегазоносных комплексов (НГК), кроме этого, выявлены залежи в доюрских отложениях бассейна (Гурари и др., 2005).

Среднеюрский НГК

Среднеюрский НГК объединяет разнофациальные толщи пород, включающих пласты Ю₂-Ю₉ тюменской свиты (J_{2bs}-J_{2bt}). Отложения тюменской свиты представляют собой толщу переслаивания аргиллитов и алевролитов с подчиненными прослоями и линзами песчаников. По фациальной характеристике отложения тюменской свиты относят к озерным, болотным (ЮК₂-ЮК₆) и озерно-аллювиальным (ЮК₂₋₄-ЮК₇₋₉). Подошвой среднеюрского НГК являются глинистые отложения радомской пачки или доюрские образования там, где нижнеюрские отложения отсутствуют, и породы комплекса залегают непосредственно на фундаменте.

Нефтематеринскими породами являются песчано-глинисто-углистые отложения тюменской свиты. Они же являются локальным невыдержанным по площади флюидоупором.

Региональной покрывкой служат глинистые отложения различного возраста. В основном это отложения абалакской свиты (J_{2k}-J_{3km}). Разрез среднеюрского комплекса представлен частым неравномерным линзовидным переслаиванием песчаников, алевролитов, глин с тонкими прослоями углей с включениями крупных обугленных обломков растений.

Верхнеюрский НГК

Верхнеюрский НГК включает в себя резервуар, приуроченный к нижней части абалакской свиты (вогулкинская толща), покрывку, сложенную карбонатно-кремнисто-глинистыми породами тутлеймской свиты. Отложения абалакской свиты накапливались при низких скоростях седиментации и характеризуют начало некомпенсированного осадконакопления в относительно глубоководном позднеюрском морском бассейне. НМТ порода представлена отложениями тутлеймской свиты (Рудкевич и др, 1988). Отложения вогулкинской толщи образуют зональный комплекс, распространенный вокруг еще сохранившихся здесь к этому времени островных выступов фундамента. Данный комплекс включает отложения горизонта Ю₀, Ю₁, которые накапливались в полифациальных прибрежно-морских, относительно морских условиях и характеризующиеся сильной литологической изменчивостью.

Отложения тутлеймской свиты (J_{3tt}-K_{1b}) представлены карбонатно-кремнисто-глинистыми отложениями темно-серыми до черных, битуминозными. Минеральный состав глинистых пород довольно разнообразный, основными глинистыми минералами являются монтмориллонит и смешанослойные образования типа гидрослюда - монтмориллонит.

Неокомский НГК

Неокомский НГК распространен практически на всей территории ХМАО и включает в себя нижнемеловые отложения от берриаса до баррема. Общими характерными особенностями

данного комплекса является клиноформное строение, субмеридиональная зональность и преобладающая тенденция смены прибрежных фаций на относительно глубоководно-морские в западном направлении. Коллекторы представлены песчано-алевролитовыми отложениями пластов, перекрытых пачками глин. Толща пород неокомского возраста разделяется региональными глинистыми покрывками на несколько самостоятельных комплексов.

Основные продуктивные горизонты связаны с прибрежно-морскими отложениями фроловской свиты (K_{1b} - K_{1br}), сложенной глинами уплотненными темно-серыми с редкими прослоями мергелей и глинистых известняков.

Апт-сеноманский НГК

Апт-сеноманский НГК включает отложения викуловской, ханты-мансийской и уватской свит (горизонты AC_{1-3} , BK_{1-2}). Основные притоки нефти связаны с сеноманом. Отложения викуловской свиты (K_{1a}) представляют собой толщу, сложенную переслаиванием песчаников, алевролитов и глин, сильно обогащенных алевролитовым материалом. Ханты-мансийская свита (K_{1a1}) представлена глинами с линзами алевролитового материала, общая мощность свиты 200-270 м. Уватская свита (K_{2s}) представляет песчано-глинистую толщу с прослоями известняков общей мощностью 225-250 м. НМТ для данного комплекса является тутлеймская свита.

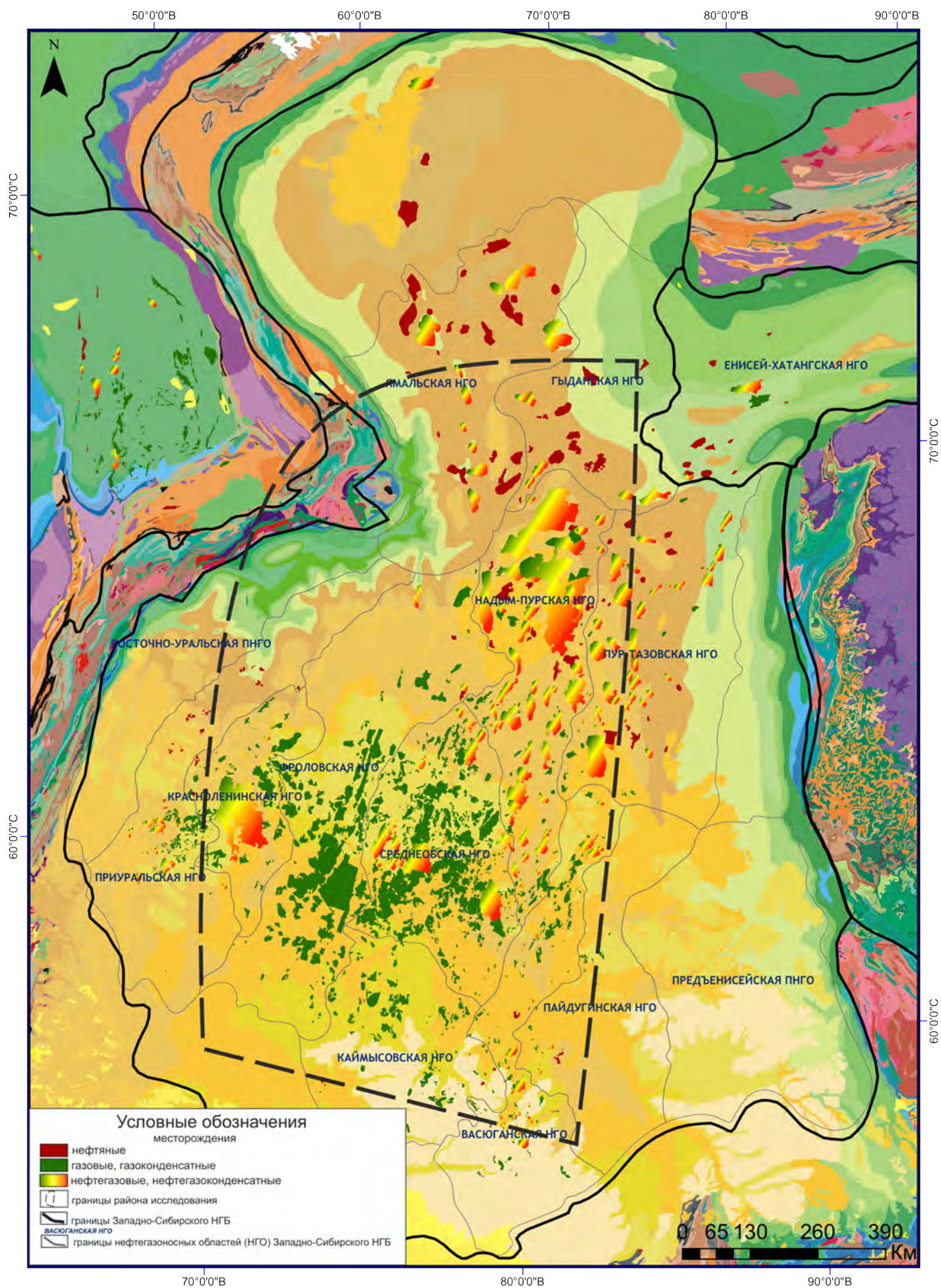


Рисунок 12. Распределение месторождений различного типа в Западной Сибири (по Ulmishak, 2003 с изменениями)

Глава 2. Методика исследования органического вещества БВУФ¹

2.1. История изучения органического вещества баженовской формации

Перед рассмотрением петрографических особенностей органического вещества баженовской свиты необходимо кратко остановиться на становлении углепетрографического метода и этапах его применения к нефтегазоматеринским толщам.

Ранние углепетрографические исследования, сформировавшиеся в середине XX века, были ориентированы преимущественно на концентрированное органическое вещество — угли и углистые породы. Основы петрологии углей и их генетической классификации были заложены в работах Ю.А. Жемчужникова (1934) и А.И. Гинзбурга (Жемчужников, Гинзбург, 1960). В 1960-е годы получили развитие исследования И.И. Аммосова и И.В. Еремина (Аммосов, Еремин, 1960), посвящённые трещиноватости углей. В 1970-х годах П.П. Тимофеев и Л.И. Боголюбова (1980) сосредоточили внимание на обстановках торфонакопления и их связи с литологическими условиями, не признавая ведущей роли метаморфизма, тогда как Н.П. Гречишников совместно с Аммосовым (Аммосов и др., 1964) предложил промышленно-генетическую классификацию углей. Более детально история углепетрографических исследований углей от их зарождения до настоящего времени изложена в работе М.В. Голицына и соавторов (Голицын и др., 2015)

Переход к изучению рассеянного органического вещества нефтегазоматеринских толщ произошёл в 1980–1990-х гг. и связан с работами И.Б. Волковой, Г.М. Парпаровой и А.В. Жуковой (1990), в которых методы классической углепетрографии были впервые системно применены к подобным объектам, включая баженовскую свиту. Исследования проводились преимущественно на концентратах нерастворимой части органического вещества — керогена. В этих работах показана сапропелевая природа органического вещества баженовской свиты, описано значительное участие водорослевого материала, включая зелёные тасманитоподобные водоросли. Одновременно была предложена специализированная терминология для описания компонентов рассеянного органического вещества (коллоальгинит, талломоальгинит, хитинит, коллохинит, псевдовитринит, псевдофузинит, псевдолейптинит, сорбомикстинит), отражавшая представления о генезисе органического вещества. В частности, псевдовитринит

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Bulatov T., Kozlova E., Leushina E., Vaitekhovich A., Pronina N., Goncharova A., Kul'kov M., Salakhidinova G., Butyrin R., Bashanova A., Torshina L., Spasennykh M. Source rock potential and depositional environments of the Jurassic and Cretaceous coals from the Gyda Peninsula, Western Siberia // *International Journal of Coal Geology*. 2025. vol. 305. 104789. EDN: ETMARH. Импакт-фактор 5,7 (JIF); 1,438 п.л.; авторский вклад 20%.

интерпретировался как остатки донных водорослей, талломоальгинит — как производные планктонных водорослей, а коллоальгинит — как продукт их микробиального разложения.

В монографии Г.М. Парпаровой и А.В. Жуковой «Углепетрографические методы в изучении осадочных пород и полезных ископаемых» (1990) впервые описан микрокомпонентный состав ОВ баженовской свиты. Для баженовской свиты одним из главных компонентов органического вещества является коллоальгинит; также характерно присутствие псевдовитринита, хитинит для баженовской свиты не выделяется. Эти положения заложили основу для последующих углепетрографических исследований высокоуглеродистых толщ Западной Сибири.

Следующий важный этап связан с развитием представлений о катагенетической зрелости органического вещества. В монографии Г. М. Парпаровой и соавторов «Катагенез и нефтегазоносность» (1981) была предпринята попытка обобщённой оценки катагенеза мезозойских отложений на территории всей Западной Сибири. В этой работе подчёркивается неоднородность степени зрелости органического вещества даже в пределах близлежащих структур и месторождений, что объясняется влиянием фундамента, глубинного теплового режима и локальных геологических факторов. Оценка степени зрелости в этих исследованиях основывалась преимущественно на измерениях показателя отражения витринита (в большей степени в воздушной среде) для углей и углистых пород, а также на показателях преломления альгинитовых компонентов для нефтегазоматеринских толщ. Современные стандарты предусматривают проведение исследований на аншлифах и измерение показателя отражения исключительно в иммерсионной среде, что обуславливает необходимость переоценки ранее полученных данных с использованием современного аналитического оборудования и усовершенствованных методических подходов.

Существенный вклад в изучение катагенеза органического вещества Западной Сибири был внесён А. Н. Фоминым. В его докторской диссертации (2005), а также в последующей монографии (Фомин, 2011) обобщены значительные массивы данных и с использованием методов компьютерного моделирования построены региональные схемы зрелости органического вещества для всей территории Западной Сибири.

Несмотря на фундаментальное значение указанных работ, следует отметить, что применяемая в них терминология не соответствует современной классификации мацералов, а методические подходы (исследования в проходящем свете, использование показателя преломления и показателя отражения в воздухе) ограничивают возможность сопоставления с современными результатами. Современная классификация мацералов рассеянного органического вещества была окончательно сформирована сравнительно недавно в рамках Международного Комитета по углепетрографии и органической петрологии (ICCP), что обуславливает необходимость пересмотра и уточнения ранее полученных данных.

В этой связи особую актуальность приобретает корректная идентификация мацерального состава и проведение измерений показателя отражения по строго определённым компонентам органического вещества. В современной практике изучения нефтегазоматеринских толщ основным индикатором степени зрелости выступает битуминит как главный нефтематеринский мацерал сапропелевого органического вещества, с которым сопоставляются показатели отражения других компонентов. В международной литературе, в частности в *International Journal of Coal Geology*, опубликован ряд работ, посвящённых проблемам диагностики битуминита и его отличия от витринита и других мацералов (например, Hackley et al., 2018).

Одной из задач настоящего исследования является адаптация и применение современной классификации мацералов к баженовской высокоуглеродистой формации. Современные исследования БВУФ с использованием актуальной классификации и современного аналитического оборудования проводятся, в том числе, на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых при участии автора. Например, альгинитовые прослои в 4 пачке БВУФ, ранее описываемые как коллоальгинит, в рамках действующей классификации относятся к ламальгиниту.

Следует отметить, что современные исследования органического вещества баженовской свиты носят преимущественно локальный характер и часто основаны на ограниченном числе образцов и методов, что затрудняет сопоставление результатов (Таблица 1). При этом значительная часть углепетрографических данных получена по углям и углистым породам, тогда как для баженовской свиты широко применяются геохимические методы (пиролиз и биомаркерный анализ).

Таким образом, необходимость комплексного применения современных углепетрографических и геохимических методов, основанных на унифицированной классификации мацералов и стандартизированных процедурах измерений, является ключевым условием получения сопоставимых данных о составе и степени зрелости органического вещества баженовской формации.

Таблица 1. Обзор открытых источников с данными углепетрографии для Западной Сибири

Организация Автор Год публикации	Возраст отложений	Количество образцов	Метод
ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука	Нижняя юра- средняя юра	>860 обр. углей и пород	Измерения показателя отражения витринита в воздушной среде и

Г.М. Парпарова, А.В. Жукова (1981)			показателя преломления витринита
КНИИГиМС (г. Красноярск) канд. дисс. Л.Н. Болдушевская (2001)	Юра, мел (Енисей-Хатангский бассейн)	273 обр.	Измерения показателя отражения витринита
А.З. Юзвицкий Угольная база России (2003)	Нижняя юра-мел	75 обр.	Измерения показателя отражения витринита
ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука докт. дисс. А.Н. Фомин (2005)	Палеозой, триас, юра	>10000 обр.	Измерения показателя отражения витринита, псевдовитринита, сорбомикстинита, битуминита в масле и показателя преломления витринита
УГГУ (г. Екатеринбург). В.П. Алексеев, Н.В. Пронина и др. (2006)	Нижняя-средняя юра	132 обр.	Мацеральный состав углей и углистых пород в аншлифах и измерения показателя отражения витринита
АО «ТомскНИПИнефть» канд. дисс. Н.В. Обласов (2010)	Нижняя-верхняя юра	48 обр.	Измерения показателя отражения витринита
«ТомскНИПИнефть» канд. дисс. П.В. Трушков (2024)	Нижняя-средняя юра	190 обр. углей и углистых пород	Нет фактических данных, только карта. Измерение показателя отражения в МГУ им. М.В. Ломоносова

ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука А.Н. Фомин <i>(Фомин, Горохова, 2024)</i>	Средняя-верхняя юра	85 образцов углей	Определение мацерального состава в шлифах
МГУ им. М.В. Ломоносова А.П. Вайтехович, Н.В. Пронина <i>(Bulatov et al., 2025)</i>	Средняя юра	29 обр. углей и углистых пород	Полное описание мацерального состава углей и углистых пород в аншлифах (с использованием новейшей классификации), расчет петрографических индексов по мацеральному составу и замеры показателя отражения витринита
МГУ им. М.В. Ломоносова Н.В. Пронина, А. П. Вайтехович <i>(Пронина и др., 2021; 2022; Савостин и др., 2024; Андреев и др., 2025)</i>	Юра, мел	>1000 обр. за ~ 10 лет работ	Полное описание мацерального состава углей и РОВ в аншлифах (с использованием новейшей классификации). Измерения показателя отражения витринита и других мацералов

Несмотря на долгий период исследования органического вещества БВУФ, все еще остается много неопределенностей, проблем и вопросов, которые благодаря усовершенствованию оборудования, вовлечению большего количества исследователей, лабораторий и международному опыту сейчас проходят активную фазу.

2.2. Углететрографические исследования

Для проведения углететрографического анализа были отобраны образцы из керна скважин и подготовлены аншлиф-штуфы и аншлиф-брикеты в соответствии с ГОСТ Р 55663—2013 (ИСО 7404-2:2009). По сравнению с частым отбором образцов для массового исследования методом пиролиза углететрографический метод выполняется исключительно вручную оператором, поэтому обычно на скважину отбирается не более 30 образцов.

Углететрографические исследования проводились автором в лаборатории угля кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на микроспектрофотометре QDI 302 Craic (CRAIC Technologies, США), установленном на базе микроскопа Leica DM 2500 P (Leica, Германия) с иммерсионным объективом 50x/0.85 Leica Germany и микроспектрофотометре Craic 508 PV (CRAIC Technologies, США) на базе микроскопа Zeiss Axioscope 5 (Zeiss, Германия) с иммерсионным объективом 50x/1.0 Epiplan-NEOFLUAR (Рисунок 13). Наблюдение, фотографирование и описание мацерального состава проводилось в простом отраженном белом и ультрафиолетовом свете в соответствии с ГОСТ Р 55662–2013 (ИСО 7404-3:2009). Для возбуждения люминесценции использовались фильтры с диапазоном длин волн 340–380 нм (Leica DM 2500 P) и 470 нм (Zeiss Axioscope 5). Фотографирование образцов проводилось в программах Craic Imaging и GeoImage. Описание мацерального состава выполнялось по действующей классификации мацералов углей и рассеянного органического вещества Международного Комитета по углететрографии и органической петрологии (International Committee for Coal and Organic Petrology - ICCP) (ГОСТ Р 58221-2018 (ИСО 7404-1:2016), ICCP System, 1994, 1998, 2001; Mastalerz, 2018; Gonçalves et al., 2024). Измерение показателя отражения проводилось в иммерсионном масле с использованием указанных выше иммерсионных объективов по эталону Spinel ($R = 0.426\%$) в соответствии с ГОСТ Р 55659–2013 (ИСО 7404-5:2009) в программе Craic CoalPro.



Рисунок 13. Микроспектрофотометры лаборатории угля кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ им. М.В. Ломоносова

2.3. Пиролитические исследования

Процесс отбора образцов на пиролиз для полной характеристики разреза каждой скважины включал 1-3 образца на каждый метр.

Пиролитические исследования проводились в геохимической лаборатории кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова для

образцов по методу Rock-Eval (Espitalié et al., 1977, 1985) на пиролизаторе HAWK Resource Workstation (Wildcat Technologies, США). Метод основан на программируемом нагреве образца в инертной атмосфере с регистрацией продуктов термического разложения органического вещества и позволяет количественно охарактеризовать его генерационный потенциал и степень термической зрелости.

В ходе анализа фиксировались основные пиролитические параметры: S_1 (количество свободных углеводородов), S_2 (потенциал генерации углеводородов при термическом разложении керогена), T_{max} (максимальная температура на пике S_2), а также рассчитывались производные показатели, такие как водородный индекс (HI). Полученные данные использовались для оценки изменений генерационных свойств и зрелости органического вещества.

Для корректной оценки ОБ БВУФ проводился пиролиз до экстракции растворимой части (битумоида) из органического вещества породы, чтобы исключить влияние тяжелых углеводородных соединений (включая смолы и асфальтены), а также после экстракции битумоида. Процесс экстракции проводится для истертой породы в порошок в аппарате Сокслета с использованием растворителей (гексана и/или хлороформа). Экстракция пород проходит достаточно долго, растягиваясь на месяцы из-за высвобождения все новых легких углеводородов, запечатанных в порах. Детально методика проведения анализа описана в статье Е.В. Козловой с соавторами (Козлова и др., 2015а, б).

2.4. Лабораторное моделирование катагенеза

Лабораторное моделирование преобразования органического вещества выполнялось методом гидропиролиза (акватермолиза) (Lewan, 1993). Данный подход позволяет анализировать процессы нефте- и газообразования и часто применяется в сочетании с методами органической петрологии (Spigolon et al., 2015; Hackley, Lewan, 2018; Liu et al., 2019; Mishra et al., 2022; Arysanto et al., 2024). Гидропиролиз моделирует природные процессы формирования углеводородов путём термического воздействия на нефтегазоматеринские породы или изолированное органическое вещество в присутствии жидкой воды (Lewan et al., 1979).

Каждый образец помещали в отдельный автоклав с добавлением дистиллированной воды. Автоклавы устанавливали в печь, предварительно нагретую до температуры 350 °С, и выдерживали при данной температуре в течение 12 часов при постоянном давлении в 30 МПа (Рисунок 14). После завершения эксперимента автоклавы охлаждали до комнатной температуры, отбирали продукты термического преобразования, после чего образцы пород извлекали и высушивали до постоянной массы. От высушенного образца отбирали навеску для пиролитических исследований, а из оставшейся части преобразованной породы изготавливали аншлифы, на которых проводили микроскопические исследования. Пиролиз выполняли для

образцов до и после прогрева методом Rock-Eval (Espitalié et al., 1977, 1985) на пиролизаторе HAWK Resource Workstation (Wildcat Technologies, США) (Рисунок 15).

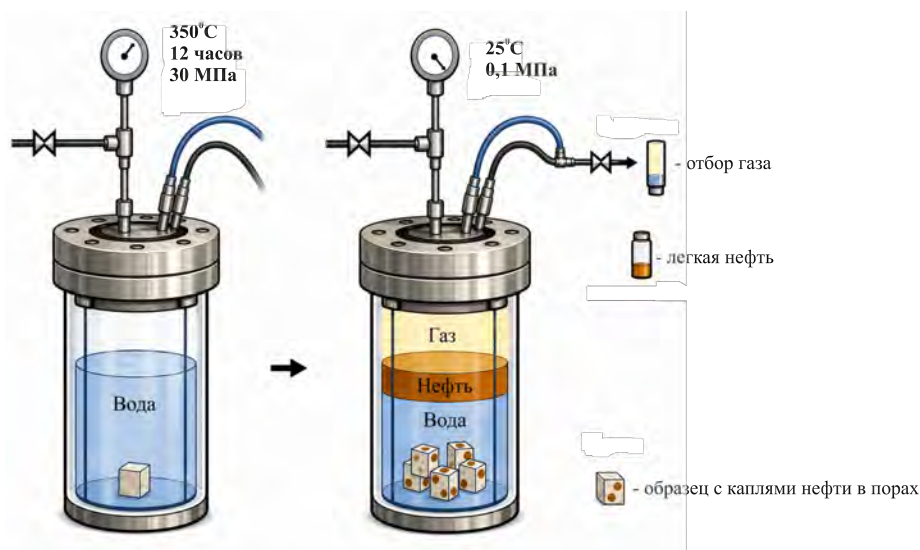


Рисунок 14. Схема проведения эксперимента по гидропиролизу

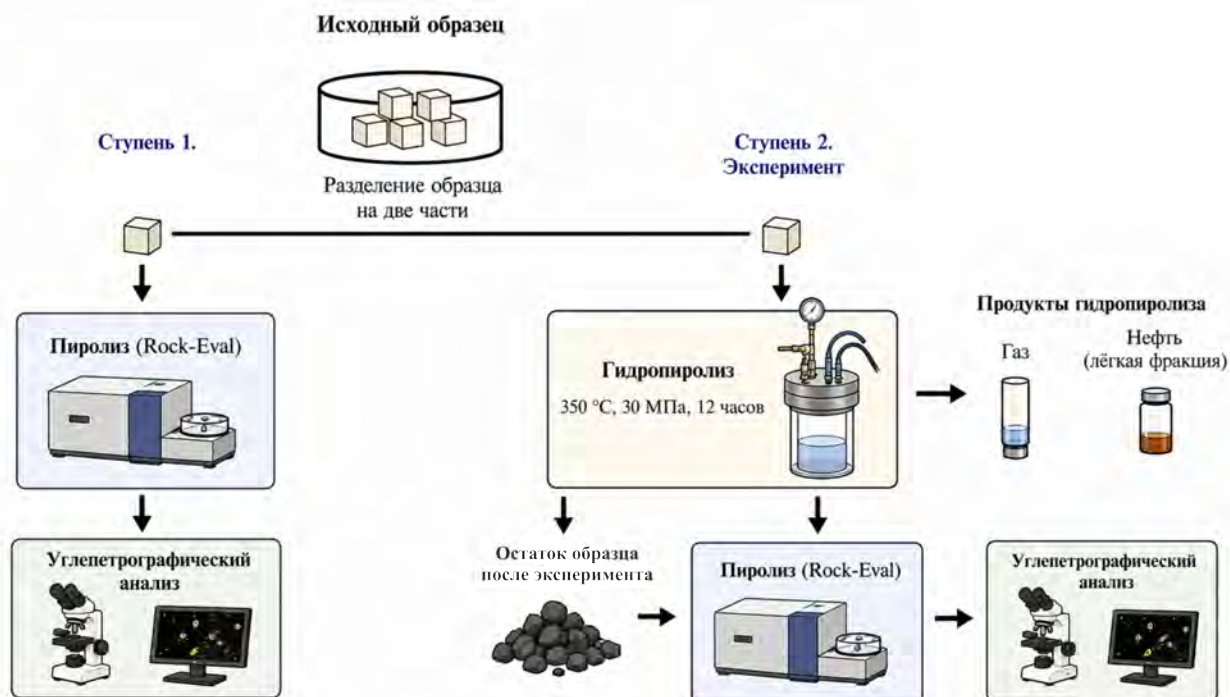


Рисунок 15. Процесс проведения исследований органического вещества БВУФ

Глава 3. Мацеральный состав органического вещества БВУФ²

Баженовская свита и ее аналоги характеризуются неоднородным мацеральным составом, который может варьировать в зависимости от территории, принадлежности к определенной пачке. Органическое вещество БВУФ описывается по действующей международной классификации мацералов ICCP/TSOP, группа зоокластов в которой была введена в 2018 году.

Таблица 2. Классификация ICCP мацералов рассеянного ОВ с доб. (Gonçalves et al., 2024)

Группа	Мацерал
Липтинита	Альгинит телальгинит ламальгинит
	Битуминит
Зоокласты	Сколекодонты
	Граптолиты
	Хитинозои
	Фораминиферы
	*
Вторичные продукты	Твердые битумы
	Пиробитумы
	Нефть

*Онихиты пока не введены в действующую классификацию

3.1.Альгинит

Альгинит является одним из главных нефтематеринских мацералов, вклад которого в процесс производства жидких углеводородов (УВ нефтяного ряда) является определяющим. Альгинит – мацерал, входящий в группу липтинита, образуется из устойчивых, богатых жирами водорослей. Долгое время это был единственный углепетрографический термин для описания сапропелевого

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Марунова Д.А., Пронина Н.В., Калмыков А.Г., Иванова Д.А., Савостин Г.Г., Вайтехович А.П., Калмыков Г.А. Эволюция биокластов при катагенезе в породах баженовского горизонта на территории Фроловской нефтегазоносной области // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2023. № 5. С. 87–95. EDN: JXXDZK. Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ); 0,563 п.л.; авторский вклад 15%.
2. Пронина Н.В., Вайтехович А.П., Калмыков А.Г., Марунова Д.А. Значение определений мацералов для понимания и изучения процессов трансформации органического вещества нефтематеринских пород // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 2. С. 29–35. EDN: ХЕKYDX. Импакт-фактор 1,180 (РИНЦ); 0,438 п.л.; авторский вклад 65%.

ОВ. Однако разнообразие водорослей так велико, что появилось еще три термина. Водоросли в виде отдельных тел называют телальгинитом (по старой классификации талломоальгинит), в виде волокнообразных сгустков – ламальгинита (по старой классификации коллоальгинит). В БВУФ встречаются обе разновидности. В простом отраженном белом свете альгинит имеет коричневый цвет и еле различимые контуры, но в ультрафиолетовом свете демонстрирует яркое свечение и отчетливо различимые края (Рисунок 16).

Основными водорослями, обитавшими в Западно-Сибирском море, являются цианобактерии (сине-зеленые водоросли), зеленые, золотистые водоросли и динофлагелляты. Водоросли не имеют корней, стеблей, их водорослевое тело обозначается различными терминами, такими как слоевище, слоево, таллом. «Водоросли — это низшие, слоевцовые, споровые растения, содержащие своих клетках хлорофилл живущие преимущественно воде» (Жизнь растений, 1977). Для существования водорослей необходима подвижная среда бассейна.

Альгинитовые прослои, описанные у Т.Д. Булатова с соавторами (2021), являются высококонцентрированными сгустками в виде нитевидных слойков, наследующих слоевища водорослей, как правило, приурочены к 4 пачке и имеют мощность от 1 до 50 мм. Данные альгинитовые прослои по мацеральному составу относятся к ламальгиниту.

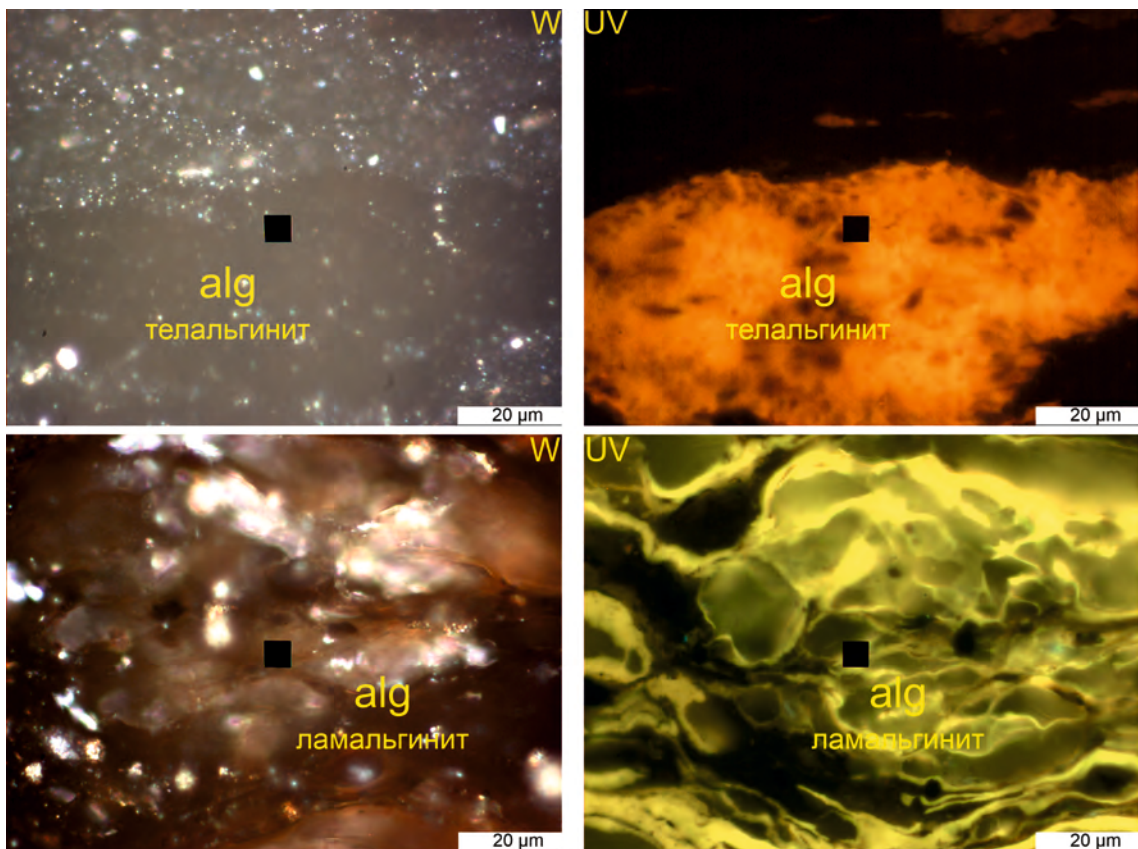


Рисунок 16. Разновидности альгинита (alg) в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

3.2. Битуминит

Битуминит является вторым главным нефтематеринским мацералом в нефтегазоматеринских толщах, который вносит значительный вклад в процесс нефтегенерации. Для описания керогена вернеюрско-нижнемеловых отложений Западной Сибири долгое время использовался термин «псевдовитринит», упоминающийся в работах Г.М. Парпаровой, А.В. Жуковой (1981) и А.Н. Фомина (2011). Битуминит входит в группу липтинита и представляет остатки водорослей. Отличается от альгинита отсутствием структуры. В БВУФ предложено выделять битуминит разных стадий генерации для более детального описания качественно наблюдаемых особенностей (Пронина и др., 2021; 2022). Догенерационный битуминит представляет исходное твердое вещество водорослевых остатков. В простом отраженном белом свете имеет характерный для группы липтинита темно-серый цвет. В УФ свете имеет неинтенсивное свечение (Рисунок 17).

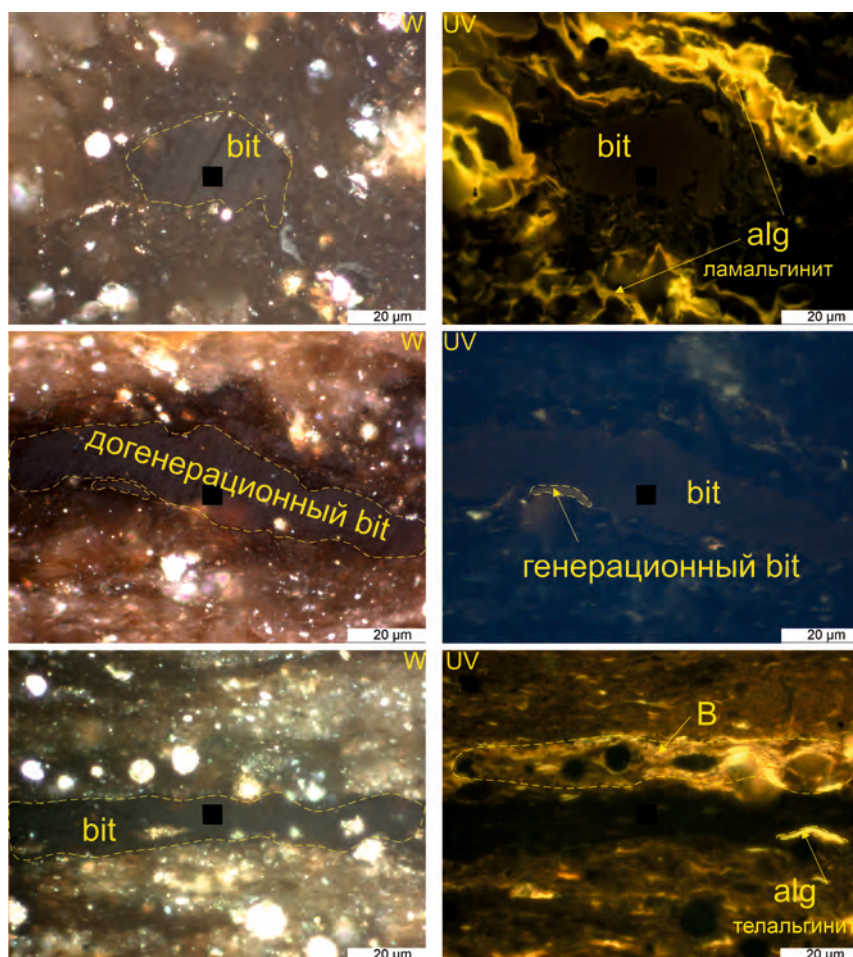


Рисунок 17. Догенерационный битуминит в БВУФ в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

Генерационный битуминит в простом отраженном белом свете имеет коричневый цвет, который приобретает в момент трансформации (выделения жидких продуктов) В УФ свете для генерационного битуминита характерно наиболее интенсивное свечение (Рисунок 18). Вокруг генерационного битуминита концентрируется битум (жидкие продукты, выделяющиеся из

битуминита) в виде пленок с очень интенсивным свечением в УФ свете. Стоит сказать, в данном контексте термин «**битум**» является **исключительно углепетрографическим** и не является синонимом геохимическому термину «битумоид» и «природный битум», который обнаруживают на нефтяных месторождениях. Автор данной работы пользуется действующей международной классификацией, в рамках которой использование данного термина утверждено.

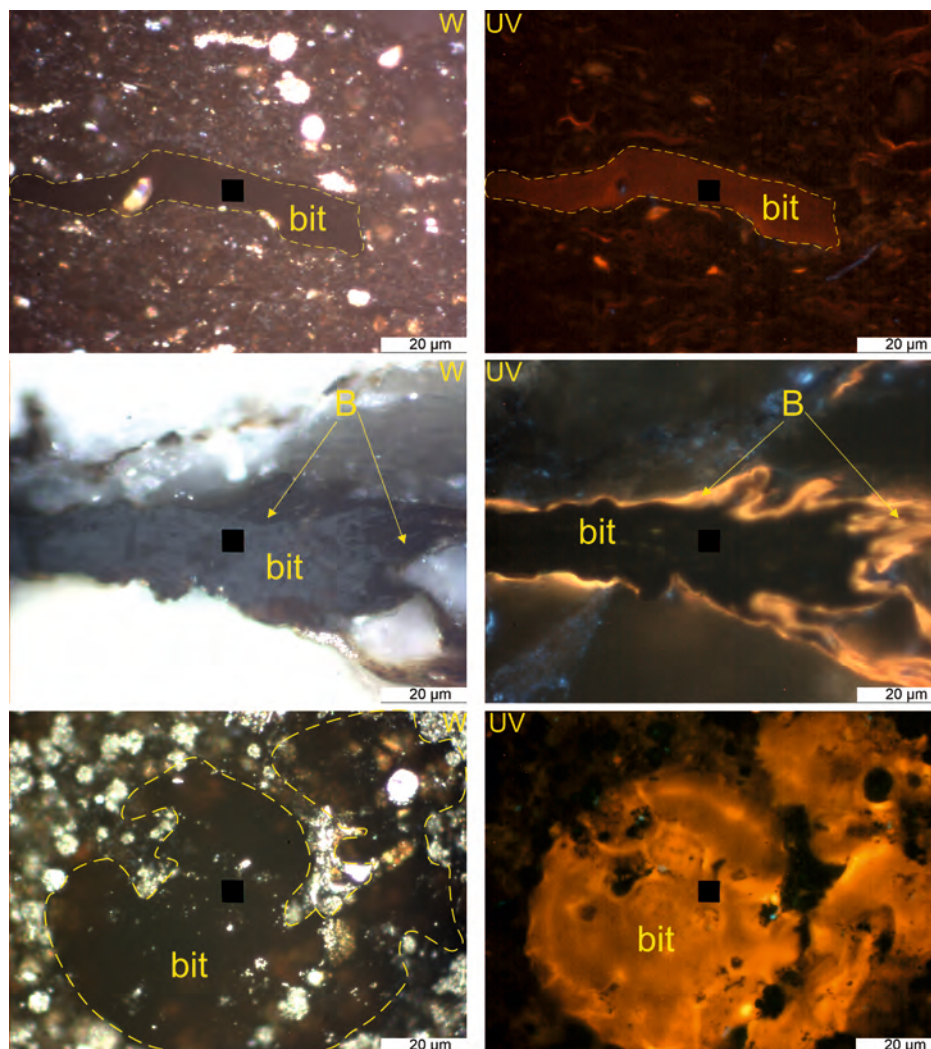


Рисунок 18. Генерационный битуминит в БВУФ в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

Постгенерационный битуминит представляет собой остаточное твердое вещество светло-серого или белого цвета. Как правило, это мелкодисперсные фрагменты белого цвета в простом отраженном белом свете, которые трассируют исходное вещество. В УФ свете не имеют свечения совсем (Рисунок 19). Вокруг постгенерационного битуминита практически не обнаруживается битумных пленок. Следует отметить, что в международной практике для обозначения более преобразованных (вторичных) микрокомпонентов широко используется термин *solid bitumen*. В настоящей работе соответствующие объекты рассматриваются в составе постгенерационного битуминита, что позволяет сохранить генетическую преемственность описания и избежать

терминологической неоднозначности, связанной с различием между геохимическим и петрографическим пониманием термина «твердый битум».

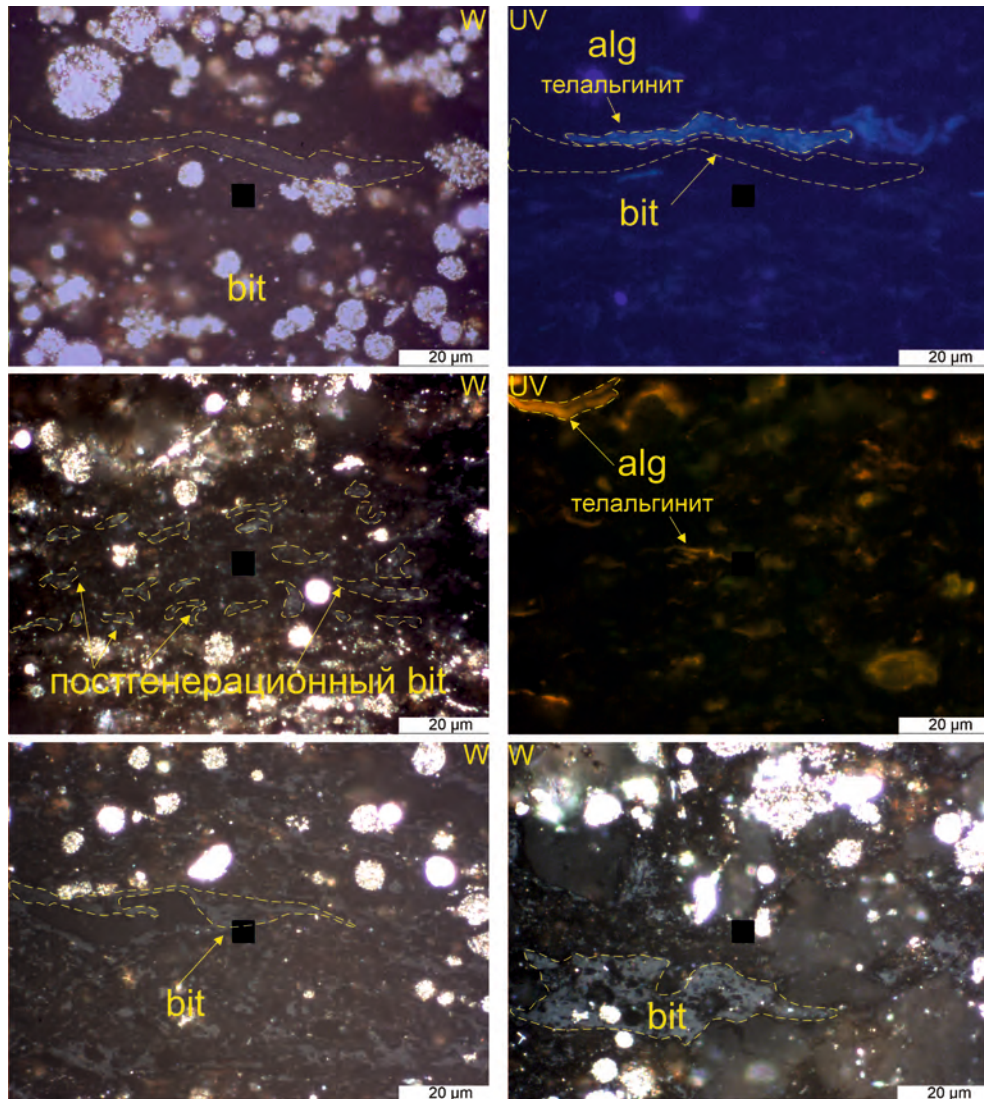


Рисунок 19. Постгенерационный битуминит в БВУФ в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

3.3. Онихиты

Онихиты – ископаемые крючья головоногих моллюсков (от греч. *onychos* — ноготь). Предполагается, что данные крючья располагались на концах щупалец белемнитов или теутид и использовались для захвата добычи (Рисунок 20).

Распространение онихитов

Онихиты известны в широком стратиграфическом интервале — от ранней юры (J1t) до нижнего мела (K1h). Наиболее древние мегаонихиты известны из пермских отложений Восточной Гренландии (Рогов и др., 2017). Находки онихитов (преимущественно мегаонихиты найдены в различных отложениях Польши, Южной Германии, на шельфе Норвежского и

Баренцева морей, в Восточной Гренландии, на Шпицбергене, Земле Короля Карла, Западной Сибири, р. Хета и р. Маймеча (Рисунок 21).

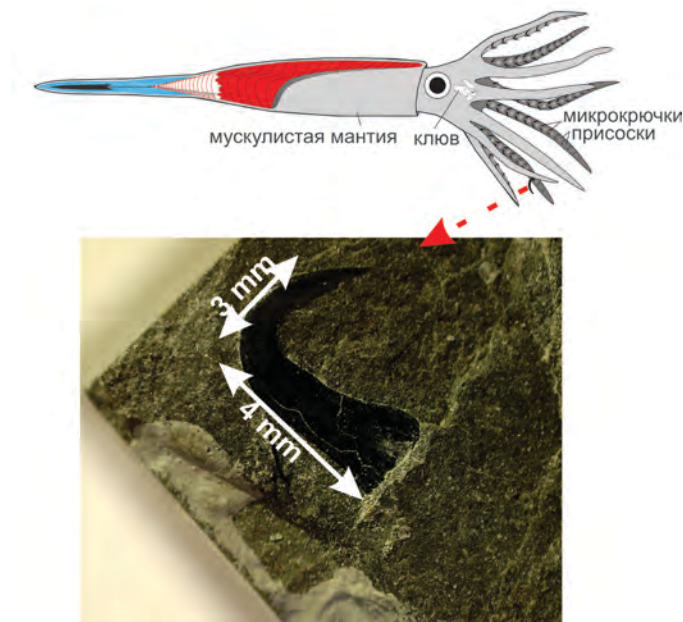


Рисунок 20. Схематичное строение белемнита с крючками. Красным показана арагонитовая раковина (фрагмокон) и покрывающий ее проостракум, синим — кальцитовый ростр (Hoffmann, Stevens, 2020), на нижней фотографии: микроонихит баженоской свиты

Находки микроонихитов датируются средней и поздней юрой (келловей-титон) (Dopovan, 1953; Kulicki, Szaniawski, 1972; Stevens, 2010; Hammer et al., 2013). Фации, где были найдены онихиты, совершенно разнообразные: от мелководных песков и песчаников и известняков до относительно глубоководных, богатых органическим веществом, нефтематеринских толщах (например, баженоская свита) (Рогов и др., 2017).



Рисунок 21. Географическое распространение онихитов

Распространение онихитов приурочено к эпиконтинентальным морям Северного полушария, связанным с системой Бореального океана и находившимся в ограниченной,

полузамкнутой связи с океаном Тетис. В позднеюрское время такие моря занимали обширные площади Западной Сибири, северной и центральной Европы, Гренландии и арктических шельфов (Рисунок 22).

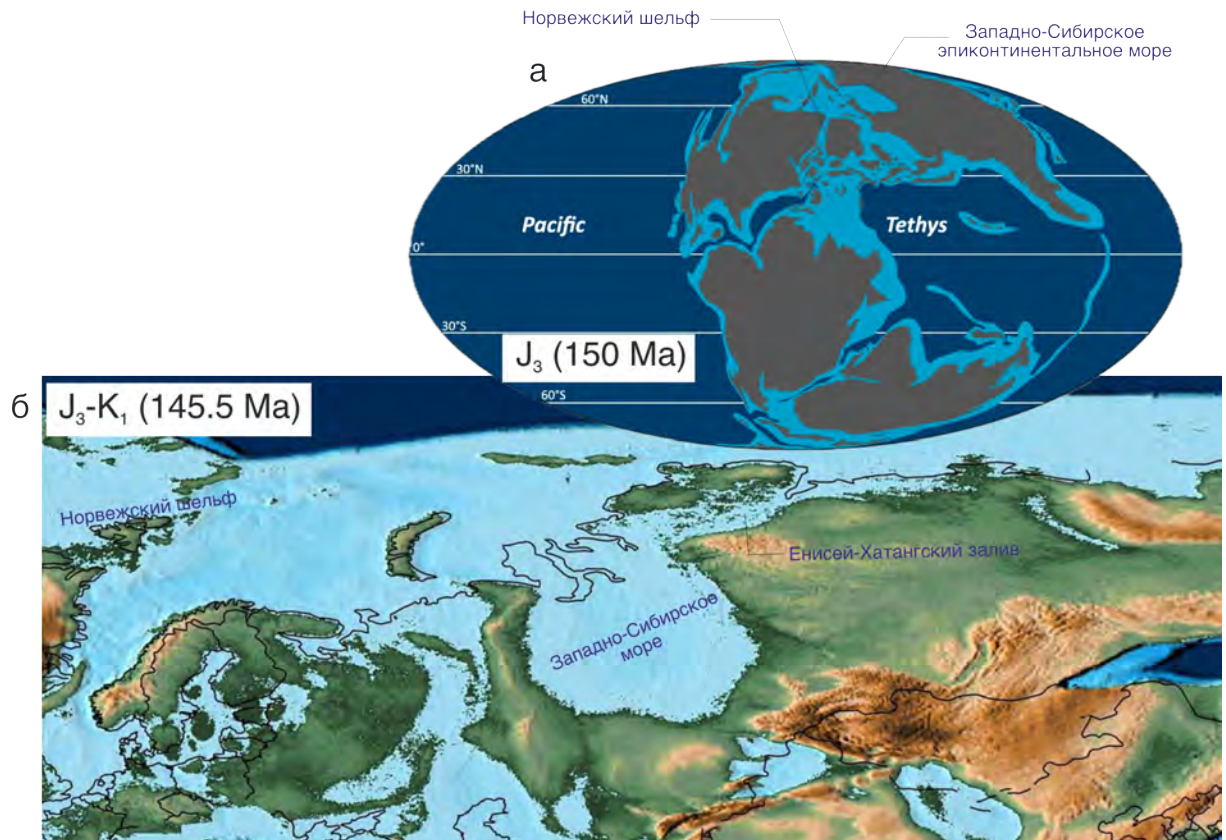


Рисунок 22. Палеогеографические реконструкции: а – поздняя юра (Galloway et al., 2024), б – граница юры и мела (Scotese, 2015)

История изучения онихитов

Рассматривая историю изучения онихитов, можно выделить несколько последовательных этапов, отражающих изменение научных представлений об их природе, морфологии и систематическом положении.

Основная сложность в изучении онихитов связана с редкостью находок с сохранением мягких тканей, а также с редким совместным обнаружением мега- и микроонихитов (Рисунок 23).



Рисунок 23. Белемнит *Passaloteuthis laevigata* с отпечатками рук с микроонихитами и мегаонихитами, длина 25 см, Германия, J1t (Hoffmann, Stevens, 2020)

Эволюция взглядов прошла путь от описания изолированных крючков и крючьев к формированию паратаксономической системы и последующим функционально-палеоэкологическим интерпретациям (Рисунок 24). Каждому этапу соответствовал определённый уровень накопления фактического материала и методологический подход к его анализу. Классификация онихитов формировалась постепенно и отражает переход от описательных подходов к более детализированным морфотипическим схемам. Первоначально онихиты рассматривались как изолированные находки без чёткой систематизации и эволюционной таксономии.

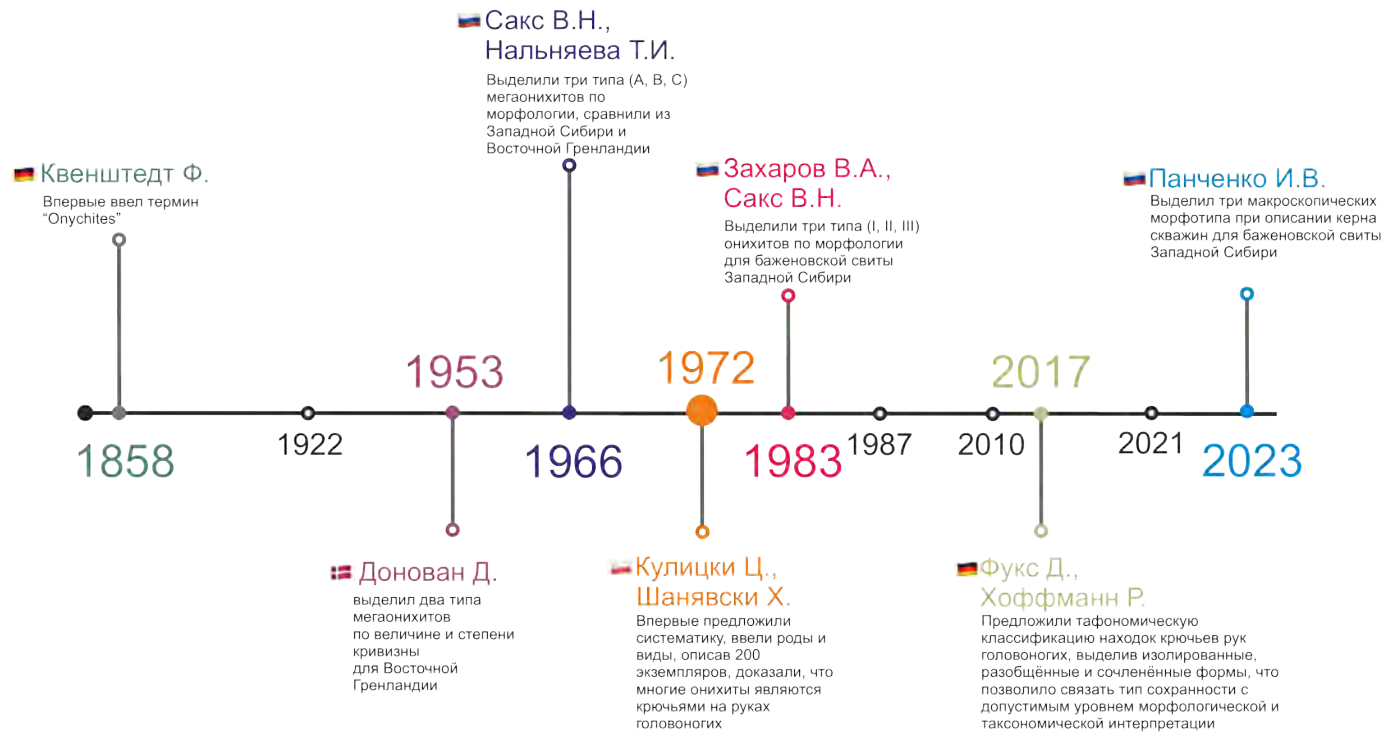


Рисунок 24. Временная шкала эволюции представлений об онихитах

1. Описательный этап (XIX век — начало XX века)

Впервые термин «Onychites» (от греч. *onychos* – ноготь) вводится в 1858 году Ф. Квенштедтом для находок из юрских отложений Германии (Quenstedt, 1858). Он описывает не биологический таксон, а изолированные ископаемые крючки и крючья серповидной формы и связывает с белемнитами.

2. Сравнительно-морфологический этап (середина XX века — 1960-е гг.)

В середине XX века были заложены основы морфологической классификации. В работе Д. Донована (Donovan, 1953) в 1953 году впервые было предложено разделение верхнеюрских мегаоницитов Восточной Гренландии по степени кривизны на два типа, что стало первым шагом к типизации этих объектов. Позднее В.Н. Сакс и Т.И. Нальняева в 1966 г. выделили три типа мегаоницитов для Западной Сибири и сравнили их с образцами из Восточной Гренландии (Рисунок 25). В монографии В. Н. Сакса и Т. И. Нальняевой (1966) онихиты охарактеризованы

как «проблематические остатки в форме крючков, состоящие из обугленного органического вещества, систематическое положение которых остаётся неясным».

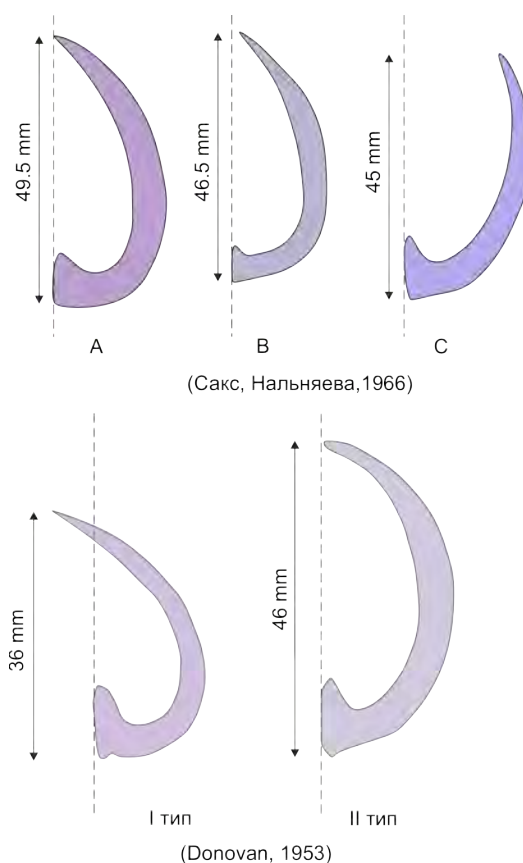


Рисунок 25. Типизация мегаонихитов по В.Н. Саксу, Т.И. Нальняевой (1966) (А - верхний волжский ярус, р. Хета, В-верхний подъярус нижнего титонского яруса, р. Маймеча, С - верхний титонский ярус, р. Боярка) и Д. Доновену (1953) (I, II типы – Восточная Гренландия, верхний оксфордский ярус-нижний киммериджский ярус)

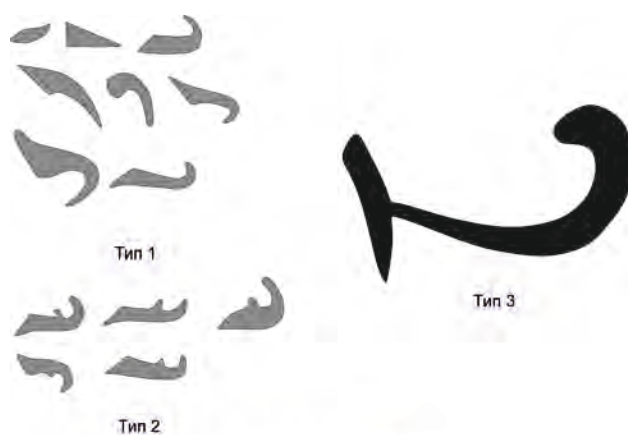
3. Этап систематизации разрозненных данных (с 1970-х гг. до 2010 г.)

Ц. Кулицки и Х. Шанявский (Kulicki, Szaniawski, 1972) впервые на основе детального морфологического сравнения юрских онихитов Польши с крючьями современных кальмаров (*Onychoteuthis*, *Ancistroteuthis*) систематически доказали, что онихиты — это крючья рук головоногих моллюсков, а не челюсти полихет (сколекодонтов). Было выделено 22 морфологических типа на основе 200 образцов (Рисунок 26). Ц. Кулицки и Х. Шанявский ввели трёхчленное строение онихита (base – shaft – uncinus). Авторы показали, что различные морфотипы крючьев могут принадлежать одному организму, что принципиально отделило классификацию онихитов от биологической систематики головоногих. Ц. Кулицки и Х. Шанявский обратили особое внимание на ошибочное определение другими учеными сколекодонт (челюстей многощетинковых червей), которые на самом деле являлись онихитами. С этого момента онихиты стали рассматриваться как самостоятельный объект анализа. Их система до сих пор остается актуальной как паратаксономическая.



Рисунок 26. Разновидности онихитов по Ц. Кулицки и Х. Шанявскому (Kulicki, Szaniawski, 1972)

Развитие паратаксономического подхода в последующие десятилетия сопровождалось расширением географической и стратиграфической базы находок, а также постепенным переходом к биологической интерпретации морфологического разнообразия. Несмотря на значительный прогресс в изучении ископаемых головоногих, в отечественной литературе онихиты, как правило, лишь фиксируются в разрезах без детального анализа их морфологии и оптических свойств (Панченко и др., 2015; Макарова и др., 2018; Амон, 2011; Амон и др., 2021). Работы В.А. Захарова и В.Н. Сакса адаптировали морфологические схемы для условий Западной Сибири и впервые для баженовской свиты описали микроонихиты (тип 1, 2) (Рисунок 27) (Захаров, Сакс, 1983). Эта классификация носила прикладной характер с ориентацией на литолого-стратиграфические задачи.



(Захаров, Сакс, 1983)

Рисунок 27. Типизация онихитов, выделяемая по В.А. Захарову и В.Н. Саксу (1983): типы 1, 2 – микроонихиты, Июльская скважина 215, интервал 2962-2975 и 2986-2998, севернее Нижнего Салыма, баженовская свита; тип 3 – мегаонихит, Июльская скважина 215, интервал 2986-

2998,5 глубина 2400 м, севернее Нижнего Салыма, баженовская свита. Размер на иллюстрации авторов отсутствует

В работе Г. Стивенса (Stevens, 2010) был обобщён материал по юрским онихитам Новой Зеландии и детально рассмотрено морфологическое разнообразие как микроонихитов, так и мегаонихитов. Выдвигалась гипотеза о возможном половом диморфизме, предполагая, что последние могли выполнять специализированную, вероятно репродуктивную функцию.

4. Современный комплексный подход (после 2010 г.)

Современный этап характеризуется переходом от паратаксономического описания к комплексному анализу морфологической variability, анатомического положения и условий сохранности онихитов. Акцент смещается с выделения формальных таксонов на изучение морфотипов, внутривидовой изменчивости и позиционной дифференциации крючьев в пределах одной короны рук. При этом новые паратаксоны, как правило, не вводятся; напротив, уточняются ограничения существующей классификации.

В 2017 году вышла работа Д. Фукса и Р. Хоффмана (Fuchs, Hoffmann, 2017), которая обобщила накопленный материал. Был проведён анализ находок с сохранёнными крючьями *in situ*, что позволило сопоставить изолированные онихиты с их реальным положением на руках ископаемых колеоидей. Авторы показали, что в пределах одного организма могут присутствовать крючья различной формы и размеров, распределённые вдоль руки неравномерно. Тем самым было продемонстрировано, что часть морфологических различий обусловлена не только функциональной дифференциацией. Это существенно уточнило интерпретацию паратаксономических единиц, введённых в 1972 году, и подчеркнуло необходимость учитывать анатомический контекст.

В России в последние годы онихиты встречаются в литологических работах, где фиксируется их наличие без каких-либо систематических привязок. Так, в 2023 году И.В. Панченко выделил три морфотипа онихитов (Панченко, 2023). К 1 морфотипу были отнесены вытянутые прямые и изогнутые онихиты, ко 2 морфотипу - изогнутые изометричные простые и раздваивающиеся, к 3 морфотипу - крупные изогнутые и обломанные (Рисунок 28). Исходя из условного деления на микро- и мегаонихиты, граничным значением которых является 5 мм (Fuchs et al., 2021), все разновидности крючьев по И.В. Панченко являются мегаонихитами. В аншлифах микроонихиты приобретают различные формы и размеры, которая может деформироваться в процессе пробоподготовки образца.

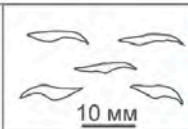

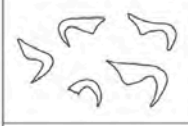
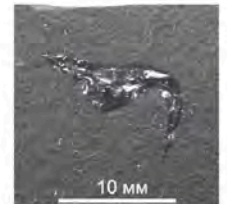



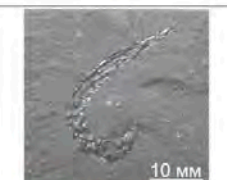


Морфотип 1			Характеристика
			1.1. Вытянутые прямые и слабоизогнутые
Морфотип 2			1.2. Вытянутые изогнутые
			2.1. Изогнутые изометричные простые
			2.2. Изогнутые переходной морфологии
Морфотип 3			2.3. Изогнутые изометричные раздваивающиеся
			3.1. Крупные изогнутые крючья
			3.2. Крупные обломанные крючья

Рисунок 28. Морфотипы онихитов по Панченко (Панченко, 2023)

Таким образом, представленные классификации отражают эволюцию взглядов — от простого морфологического описания к паратаксономическим системам и далее к прикладным морфотипическим схемам, используемым при изучении баженовской свиты.

Особенности строения онихитов

Онихиты (*Onychites* sp.) представляют собой изолированные крючья на руках головоногих моллюсков, в частности колеоидей, и характеризуются изогнутой формой. При описании морфологии онихитов в настоящем исследовании используется терминология, предложенная Ц. Кулицки и Х. Шанявским (Kulicki, Szaniawski, 1972), поскольку именно в этой работе была впервые подробно описана морфологическая организация онихитов и выделены основные элементы их строения (Рисунок 29). Эта система терминов (*base*, *shaft*, *uncinus* и др.) получила широкое распространение в последующих исследованиях и используется в современных зарубежных работах по морфологии крючьев рук колеоидей. В их морфологии выделяются три основные части: основание (*base*), стержень (*shaft*) и крючковидная вершина — унцинус (*uncinus*).

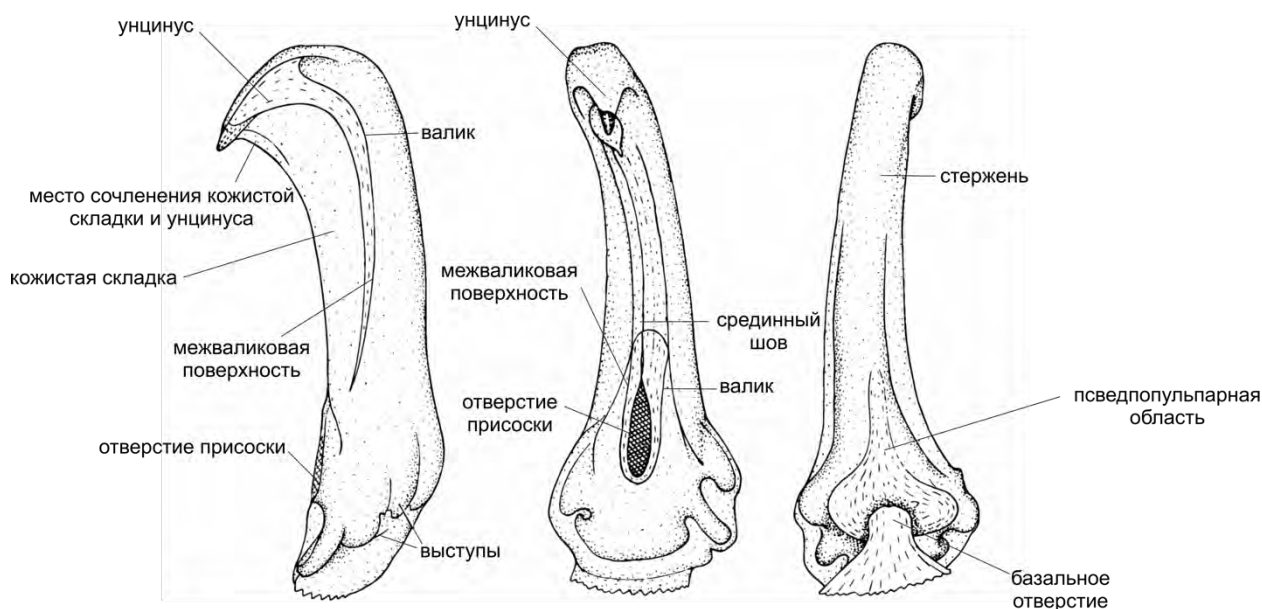


Рисунок 29. Строение онихитов по Ц. Кулицки, Х. Шанявскому (Kulicki, Szaniawski 1972)

Основание является проксимальной частью крючка и служило для его соединения с мягкими тканями руки. В этой области располагается базальное отверстие, связанное с внутренней псевдопальпальной полостью, а также отверстие присоски. По краям основания часто развиты небольшие выступы, которые, вероятно, обеспечивали дополнительную фиксацию крючка в мягких тканях. На поверхности основания иногда наблюдается кольцевой рубец, интерпретируемый как след прикрепления мягких тканей.

Средняя часть крючка образует стержень, соединяющий основание с вершиной. На внутренней стороне стержня располагаются два продольных валика, между которыми находится межваликовая поверхность. Вдоль этой области может проходить срединный шов. У некоторых форм в проксимальной части стержня развивается небольшой боковой отросток. Эти элементы отражают внутреннюю организацию крючка и могут варьировать у разных морфотипов.

Дистальная часть онихита представлена унцинусом — изогнутой крючковидной вершиной, которая непосредственно участвовала в захвате и удержании добычи. В области вершины крючок постепенно сужается и приобретает характерную серповидную форму. Предполагается, что при жизни значительная часть крючка была покрыта мягкотканым покровом — кожной складкой (защитной мембраной), через которую выступал кончик унцинуса. Рост крючьев колеоидей происходил путём последовательного наращивания органического вещества у основания крючка, при котором новые слои повторяли форму уже сформированной части (Fuchs, Hoffmann, 2017). Такой характер роста обуславливает внутреннюю неоднородность вещества онихитов и может проявляться в виде дугообразных зон, повторяющих контур крючка.

На схеме (Рисунок 30) показаны основные морфометрические параметры онихитов, используемые при их морфологическом описании и сравнении. Измеряются длина, высота

онихита, длина основания и длина унцинуса. Эти параметры позволяют количественно описывать форму и сравнивать различные морфотипы онихитов.

Длина онихита измеряется по линии, соединяющей основание крючка с вершиной унцинуса. Дополнительно определяется высота крючка, характеризующая степень его изгиба. Отдельно выделяют длину основания, соответствующую проксимальной части крючка, и длину унцинуса, представляющего собой дистальную крючковидную часть.

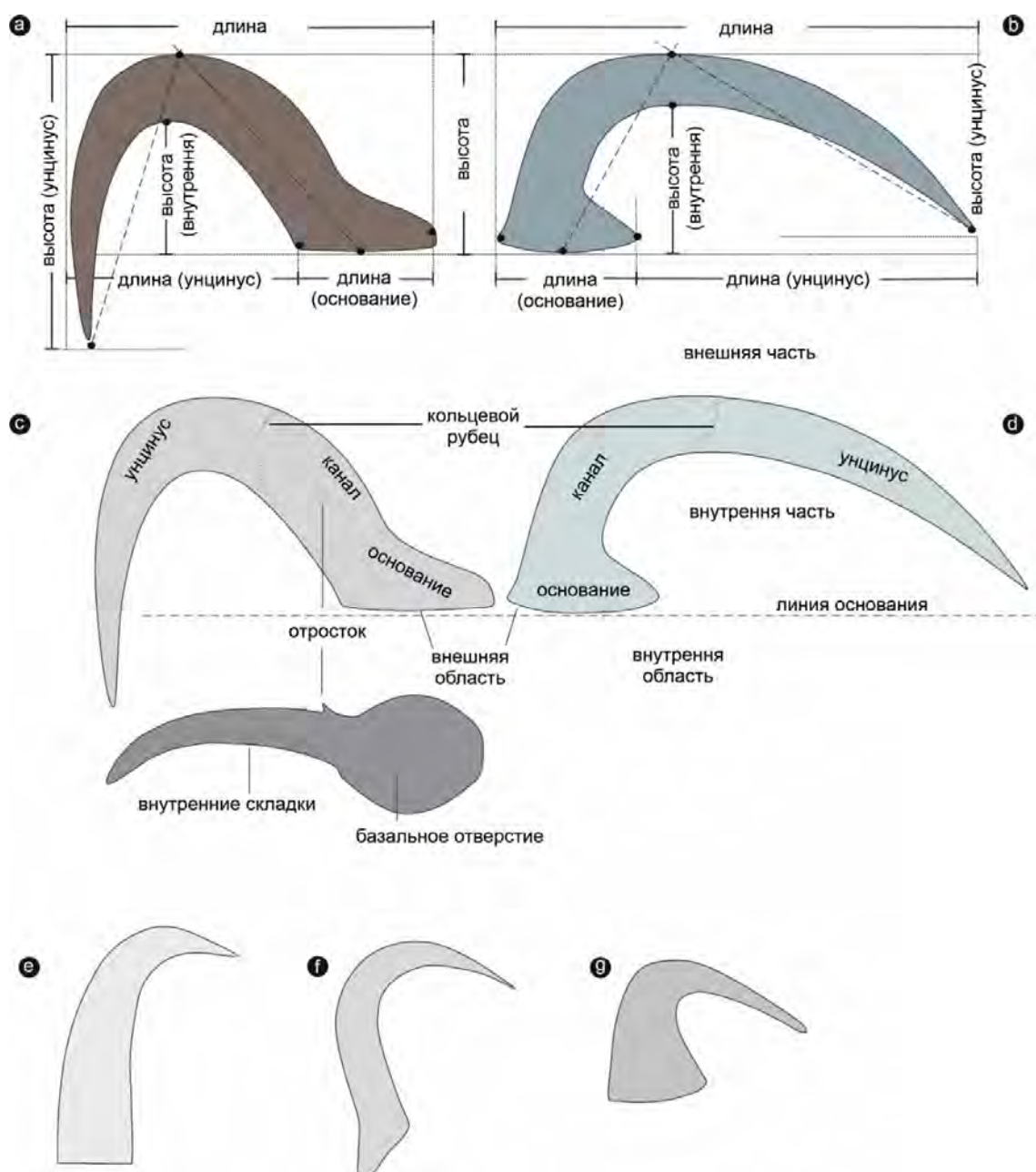


Рисунок 30. Строение онихитов: *a* - мегаонихиты, *b* микроонихиты (Fuchs et al., 2017); Морфология крючков белемнитов: *c* – микроонихит в продольном и поперечном виде, *d* – мегаонихит в продольном виде (Fuchs et al., 2017); Сравнение степени изогнутости микроонихитов: *e* – микроонихит длиной 0,4 мм, *f* – длиной 1 мм, *g* – длиной 3 мм, унцинус – пологая изогнутая часть онихита (Stevens, 2010)

Специальных исследований, направленных на изучение химического состава онихитов Западной Сибири, до настоящего времени не проводилось. Однако Д. Фукс и Р. Хоффман (Fuchs, Hoffmann, 2017) выполнили обширный исторический и сравнительный обзор ископаемых онихитов, сопоставив их с крючьями щупалец современных кальмаров *Ancistrocheirus lesueuri* (Рисунок 31). На основании морфологического и микроструктурного сходства авторы пришли к выводу о высокой вероятности идентичной или близкой природы этих образований. Д. Фукс и Р. Хоффман разделяют точку зрения Б. Бертольда и Т. Энгезера, согласно которой онихиты преимущественно имеют хитиновый состав, либо состоят из β -хитина. Подобный состав подтверждается наблюдениями за современными колеоидами, у которых крючья щупалец формируются именно из β -хитина (Fuchs, Hoffmann, 2017))



Рисунок 31. а: Современный кальмар *Ancistrocheirus lesueuri*; б: крючья кальмара (Fuchs, Hoffmann, 2017)

Существуют и альтернативные представления, согласно которым онихиты могли иметь белково-хитиновый состав. В пользу этой гипотезы приводятся данные по строению присосок современных кальмаров и осьминогов. Так, С. Хант и М. Никсон (Hunt, Nixon, 1981) показали, что присоски кальмаров содержат около 51,2 % хитина и 48,8 % белка, а также детально описали аминокислотный состав белковой компоненты. Дополнительно обсуждалась возможность участия хрящевой ткани в формировании крючьев колеоидей, поскольку у современных кальмаров присутствуют различные хрящевые элементы, включая хрящи замка мантии и

воронки (Stevens, 2010). Однако эта гипотеза не получила широкого распространения и требует дальнейших исследований.

Так, в современной литературе преобладает точка зрения, согласно которой онихиты представляют собой преимущественно хитиновые или хитин-белковые образования, что принципиально сближает их по химической природе с растительными структурными полисахаридами, такими как целлюлоза. Данное обстоятельство имеет важное значение для интерпретации их оптических свойств и дальнейшего использования в углепетрографических исследованиях.

Углепетрографические исследования

Для баженовской свиты и её возрастных аналогов онихиты представляют особый интерес, поскольку встречаются повсеместно по разрезу и отличаются устойчивостью к катагенетическим преобразованиям.

В углепетрографических описаниях онихиты относятся к группе зоокластов и представляют собой органические остатки животного происхождения. Микроонихиты, которые наиболее часто встречаются в углепетрографических аншлифах баженовской свиты, остаются слабо типизированными и редко рассматриваются как самостоятельный объект исследования, но представляют большой интерес для данной работы. В ультрафиолетовом свете онихиты демонстрируют выраженное зональное строение: наблюдаются широкие дугообразные зоны, повторяющие контур крючка, внутри которых иногда прослеживается более тонкая полосчатость. Такое строение отражает послойный характер роста крючка и неоднородность его органического вещества. В ряде случаев различается двойная зональность — внутренняя и периферическая, которая может быть связана с двумя фазами роста онихита.

Онихиты оптически в простом отраженном белом свете по серому цвету напоминают наиболее распространенный мацерал гумусовых углей – витринит, отличаясь зональным строением, которое обнаруживается только в УФ свете, распределяясь неравномерно: некоторые фрагменты его не имеют вовсе, а самое интенсивное наблюдается по краям онихитов, они становятся тоньше, концентрируя вокруг битумы (Вайтехович и др., 2022; 2026). Неоднородность онихитов по форме и различным оттенкам серого демонстрируется на примере одного крупного крючка (Рисунок 32).

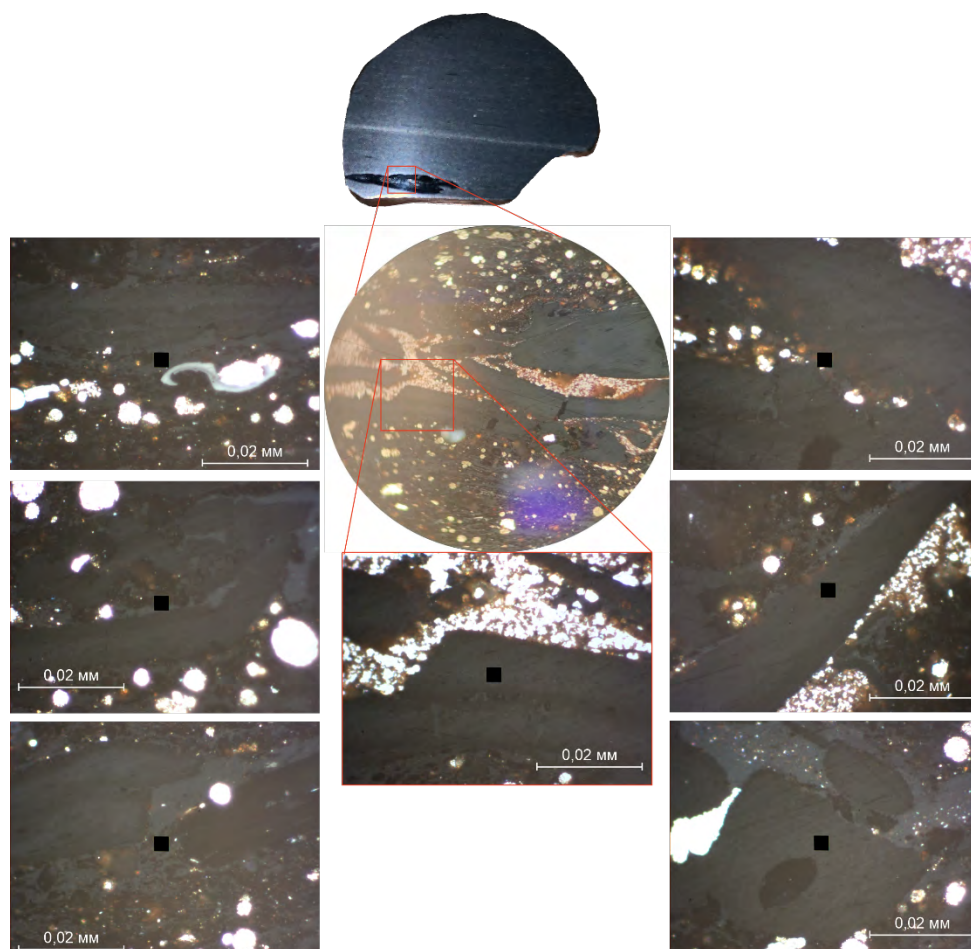


Рисунок 32. Фото различных фрагментов одного онихита в анилифе в простом отраженном белом свете

Онихиты в отличие от битуминита, как правило, располагаются в породе не параллельно напластованию, а занимают разные оси и вытянуты в ту или иную сторону. По характеру поверхности и люминесценции онихиты условно подразделяются на «шагреньевые» и «нешагреньевые», а также на люминесцирующие и нелюминесцирующие разновидности. Различия в интенсивности люминесцентного свечения, вероятно, связаны как с внутренним строением онихитов, так и с различной степенью их преобразованности. В более преобразованных образцах поверхность онихитов приобретает выраженную микронеровность («шагрень»), что особенно наглядно проявляется в экспериментах по гидропиролизу (Савостин и др., 2024; Марунова и др., 2023). Размеры онихитов колеблются в пределах от 0,3 мм – микроонихиты до 8-9 мм – мегаонихиты. Редко в аншлифах могут встречаться раздваивающиеся онихиты (Рисунок 33).

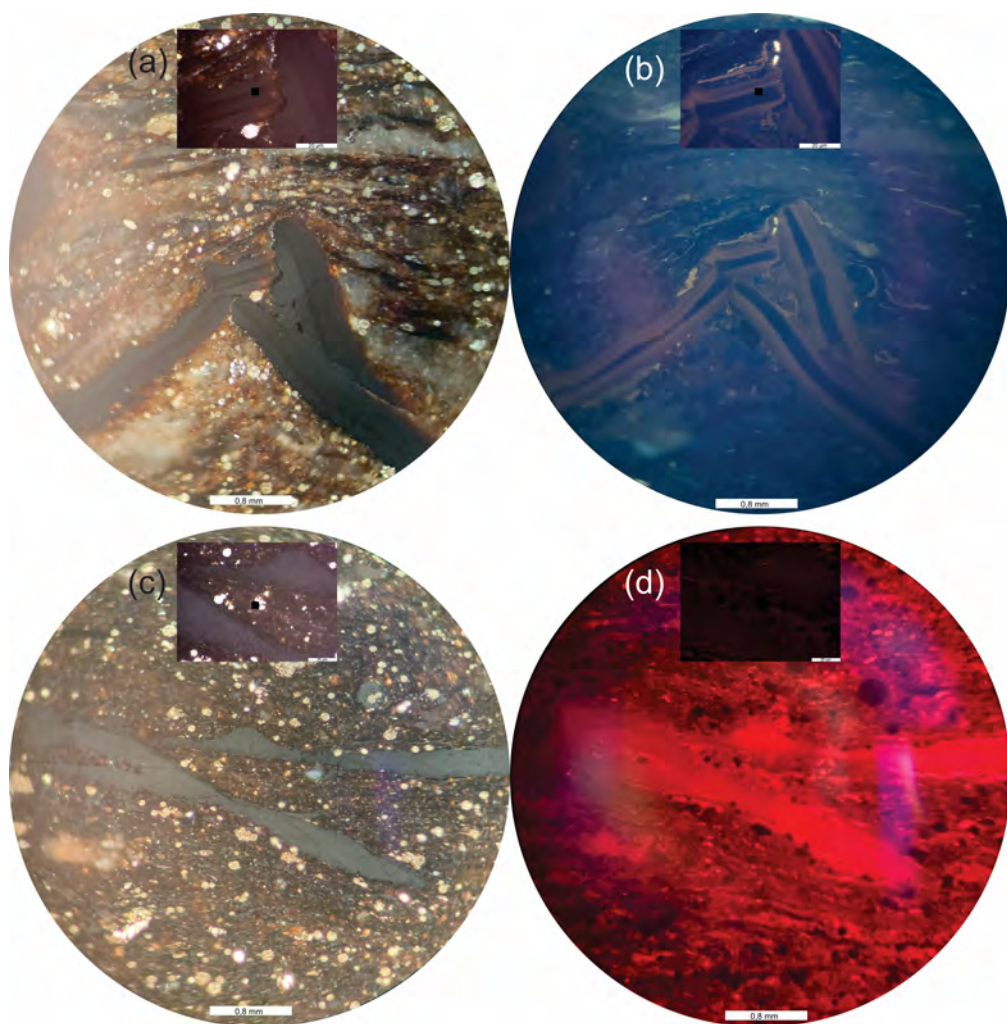


Рисунок 33. Микрофотографии раздваивающихся онихитов из окуляра микроскопа: А, Б – простой отраженный белый свет; А1, Б1 – ультрафиолетовый свет с голубым и зеленым фильтрами

Так, сочетание морфологических элементов (основание, кольцевой рубец, канал, унцинус) и оптических признаков (зональность, различная интенсивность люминесценции) позволяет уверенно идентифицировать микроонихиты в аншлифах (Рисунок 34) и отличать их от других зоокластов и витринитоподобных включений.

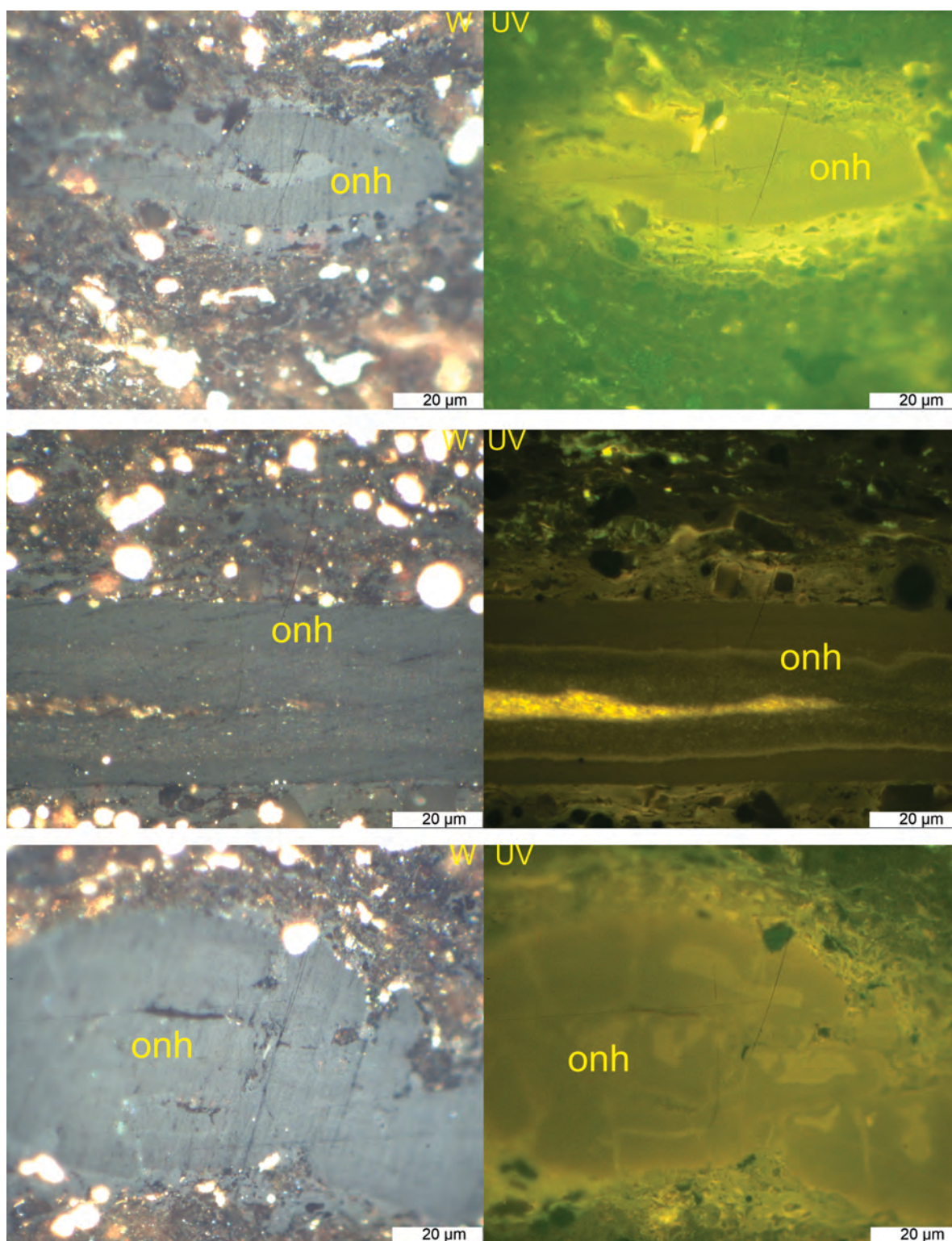


Рисунок 34. Онихиты в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

3.4. Известковые диноцисты и радиолярии

Кальцисферы (кальцисфериды) традиционно рассматриваются как группа неясного систематического положения, поэтому применение данного термина в литературе позволяет избежать однозначной таксономической интерпретации. В.С. Вишневская в своих работах предлагает относить кальцисферы к известковым цистам динофитовых водорослей (*Dinoflagellata*) (Вишневская, 2018). Анализ подобных объектов с использованием сканирующей

электронной микроскопии показывает, что их стенка сложена псевдолокнистым кальцитом (Рисунок 35). В настоящей работе автор придерживается данной систематической трактовки.

Формирование известковых цист связано с процессом обызвествления слоевища водорослей. При этом различные группы водорослей демонстрируют разные механизмы обызвествления. Так, у сине-зелёных водорослей обызвествление проявляется в виде тонкой кальцитовой пленки, обволакивающей слоевище (Чувашов и др., 1987). Образование цист происходит при наступлении определённых условий среды, под влиянием которых клетка формирует специализированную оболочку или переходит в инцистированное состояние на ограниченный период времени, не утрачивая жизнеспособности. Выделяют несколько категорий цист, связанных с покоем, размножением, пищеварительными процессами, а также с изменением температуры или высыханием водоёмов (Возженникова, 1979). Вероятнее всего, известковые цисты, широко распространённые в отложениях Западной Сибири, относятся к цистам покоя динофлагеллят, что согласуется с их морфологическими особенностями и условиями осадконакопления.

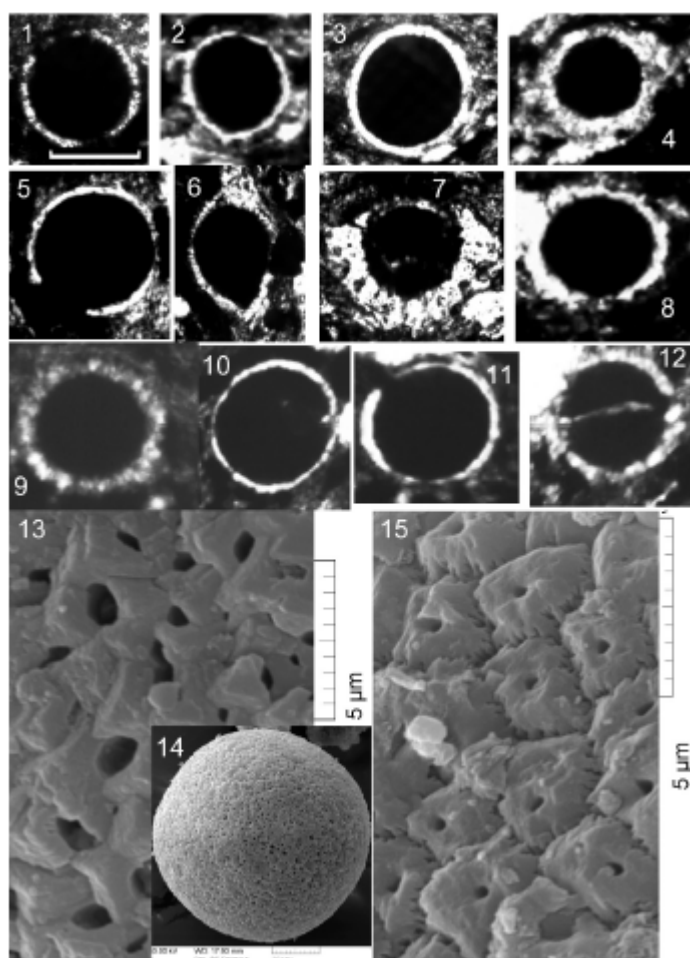


Рисунок 35. Примеры известковых диноцист в Западной Сибири (Вишневская, 2018)

В простом отраженном белом свете диноцисты представляют овальные тела серого цвета, иногда фрагментированные с обволакивающей кальцитовой оболочкой. Не всегда оболочка

однородная, иногда она может представлять собой «корону» (Рисунок 36). Свечения в УФ свете не имеют. В углепетрографических исследованиях известковые диноцисты играют вспомогательную роль, однако их присутствие важно для реконструкции условий осадконакопления.

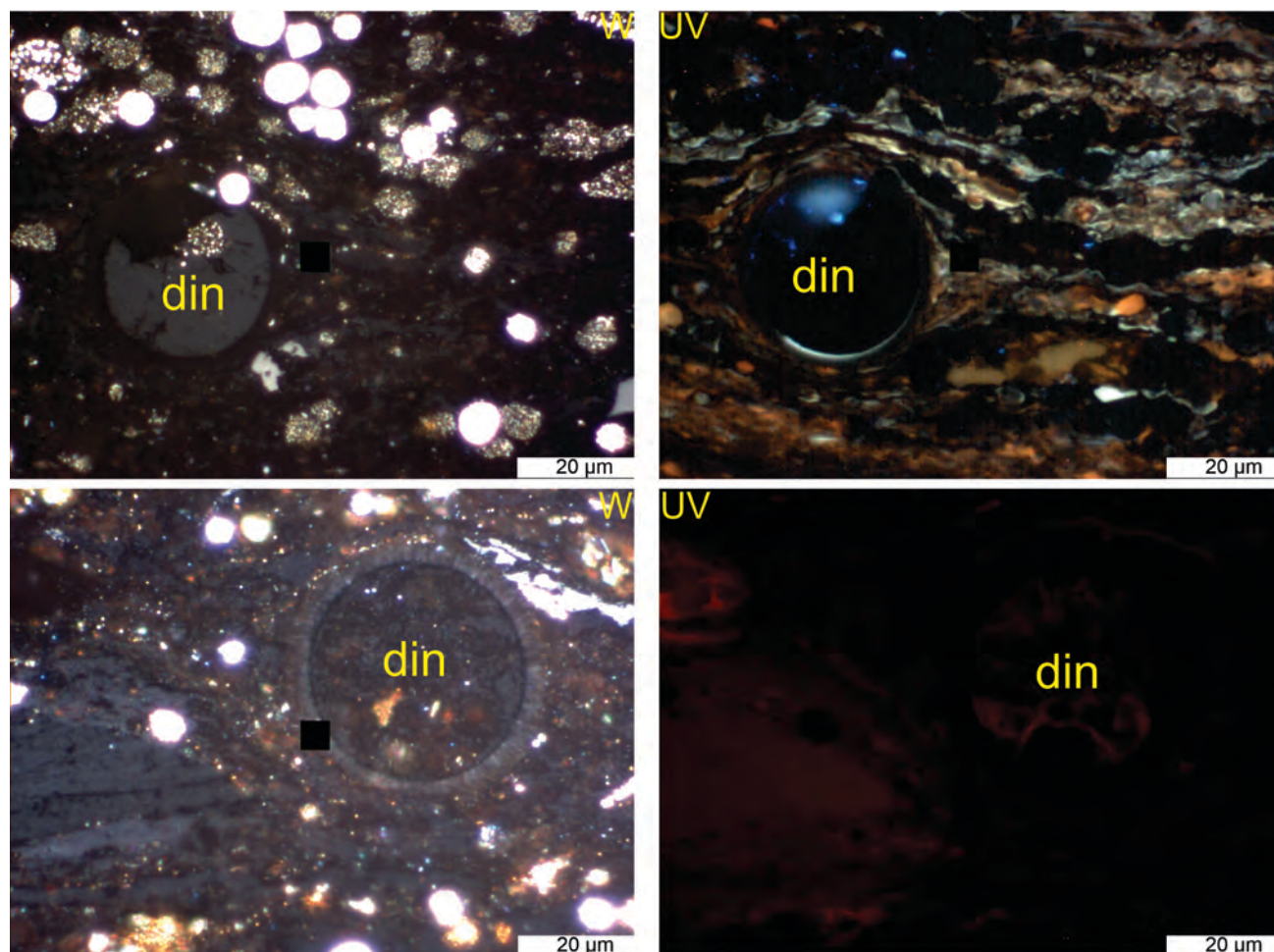


Рисунок 36. Известковые цисты динофлагеллят в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

Наряду с диноцистами, в отложениях баженовской высокоуглеродистой формации широко распространены радиолярии, представленные как отдельными скелетами с веществом, так и их пиритизированными формами (Рисунок 37).

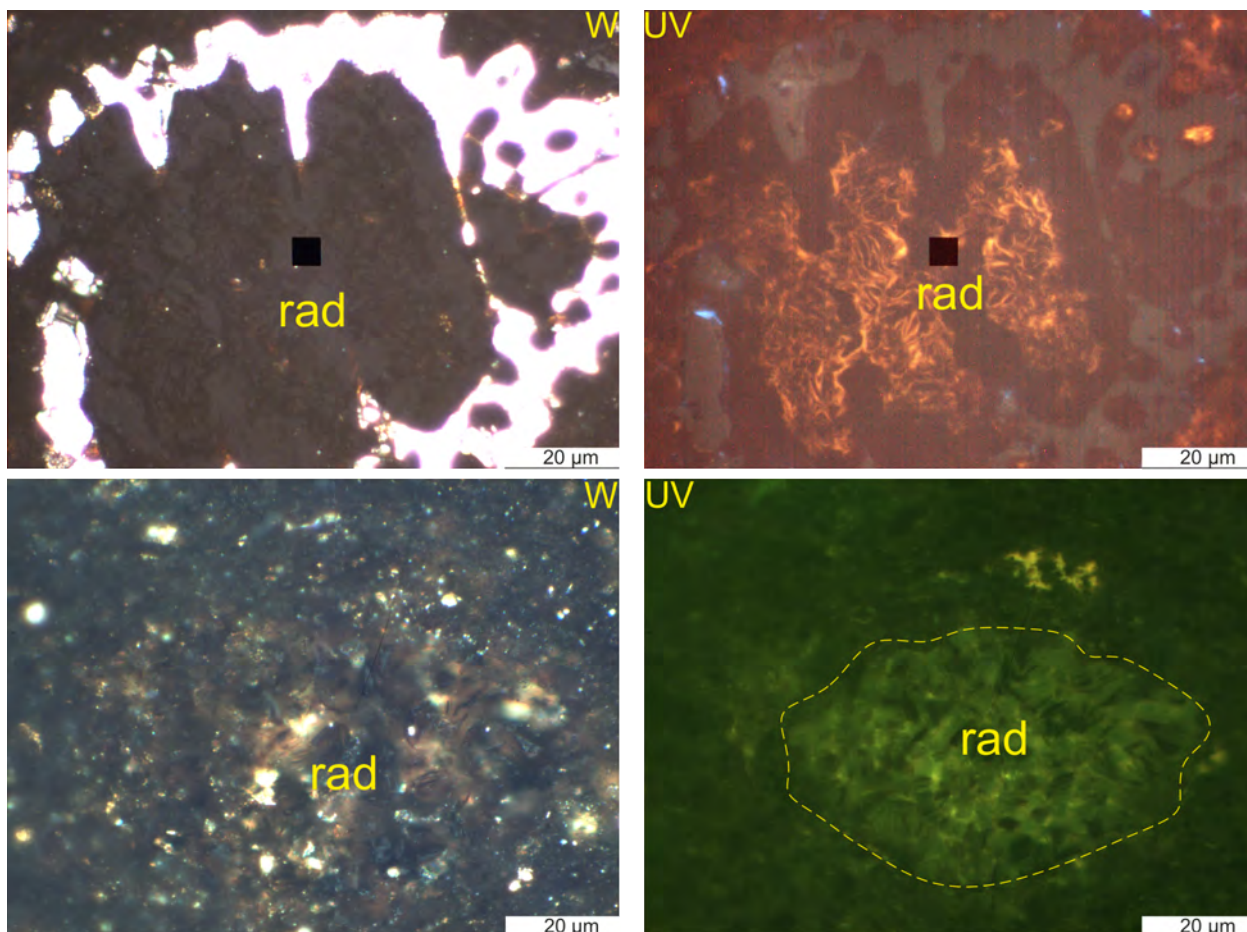


Рисунок 37. Радиоларии (*rad*) в отложениях БВУФ в простом отраженном белом (*W*) и ультрафиолетовом свете (*UV*)

3.5. Биокласты

Повсеместно встречаются сильно обуглероженные органические остатки, которые объединяются под общим термином «биокласты» (Рисунок 38), так как достоверно определить их природу не представляется возможным. Помимо вышеуказанных мацералов на севере Западной Сибири (Гыданский свод) встречается привнесенный витринит в небольшом количестве, однако его исходное местонахождение неизвестно, поэтому для оценки зрелости баженовского горизонта предлагается его не использовать, так как удовлетворительной корреляции не установлено.

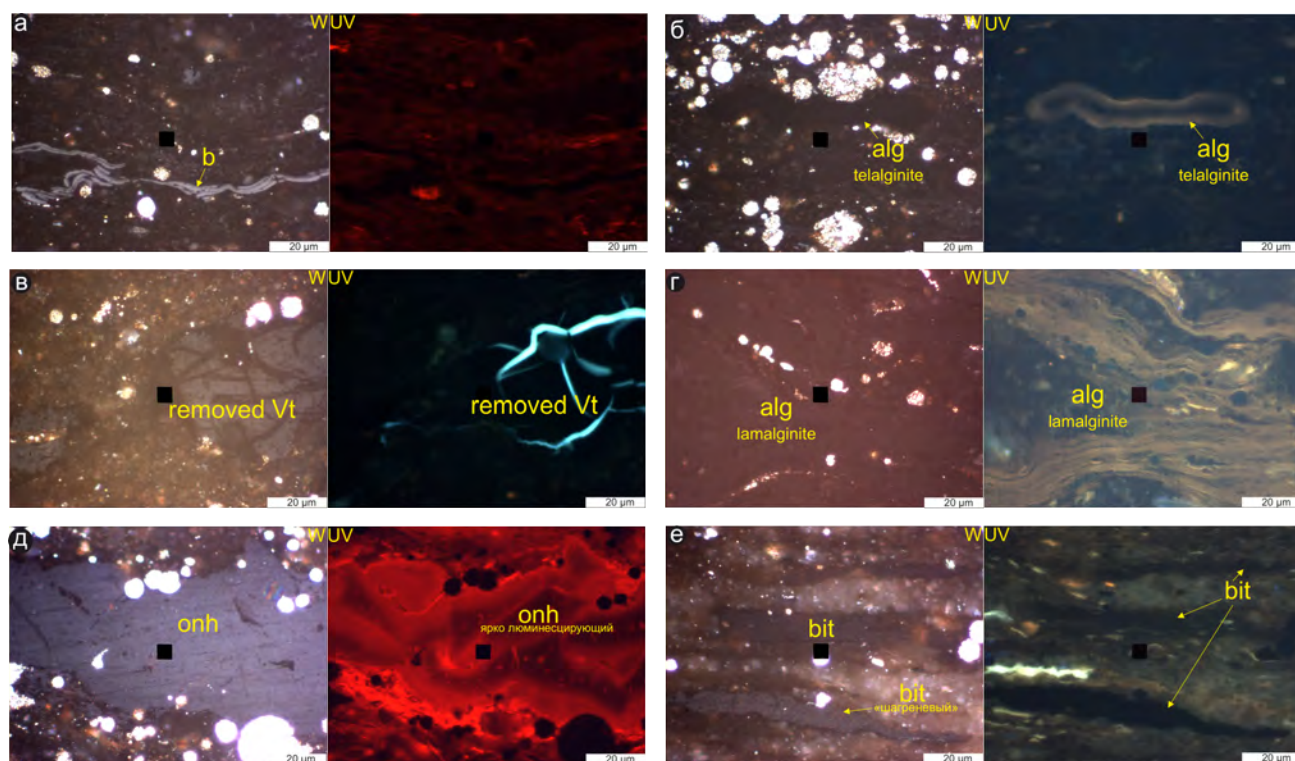
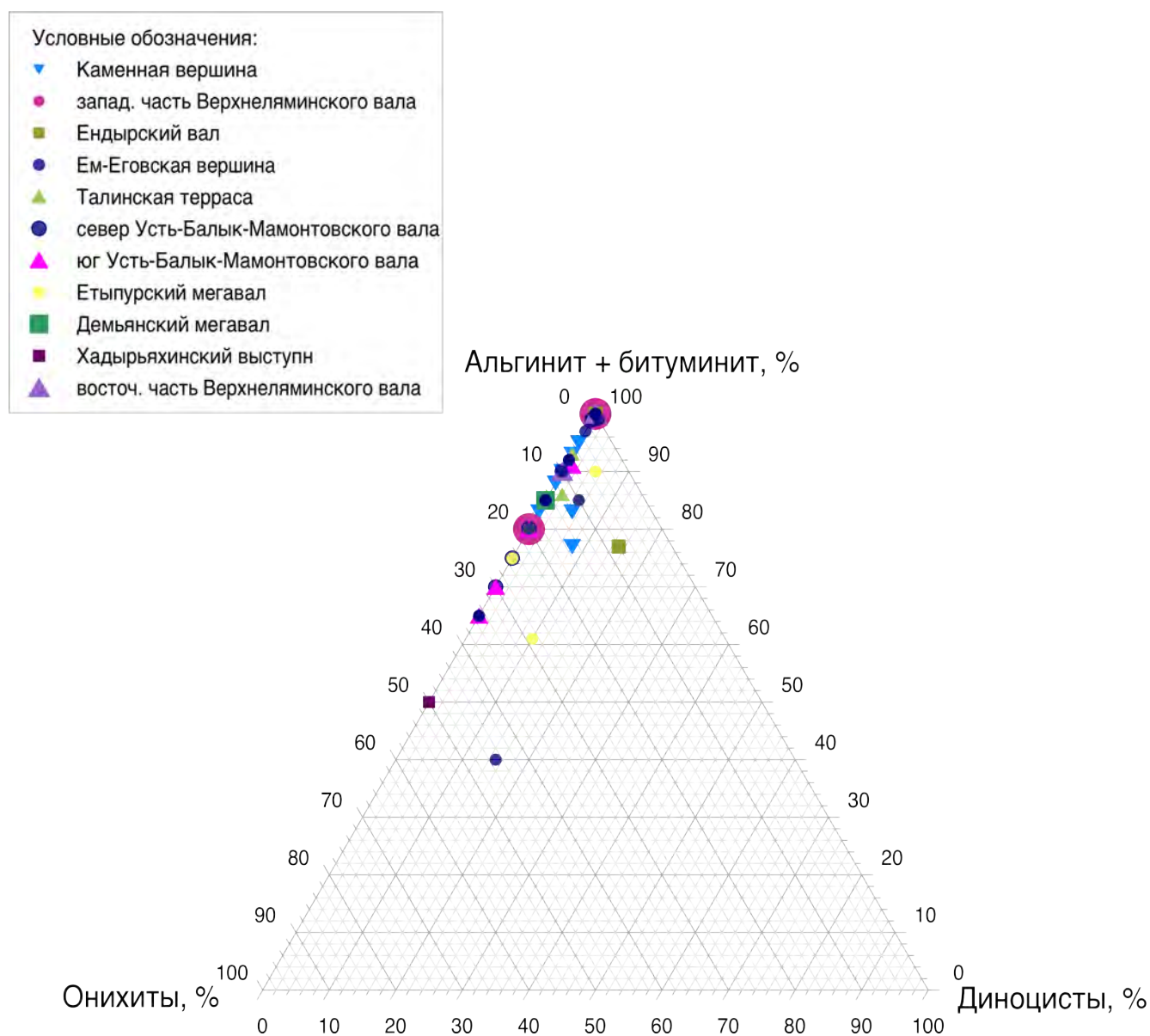


Рисунок 38. Разнообразие мацерального состава, принятые сокращения: *removed Vt* – переотложенный витринит, *alg* (*alginite*) – альгинит, *onh* (*onychites*) – онихиты, *bit* (*bituminite*) – битуминит, *V* (*Bitumen*) – битум, *b* (*bioclasts*) – биокласты, *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – ультрафиолетовый свет (*a*, *д* – зеленый фильтр; *б*, *в*, *г*, *е* – голубой фильтр)

Для количественной оценки мацерального состава была построена треугольная диаграмма, которая принята для углей, в которых традиционно выделяется три группы мацералов – витринита, инертинита, липтинита. В связи с тем, что в БВУФ присутствует только группа липтинита и зоокласты в виде онихитов, для большей наглядности искусственно принято разделение на альгинит и битуминит (как мацералы группы липтинита); онихиты и диноцисты (Рисунок 39). Как видно из диаграммы, битуминит, который играет роль основной массы, превалирует над другими микрокомпонентами. В целях конфиденциальности названия месторождений заменены тектоническими элементами, к которым они приурочены.



Помимо этого, по имеющимся 295 образцам была построена диаграмма средних значений битуминита, телальгинита, ламальгинита, онихитов и диноцист по пачкам (Рисунок 40), которая позволила более детально рассмотреть микрокомпоненты. Мацеральный состав органического вещества баженовской высокоуглеродистой формации представлен битуминитом (65-100%), онихитами (5-35%), телальгинитом (1-5%), которые преобладают в 1, 2, 3, 5 и 6 пачках; ламальгинитом (5-80%), который представлен в 4 пачке; остатками диноцист (0-15%) в 5 пачке и радиолярий (1-15%) в 4 пачке, а также разнообразными переотложенными фрагментами витринита и неопределимыми биокластами разной природы, составляющими незначительные количества (<2%).

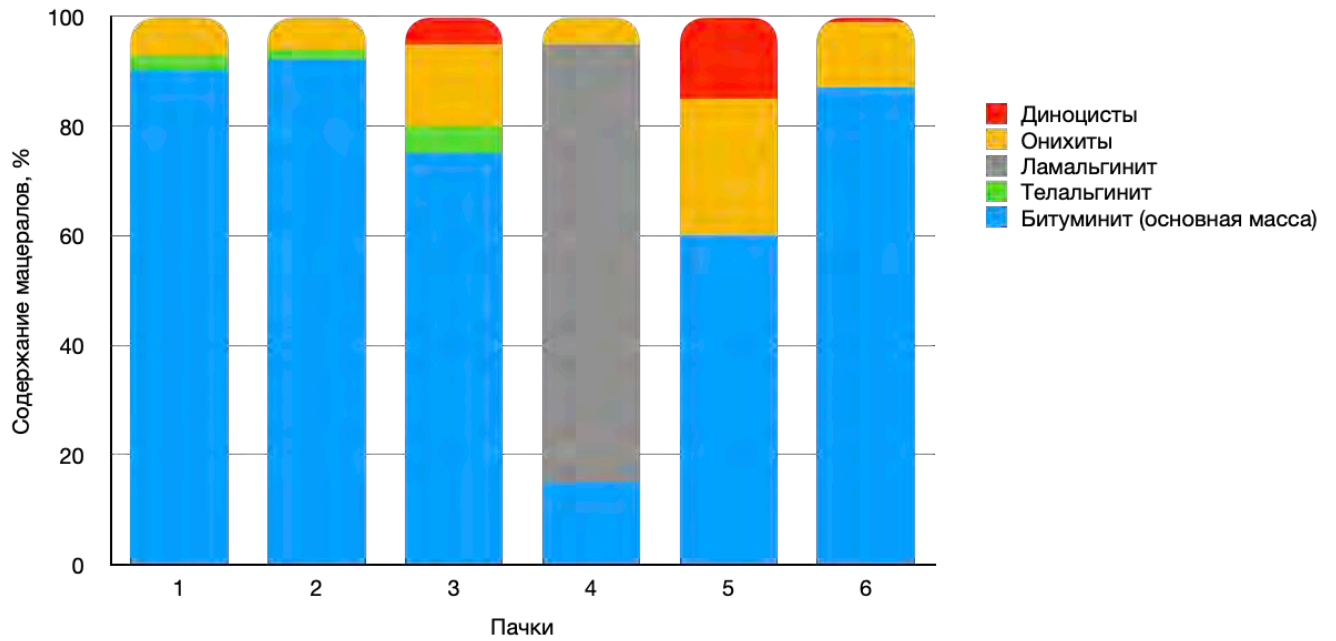


Рисунок 40. Распределения среднего содержания мацералов по пачкам БВУФ

При попытке оценить усредненный мацеральный состав по месторождениям, было выявлено, что вариации незначительны и преобладает битуминит в виде основной массы и повсеместно встречаются онихиты. Данные мацерального состава сопоставлялись с геохимическими и литологическими анализами при построении сводных диаграмм и планшетов (Рисунок 41).

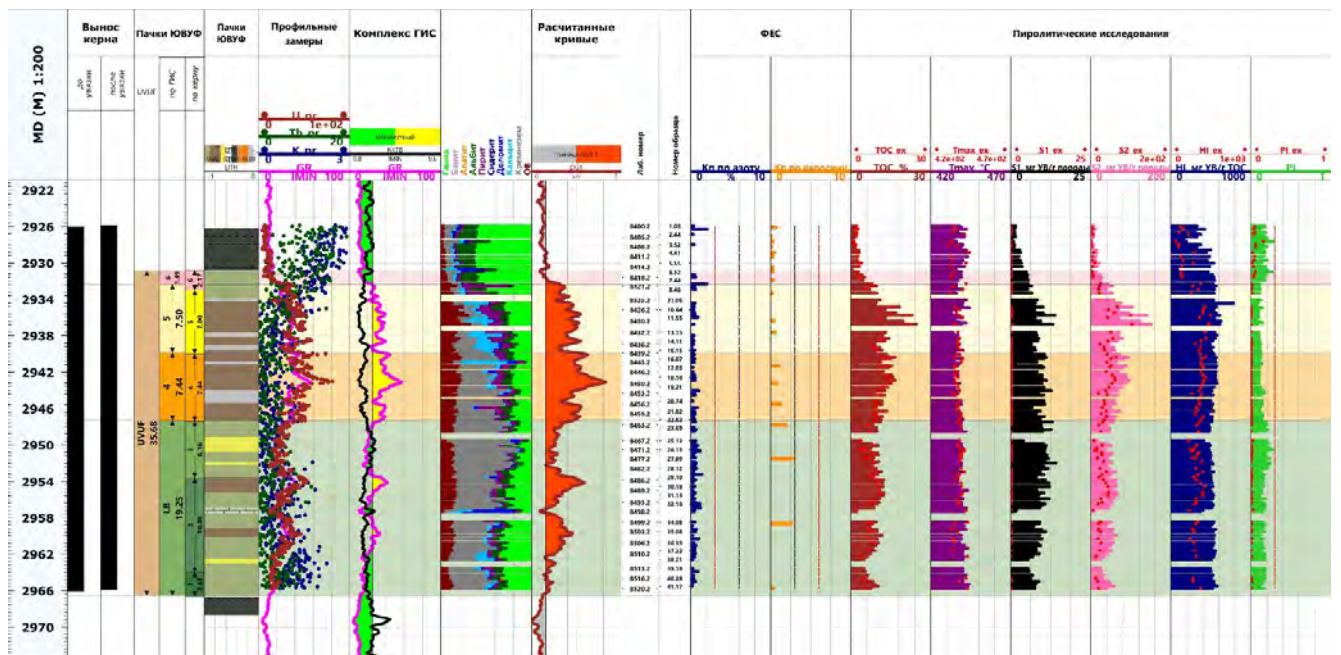


Рисунок 41. Пример сводного планшета по одной из исследованных скважин

Глава 4. Признаки трансформации органического вещества БВУФ³

4.1. Изменения в естественных образцах

Альгинит

В исследованных образцах для альгинита в пределах главной зоны нефтеобразования наблюдались выраженные изменения оптических характеристик. В ультрафиолетовом свете фиксируется постепенное ослабление и изменение цвета и оттенка свечения, вплоть до его полного исчезновения (Рисунок 42).

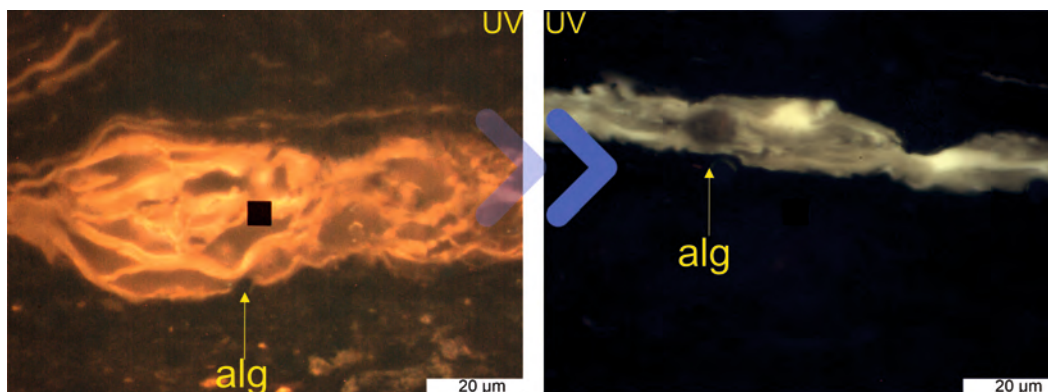


Рисунок 42. Различия в цвете свечения альгинитов. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *alg* - альгинит

В простом отражённом белом свете отмечается размытие и деформация контуров мацерала, а также частичное разрушение его внутренней структуры (Рисунок 43). По мере увеличения степени катагенеза контуры мацерала становятся менее чёткими, что отражает внутреннюю структурную перестройку органического вещества.

Битуминит

Битуминит демонстрирует более позднее вступление в процесс генерации по сравнению с альгинитом. На более ранних стадиях зрелости (ПК₁₋₃) он характеризуется относительно стабильной морфологией и существует в своей догенерационной форме, однако с ростом

³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Савостин Г.Г., Калмыков А.Г., Вайтехович А.П., Пронина Н.В., Грязнова Д.А., Марунова Д.А., Калмыков Г.А. Изменение характеристик керогена и минеральной матрицы пород баженовских отложений при лабораторном моделировании гидротермальных процессов // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 3. С. 206–219. EDN: ОЕХВНМ. Импакт-фактор 1,180 (РИНЦ); 0,875 п.л.; авторский вклад 30%.
2. Пронина Н.В., Вайтехович А.П. Прямые признаки нефтеобразования в породах баженовской свиты // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 2. С. 152–157. EDN: ЕНХJNT. Импакт-фактор 1,180 (РИНЦ); 0,375 п.л.; авторский вклад 80%.

катагенеза происходит изменение его оптического облика: цвет в отражённом свете изменяется от серого к более тёмным, коричневым оттенкам (Рисунок 44).

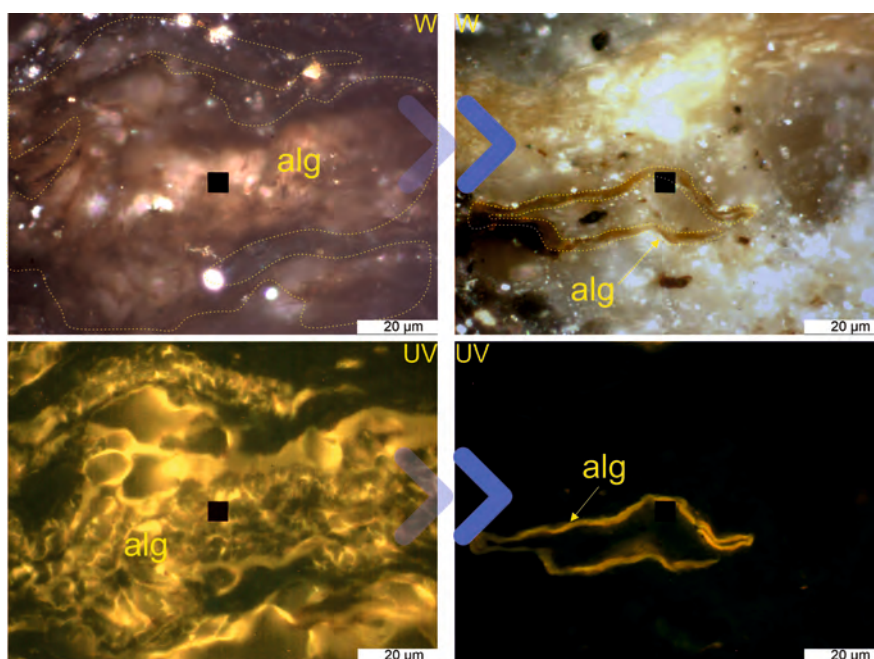


Рисунок 43. Разные размеры и контуры альгинита в образцах с разной зрелостью. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *alg* - альгинит

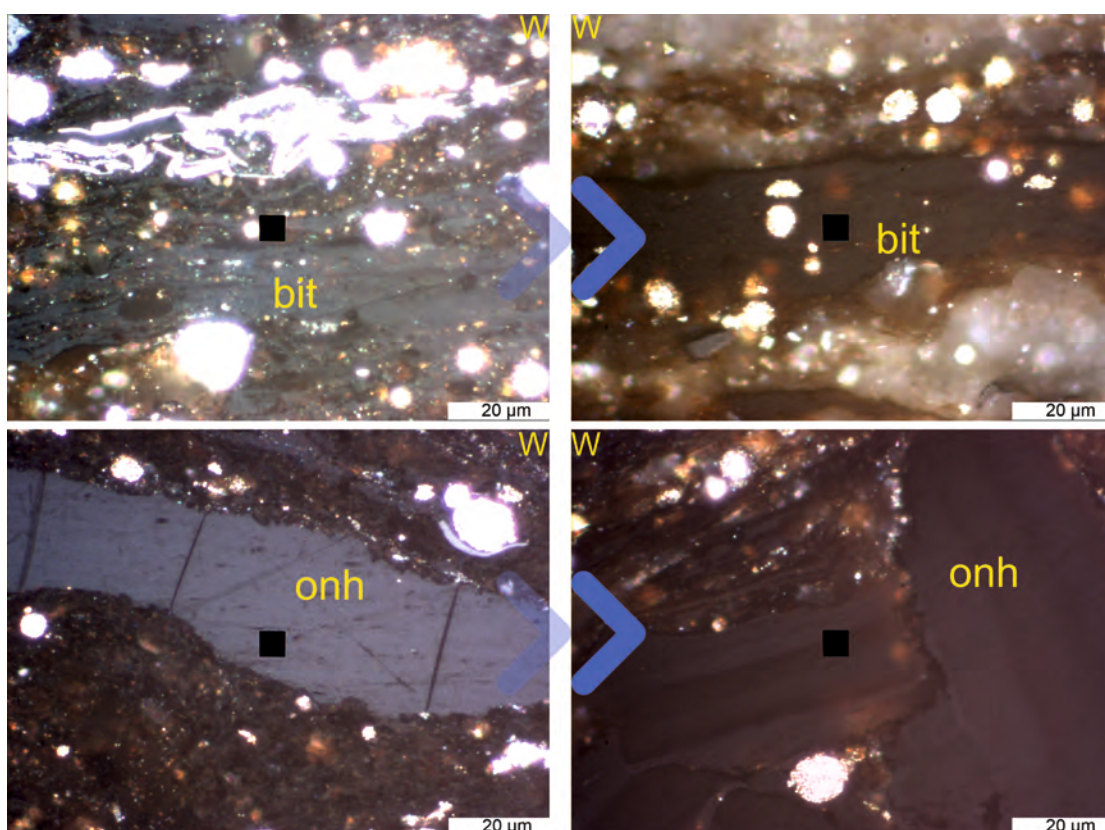


Рисунок 44. Изменение цвета битуминита и онихитов с серого на коричневый. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *bit* – битуминит, *onh* – онихиты

Одним из ключевых признаков трансформации битуминита является появление вторичной («керогеновой») пористости, связанной с генерацией и эмиграцией углеводородов,

проявляется в виде пор и микротрещин (Рисунок 45). Данное явление не ново и описано в работах М.Ю. Зубкова (1988) и Г.А. Калмыкова (Калмыков, Балущкина, 2017). В пределах главной зоны нефтеобразования наблюдается переход от генерационного битуминита к постгенерационному, при котором исходные контуры мацерала сильно сокращаются, часто приводя к дезинтеграции, а свечение исчезает.

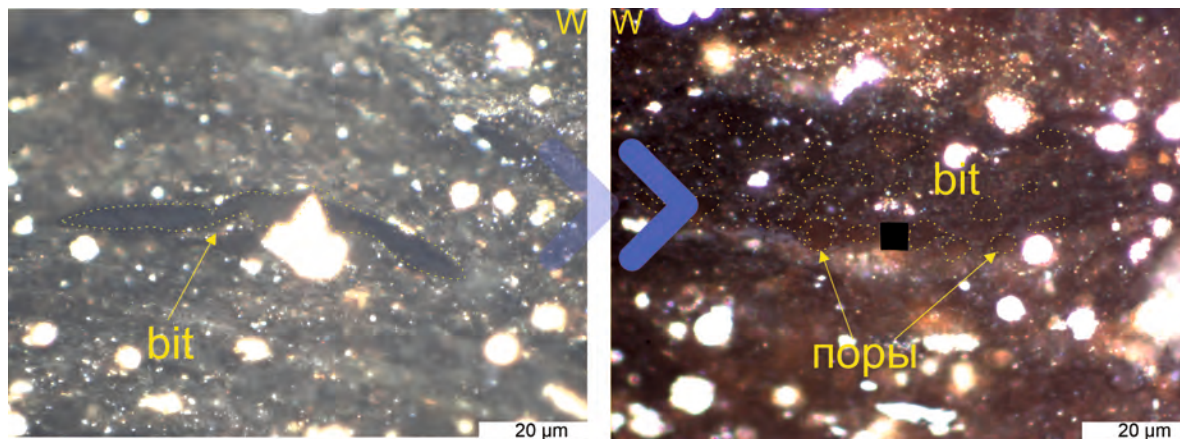


Рисунок 45. Возникновение пор в битумините. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *bit* – битуминит

Даже в относительно незрелых образцах фиксируется присутствие постгенерационного битуминита, однако его доля существенно ниже по сравнению с более зрелыми образцами.

Онихиты

Онихиты демонстрируют более устойчивое поведение на ранних стадиях катагенеза по сравнению с альгинитом и битуминитом, вступают в процесс трансформации позднее всех, при достижении условий главной зоны нефтеобразования в них также фиксируются характерные признаки преобразования. В отражённом свете отмечается кратковременное изменение окраски с серой на коричневую (Рисунок 44) и расширение контуров, связанных с миграцией и аккумуляцией битумов (Рисунок 46), а в ультрафиолетовом свете — появление люминесцирующих зон (Рисунок 47). Внутри онихитов формируется вторичная пористость и микротрещины, а также по краям фрагментов выделение битумных пленок (Рисунок 48). Онихиты не пропадают в процессе преобразования, однако их поверхность может становиться шагреновой.

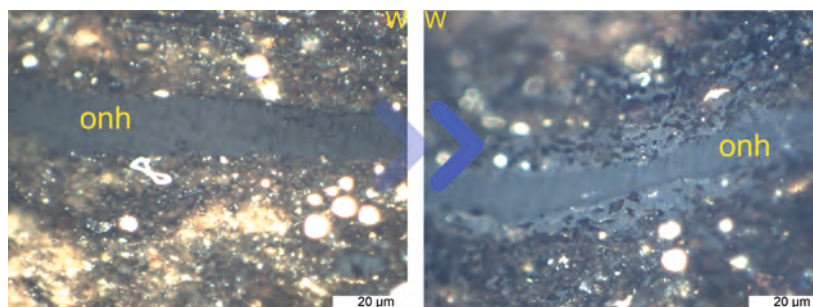


Рисунок 46. Изменение контуров онихитов. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *onh* – онихиты

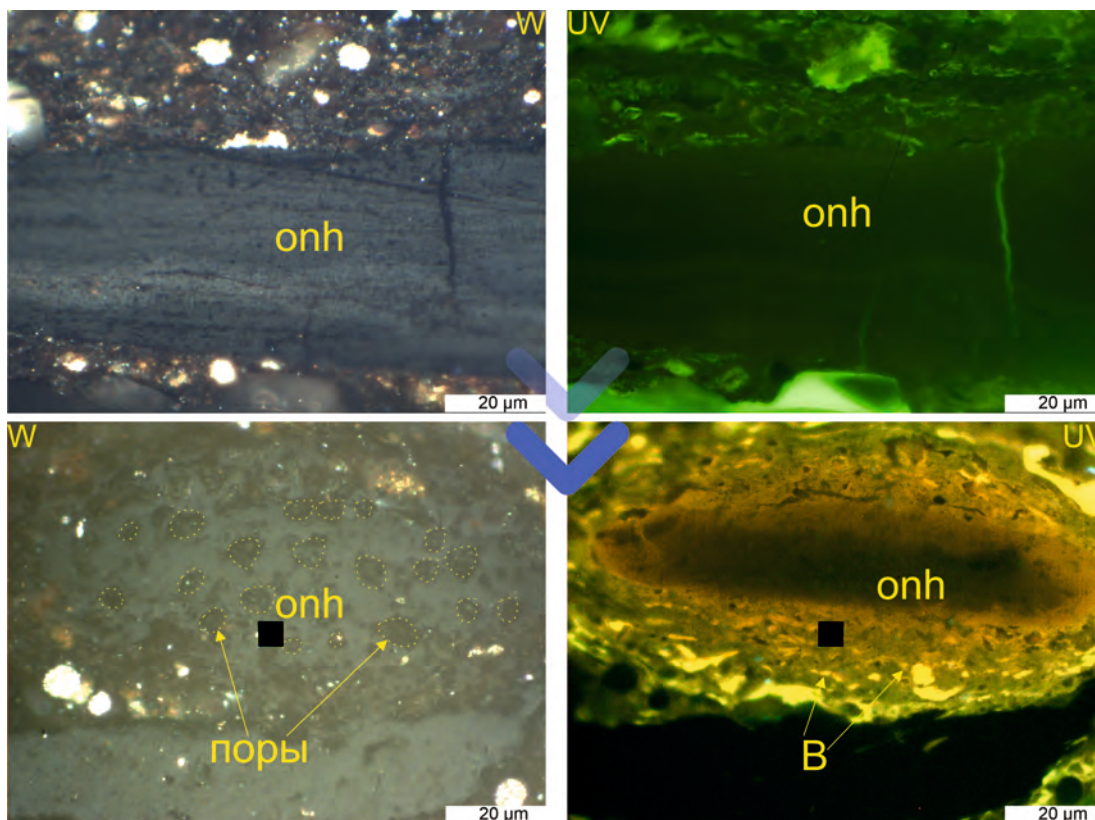


Рисунок 47. Появление «вторичной» керогеновой пористости в онихитах. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *onh* – онихиты, *B* – новообразованный битум

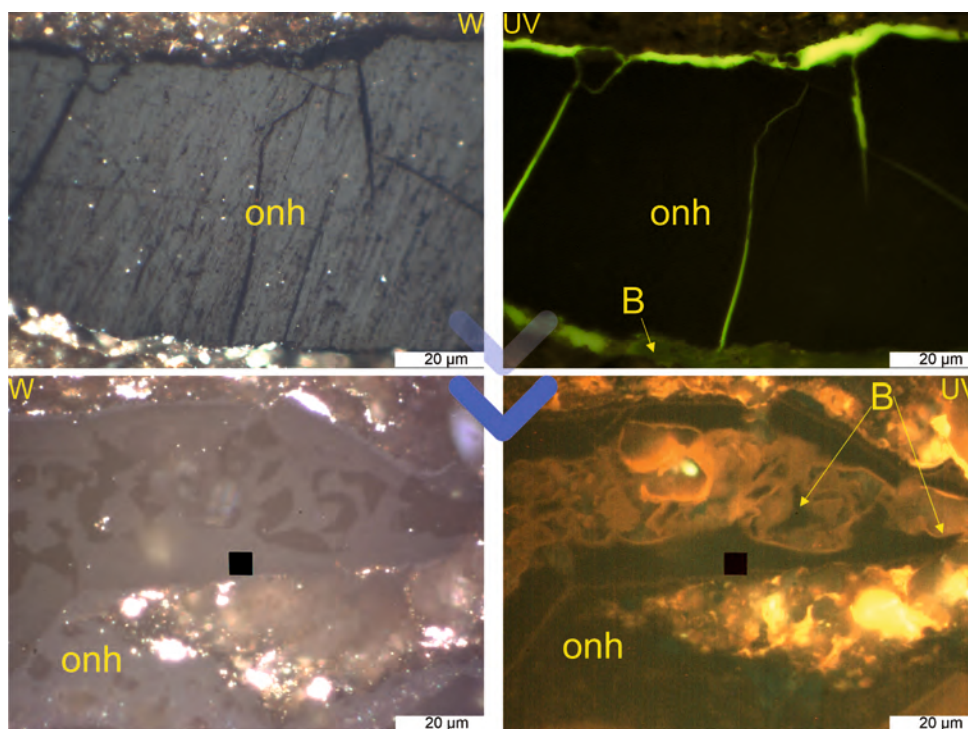


Рисунок 48. Выделение битумных пленок из онихитов. Условные обозначения: *W* – простой отраженный белый свет, *UV* – УФ свет, *onh* – онихиты, *B* – новообразованный битум

Так, несмотря на различия в исходной природе мацералов, для альгинита, битуминита и онихитов фиксируется единый набор признаков катагенетического преобразования

органического вещества, проявляющийся в изменении оптических свойств, развитии вторичной пористости и образовании битумных пленок. При этом степень выраженности и последовательность появления данных признаков различаются, что отражает неодинаковую чувствительность мацералов к процессу катагенеза.

На представленной схеме (Рисунок 49) обобщены изменения качественных оптических признаков трансформации альгинита, битуминита и онихитов преимущественно в интервале главной зоны нефтеобразования, соотнесённые с количественными показателями зрелости органического вещества (показателем отражения витринита и битуминита). Схема опирается только на исследованные образцы и может в дальнейшем быть уточнена на более широкой выборке данных.

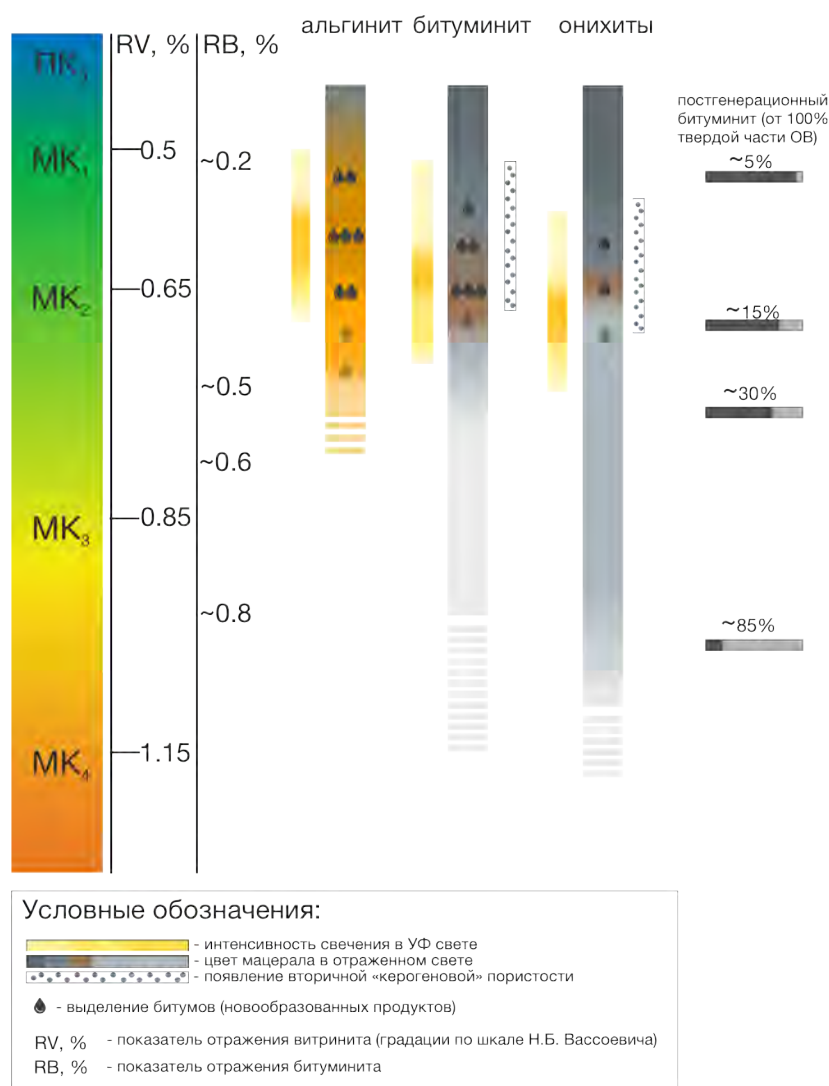


Рисунок 49. Шкала признаков трансформации альгинита, битуминита, онихитов в БВУФ, сопоставленная с границами зон катагенеза по Вассоевичу (1986), штрихи на концах столбцов показывают неточность границ ввиду ограниченности фактического материала

Раньше всех в процесс трансформации вступает альгинит, приобретая свечение уже в протокатагенезе (ПК), к началу мезокатагенеза (МК₁) при RB ~ 0,25% растет интенсивность

люминесценции и уменьшается к началу МК₂ при RB ~ 0,35%. В простом отраженном свете в мезокатагенезе во всех исследованных образцах цвет альгинита коричневый. Битуминит в догенерационной форме присутствует примерно до середины МК₁, при RB ~ 0,2% появляются поры и свечение в УФ свете, его интенсивность начинает расти на границе RB ~ 0,3%, когда битуминит приобретает генерационную форму, изменяя цвет с серого на коричневый в простом отраженном свете, люминесценция и пористость начинает уменьшаться при RB ~ 0,38%. К середине МК₂ количество постгенерационного битуминита заметно возрастает. При RB ~ 0,5% люминесценция битуминита пропадает. В момент наиболее интенсивного свечения происходит выделение битумов, которые имеют очень яркое свечение в УФ свете и концентрируются вокруг мацералов. Онихиты позже всех вступают в процесс трансформации и не претерпевают значительных изменений, практически все время имея серый цвет в простом отраженном свете. При Ronh/RB ~ 0,25% начинает проявляться керогеновая пористость. В очень узком диапазоне с Ronh/RB ~ 0,35-0,4% они могут кратковременно приобретать коричневый цвет, концентрировать вокруг себя новообразованные продукты – битумы. При Ronh/RB ~ 0,25% появляется люминесценция, которая усиливается к Ronh/RB ~ 0,35% и затем уменьшается вплоть до полного исчезновения к Ronh/RB ~ 0,5%. Часть фрагментов онихитов в процессе преобразования приобретает шагреневую поверхность.

Если схематично представить процесс преобразования твердой (нерастворимой в органических растворителях) части ОВ баженовской формации, то к середине главной фазы нефтеобразования генерации углеводородных соединений нефтяного ряда выходит на максимум, а к началу МК₄ начинается активное продуцирование газообразных углеводородов (Рисунок 50).

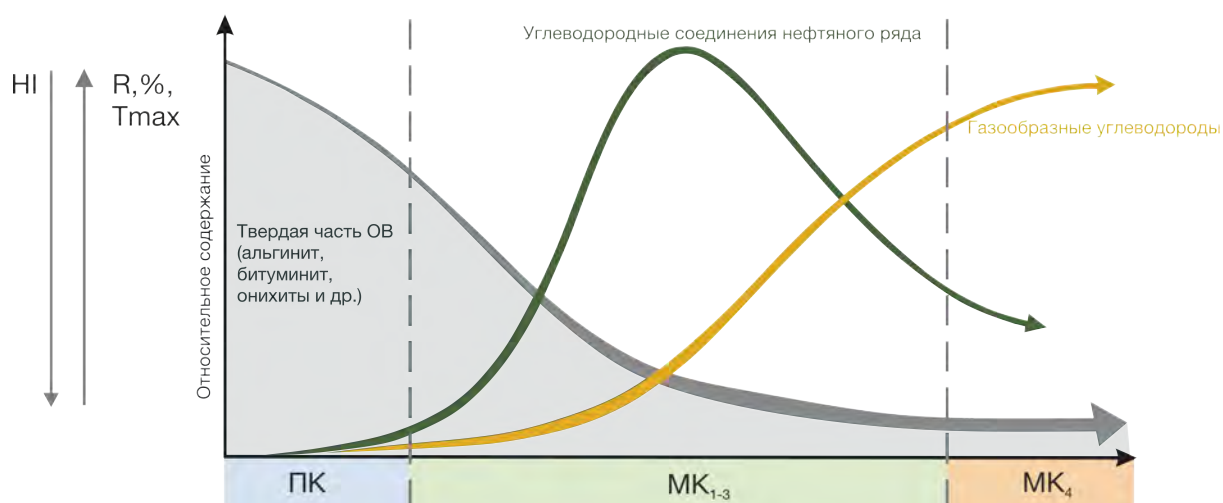


Рисунок 50. Схематичный процесс возможного изменения ОВ баженовской формации в ходе катагенеза (сильно переработано по Вассоевич, 1986; Mastalerz et al., 2018)

4.2. Изменения, наблюдаемые в ходе искусственного преобразования

Результаты лабораторного эксперимента по гидропиролизу подтверждают закономерности поведения мацералов, ранее установленные при изучении естественных образцов в главной зоне нефтеобразования. В ходе термического воздействия фиксируется последовательное изменение оптических характеристик органического вещества, сопоставимое с процессами в естественных образцах (Рисунок 51).

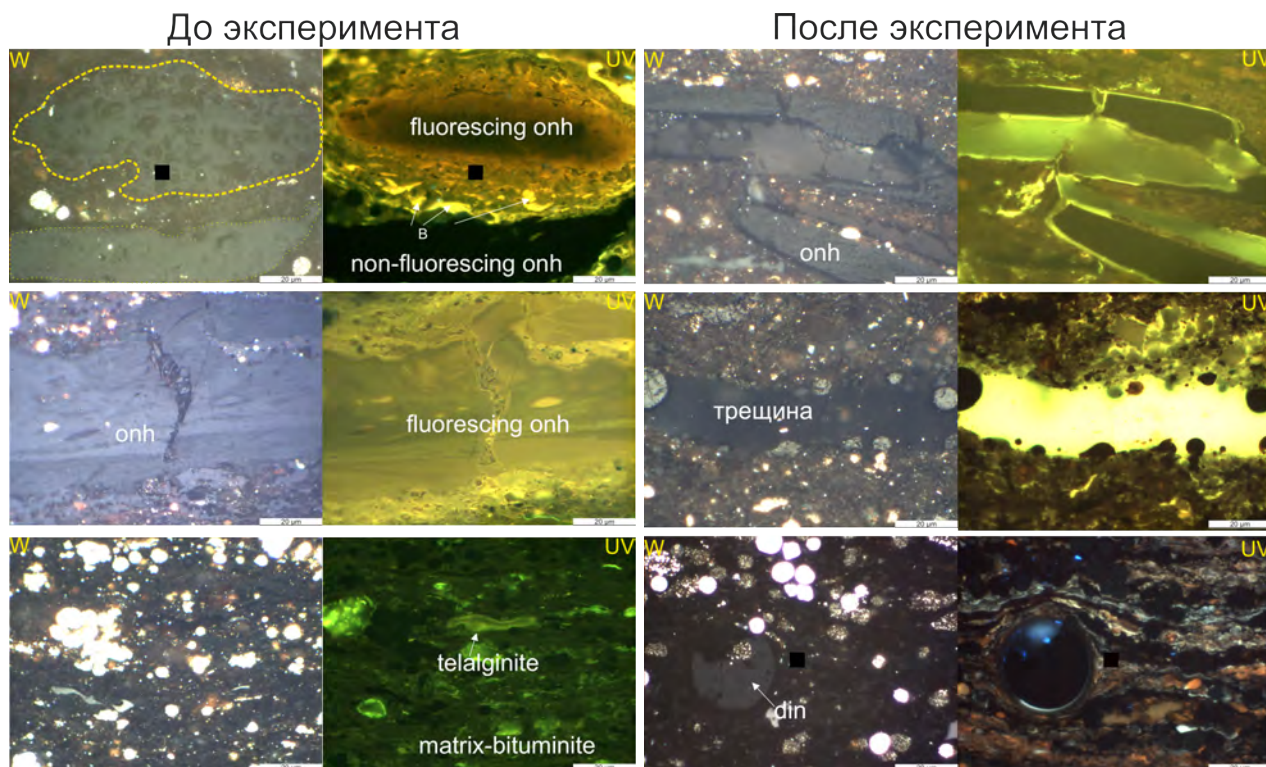


Рисунок 51. Изменение образцов до и после эксперимента в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV) Принятые сокращения: *fluorescing onh* – люминесцирующие фрагменты онихитов, *non-fluorescing onh* — нелюминесцирующие фрагменты онихитов, B – новообразованный битум, *matrix bituminite* – битуминит в виде основной массы, *din* – диноцисты

Альгинит

В экспериментально измененных образцах для альгинита отмечается выраженное снижение интенсивности люминесценции вплоть до её полного исчезновения (Рисунок 52). Одновременно наблюдается размытие и деформация контуров мацерала, что отражает деструкцию его исходной структуры.

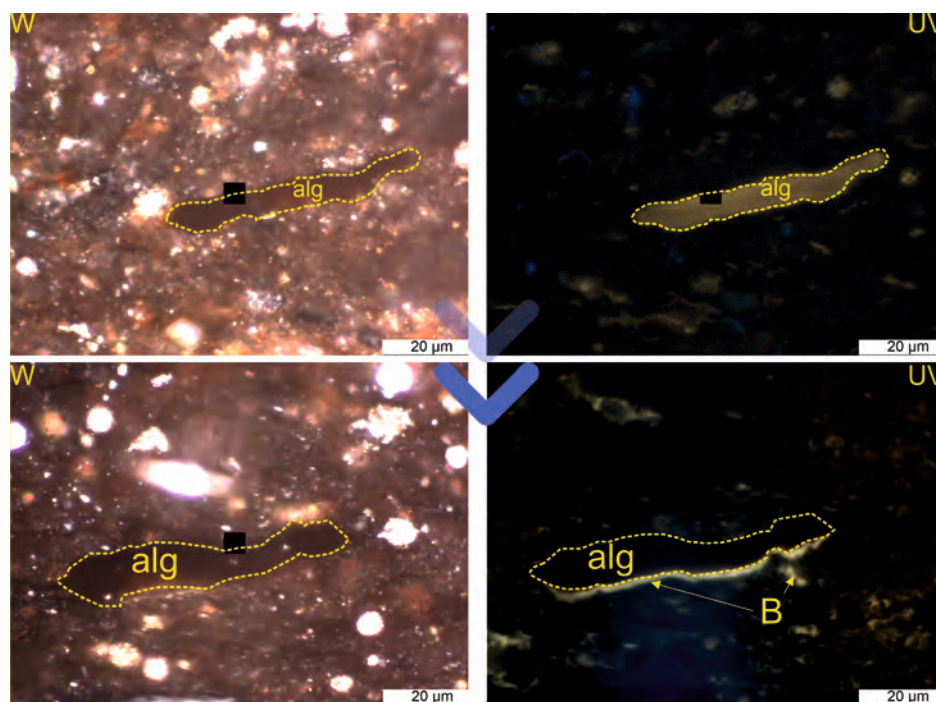


Рисунок 52. Изменение альгинита в ходе гидропиролиза (сверху – исходные образцы, снизу – после прогрева) в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

Битуминит

В образцах после гидропиролиза у битуминита выявляется появление или усиление люминесцентного свечения, а также изменение цвета в отражённом свете с серого на коричневый. Фиксируется развитие вторичной (керогеновой) пористости и появление новообразованных битумных плёнок, которые концентрируются как в порах, так и вокруг мацерала. Догенерационный битуминит переходит в генерационную форму (Рисунок 53), а генерационный битуминит переходит в постгенерационную форму. Эти признаки интерпретируются как результат активной генерации жидких углеводородов.

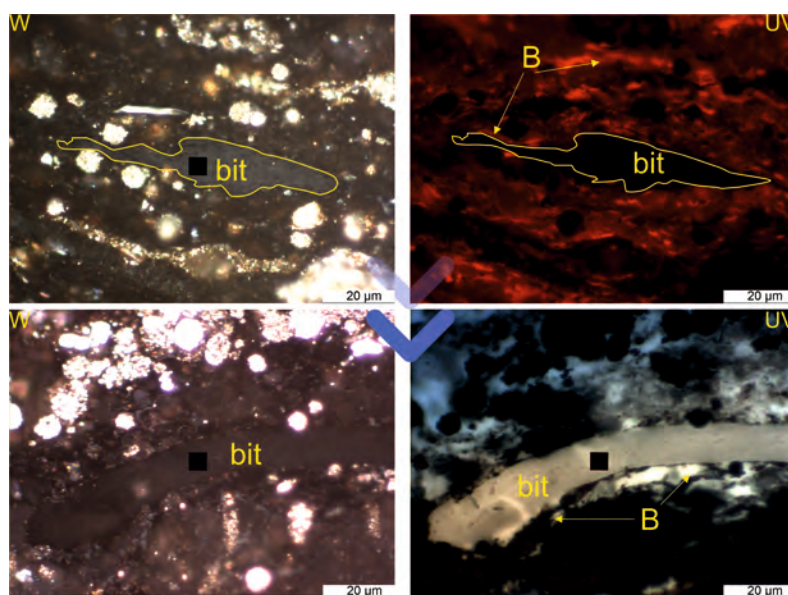


Рисунок 53. Изменение битуминита после гидропиролиза (сверху – исходные образцы, снизу – после прогрева) в простом отраженном белом (W) и ультрафиолетовом свете (UV)

Онихиты

Онихиты в ходе гидропиролиза демонстрируют потерю исходной яркой люминесценции, изменение цвета в отражённом свете и формирование системы пор и микротрещин. Отмечается появление битумных пленок по границам и вдоль трещин, что указывает на участие онихитов в процессах генерации и миграции углеводородов при увеличении степени преобразованности (Рисунок 54).

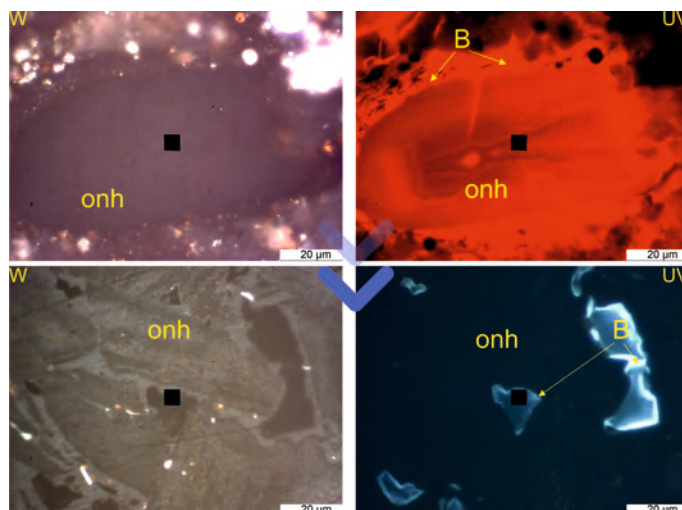


Рисунок 54. Изменение онихитов после гидропиролиза (сверху – исходные образцы, снизу – после прогрева) в простом отраженном белом (*W*) и ультрафиолетовом свете (*UV*)

Характерной особенностью онихитов является появление «шагреновой» поверхности (Рисунок 55).

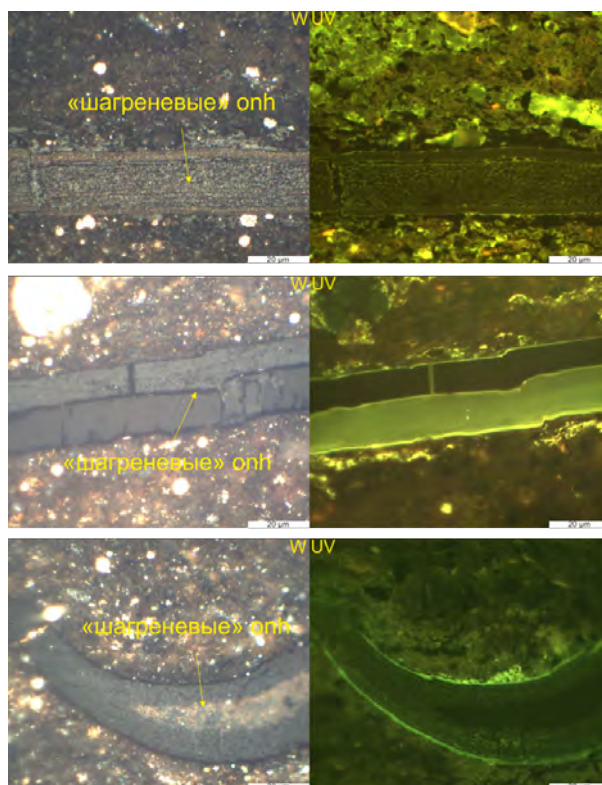
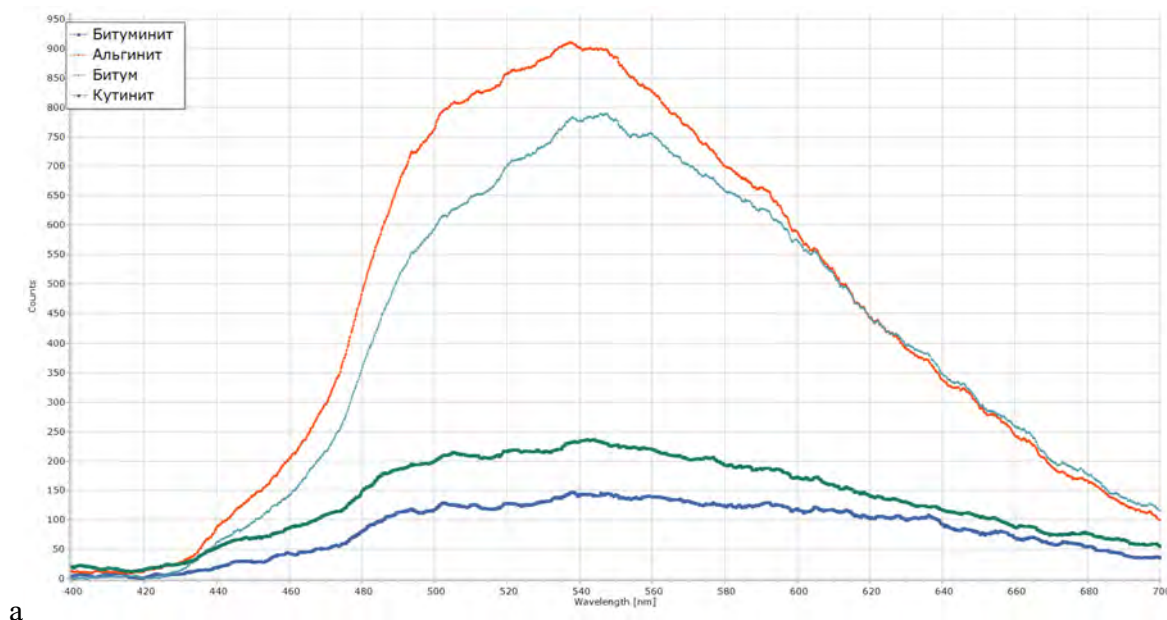


Рисунок 55. Появление «шагреновой» поверхности у онихитов после гидропиролиза в простом отраженном белом (*W*) и ультрафиолетовом свете (*UV*)

В целом, наблюдаемые в эксперименте изменения оптических свойств мацералов полностью согласуются с данными по естественным образцам и подтверждают, что гидропиролиз адекватно моделирует ключевые этапы катагенетического преобразования ОВ в главной зоне нефтеобразования.

Для более наглядной демонстрации описанных изменений интенсивности свечения были выполнены измерения УФ спектров свечения для отдельных мацералов (Рисунок 56). Полученные спектры отражают различия как в интенсивности, так и в длине волны на пике люминесценции для различных компонентов органического вещества. Для альгинита и новообразованного битума характерны более высокие значения интенсивности свечения с максимумами в диапазоне ~500–550 нм, тогда как для битуминита и кутинита (остатков кутикулы высших растений), наблюдается более низкая интенсивность и сглаженный характер спектров. Кутинит был добавлен дополнительно для сравнения.

После термического воздействия (гидропиролиза) отмечается снижение общей интенсивности люминесценции и смещение максимумов в длинноволновую область, что соответствует увеличению степени катагенетической преобразованности органического вещества. При этом различия между отдельными мацералами сохраняются, однако становятся менее выраженными (Рисунок 56). Так, спектры подтверждают различный характер свечения органического вещества и могут рассматриваться как дополнительный инструмент для более количественного представления качественных характеристик.



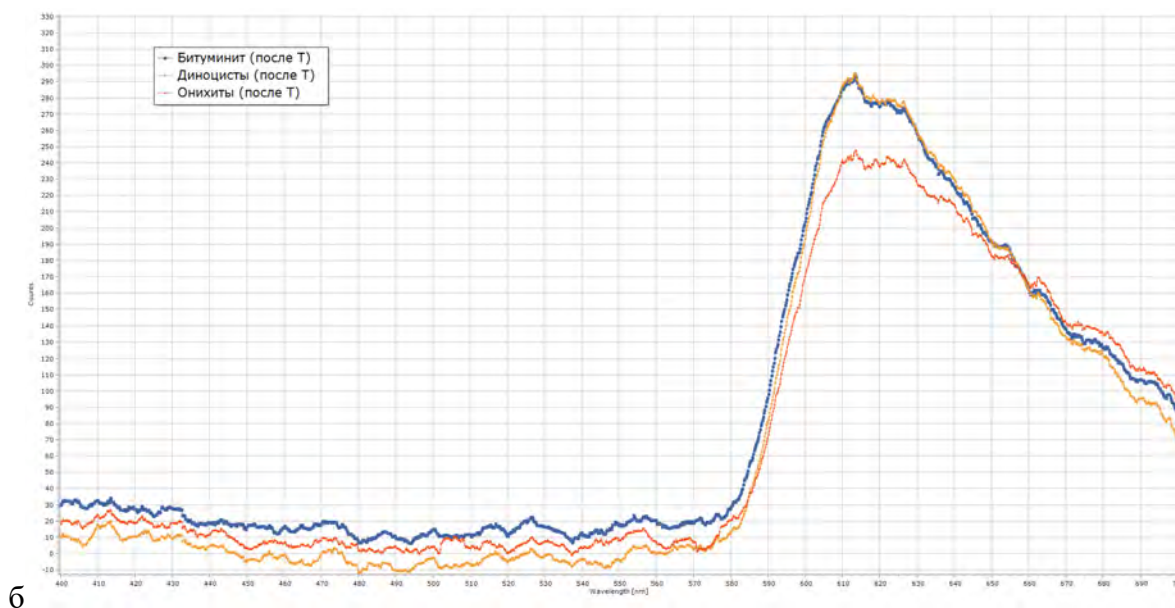


Рисунок 56. Спектры УФ свечения на примере альгинита, битуминита и новообразованного битума: а – образцы до гидропиролиза, б – образцы после гидропиролиза (микроспектрофотометр QDI 302)

Для лабораторного моделирования катагенетического преобразования органического вещества методом гидропиролиза была сформирована выборка из 44 образцов. Из-за особенностей распределения мацералов в аншлифах измерение показателя отражения удалось выполнить не во всех пробах, а в 23 образцах (суммарное количество замеров превышает 3000). В 12 образцах были получены совместные значения показателя отражения онихитов и битуминита.

Установлено, что показатель отражения онихитов увеличивается с 0,12–0,39 % в исходных образцах до 0,23–0,65 % после прогрева; средний прирост составляет около 0,13 % (Рисунок 57).

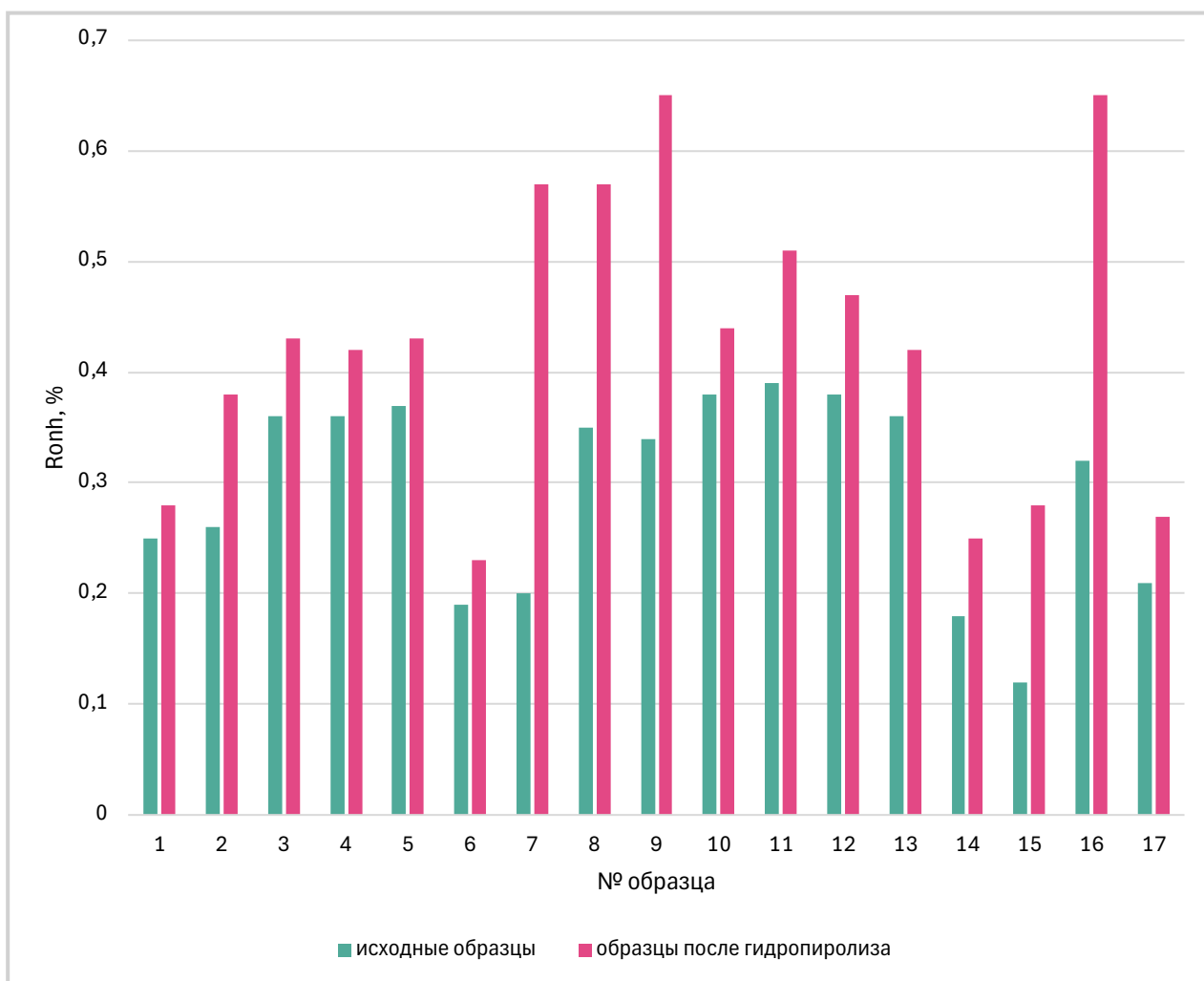


Рисунок 57. Изменение показателя отражения онихитов (R_{onh}) до и после гидропиролиза на примере 17 образцов

В 12 образцах, для которых были получены значения показателя отражения битуминита, наблюдается увеличение RB с 0,20–0,38% в исходных образцах до 0,29–0,56% после прогрева. Средний прирост показателя отражения составляет около 0,16% (Рисунок 58). Увеличение показателя отражения битуминита отражает рост степени преобразованности органического вещества при термическом воздействии. Аналогичная тенденция наблюдается и для онихитов, что подтверждает их чувствительность к катагенетическим изменениям и согласуется с результатами корреляции R_{onh} и RB .

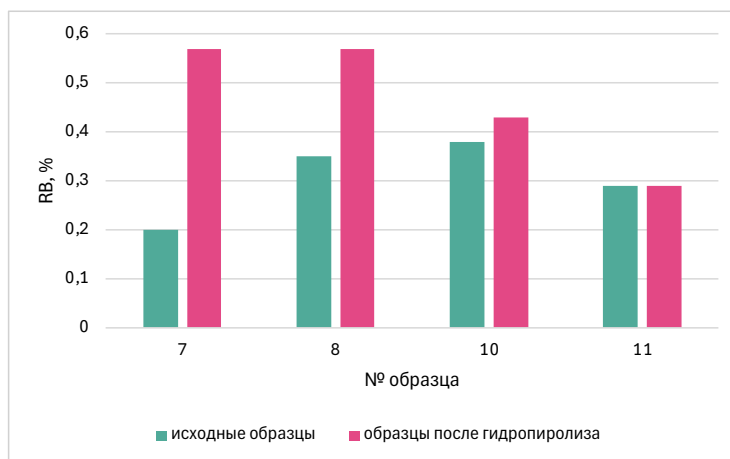


Рисунок 58. Изменение показателя отражения битуминита (RB) до и после гидропиролиза на примере 10 образцов

Для образцов, задействованных в эксперименте по гидропиролизу и отобранных как менее преобразованные, значения T_{\max} изменялись в диапазоне 426–447 °С, водородный индекс изменялся в диапазоне 182–690 мг УВ/г ТОС. В искусственно преобразованных образцах T_{\max} составил 432–458 °С, HI – 50–501 мг УВ/г ТОС, что отражает общее снижение генерационного потенциала с ростом степени катагенеза (с ПК₃–МК₂ до МК₁–МК₃) (Рисунок 59). Градации катагенеза и T_{\max} сопоставлялись по данным разных авторов (Yang, Horsfield, 2020).

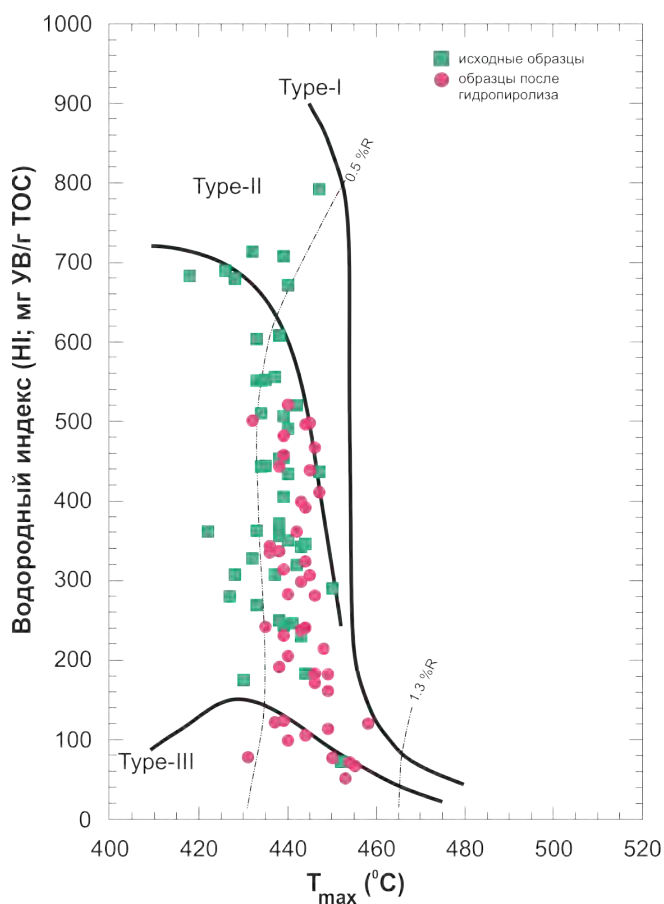


Рисунок 59. Диаграмма HI- T_{\max} для образцов, подвергшихся эксперименту

На диаграмме выхода углеводородов (Рисунок 60) отчётливо фиксируется рост суммарного выхода синтетической нефти, преимущественно за счёт тяжёлой фракции, а также изменение соотношения между жидкими и газообразными продуктами. Для большинства исследованных образцов отмечается существенное увеличение удельного выхода тяжёлой синтетической нефти, что свидетельствует об интенсивном термическом разложении ОВ с образованием высокомолекулярных углеводородов. Максимальные значения выхода тяжёлой нефти приурочены к образцам с повышенным содержанием органического вещества, что подчёркивает определяющую роль мацерального состава и исходного ТОС в реализации генерационного потенциала. Выход лёгкой синтетической нефти после гидропиролиза также возрастает, однако в меньшей степени по сравнению с тяжёлой фракцией.

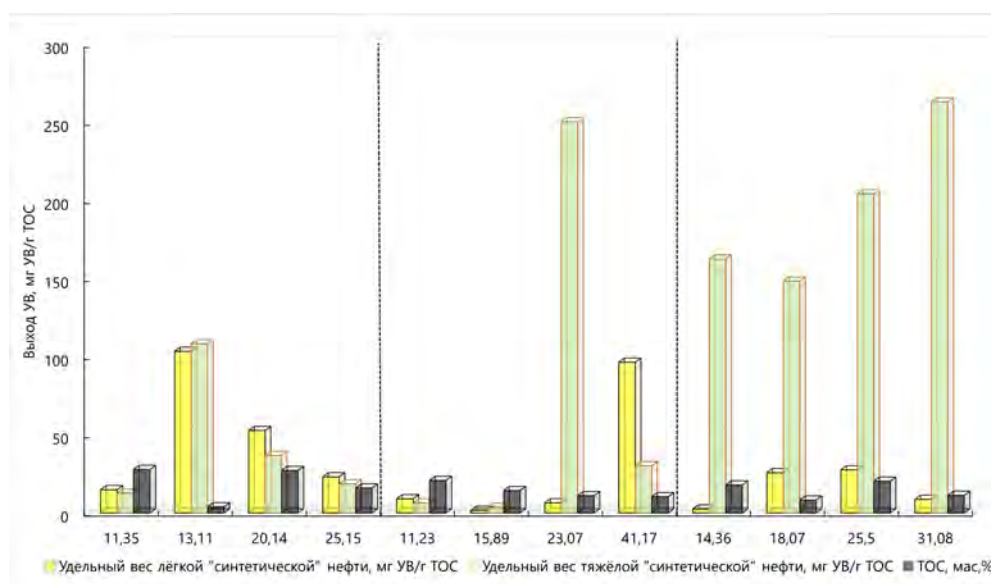


Рисунок 60. Диаграмма выхода углеводородов в образцах после эксперимента

Таким образом, изменения химических параметров органического вещества после гидропиролиза хорошо согласуются с наблюдаемыми оптическими признаками преобразования мацералов. Совместный анализ пиролитических и углепетрографических данных подтверждает, что лабораторный эксперимент адекватно моделирует процессы генерации углеводородов, характерные для естественных условий катагенеза в главной зоне нефтеобразования.

Глава 5. Оценка степени зрелости органического вещества БВУФ⁴

Определение степени зрелости в концентрированном органическом веществе (в углях и углистых породах) проводится по показателю отражения витринита – «золотому» стандарту среди всех методов оценки зрелости. Показатель отражения витринита определяется на микроспектрофотометрах или с помощью фотоэлектронных умножителей в иммерсионной среде (с использованием иммерсионного масла и иммерсионного объектива) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55659–2013 (ИСО 7404-5:2009). В углях выделяют три группы мацералов – витринита, инертинита и липтинита. Группа витринита не случайно выбрана для определения показателя отражения среди всех групп, потому что является наиболее распространенной, так как витринит является основным углеобразующим компонентом и присутствует почти во всех угольных пластах, пропластках и линзах, а также в виде рассеянных включений в породе. Относительная однородность оптических свойств витринита и его чувствительность к термическому воздействию делают показатель отражения витринита (RV, %) надёжным индикатором степени катагенетической преобразованности углистого органического вещества.

В то же время оценка степени зрелости органического вещества в нефтегазоматеринских толщах требует применения более комплексного подхода. Особенности состава, возраста и условий формирования НГМТ обуславливают ограниченную применимость классического подхода для углей, что связано как с отсутствием витринита, так и с доминированием нефтематеринских мацералов группы липтинита. В связи с этим для оценки степени зрелости органического вещества в НГМТ применяется сочетание оптических и химических методов, подбираемых с учётом возраста и литологических особенностей пород (Таблица 3).

Оптические показатели зрелости включают в себя исследования в проходящем свете по изменению окраски нерастворимой части керогена, а также по цвету конодонтов, спор и др. В отражённом свете проводится измерение показателя отражения витринита, который традиционно считается основным индикатором степени катагенетической преобразованности органического вещества. Дополнительно используются прямые оптические признаки нефтеобразования, например, интенсивность люминесцентного свечения в УФ свете.

⁴ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Андреев Б., Козлова Е.В., Булатов Т.Д., Карамов Т.И., Леушина Е.А., Широкова В.В., Бажанова А.Е., Вайтехович А.П., Пронина Н.В., Дударев В.В., Колесов В.В., Спасенных М.Ю. Идентификация очага низкотемпературной генерации углеводородов на южной периферии Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. 2025. Т. 27. № 4. С. 192–215. EDN: СНРЈС. Импакт-фактор 1,180 (РИНЦ); 1,500 п.л.; авторский вклад 15%.

Для баженовской свиты и ее возрастных аналогов характерно отсутствие витринита, по которому могли бы проводиться замеры показателя отражения, поэтому выбираются другие мацералы для замера. Так, мировая практика использует в нефтематеринских толщах мацералы группы липтинита (битуминит), зоокласты (сколекодонты, хитинозои, граптолиты) и вторичные продукты (твердые битумы) (Mastalerz et al., 2018; Petersen et al., 2013; Wei et al., 2016). Полученные значения показателей отражения пересчитываются в эквивалент показателя отражения витринита (RV_{eq} , %) по специализированным формулам (Таблица 4) (Schmidt et al., 2019).

Таблица 3. Оптические показатели зрелости (Hartkopf-Fröder et al., 2015)

	Показатель зрелости	Индекс	Особенности возраста
Показатель отражения	Показатель отражения витринита	RV	D и моложе
	Показатель отражения битуминита	RB	Все осадочные породы
	Показатель отражения граптолитов, хитинозой, сколекодонт и др. зоокластов	R_{grap} , R_{chi} , R_{sco}	С и моложе
Флюоресценция	Цвет и интенсивность спектра люминесцентного свечения	λ_{max}	D и моложе
Цвет	Индекс окраски спор (Spore Colour Index)	SCI	S и моложе
	Индекс изменения окраски конодонтов-ИОК (Conodont Alteration Index)	CAI	С - Т
	Цвет остракод, акритархов, динофлагеллят, прازیнофитов	AAI	О и моложе
	Индекс термического превращения (Thermal Alteration Index)	TAI	О и моложе

Химические методы оценки степени зрелости включают пиролитические и геохимические параметры. К основным показателям относятся максимальная температура выхода углеводородов при пиролизе (T_{max}), коэффициент преобладания нечётных n-алканов над чётными (CPI), битумоидный коэффициент, а также биомаркерные индексы, включая метилдибензотиофеновый индекс (MDBT), метилфенантреновый индекс (MPI) и связанные с ними производные параметры.

5.1. Пиролитические показатели зрелости органического вещества БВУФ

По результатам пиролитических исследований в изученных образцах БВУФ содержание органического вещества по общему органическому углероду (TOC) варьирует от 0,89 до 32 % масс. Значения T_{max} в естественных образцах изменяются в диапазоне 418–461 °С. Более высокие

значения T_{\max} (439–461 °С) характерны для наиболее преобразованных образцов (Каменная вершина, Салымский мегавал, Верхнеяминский вал и Нижнепурский мегапрогиб), тогда как более низкие значения (420–435 °С) отмечаются в менее преобразованных образцах (Еныдрский вал, Каймысовский свод и др.).

Водородный индекс (HI) в естественных образцах варьирует от 33 до 1018 мг УВ/г ТОС: минимальные значения характерны для наиболее преобразованных и обеднённых органическим веществом образцов (Салымский мегавал), максимальные — для образцов, обогащённых альгинитом (альгинитовые прослои, например, на Усть-Балык-Мамонтовском валу). Исходя из полученных пиролитических данных (Рисунок 61), основная часть ОВ БВУФ принадлежит ко II типу ОВ.

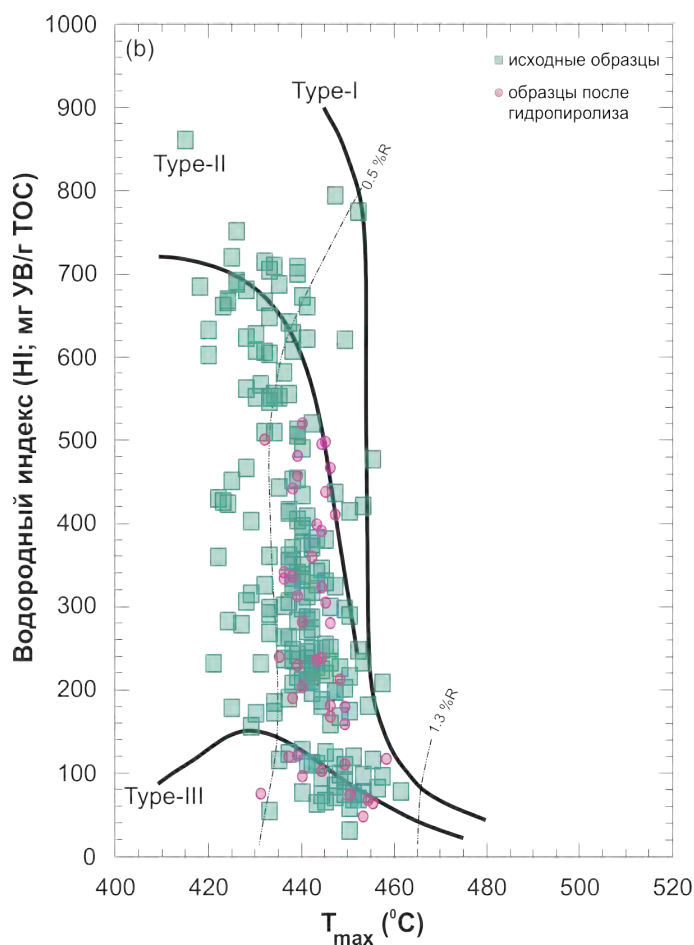


Рисунок 61. Диаграмма T_{\max} -HI для естественных образцов БВУФ и образцов после гидропиролиза

Для данного типа характерны повышенные значения водородного индекса и нефтегенерационный потенциал, что согласуется с доминированием нефтематеринских мацералов органического вещества. Преобладающим мацералом в составе органического вещества II типа в изученных образцах является битуминит. Вместе с тем диапазон значений HI и T_{\max} демонстрирует выраженную неоднородность органического вещества даже в пределах одной формации. Наблюдаемая вариабельность не может быть объяснена исключительно

валовыми методами, к которым относится пиролиз Rock-Eval, поскольку данный метод не позволяет дифференцировать вклад отдельных мацералов в суммарный пиролитический отклик. Это указывает на необходимость привлечения более детальных углепетрографических исследований.

Так, в образцах с очень высокими значениями водородного индекса ($HI > 700$ мг УВ/г ТОС) установлено повышенное содержание ламальгинита — мацерала группы липтинита, обладающего высоким нефтегенерационным потенциалом. Напротив, в образцах с низкими значениями HI (< 150 мг УВ/г ТОС) преобладает постгенерационный битуминит, характеризующийся сниженным водородным индексом и отсутствием потенциала для дальнейшей генерации углеводородов. Данные закономерности хорошо прослеживаются при сопоставлении пиролитических параметров с мацеральным составом конкретных образцов (Рисунок 62).

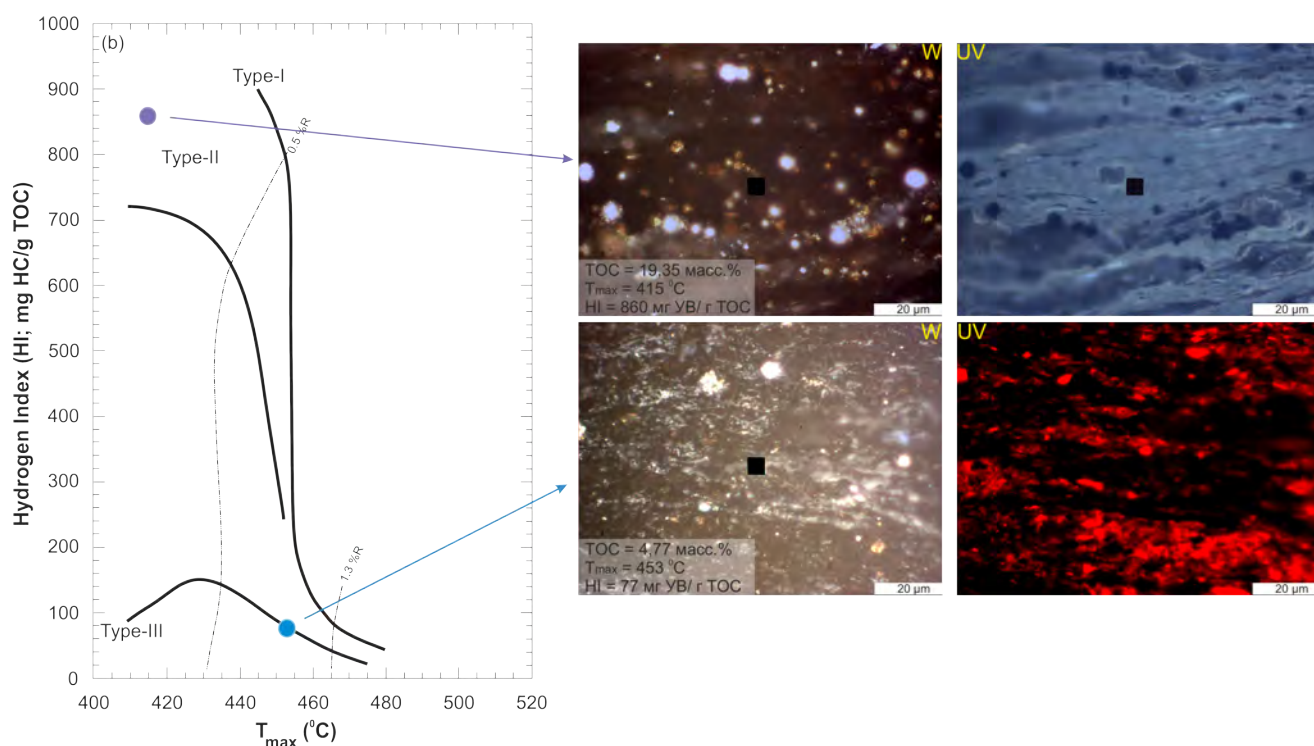


Рисунок 62. Сопоставление мацерального состава и пиролитических параметров образцов различной степени преобразованности: образец с повышенным содержанием ламальгинита и высокими значениями HI (сиреневый маркер) и образец с преобладанием постгенерационного битуминита и низкими значениями HI (голубой маркер)

Как видно из диаграммы ТОС-S2 (Рисунок 63) большая часть исследованных образцов попадает в области «очень хорошего» и «превосходного» генерационного потенциала. Это свидетельствует о высоком качестве органического вещества баженовской высокоуглеродистой формации и его значительном нефтегенерационном потенциале. Небольшая часть образцов тяготеет к области I типа органического вещества, что объясняется повышенным содержанием

альгинита, обладающего высоким водородным индексом и, соответственно, высокими значениями S_2 . В то же время образцы, смещённые в сторону области III типа, характеризуются более высокой степенью катагенетического преобразования органического вещества, что приводит к снижению генерационного потенциала и уменьшению значений параметра S_2 . Следует отметить, что выявленные различия наблюдаются не только между разными месторождениями, но и по разрезу в пределах одной скважины. Параметры ТОС и S_2 распределяются неравномерно, что во многом обусловлено литологической неоднородностью разреза. Как было показано ранее, наиболее низкие концентрации общего органического углерода характерны для карбонатных прослоев, тогда как повышенные значения ТОС приурочены к 4-й и 5-й пачкам баженовской свиты.

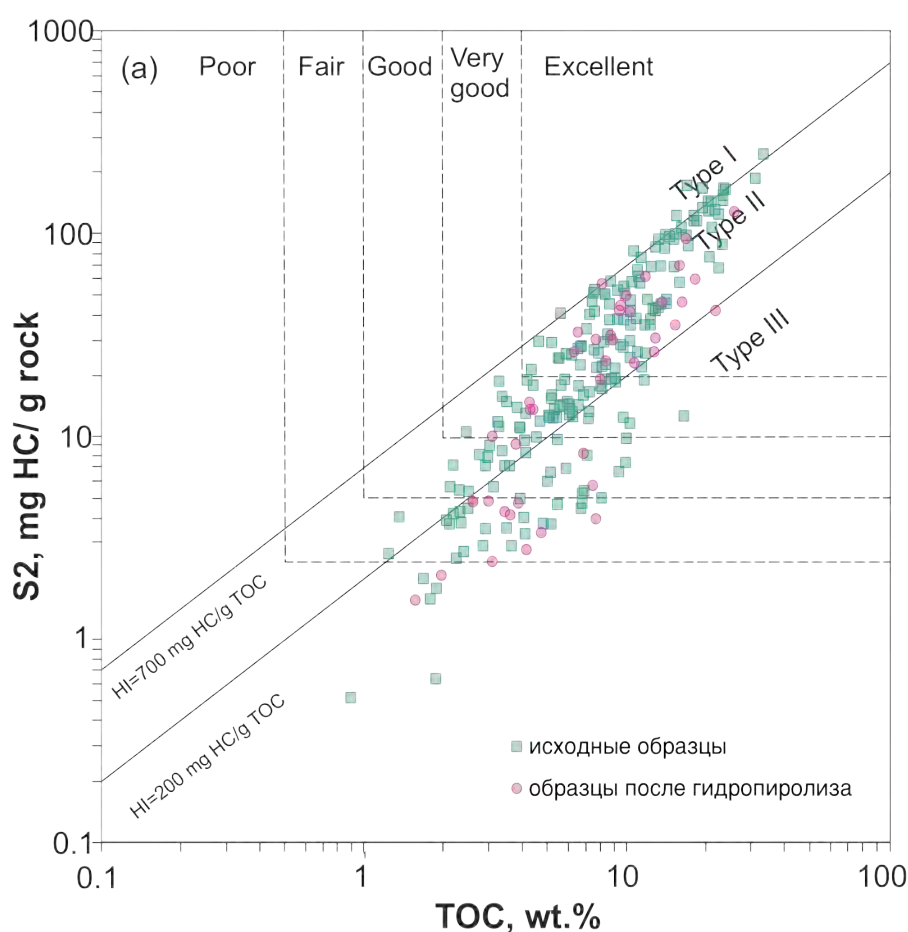


Рисунок 63. Диаграмма зависимости параметра S_2 от содержания общего органического углерода (ТОС) для образцов баженовской высокоуглеродистой формации

Параметр T_{max} в ряде случаев демонстрирует ограниченную информативность, что связано с выраженной неоднородностью мацерального состава. В работе С. Янга и Б. Хосфилда (Yang, Horsfield, 2020) описано явление занижения значений T_{max} (T_{max} suppression) в насыщенных ОВ формациях, широко распространённое в мировых нефтематеринских толщах. Аналогичное поведение параметра T_{max} фиксируется и в исследованных образцах БВУФ. Несмотря на указанные ограничения пиролитических показателей зрелости, в ряде зарубежных

работ показана хорошая корреляция между значениями T_{\max} и показателем отражения битуминита (RB), которая позволяет использовать эмпирические зависимости для пересчёта пиролитических параметров в показатель отражения эквивалента витринита ($RV_{\text{eq.}}$) (Hackley et al., 2024). В работе Е.В. Козловой с соавторами (Козлова и др., 2015б) для скважин центральной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна зафиксирован устойчивый тренд совместного изменения параметров H_I и T_{\max} в узком диапазоне значений T_{\max} (420–470 °С). Аналогичные закономерности отмечены и в исследованиях баженовской формации, выполненных в Сколковском институте науки и технологий (Андреев и др., 2026; Spasennykh et al., 2021). Полученные в настоящей работе данные в целом согласуются с указанным трендом, однако неоднородность состава органического вещества предполагает использование показателя отражения битуминита/онихитов и их дальнейший пересчет в показатель отражения эквивалента витринита ($RV_{\text{eq.}}$).

5.2. Оптические показатели зрелости органического вещества БВУФ

Основными мацералами, использованными при оценке степени зрелости органического вещества, являлись битуминит и онихиты. Диноцисты характеризуются ограниченной информативностью и редким присутствием по разрезу, преимущественно приурочены к 5-й пачке. В ходе исследования проведён значительный объём измерений показателя отражения битуминита (RB) и онихитов (R_{onh}), включающий десятки тысяч индивидуальных определений по совокупности всех образцов. Это позволило сформировать представительную выборку и проанализировать распределение значений показателей отражения, а также оценить степень их вариабельности.

Показатель отражения битуминита (RB, %) в естественных образцах изменяется в диапазоне от 0,19 до 0,65%, показатель отражения онихитов (R_{onh} , %) — 0,18 - 0,65%. В образцах, подвергшихся гидропиролизу, значения RB составляют 0,29–0,70 %, а R_{onh} — 0,23 - 0,75%. Из чего следует, что в естественных и экспериментально полученных образцах показатели отражения битуминита и онихитов изменяются в сопоставимых диапазонах.

Следует отметить, что далеко не в каждом образце возможно одновременное присутствие онихитов и битуминита, пригодных для проведения измерений. Битуминит часто представлен в виде тонких, невыдержанных прослоев или выполняет роль основной массы в образце, что затрудняет корректное определения его показателя отражения. В связи с этим использование онихитов в качестве альтернативного оптического индикатора степени зрелости представляется обоснованным.

Вследствие зонального строения онихитов в пределах одного фрагмента могут наблюдаться различия значений показателя отражения (Рисунок 64). Так, например, для одного

образца минимальное значение показателя отражения онихитов составляет 0,38 % (172 измерения), тогда как более высокое значение достигает 0,47 % (111 измерений) (Рисунок 65).

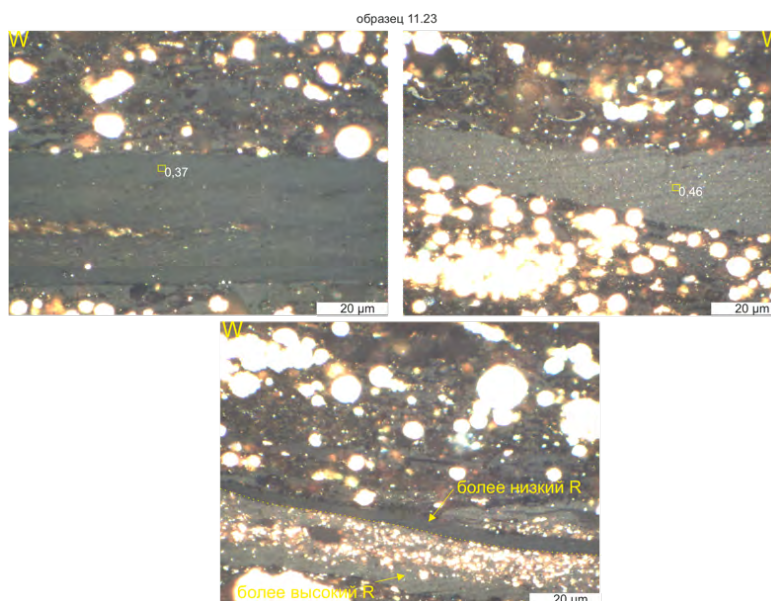
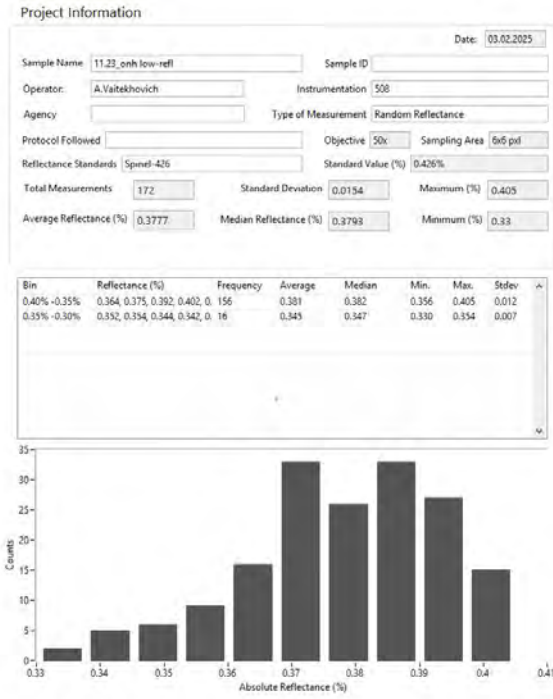


Рисунок 64. Фрагменты онихитов с более низким и более высоким показателем отражения в одном исходном образце

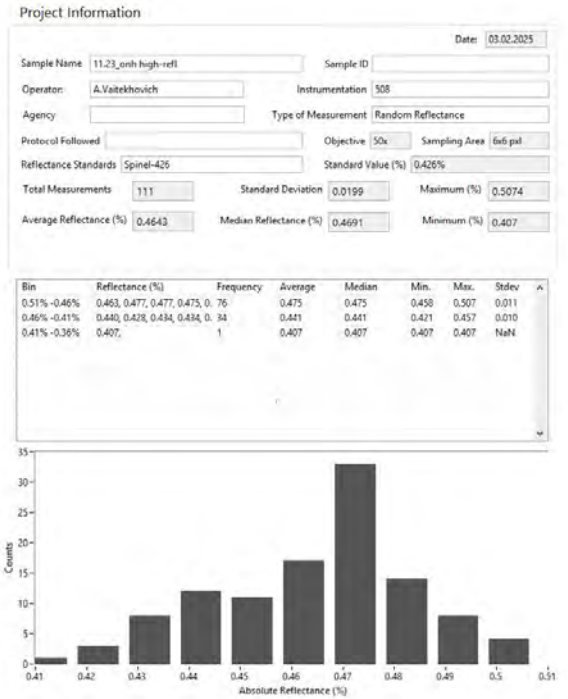
При этом значение показателя отражения битуминита для того же образца составляет 0,38 % (48 измерений) (Рисунок 66). Как следует из распределения, минимальные значения R_{onh} наиболее близки к значениям R_B . Подобная вариабельность значений показателя отражения известна и для других органических компонентов. При измерениях показателя отражения граптолитов и темного витринита (dark vitrinite) рекомендуется ориентироваться на минимальные значения, которые считаются наиболее корректными для оценки степени преобразованности органического вещества (Goodarzi, 1984; Petersen, 2013; Luo et al, 2020). По аналогии с данным подходом в настоящей работе при анализе онихитов использовались минимальные значения R_{onh} .

Рассмотренный пример отражает лишь частный случай возможной вариабельности значений внутри образца. В связи с этим гистограммы распределения значений показателя отражения онихитов и битуминита были построены не по усреднённым значениям для образцов, а по совокупности всех индивидуальных измерений. В анализ включены не 255 точек, соответствующие числу образцов, а тысячи значений R_B и R_{onh} . В результате суммарное распределение отражает одновременно как вариацию значений внутри образца, так и различия между образцами, обусловленные разной степенью зрелости.

На гистограмме представлено обобщённое распределение значений показателя отражения битуминита и онихитов, построенное по совокупности всех индивидуальных измерений (Рисунок 67). По оси абсцисс отложены значения показателя отражения (R , %), по оси ординат — относительная частота.

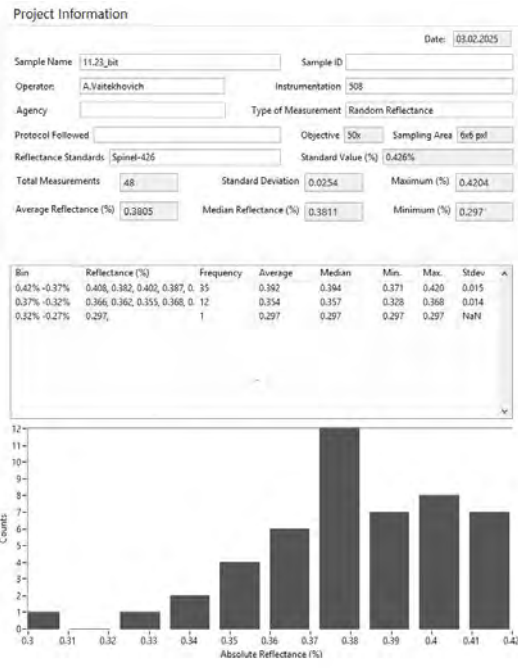


а

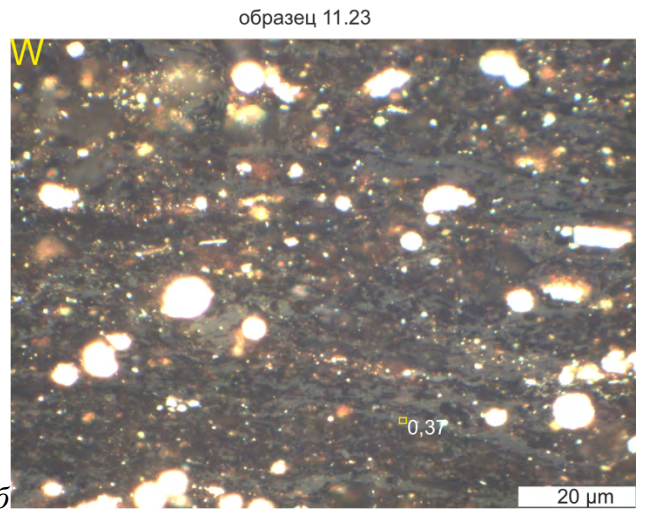


б

Рисунок 65. Гистограмма распределения значений R_{0nh} в онихитах на примере 1 образца (микроспектрофотометр Craic 508 PV): а – более низкое значение R_{0nh} (0,38%), б – более высокое значение (0,47%)



а



б

Рисунок 66. а - гистограмма распределения значений R_B (микроспектрофотометр Craic 508 PV), б – распределение битуминита в образце



Рисунок 67. Распределение показателя отражения (R , %) онихитов (синие столбцы) и битуминита (фиолетовые столбцы), нормированное к относительной частоте (% от общего числа измерений).

Распределение показателя отражения онихитов характеризуется выраженной мультимодальностью и широким диапазоном значений (R_{onh} - 0,15–0,75%), что отражает вариации степени зрелости органического вещества в совокупности исследованных образцов. Наличие нескольких максимумов свидетельствует о существовании популяций, соответствующих различным стадиям катагенетической преобразованности.

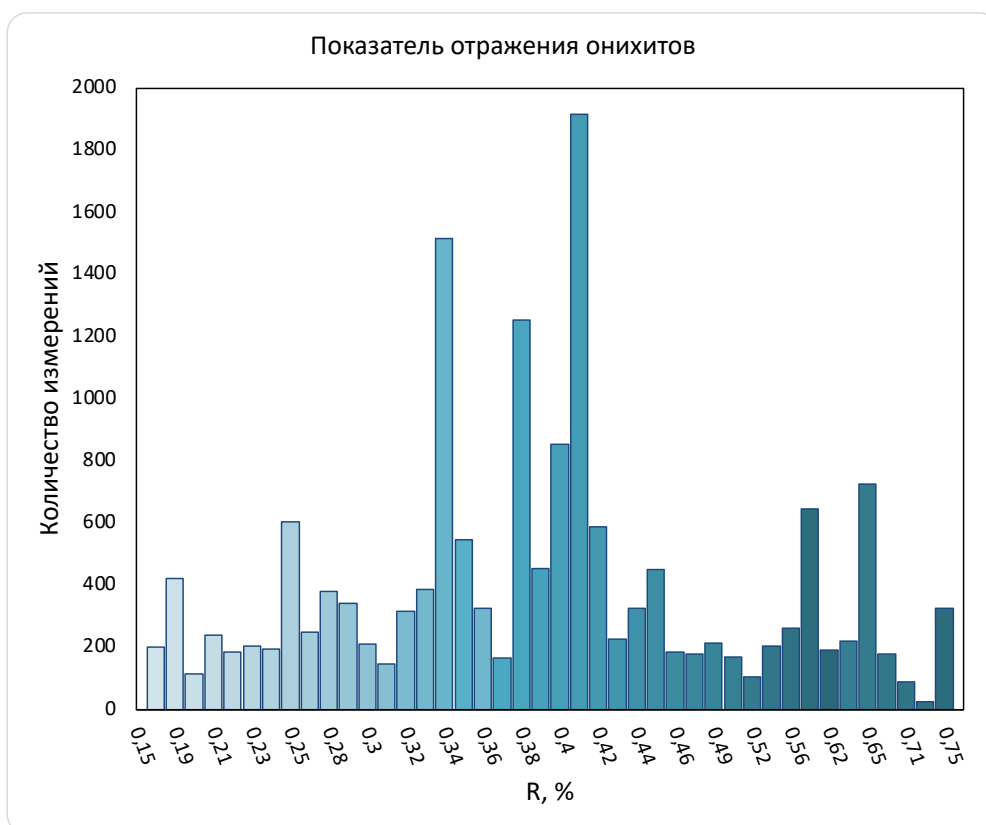


Рисунок 68. Распределение значений показателя отражения онихитов (R_{onh} , %) по совокупности индивидуальных измерений

Распределение показателя отражения битуминита характеризуется также широким диапазоном значений (Рисунок 69). Основным максимум приходится на интервал 0,32–0,40%, при наличии как более низких значений (~0,20–0,30%), так и более высоких значений (>0,45%). Учитывая, что выборка охватывает один стратиграфический интервал, но различается по глубине залегания и пространственному положению, полученное распределение отражает латерально-вертикальную изменчивость степени зрелости органического вещества.

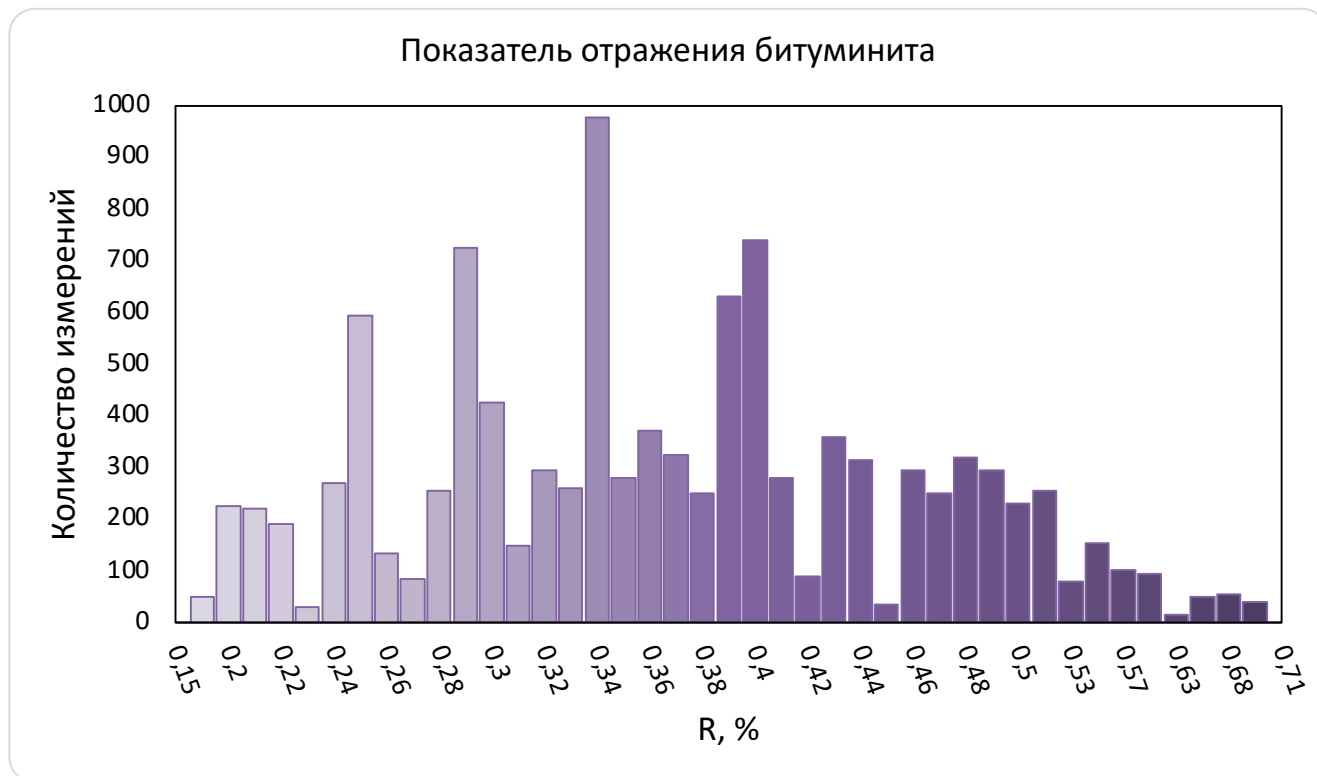


Рисунок 69. Распределение значений показателя отражения битуминита (RB, %) по совокупности индивидуальных измерений

Для установления зависимости между значениями показателей отражения битуминита и онихитов были сделаны замеры каждого из этих микрокомпонентов в одинаковых образцах, в результате устанавливается тесная линейная зависимость, коэффициент детерминации которой составляет $R^2 = 0,94$ (Рисунок 70). Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени согласованности поведения данных мацералов при катагенетическом преобразовании органического вещества и подтверждают возможность использования онихитов наравне с битуминитом для оценки степени зрелости органического вещества в баженовской высокоуглеродистой формации.

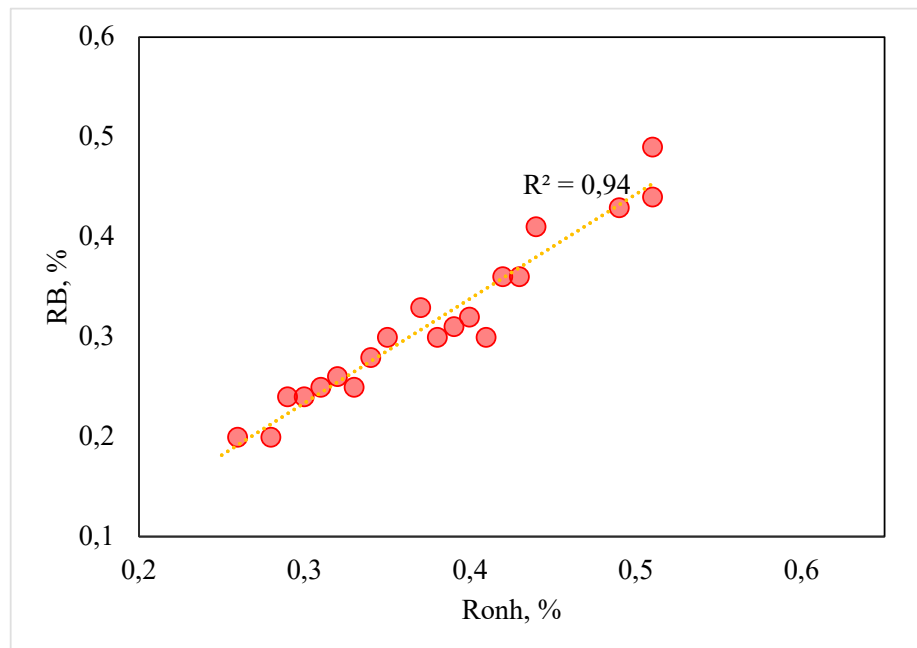


Рисунок 70. Сопоставление показателей отражения битуминита (RB) и онихитов (Ronh) в естественных образцах; пунктирной линией показана линейная регрессия ($R^2 = 0,94$).

Далее было проведено сравнение показателей зрелости органического вещества, полученных пиролизическими и углепетрографическими методами (T_{\max} и RB/Ronh). При рассмотрении всей совокупности образцов корреляция между параметром T_{\max} и показателями отражения битуминита и онихитов является низкой ($R^2 \approx 0,21$) (Рисунок 71). Полученные в работе значения образуют компактную группу точек, сосредоточенную в узком интервале значений T_{\max} (~420–450 °C) и показателя отражения битуминита и онихитоа (~0,2–0,7 %). Низкая степень корреляции может быть обусловлена тем, что T_{\max} представляет собой валовый показатель, тогда как показатели отражения (RB и Ronh) характеризуют отдельные мацералы. Для баженовской высокоуглеродистой формации, отличающейся выраженной неоднородностью мацерального состава, это приводит к расхождению между пиролизическими и оптическими параметрами зрелости. Кроме того, на величину T_{\max} , помимо степени катагенетического преобразования, могут оказывать влияние литологический состав пород, высокое содержание органического вещества, присутствие урана, а также относительно узкий диапазон изменения данного параметра в пределах главной зоны нефтеобразования. При сопоставлении полученных результатов с литературными данными обращает на себя внимание различие в характере зависимостей (Рисунок 71). В работе Г. Петерсена (Petersen et al., 2013), основанной на выборке из 621 образца гумусовых углей различного возраста и из разных бассейнов, а также в работе А.Н. Фомина (Фомин, 2011), включающей 190 образцов палеозойских и мезозойских углей Западной Сибири, установлена высокая корреляция между T_{\max} и показателями отражения ($R^2 \approx 0,88$), однако данные зависимости получены для широкого диапазона зрелости органического вещества, охватывающего как мезокатагенез, так апокатагенез. В отличие от этого, исследуемая

выборка сапропелевого ОВ соответствует узкому интервалу зрелости, приуроченному к главной зоне нефтеобразования (МК₁-МК₃), что приводит к ослаблению связи между T_{\max} и показателями отражения. Однако аналогичный эффект наблюдается и при ограничении диапазона зрелости в опубликованных данных: при выделении узких интервалов значений коэффициент детерминации заметно снижается (для данных Г. Петерсена значение R^2 уменьшается до ~ 0.44 , а для данных А.Н. Фомина — до ~ 0.04), что подтверждает зависимость величины R^2 от ширины рассматриваемого диапазона. Так, коэффициент детерминации в узком интервале зрелости оказывается нестабильным и существенно зависит от состава выборки. Это ограничивает возможность использования зависимостей типа $R-T_{\max}$ для локальных объектов, включая баженовскую высокоуглеродистую формацию.

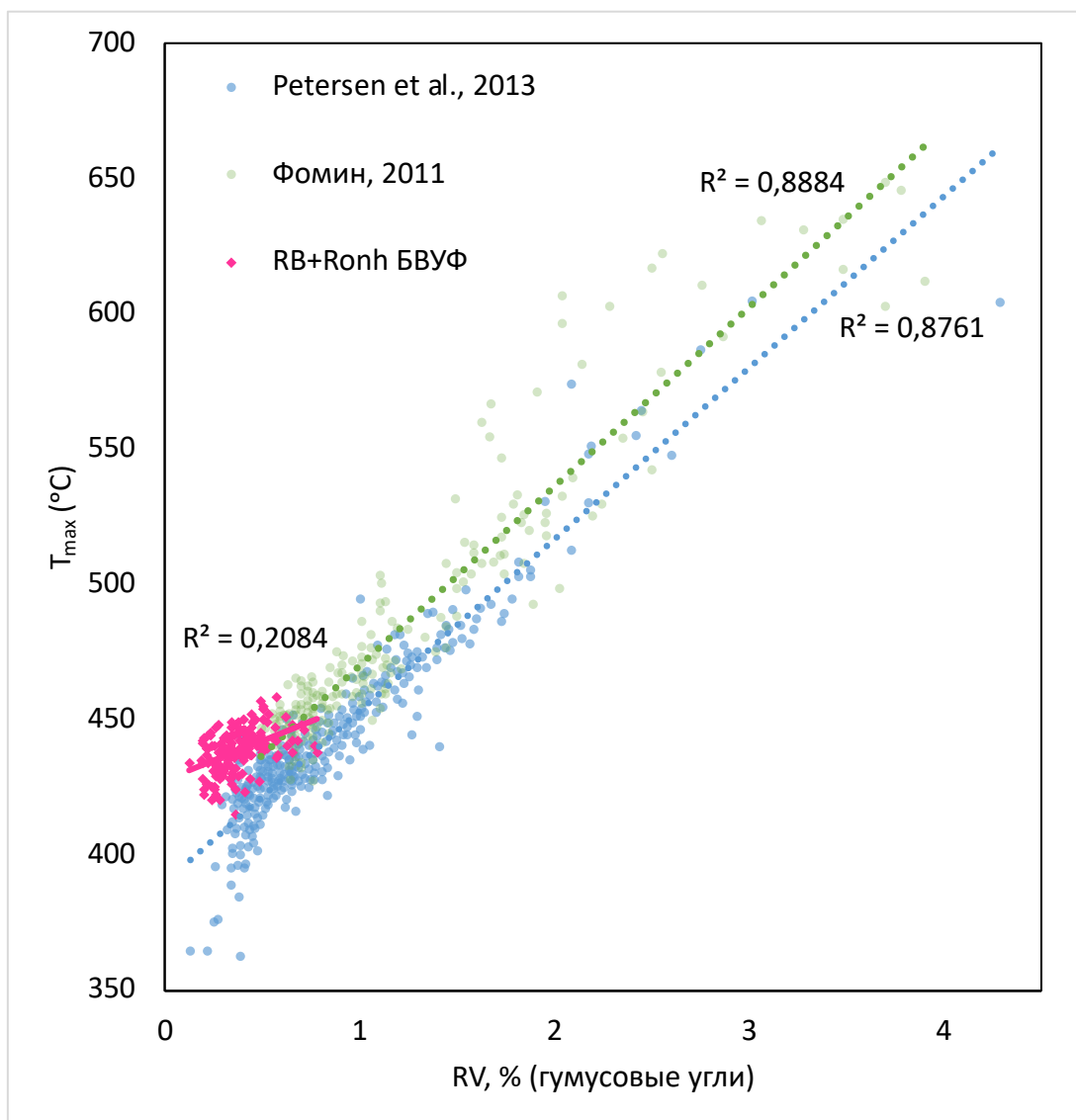


Рисунок 71. Сравнение зависимостей между параметром T_{\max} и показателем отражения витринита (RV, %) по данным разных авторов: по материалам Г. Петерсена и соавт. (Petersen et al., 2013) и А.Н. Фомина (2011); пунктирными линиями показаны соответствующие линейные аппроксимации

При попытке усреднения данных по образцам в пределах отдельных скважин корреляция между T_{\max} и показателями отражения онихитов и битуминита несколько улучшается, однако остаётся недостаточной для построения устойчивой формулы пересчёта T_{\max} в показатель отражения эквивалента витринита ($RV_{\text{eq.}}$) (Рисунок 72).

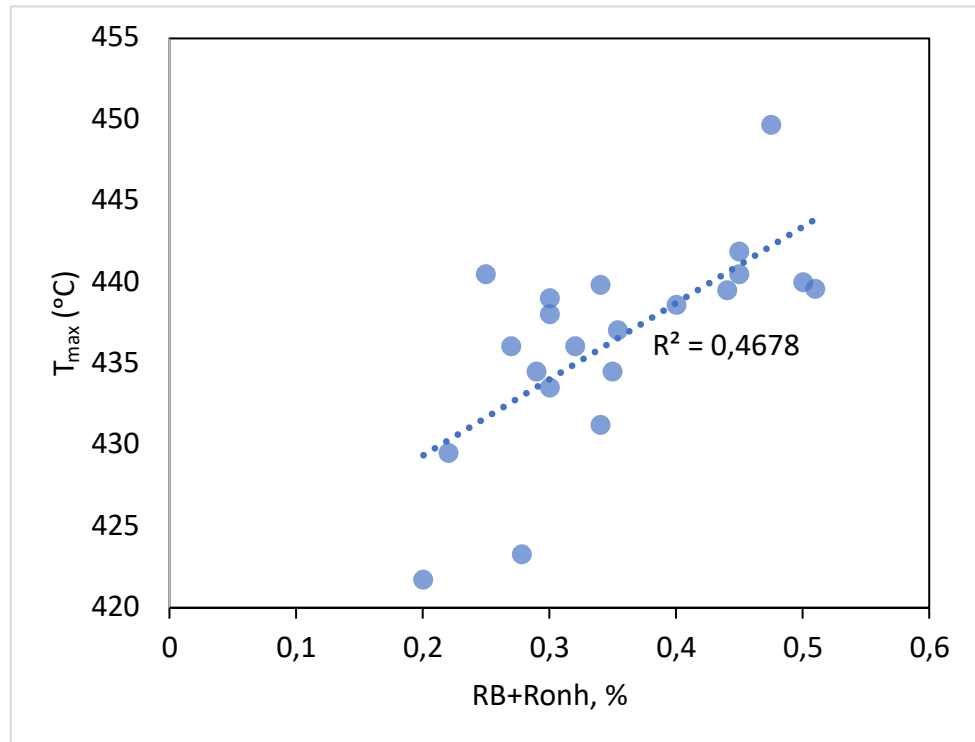


Рисунок 72. Сопоставление средних значений по скважинам параметра T_{\max} с показателями отражения битуминита (RB, %) и онихитов (Ronh, %) в естественных образцах БВУФ

В работе С. Янга и Б. Хосфилда подчёркивается невозможность применения универсальной формулы пересчёта T_{\max} –R для всех нефтематеринских толщ даже при одинаковом типе органического вещества (Yang, Horsfield, 2020), что подтверждается и результатами настоящей работы.

ОВ баженовской формации находится в пределах главной зоны нефтеобразования, оценка зрелости сопровождается рядом методических ограничений. При использовании углепетрографических методов они связаны, в частности, с изменением оптических свойств битуминита (изменение цвета с серого на коричневый), что может приводить к занижению значений RB. В связи с этим в предыдущей главе были подробно рассмотрены оптические признаки трансформации органического вещества, которые необходимо учитывать при интерпретации показателей отражения. При проведении углепетрографических исследований в данной работе измерения показателя отражения выполнялись по битуминиту и онихитам. Диноцисты потенциально могут использоваться для оценки зрелости, однако их неоднородная сохранность и часто переотложенный характер не позволяют использовать их наравне с битуминитом и онихитами.

Различными исследователями (Hartkopf-Fröder et al., 2015; Schmidt et al., 2019) предложен ряд эмпирических формул пересчёта показателя отражения битуминита (BR) в показатель отражения эквивалента витринита ($VR_{eq.}$) (Таблица 4). В то же время, трудности применения подобных формул на низких стадиях преобразованности органического вещества ($RV < 1,3\%$) подробно обсуждаются Й. Шмидтом с соавторами (Schmidt et al., 2019), которые предложили уточнённые зависимости на основе анализа 264 образцов.

Таблица 4. Формулы пересчета показателя отражения битуминита BR в показатель отражения эквивалента витринита ($VR_{eq.}/RV_{eq.}$) по данным различных авторов (Schmidt et al., 2019)

Публикация	Формула пересчета
Jacob (1985)	$VR_{eq. BR} = 0.668 * BR + 0.4$
Jacob (1989)	$VR_{eq. BR} = 0.618 * BR + 0.4$
Bertrand (1990)	$VR_{eq. BR} = (BR + 0.03) / 0.96$
Bertrand (1993)	$VR_{eq. BR} = (BR - 0.13) / 0.87$
Riediger (1993)	(BR < 0.72%) = Jacob (1989) (BR > 0.72%) $VR_{eq. BR} = 0.277 * BR + 0.57$
Liu, Shi (1994)	$VR_{eq. BR} = 0.668 * BR + 0.346$
Landis, Castaño (1995)	$VR_{eq. BR} = (BR + 0.41) / 1.09$
Bertrand, Malo (2001)	$VR_{eq. BR} = (BR - 0.059) / 0.936$
Schoenherr et al. (2007)	$VR_{eq. BR} = (BR + 0.2443) / 1.0495$
Bertrand, Malo (2012) для известняков	$VR_{eq. BR} = 1.25 * BR^{0.904}$
Bertrand, Malo (2012) для глинистых сланцев и мергелей	$VR_{eq. BR} = 0.8113 * BR^{1.2438}$
Wei et al. (2016)	$VR_{eq. BR} = 0.83 * BR + 0.22$
Mählmann, Le Bayon (2016)	$BR_{maxeq}, VR_{max} = -0.519 + 1.341 * VR_{max} - 0.0977 * VR_{max}^2 + 0.0151 * VR_{max}^3$
Liu et al. (2017)	$VR_{eq. BR} = 0.5992 * BR + 0.3987$

Несмотря на существующие ограничения, пересчёт показателя отражения битуминита в показатель отражения эквивалента витринита широко применяется и остаётся оправданным при наличии однородных и хорошо различимых площадок для измерений. В условиях, когда битуминит представлен тонкими и невыдержанными прослоями и не всегда пригоден для измерений, использование онихитов в качестве альтернативного объекта для оценки зрелости представляется обоснованным. В рамках данной работы, ввиду ограниченного объёма выборки, не представляется возможным предложить или обосновать универсальную

формулу пересчёта для условий Западной Сибири. Для этого требуется расширение стратиграфического диапазона с привлечением нижележащих и вышележащих углистых отложений, что позволит как уточнить существующие зависимости, так и оценить применимость опубликованных формул. В этой связи при интерпретации степени зрелости органического вещества особое значение приобретает использование прямых признаков его преобразования, таких как изменение окраски органического вещества, характер свечения в ультрафиолетовом свете, а также морфологические особенности мацералов. Комплексный учёт этих признаков в сочетании с измерениями показателя отражения позволяет повысить надёжность оценки степени катагенетической преобразованности органического вещества. При необходимости пересчёта значений в эквивалент витринита использовалась формула Jacob (1985), как одна из наиболее распространённых в литературе. Например, для образца «17,16» при $RV = 0,64\%$ расчётное значение RV_{eq} составляет $0,83\%$.

5.3. Латеральная катагенетическая зональность БВУФ

Процесс обобщения данных для построения схем и карт катагенеза представляет собой сложную и трудоёмкую задачу, что обусловлено выраженной неоднородностью разреза даже в пределах одной скважины. В нефтематеринских толщах эта неоднородность проявляется в вариациях мацерального состава, содержании органического вещества, литологических особенностях и неодинаковых условиях термической истории, что приводит к существенному разбросу значений показателей зрелости на малых глубинных интервалах. В результате такие параметры, как T_{max} или показатели отражения, могут варьировать как в пределах одного образца, так и по разрезу одной скважины, не всегда напрямую отражая региональный уровень катагенетической преобразованности.

Следует учитывать, что методы исследования фиксируют различные уровни организации вещества. Углететрографические наблюдения позволяют детально охарактеризовать состояние отдельных мацералов на микроуровне, выявляя локальные особенности преобразования органического вещества. Однако такая детальность одновременно ограничивает возможность прямого экстраполирования результатов на масштаб разреза и тем более площади. Напротив, пиролитические и другие геохимические методы отражают интегральный отклик всего органического вещества образца, что делает их более пригодными для выявления региональных закономерностей и построения карт катагенеза.

В связи с этим при переходе от уровня отдельного образца и скважины к региональному обобщению необходимо сочетание методов: валовые геохимические параметры используются в качестве основы для картирования, тогда как углететрографические данные служат инструментом уточнения и интерпретации, позволяя учитывать влияние мацерального состава и корректно оценивать степень зрелости органического вещества.

А.Н. Фомин совместно с А.Э. Конторовичем обобщили обширный массив данных по степени зрелости юрских и меловых отложений Западной Сибири и на этой основе построили региональные карты катагенеза (Конторович и др., 2009; Фомин и др., 2001; Фомин, 2011). Для территории Западной Сибири характерен классический региональный рост катагенеза с увеличением глубины залегания, что наглядно иллюстрируется разрезом сверхглубокой скважины Тюменская СГ-6, вскрывшей разрез до глубины 7502 м (Рисунок 73) (Долженко и др., 2017).

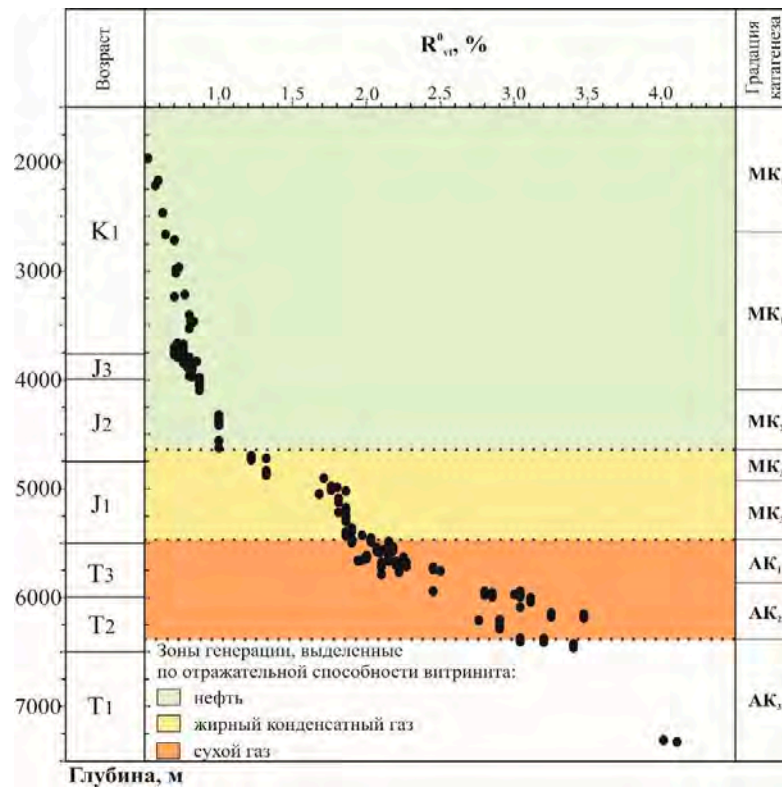


Рисунок 73. Рост катагенеза с глубиной в разрезе скв. Тюменская СГ-6 по показателю отражения витринита (Долженко и др., 2017)

Гидротермальная деятельность в пределах Красноленинского свода подробно описана в работах Г.А. Калмыкова с соавторами (Карпова и др., 2021; Gafurova et al., 2024; Калмыков и др., 2024). Аналогичные закономерности фиксируются и по данным автора: Каменная вершина, Верхнеляминский вал и Салымский мегавал характеризуются более высоким уровнем катагенеза по сравнению с прилегающими территориями. Локальные тренды повышенной зрелости приурочены к зонам флюидопроводящих разломов и/или гранитных массивов, в частности к отдельным скважинам на Каменной вершине Красноленинского свода. Для Сургутского свода, напротив, характерен более плавный и закономерный рост катагенеза с глубиной.

Следует отметить, что глубины исследованных в данной работе образцов, как правило, не превышают 3000 м, за исключением образцов, приуроченных к Гыданскому своду, где глубины достигают 3500 м.

Коллективом кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ им. М.В. Ломоносова была построена схема катагенетической преобразованности органического вещества по результатам пиролитических исследований, в частности по индексу трансформации (Transformatio Ratio - TR) (Калмыков и др., 2024). Данная схема основана на «Схеме катагенеза органического вещества в кровле верхнеюрских отложений Западно-Сибирского мегабассейна», составленной А.Н. Фоминым при участии А.Э. Конторовича, В.О. Красавчикова и др. (Фомин, 2011)

В отличие от углепетрографических исследований, пиролитические анализы выполняются в значительно большем объёме: в среднем на одну скважину приходится 200–250 образцов, тогда как на углепетрографические исследования отбирается не более 20–30 образцов. В качестве интегрального показателя зрелости коллективом кафедры геологии геохимии горючих ископаемых был выбран индекс трансформации, а не T_{max} , поскольку последний подвержен влиянию ряда факторов, что выражается в разбросе значений до 10–15 °С даже в пределах одной скважины.

Индекс трансформации рассчитывался на основе водородного индекса (HI) по формуле:

$$TR = \frac{HI_0 - HI}{HI_0} \cdot 100\%,$$

где HI_0 - водородный индекс ОВ на стадии катагенеза ПК₃, который условно был выбран равным 715 мг УВ/г ТОС,

HI - водородный индекс, рассчитанный по результатам пиролиза образца после экстракции.

Совокупность пиролитических и углепетрографических данных охватывает преимущественно центральную часть Западной Сибири, включая Красноленинскую, Фроловскую и Среднеобскую нефтегазоносные области (НГО). Отдельные скважины представлены в пределах Каймысовской, Надым-Пурской, Пур-Тазовской и Гыданской НГО. Самой южной точкой исследований является скважина, расположенная в пределах Игольско-Талового вала, самой северной — скважины Гыданского свода. Для Красноленинской, Фроловской и Среднеобской НГО характерны значения TR 10–35 %, соответствующие градации МК₁; локально выделяются участки с TR 35–60 % (МК₂). Лишь отдельные скважины демонстрируют повышенный катагенез, соответствующий МК₃ и выше (TR 70–100 %). Районирование тектонических элементов выполнялось по карте А.В. Шпильмана (Шпильман, 2008).

Так, **TR 0-30%** выделяется на Эргинском валу, Зимнем валу, Ендырском валу Фроловой мегавпадины, юго-восточной части Салымского и Верхнесалымского мегавалов, северо-западе Юганской мегавпадины, центральной части Каймысовского свода, севере Пологрудовского

мегавала, центральной части Игольско-Талового вала, центральной части Русско-Часельского вала.

TR 30-50% - на Малобалыкской седловине, Усть-Балык-Мамонтовском валу Сургутского свода, Гыданском своде, Хадырьяхинском выступе, Губкинском валу, Ем-Еговской вершине, Талинской террасе Красноленинского свода.

TR 50-75% на Ем-Еговской вершине Красноленинского свода, центральной части Тундринской котловины Фроловской мегавпадины, Етыпурском мегавалу.

TR 75-100% на Каменной вершине, Талинской террасе Красноленинского свода, Верхнеляминском валу Фроловской мегавпадины, Салымском мегавалу и Нижнепурском мегапрогибе. Подобные локальные участки с повышенной зрелостью могут быть связаны с гидротермальной деятельностью (Калмыков и др., 2024; Карпова и др., 2021).

Автором были уточнены некоторые зоны на схеме катагенеза (Рисунок 74), а именно с повышенным катагенезом (TR 75-95%). Данные зоны подтверждаются данными углепетрографии, а именно показателем отражения битуминита и онихитов. Автор намеренно на данном этапе не использует эквиваленты и формулы пересчета, т.к. они содержат определенные погрешности, которые были описаны выше. Так, для повышенной зрелости по TR данные RV составляют 0,65-0,7% R_{onh} - 0,6-0,8%. На схему катагенеза были нанесены уточнения по показателю отражения. Были скорректированы границы четырех областей (Рисунок 74). Для месторождений в трех областях (Фроловская, Каймысовская, Пур-Тазовская НГО) была уточнена и присвоена градация катагенеза МК₁, показатель отражения битуминита и онихитов – 0,28-0,34%. Для месторождений Среднеобской НГО - МК₂, показатель отражения онихитов – 0,35-0,65%.

Области на карте: **Фроловская НГО.** Ендырский вал, Тундринская котловина Фроловской мегавпадины. **Каймысовская НГО.** Пологрудовский мегавал, Каймысовский свод, Игольско-Таловый вал. **Среднеобская НГО.** Усть-Балык-Мамонтовский вал Сургутского свода. **Пур-Тазовская НГО.** Русско-Часельский вал.

Выполненный анализ показал, что оценка степени зрелости органического вещества в баженовской высокоуглеродистой формации Западной Сибири требует применения комплекса методов, поскольку сингенетичный витринит в толще отсутствует, а мацеральный состав характеризуется компонентами группы липтинита и зоокластами. В связи с этим обосновано использование альтернативных оптических индикаторов зрелости — показателя отражения битуминита и онихитов, а также пиролитических параметров, что соответствует современным представлениям о нефтематеринских толщах без витринита.

Пиролитические данные характеризуются широким диапазоном содержания органического вещества (ТОС 0,89–32 %) и значений T_{max} (418–461 °С), что соответствует

интервалу главной зоны нефтеобразования. Органическое вещество преимущественно относится ко II типу и контролируется мацералами группы липтинита, прежде всего битуминитом. При этом вариации водородного индекса и T_{max} отражают не только степень зрелости, но и существенную неоднородность мацерального состава: высокие значения HI (>700 мг УВ/г ТОС) связаны с обогащением ламальгинитом, тогда как низкие (<150 мг УВ/г ТОС) — с преобладанием постгенерационного битуминита. В этих условиях T_{max} демонстрирует ограниченную применимость как самостоятельный индикатор зрелости, в том числе из-за эффекта его занижения, характерного для высокоуглеродистых сланцевых формаций.

Оптические показатели зрелости, напротив, позволяют более дифференцированно оценивать степень преобразованности органического вещества. Значения показателя отражения битуминита и онихитов изменяются в сопоставимых диапазонах (RB: 0,19–0,65 %; Ronh: 0,18–0,65 %) и характеризуются высокой степенью корреляции, что подтверждается тесной линейной зависимостью между ними ($R^2 \approx 0,94$). Это позволяет рассматривать онихиты как полноценный альтернативный индикатор зрелости, особенно в тех случаях, когда битуминит представлен в виде тонких или неоднородных участков и затруднён для измерений. При этом для онихитов характерна вариабельность значений показателя отражения, связанная с их зональным строением, а сопоставление с показателем отражения битуминита обосновывает использование минимальных значений как наиболее корректных при интерпретации.

Сопоставление пиролитических и углепетрографических параметров показало, что в пределах рассматриваемого интервала зрелости (МК₁–МК₃) связь между T_{max} и показателями отражения выражена слабо. Это обусловлено как узким диапазоном зрелости, так и различной природой этих показателей: T_{max} является валовым параметром, тогда как RB и Ronh характеризуют отдельные мацералы. В результате использование универсальных зависимостей типа T_{max} –R для баженовской свиты оказывается ограниченным.

В качестве более устойчивого интегрального показателя зрелости выступает индекс трансформации (TR), рассчитываемый по водородному индексу. Его применение позволяет нивелировать влияние мацеральной неоднородности и выполнить районирование степени катагенеза. Основная часть исследованной территории соответствует градациям МК₁–МК₂ (TR 10–60 %), тогда как локальные зоны повышенной зрелости (TR до 75–100 %) приурочены к тектонически активным элементам и, вероятно, связаны с гидротермальными процессами и зонами флюидопроводящих разломов. Интеграция пиролитических и углепетрографических данных позволила уточнить границы площадного распространения зон катагенеза и связать их с конкретными диапазонами значений показателей отражения битуминита и онихитов. При этом применение формул пересчёта в эквивалент витринита возможно лишь условно и сопровождается методическими ограничениями, особенно в узком диапазоне зрелости.

Таким образом, оценка степени катагенетической преобразованности органического вещества БВУФ должна основываться на комплексном подходе, учитывающем мацеральный состав, оптические характеристики и пиролитические параметры, а также геологическое строение территории.

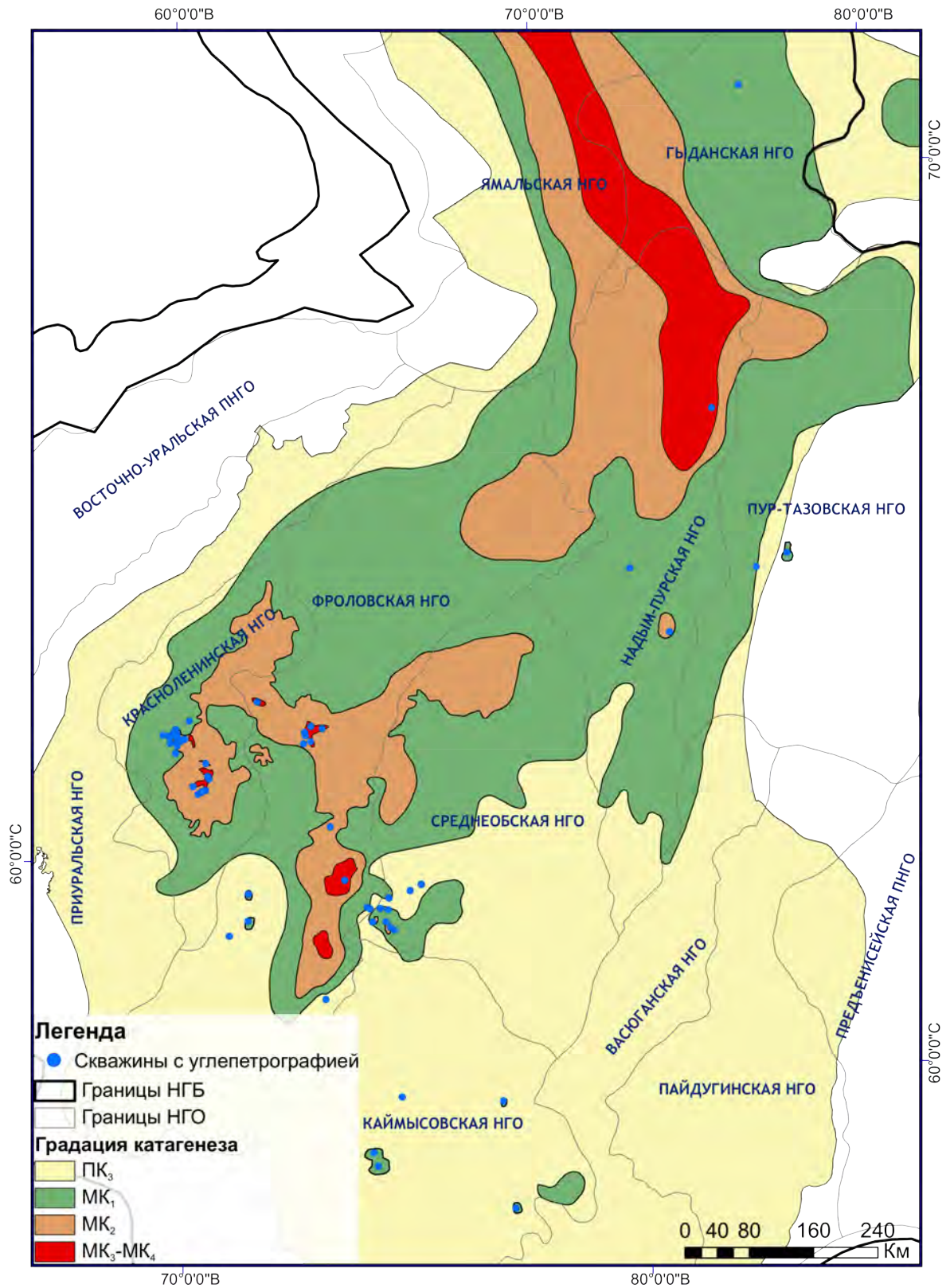


Рисунок 74. Уточненная схема катагенеза по углепетрографическим данным (Калмыков и др., 2024 с изменениями)

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что органическое вещество баженовской высокоуглеродистой формации Западной Сибири характеризуется выраженной неоднородностью мацерального состава, обусловленной как условиями осадконакопления, так и исходным биоразнообразием. Основную массу органического вещества формируют нефтематеринские мацералы группы липтинита — битуминит и альгинит, при значительной роли зоокластов, прежде всего онихитов. Количественные соотношения указанных компонентов систематически изменяются по разрезу, что определяет вариации генерационного потенциала органического вещества.

Показано, что традиционное представление органического вещества баженовской свиты и ее возрастных аналогов как «аморфной массы» не отражает его реального строения. Применение современной оптической аппаратуры и люминесцентных методов позволило детально идентифицировать микрокомпоненты, проследить особенности их морфологии, пространственного распределения и оптических свойств, что обеспечило переход к количественной характеристике мацерального состава рассеянного органического вещества.

Установлено, что нефтематеринские мацералы БВУФ претерпевают закономерные изменения оптических признаков в процессе катагенеза, включая изменение цвета в отражённом свете, трансформацию интенсивности и характера люминесценции, развитие вторичной пористости и образование битумных плёнок. Данные признаки отражают развитие процессов нефтегенерации и проявляются с различной степенью и последовательностью для разных мацералов.

Результаты экспериментов по гидропиролизу подтвердили, что наблюдаемые в природных образцах изменения являются следствием катагенетических преобразований органического вещества. В лабораторных условиях получены аналогичные изменения мацералов БВУФ, что обосновывает использование указанных признаков в качестве диагностических индикаторов стадии преобразованности органического вещества.

Показано, что оценка степени зрелости органического вещества БВУФ требует комплексного подхода, поскольку сингенетичный витринит в толще отсутствует, а мацеральный состав представлен преимущественно липтинитом и зоокластами. Обосновано использование альтернативных оптических индикаторов — показателей отражения битуминита и онихитов, а также пиролитических параметров (T_{\max} , HI, TR). Установлено, что показатели отражения битуминита и онихитов изменяются в едином диапазоне и характеризуются высокой степенью корреляции ($R^2 \approx 0,94$), что позволяет рассматривать онихиты как надёжный дополнительный индикатор зрелости, особенно при ограниченной пригодности битуминита для измерений.

Применение индекса трансформации (TR), рассчитанного по водородному индексу, позволило снизить влияние указанных ограничений и выполнить более устойчивое районирование степени катагенетической преобразованности органического вещества. Установлено, что основная часть территории соответствует грациям МК₁–МК₂ (TR 10–60 %), тогда как локальные зоны повышенной зрелости (TR 75–95 %) приурочены к тектоническим элементам и, вероятно, связаны с гидротермальной активностью и зонами флюидопроводящих разломов.

На основе интеграции пиролитических и углепетрографических данных уточнены отдельные участки схемы катагенетической зональности Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Показано, что комплексный подход обеспечивает более достоверную интерпретацию степени зрелости органического вещества и позволяет выявлять локальные особенности тепловой эволюции бассейна. Применение универсальных формул пересчёта показателей отражения в эквивалент витринита для БВУФ является методически ограниченным и может приводить к дополнительным погрешностям.

Таким образом, выполненная работа подтверждает необходимость комплексного использования углепетрографических и пиролитических методов при изучении нефтегазоматеринских толщ без витринита. Продемонстрирована возможность применения показателей отражения битуминита и онихитов в качестве количественных индикаторов зрелости органического вещества. Полученные результаты расширяют представления о составе, строении и преобразованности органического вещества баженовской высокоуглеродистой формации и могут быть использованы при оценке генерационного потенциала и прогнозе трудноизвлекаемых запасов углеводородов Западной Сибири, а также в других нефтегазоматеринских толщ (доманиковский горизонт, куонамская и хадумская свиты).

Список литературы

1. Алексеев В.П., Журавлёва Д.Д., Красковская Т.Ф., Пронина Н.В., Русский В.И., Свечников Л.И., Фёдоров Ю.Н. Угленасыщенность, петрографический состав и метаморфизм углей тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района (Западная Сибирь) / под ред. В.П. Алексеева. — Екатеринбург : УГГУ, 2006. — 158 с.
2. Амон Э.О. Радиоларии в баженовской свите (волжский ярус) Широкого Приобья, Западная Сибирь // Ежегодник-2010. Труды ИГГ УрО РАН. — 2011. — Вып. 158. — С. 3–8.
3. Амон Э.О., Вишневская В.С., Гатовский Ю.А., Жегалло Е.А. К вопросу о разнообразии микрофоссилий баженовского горизонта Западной Сибири (поздняя юра — ранний мел) // Георесурсы. — 2021. — Т. 23. — № 3. — С. 118–131. — DOI: 10.18599/grs.2021.3.15.
4. Аммосов И.И., Бабашкин Б.Г., Гречишников Н.П. Промышленно-генетическая классификация углей СССР. — М. : Наука, 1964. — 176 с.
5. Аммосов И.И., Ерёмин И.В. Трещиноватость углей. — М. : Издательство Академии наук СССР, 1960. — 108 с.
6. Андреев Б., Козлова Е.В., Булатов Т.Д., Карамов Т.И., Леушина Е.А., Широкова В.В., Бажанова А.Е., Вайтехович А.П., Пронина Н.В., Дударев В.В., Колесов В.В., Спасенных М.Ю. Идентификация очага низкотемпературной генерации углеводородов на южной периферии Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. — 2025. — Т. 27. — № 4. — С. 192–215. — DOI: 10.18599/grs.2025.4.13.
7. Баженова Т.К. Смешанные породы, содержащие некарбонатный углерод // Систематика и классификации осадочных пород и их аналогов / под ред. В.Н. Шванова. — СПб. : Недра, 1998. — С. 265–267.
8. Богатырева И.Я., Коточкова Ю.А., Балущкина Н.С., Хотылев О.В., Фомина М.М., Тюрина Н.А., Яблоновский Б.И., Калмыков Г.А. Структурно-фациальная типизация разрезов баженовской высокоуглеродистой формации Западно-Сибирского бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2024. — № 1. — С. 66–82. — DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-66-82.
9. Болдушевская Л.Н. Геохимические критерии прогноза нефтегазоносности мезозойских отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба и северо-востока Западно-Сибирской плиты : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.09 / Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья. — Красноярск, 2001. — 205 с.
10. Брадучан Ю.В., Гольберт А.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А., Булыникова С.П., Климова И.Г., Месежников М.С., Вячкилева Н.П., Козлова Г.Э., Лебедев А.И., Нальняева Т.И., Турбина А.С. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтегазоносность). — Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1986. — 216 с.

11. Булатов Т.Д., Козлова Е.В., Пронина Н.В., Коробова Н.И., Леушина Е.А., Воропаев А.В., Панченко И.В., Морозов Н.В., Спасенных М.Ю. Кероген I типа в породах баженовской свиты Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2021. — № 6. — С. 110–119. — DOI: 10.33623/0579-9406-2021-6-110-119.
12. Бурлин А.И., Конюхов Е.Е., Карнюшина Е.Е. Литология нефтегазоносных толщ : учеб. пособие для вузов. — М. : Недра, 1991. — 286 с.
13. Вайтехович А.П., Пронина Н.В., Коточкова Ю.А. Онихиты в баженовском горизонте // Успехи органической геохимии — 2022. Новосибирск, 2022. С. 35–37. <https://doi.org/10.25205/978-5-4437-1312-0-35-37>
14. Вайтехович А.П., Пронина Н.В. Оптические свойства онихитов в баженовской высокоуглеродистой формации // Современные вопросы литологии, морской геологии, геохимии и петрофизики – 2026. Наука. Обучение. Практика: тезисы докладов научно-практического форума с международным участием (Москва, 28–30 января 2026 г.). М.: МАКС Пресс, 2026. С. 74–77.
15. Вассоевич Н.Б. Геохимия органического вещества и происхождение нефти : избранные труды. — М. : Наука, 1986. — 304 с.
16. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Известия АН СССР. Серия геологическая. — 1967. — № 6. — С. 135–157.
17. Вишневская В.С. Юрско-меловые «кальцисфериды» России и методы их исследования // Экзолит-2018. Литогенез: стадийность, процессы и диагностика : материалы конференции. — 2018. — С. 17–19.
18. Вишневская В.С., Амон Э.О., Гатовский Ю.А. Радиолариевая биостратиграфия баженовского горизонта (верхняя юра — нижний мел) Западной Сибири // Стратиграфия. Геологическая корреляция. — 2020. — Т. 28. — № 6. — С. 105–124.
19. Возженникова Т.Ф. Диноцисты и их стратиграфическое значение / под ред. А.Ф. Хлоновой. — Новосибирск : Наука, 1979. — 227 с. — (Труды Института геологии и геофизики. Вып. 422).
20. Геология нефти и газа Западной Сибири / Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. — М. : Недра, 1975. — 679 с.
21. Голицын М.В., Вялов В.И., Пронина Н.В. Развитие науки об угле в СССР и России // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2015. — № 4. — С. 11–21.
22. ГОСТ Р 58221—2018 (ИСО 7404-1:2016). Методы петрографического анализа углей. Ч. 1: Словарь терминов. — М. : Стандартинформ, 2018.

23. ГОСТ Р 55663—2013 (ИСО 7404-2:2009). Методы петрографического анализа углей. Ч. 2: Методы подготовки проб углей. — М. : Стандартинформ, 2014.
24. ГОСТ Р 55662—2013 (ИСО 7404-3:2009). Методы петрографического анализа углей. Ч. 3: Методы определения мацерального состава. — М. : Стандартинформ, 2014.
25. ГОСТ Р 55659—2013 (ИСО 7404-5:2009). Методы петрографического анализа углей. Ч. 5: Метод определения показателя отражения витринита с помощью микроскопа. — М. : Стандартинформ, 2014.
26. Гурари Ф.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья. — Л. : Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1959. — 182 с.
27. Гурари Ф.Г., Девятов В.П., Демин В.И., Еханин А.Е., Казаков А.М., Касаткина Г.В., Шиганова О.В. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней–средней юры Западно-Сибирской провинции. — Новосибирск : СНИИГГиМС, 2005. — 156 с.
28. Долженко К.В., Сафронов П.И., Фомин А.Н., Меленевский В.Н. Изучение органического вещества баженовской свиты и моделирование процессов генерации углеводородов по материалам скважины Тюменская СГ-6 (Западная Сибирь) // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2017. — Т. 2. — № 1. — С. 106–110.
29. Жемчужников Ю.А. Введение в петрографию угля. — 2-е изд. — М. : ОНТИ, 1934. — 224 с.
30. Жемчужников Ю.А., Гинзбург А.И. Основы петрологии углей. — М. : Издательство Академии наук СССР, 1960. — 179 с.
31. Жизнь растений: в 6 т. Т. 3: Водоросли. Лишайники / под ред. А.Л. Фёдорова, М.М. Голлербаха. — М. : Просвещение, 1977. — 487 с.
32. Захаров В.А. Условия формирования волжско-берриасской высокоуглеродистой баженовской свиты Западной Сибири по данным палеоэкологии // Эволюция биосферы и биоразнообразие. — М. : Т-во научных изданий КМК, 2006. — С. 552–568.
33. Захаров В.А., Сакс В.Н. Баженовское (волжско-берриасское) море Западной Сибири // Палеобиогеография и биостратиграфия юры и мела Сибири. — М. : Наука, 1983. — С. 5–32.
34. Зубков М.Ю. Кероген черных сланцев — источник вторичной пористости // Геохимия сложнопостроенных месторождений нефти и газа: сборник научных трудов ЗапСибНИГНИ. — Тюмень, 1988. — С. 62–71.
35. Ископаемые известковые водоросли (морфология, систематика, методы изучения) / Чувашов Б.И., Лучинина В.А., Шуйский В.П., Шайкин И.М., Берченко О.И., Ищенко А.А., Салтовская В.Д., Ширшова Д.И. — Новосибирск : Наука, 1987. — 225 с.
36. Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.12 / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. — М., 2016. — 391 с.

37. Калмыков Г.А., Балушкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. — М. : ГЕОС, 2017. — 247 с.
38. Калмыков Г.А., Карпова Е.В., Балушкина Н.С., Хотылев А.О., Краснова Е.А., Иванова Д.А., Савостин Г.Г., Калмыков А.Г. Гидротермально-метасоматическая проработка осадочного чехла как один из факторов формирования залежей нефти и газа // Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича (29 января — 1 февраля 2024 г.). — 2024. — С. 79–81.
39. Карпова Е.В., Хотылев А.О., Мануилова Е.А., Майоров А.А., Краснова Е.А., Хотылев О.В., Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Калмыков А.Г. Гидротермально-метасоматические системы как важнейший фактор формирования элементов нефтегазоносного комплекса в баженовско-абалакских отложениях // Георесурсы. — 2021. — Т. 23. — № 2. — С. 142–151.
40. Козлова Е.В., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. Формы нахождения углеводородов в породах баженовской свиты // Геофизика. — 2015а. — № 3. — С. 15–22.
41. Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Балушкина Н.С., Пронина Н.В., и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогенонасыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2015б. — № 5. — С. 44–53.
42. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Данилова В.П., Москвин В.И., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. — 2014. — Т. 55. — № 5–6. — С. 745–776.
43. Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54. — № 8. — С. 972–1012.
44. Конторович А.Э., Фомин А.Н., Красавчиков В.О., Истомин А.В. Катагенез органического вещества в кровле и подошве юрского комплекса Западно-Сибирского мегабассейна // Геология и геофизика. — 2009. — Т. 50. — № 11. — С. 1191–1200.
45. Макарова О.М., Коробова Н.И., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А. Состав и коллекторские свойства отложений баженовской свиты в центральной части Тундринской котловины // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2018. — № 1. — С. 107–111.
46. Марунова Д. А., Пронина Н. В., Калмыков А. Г., Иванова Д. А., Савостин Г. Г., **Вайтехович А. П.**, Калмыков Г. А. Эволюция биокластов при катагенезе в породах баженовского

- горизонта на территории Фроловской нефтегазоносной области // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2023. № 5. С. 87–95. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-87-95.
47. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии) : учеб. пособие. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996. — 448 с.
48. Обласов Н.В. Геохимия углистого органического вещества и его роль в формировании месторождений нефти и газа на территории Томской области : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.09 / АО «ТомскНИПИнефть». — Томск, 2010. — 155 с.
49. Панченко И.В. Событийно-стратиграфические уровни верхнеюрско-нижнемеловой черносланцевой толщи Западной Сибири : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.02 / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. — М., 2023. — 287 с.
50. Панченко И.В., Балущкина Н.С., Барабошкин Е.Ю., Вишневская В.С., Калмыков Г.А., Шурекова О.В. Комплексы палеобиоты в абалакско-баженовских отложениях центральной части Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2015. — Т. 10. — № 2. — Ст. 24. — DOI: 10.17353/2070-5379/24_2015.
51. Панченко И.В., Немова В.Д., Смирнова М.Е., Ильина М.В., Барабошкин Е.Ю., Ильин В.С. Стратификация и детальная корреляция баженовского горизонта в центральной части Западной Сибири по данным литолого-палеонтологического изучения керн и ГИС // Геология нефти и газа. — 2016. — № 6. — С. 22–34.
52. Парпарова Г.М., Жукова А.В. Угленепетрографические методы в изучении осадочных пород и полезных ископаемых. — Л. : Недра, 1990. — 308 с.
53. Парпарова Г.М., Неручев С.Г., Жукова А.В., Трушков П.А., Баженова Т.К., Буряк В.Н., Дьяконов А.И., Зеличенко И.А., Калмыков Г.С., Котов В.С., Кобахидзе А.Д., Лебедев Б.А., Лебедева Г.В., Макаров К.К., Рогозина Г.А., Соболев В.С., Чичуа Б.К., Шуменкова Ю.М. Катагенез и нефтегазоносность. — Л. : Недра, 1981. — 240 с.
54. Парпарова Г.М., Неручев С.Г., Жукова А.В., Лопатин В.В. Новые данные о биопродуцентах сапропелевого органического вещества «черносланцевых» отложений (в связи с формированием их нефтегазоматеринского потенциала) // Горючие сланцы. — 1988. — № 4. — С. 356–364.
55. Пронина Н.В., Вайтехович А.П. Прямые признаки нефтеобразования в породах баженовской свиты // Георесурсы. — 2021. — Т. 23. — № 2. — С. 152–157. — DOI: 10.18599/grs.2021.2.15.
56. Пронина Н.В., Вайтехович А.П., Калмыков А.Г., Марунова Д.А. Значение определений мацералов для понимания и изучения процессов трансформации органического вещества нефтематеринских пород // Георесурсы. — 2022. — Т. 24. — № 2. — С. 29–35. — DOI: 10.18599/grs.2022.2.6.

57. Рогов М.А., Бизиков В.А., Мироненко А.А., Ипполитов А.П., Панченко И.В. Мегаонихиты (Coleoidea, Cephalopoda) в поздней юре и раннем мелу Северного полушария // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии: материалы VII Всероссийского совещания. — М. : ГИН РАН, 2017. — С. 192–196.
58. Рудкевич М.Я., Озеранская Л.С., Чистякова Н.Ф., Корнев В.А., Максимов Е.М. Нефтегазоносные комплексы Западно-Сибирского бассейна. — М. : Недра, 1988. — 303 с.
59. Рыжкова С.В., Бурштейн Л.М., Ершов С.В., Казаненков В.А., Конторович А.Э., Конторович В.А. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 7. — С. 1053–1074.
60. Савостин Г. Г., Калмыков А. Г., Вайтехович А. П., Пронина Н. В., Грязнова Д. А., Марунова Д. А., Калмыков Г. А. Изменение характеристик керогена и минеральной матрицы пород баженовских отложений при лабораторном моделировании гидротермальных процессов // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 3. С. 206–219. DOI: 10.18599/grs.2024.3.21.
61. Сакс В.Н., Нальняева Т.И. Верхнеюрские и нижнемеловые белемниты севера СССР. Т. 2: Роды *Rachyteuthis* и *Acroteuthis*. — М. : Наука, 1966. — 207 с.
62. Стафеев А.Н., Ступакова А.В., Сулова А.А., Гиладев Р.М., Шелков Е.С., Книппер А.А. Баженовский горизонт Сибири (титон — нижний берриас): тектонические и гидродинамические условия осадконакопления // Георесурсы. — 2019. — Т. 21. — № 2. — С. 117–128. — DOI: 10.18599/grs.2019.2.117-128.
63. Стафеев А.Н., Ступакова А.В., Сулова А.А., Гиладев Р.М. Обстановки осадконакопления и палеогеографическая зональность баженовского горизонта (титон — нижний берриас) Западной Сибири // Георесурсы. — 2017. — Спец. вып. — С. 134–143. — DOI: 10.18599/grs.19.14.
64. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И. Развитие идей в области познания вещественно-петрографического состава и генезиса органического вещества // Литология в исследованиях Геологического института АН СССР. — М. : Наука, 1980. — С. 96–109.
65. Топчий М.С., Пронина Н.В., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А., Фомина М.М., Карпов Ю.А., Козлова Е.В., Фадеева Н.П. Распределение органического вещества в породах баженовской высокоуглеродистой формации // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2019. — № 2. — С. 46–56. — DOI: 10.33623/0579-9406-2019-2-46-56.
66. Трушков П.В. Геохимические аспекты формирования нефтегазоносности мелового и юрского комплексов на юге Тюменской области : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 1.6.11 / АО «ТомскНИПИнефть». — Томск, 2024. — 203 с.

67. Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). — М. : Геоинформцентр, 2003. — 604 с.
68. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских (триас — юра) и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.12. — Новосибирск, 2005. — 351 с.
69. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. — Новосибирск : ИНГГ СО РАН, 2011. — 331 с.
70. Фомин А.Н., Горохова В.Е. Мацеральный состав и условия формирования углей тюменской свиты на юго-востоке Западно-Сибирского мегабассейна // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2024. — № 46 (60). — С. 23–31. — DOI: 10.20403/2078-0575-2024-4b-23-31.
71. Фомин А.Н., Конторович А.Э., Красавчиков В.О. Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности юрских, триасовых и палеозойских отложений северных районов Западно-Сибирского мегабассейна // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 11–12. — С. 1875–1887.
72. Хотылев А.О., Майоров А.А., Худолей А.К., Ершова В.Б., Калмыков Г.А., Хубанов В.Б., Червяковская М.В. Гранитоидные массивы Красноленинского свода в Западной Сибири: состав, строение, возраст и условия формирования // Геотектоника. — 2021а. — № 2. — С. 70–93.
73. Хотылев О.В., Гатовский Ю.А., Балушкина Н.С., Коточкова Ю.А., Коробова Н.И., Фомина М.М., Карпова Е.В., Калмыков Г.А. Модели седиментации баженовской высокоуглеродистой формации в зоне развития тутлеимской и баженовской свит // Георесурсы. — 2021б. — Т. 23. — № 2. — С. 120–131. — DOI: 10.18599/grs.2021.2.11.
74. Шпильман А.В. Тектоническая карта Западно-Сибирской плиты. — Тюмень : ГП «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», 2008. — Масштаб 1:2 500 000.
75. Шпильман В.И. Тектоническая карта центральной части Западно-Сибирской плиты / под ред. В.И. Шпильмана, Н.И. Змановского, Л.Л. Подсосовой. — Тюмень : АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», 1998.
76. Эдер В.Г., Замирайлова А.Г. Литология баженовской свиты Западной Сибири. — Новосибирск : СО РАН, 2023. — 243 с.
77. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. — Л. : Недра, 1988. — 272 с.
78. Arysanto A., Burnaz L., Zheng T., Littke R. Geochemical and petrographic evaluation of hydrous pyrolysis experiments on core plugs of Lower Toarcian Posidonia Shale: Comparison of artificial

- and natural thermal maturity series // *International Journal of Coal Geology*. — 2024. — Vol. 284. — Article 104459. — DOI: 10.1016/j.coal.2024.104459.
79. Bulatov T., Kozlova E., Leushina E., Vaitekhovich A., Pronina N., Goncharova A., Kul'kov M., Salakhidinova G., Butyrin R., Bashanova A., Torshina L., Spasennykh M. Source rock potential and depositional environments of the Jurassic and Cretaceous coals from the Gyda Peninsula, Western Siberia // *International Journal of Coal Geology*. 2025. vol. 305. pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.coal.2025.104789.
80. Donovan D.T. The Jurassic and Cretaceous stratigraphy and palaeontology of Traill Ø, East Greenland. — Copenhagen : C.A. Reitzel, 1953. — Vol. 111. — No. 4.
81. Espitalié J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications // *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. — 1985. — Vol. 40. — No. 5. — P. 563–579.
82. Espitalié J., Laporte J.L., Madec M., Marquis F., Leplat P., Paulet J., Boutefeu A. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution // *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. — 1977. — Vol. 32. — No. 1. — P. 23–42.
83. Fuchs D., Hoffmann R. Treatise online no. 91: Part M, chapter 10: Arm armature in belemnoid coleoids // *Treatise Online*. — 2017.
84. Fuchs D., Hoffmann R., Klug C. Evolutionary development of the cephalopod arm armature: A review // *Swiss Journal of Palaeontology*. — 2021. — Vol. 140. — No. 1. — Article 27.
85. Gafurova D., Maltseva A., Kalmykov A., Mazzini A., Balushkina N., Karpova E., Khotylev A., Latypova M., Fomina M., Manuilova E., Kotochkova J., Ivanova D., Churkina V., Kalmykov G. Impact and implications of hydrothermal fluids migration in the Frolov hydrocarbon province in West Siberia // *Marine and Petroleum Geology*. — 2024. — Vol. 164. — Article 106826. — DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.106826.
86. Galloway J.M., Hadlari T., Dewing K., Poulton T., Grasby S.E., Reinhardt L. The silent VOICE— Searching for geochemical markers to track the impact of Late Jurassic rift tectonics // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2024. — Vol. 25. — Article e2024GC011490.
87. Gonçalves P.A., Kus J., Hackley P.C., Borrego A.G., Hámor-Vidó M., Kalkreuth W., Mendonça Filho J.G., Petersen H.I., Pickel W., Reinhardt M.J., Suárez-Ruiz I., International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The petrology of dispersed organic matter in sedimentary rocks: Review and update // *International Journal of Coal Geology*. — 2024. — Vol. 294. — Article 104604. — DOI: 10.1016/j.coal.2024.104604.
88. Goodarzi F. Organic petrography of graptolite fragments from Turkey // *Marine and Petroleum Geology*. — 1984. — Vol. 1. — No. 3. — P. 202–210. — DOI: 10.1016/0264-8172(84)90146-6.

89. Hackley P.C., Lewan M. Understanding and distinguishing reflectance measurements of solid bitumen and vitrinite using hydrous pyrolysis: Implications to petroleum assessment // *AAPG Bulletin*. — 2018. — Vol. 102. — No. 6. — P. 1119–1140.
90. Hackley P.C., Scott C., Birdwell J.E., Nedzweckas J.L., Valentine B.J., Zhang T., Nesheim T.O. Insights on using solid bitumen reflectance as a thermal maturity proxy in the Bakken Formation, Williston Basin, USA // *ACS Omega*. — 2024. — Vol. 9. — No. 31. — P. 33983–33997. — DOI: 10.1021/acsomega.4c03074.
91. Hackley P.C., Valentine B.J., Hatcherian J.J. On the petrographic distinction of bituminite from solid bitumen in immature to early mature source rocks // *International Journal of Coal Geology*. — 2018. — Vol. 196. — P. 232–245. — DOI: 10.1016/j.coal.2018.06.004.
92. Hammer Ø., et al. Large onychites (cephalopod hooks) from the Upper Jurassic of the Boreal Realm // *Acta Palaeontologica Polonica*. — 2013. — Vol. 58. — No. 4. — P. 827–835.
93. Hartkopf-Fröder C., Königshof P., Littke R., Schwarzbauer J. Optical thermal maturity parameters and organic geochemical alteration at low grade diagenesis to anchimetamorphism: A review // *International Journal of Coal Geology*. — 2015. — Vol. 150. — P. 74–119. — DOI: 10.1016/j.coal.2015.06.003.
94. Hoffmann R., Stevens K. The palaeobiology of belemnites—foundation for the interpretation of rostrum geochemistry // *Biological Reviews*. — 2020. — Vol. 95. — No. 1. — P. 94–123. — DOI: 10.1111/brv.12557.
95. Hunt S., Nixon M. A comparative study of protein composition in the chitin-protein complexes of the beak, pen, sucker disc, radula and oesophageal cuticle of cephalopods // *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*. — 1981. — Vol. 68. — No. 4. — P. 535–546. — DOI: 10.1016/0305-0491(81)90071-7.
96. International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). Classification of liptinite — ICCP system 1994 // *International Journal of Coal Geology*. — 2017. — Vol. 169. — P. 40–61. — DOI: 10.1016/j.coal.2016.11.004.
97. International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new inertinite classification (ICCP System 1994) // *Fuel*. — 2001. — Vol. 80. — P. 459–471.
98. International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The new vitrinite classification (ICCP System 1994) // *Fuel*. — 1998. — Vol. 77. — P. 349–358.
99. Jacob H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen (“migrabitumen”) // *International Journal of Coal Geology*. — 1989. — Vol. 11. — No. 1. — P. 65–79.
100. Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas // *Erdöl und Kohle-Erdgas*. — 1985. — Vol. 38. — P. 365.

101. Kulicki C., Szaniawski K. Cephalopod arm hooks from the Jurassic of Poland // *Acta Palaeontologica Polonica*. — 1972. — Vol. 17. — No. 3.
102. Lewan M.D. Laboratory simulation of petroleum formation: hydrous pyrolysis // *Organic Geochemistry: Principles and Applications*. — Boston : Springer US, 1993. — P. 419–442.
103. Lewan M.D., Winters J.C., McDonald J.H. Generation of oil-like pyrolyzates from organic-rich shales // *Science*. — 1979. — Vol. 203. — No. 4383. — P. 897–899.
104. Liu D.H., Shi J.C. Evaluation of early Palaeozoic carbonate source rocks // *Natural Gas Industry*. — 1994. — Vol. 14. — No. 6. — P. 32–36. — (in Chinese).
105. Liu X., Wang Q., Jia W., Song J., Peng P.A. Pyrolysis of an organic-rich shale containing type II kerogen before and after oil generation and expulsion: Implications for the generation of late hydrocarbon and hydrogen gases // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. — 2023. — Vol. 173. — Article 106105.
106. Luo Q., Goodarzi F., Zhong N., Wang Y., Qiu N., Skovsted C.B., Suchý V., Schovsbo N.H., Morga R., Xu Y., Hao J., Liu A., Wu J., Cao W., Min X., Wu J. Graptolites as fossil geothermometers and source material of hydrocarbons: An overview of four decades of progress // *Earth-Science Reviews*. — 2020. — Vol. 200. — Article 103000. — DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.103000.
107. Mastalerz M., Drobnik A., Stankiewicz A.B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review // *International Journal of Coal Geology*. — 2018. — Vol. 195. — P. 14–36. — DOI: 10.1016/j.coal.2018.05.013.
108. Mishra D.K., Hackley P.C., Jubb A.M., Sanders M.M., Agrawal S., Varma A.K. Maturation study of vitrinite in carbonaceous shales and coals: Insights from hydrous pyrolysis // *International Journal of Coal Geology*. — 2022. — Vol. 259. — Article 104044.
109. Petersen H.I., Schovsbo N.H., Nielsen A.T. Reflectance measurements of zooclasts and solid bitumen in Lower Paleozoic shales, southern Scandinavia: Correlation to vitrinite reflectance // *International Journal of Coal Geology*. — 2013. — Vol. 114. — P. 1–18. — DOI: 10.1016/j.coal.2013.03.013.
110. Quenstedt F.A. *Der Jura*. — Laupp, 1858.
111. Schmidt J.S., Hackley P.C., Valentine B.J., Hatcherian J.J. Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation // *International Journal of Coal Geology*. — 2019. — Vol. 201. — P. 44–50. — DOI: 10.1016/j.coal.2018.11.012.
112. Scotese C.R. *Atlas of Paleogene Paleogeographic Maps*. — Arlington, Texas : PALEOMAP Project, 2015.
113. Spasennykh M., Maglevannaia P., Kozlova E., Bulatov T., Leushina E., Morozov N. Geochemical trends reflecting hydrocarbon generation, migration and accumulation in

- unconventional reservoirs based on pyrolysis data (on the example of the Bazhenov Formation) // *Geosciences*. — 2021. — Vol. 11. — No. 8. — Article 307. — DOI: 10.3390/geosciences11080307.
114. Spigolon A.L., Lewan M.D., de Barros Penteado H.L., Coutinho L.F.C., Mendonça Filho J.G. Evaluation of the petroleum composition and quality with increasing thermal maturity as simulated by hydrous pyrolysis: A case study using a Brazilian source rock with Type I kerogen // *Organic Geochemistry*. — 2015. — Vol. 83. — P. 27–53. — DOI: 10.1016/j.orggeochem.2015.03.001.
115. Stasiuk L.D. Algal bloom episodes and the formation of bituminite and micrinite in hydrocarbon source rocks: evidence from the Devonian and Mississippian, northern Williston Basin, Canada // *International Journal of Coal Geology*. — 1993. — Vol. 24. — No. 1–4. — P. 195–210. — DOI: 10.1016/0166-5162(93)90010-8.
116. Stevens G.R. Palaeobiological and morphological aspects of Jurassic Onychites (cephalopod hooks) and new records from the New Zealand Jurassic // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. — 2010. — Vol. 53. — No. 4. — P. 395–412.
117. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia // *U.S. Geological Survey Bulletin*. — 2003. — No. 2201-G.
118. Wei L., Wang Y., Mastalerz M. Comparative optical properties of macerals and statistical evaluation of mis-identification of vitrinite and solid bitumen from early mature Middle Devonian–Lower Mississippian New Albany Shale: Implications for thermal maturity assessment // *International Journal of Coal Geology*. — 2016. — Vol. 168. — P. 222–236. — DOI: 10.1016/j.coal.2016.11.003.
119. Yang S., Horsfield B. Critical review of the uncertainty of Tmax in revealing the thermal maturity of organic matter in sedimentary rocks // *International Journal of Coal Geology*. — 2020. — Vol. 225. — Article 103500. — DOI: 10.1016/j.coal.2020.103500.