

На правах рукописи

ДОЛЖЕНКО Кирилл Васильевич

**ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ТЕРРАГЕННОГО
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕЗО- И
АПОКАТАГЕНЕЗЕ (НА ПРИМЕРЕ
СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ
СРЕДНЕВИЛЮЙСКАЯ-27)**

25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Фомин Александр Николаевич

доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Официальные оппоненты:

Гордадзе Гурам Николаевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», профессор кафедры органической химии и химии нефти ФХТиЭ, г. Москва

Соболев Петр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук, АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», заведующий лабораторией, г. Новосибирск

Ведущая организация:

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения российской академии наук» обособленное подразделение ИПНГ СО РАН, г. Якутск

Защита состоится 07 сентября 2022 г. в 11 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН).

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3;

e-mail: KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-02/dolzhenko2022>

Автореферат разослан 22 июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
К.Г.-М.Н.

Е.А. Костырева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования: песчано-алеврито-глинистые субугленосные и угленосные породы перми и верхнего карбона, содержащие в повышенных и высоких концентрациях захороненное органическое вещество высшей наземной растительности – террагенное. Коллекция пород из керна сверхглубокой скважины Средневиллойская №27 в интервале 3370-6458.

Предмет исследования: особенности изменения состава (группового, индивидуальных соединений), структуры, комплекса геохимических характеристик (пиролитические, биомаркерные, битуминологические и др.) в ходе последовательных превращений террагенного ОВ в процессах мезо- и апокатагенеза.

Цель исследования: выявление закономерностей превращений террагенного органического вещества в среднем, позднем мезо- (МК₂-МК₃) и апокатагенезе (АК) в жестких термобарических условиях и совершенствовании теоретических основ прогноза нефтегазоносности глубоко погруженных осадочных комплексов.

Научная задача: используя широкий спектр современных физико-химических методов изучения органического вещества осадочных пород, экспериментально установить основные закономерности превращений террагенного органического вещества и его битумоидов при погружении на большие глубины с жесткими термобарическими условиями, и построить на этой основе принципиальную модель эволюции состава террагенного органического вещества в мезо- и апокатагенезе.

Научная новизна работы заключается в детальном изучении катагенетических превращений террагенного ОВ на протяжении уникального, более чем 3-х километрового разреза практически однородной по мацериальному составу угленосной толщи верхнекарбонново-пермских пород.

Актуальность работы. Последние тенденции развития нефте- и газопоисковых работ в мире связаны с освоением трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), к ним относятся:

– нетрадиционные запасы – керогеновые (пиролитические) и сланцевые нефти высокоуглеродистых низкопроницаемых формаций (баженовиты и доманикиты в РФ, формации Грин-Ривер (США), Ирати (Бразилия), Фушунь (КНР) и др. за рубежом);

– древнейшие залежи нефти в допалеозойских осадочных толщах (Лено-Тунгусская провинция (РФ), Сычуанский бассейн (КНР), Аравийская платформа (Оман);

– поиски углеводородных скоплений, залегающих на больших глубинах (свыше 4000 м) в жестких термобарических условиях (месторождения Тенгиз, Карачаганское (Прикаспийская впадина), Гайбер

(Мексиканский залив), Тьюпи (Бразилия), Таримский бассейн (Китай) и др.).

Настоящая работа принадлежит последнему из указанных направлений. Хорошо изученный бурением интервал промышленной нефтегазоносности (1,5-3,5 км), как правило, охватывает диапазон зрелости от прото- до раннего-среднего мезокатагенеза. Связано это в первую очередь, согласно работам Н.Б. Вассоевича, Д. Вельте, В.С. Вышемирского, А.Э. Конторовича, С.Г. Неручева, Б.А. Соколова, Б. Тиссо, А.А. Трофимука, Г. Филиппи, Л.М. Бурштейна, Н.В. Лопатина, В.Р. Лившица и других, с реализацией главной фазы нефтегазообразования на этих глубинах. Представления же о дальнейшем ходе эволюции органического вещества под действием температуры и давления были основаны из-за недостатка экспериментальной базы, главным образом, на теоретических предположениях. Поэтому обоснование нижней границы распространения скопления нефти в осадочных бассейнах в жестких термобарических условиях является актуальным с точки зрения дальнейшего совершенствования методики прогноза и поиска УВ-скоплений на больших глубинах. Не менее важной является и задача совершенствования теории геохимических преобразований, которым подвержено органическое вещество и нефти глубокопогруженных пород.

Степень разработанности темы. В ходе становления современной осадочно-миграционной теории нефтидогенеза стало совершенно очевидно, что террагенное (гумусовое) и аквагенное (сапропелевое) ОВ необходимо изучать по отдельности (Н.Б. Вассоевич, Д. Вельте, В.С. Вышемирский, А.Н. Гусева, В.П. Данилова, А.Э. Конторович, С.Г. Неручев, И.И. Нестеров, Б. Тиссо, А.А. Трофимук, В.А. Успенский).

Поэтому в представленной диссертационной работе будет предпринята попытка продолжить вслед за Н.Б. Вассоевичем, В.С. Вышемирским, В.В. Казариновым, А.А. Карцевым, А.Э. Конторовичем, С.Г. Неручевым, В.П. Даниловой, И.Д. Поляковой, А.А. Трофимук, Е.А. Рогозиной, В.А. Успенским, В.В. Шиманским, А.Н. Фоминым, А.С. Фомичевым и других изучение преобразований ОВ террагенного (гумусового) происхождения на основе уникального разреза сверхглубокой скв. Средневилюйская-27, где пермские отложения образуют практически однородную по литологии и генезису угленосную и субугленосную терригенную толщу, обогащенную ископаемыми остатками высшей наземной растительности.

Теоретическая и практическая значимость. Представленная работа содержит как фундаментальные для теории нефтидогенеза результаты, так и прикладные, основанные на характеристике террагенного ОВ в породах

верхнепалеозойского комплекса Вилюйской гемисинеклизы: данные экспериментальных лабораторных исследований превращений террагенного ОВ в позднем мезо- и апокатагенезе; оценка остаточного генерационного потенциала и обоснование роли отложений верхнего палеозоя Вилюйской гемисинеклизы, как газопроизводящих; изучение распределения в разных зонах катагенеза содержаний органического углерода, изменения состава битумоидов на групповом и молекулярном уровнях, показателей углеводородов-биомаркеров (УВ-БМ).

Несмотря на большие успехи в освоении глубоких горизонтов (ниже 5,0 км), оценка перспектив их нефтегазоносности носит, во многих случаях, вероятностный характер. Тем не менее, поиски УВ на больших глубинах были неоднократно успешно реализованы в России и зарубежных странах. На прошедшей в 2012 г. в г. Баку конференции «Потенциал глубокозалегающих углеводородов: будущие энергоресурсы – реальность и прогнозы» были представлены следующие данные: в интервале глубин 4500-8100 м разрабатываются более 1000 месторождений нефти и газа, и их начальные суммарные извлекаемые запасы составляют 7% от мировых нефти и 25% газа. На этих глубинах в России, Египте, Ливии, Мексике, Франции и США разведано около 47% их общих запасов газа, в Мексике и США коэффициент открытия промышленных залежей на больших глубинах составляет 50-70%.

Непосредственно в районе исследования (Вилюйская гемисинеклиза, Восточная Сибирь) ещё с 60-х годов прошлого века и до настоящего момента добыча ведется, главным образом, из мезозойских и пермских отложений до 3-4 км [Органическая геохимия..., 1974; Геология нефти..., 1981; Ситников и др., 2017]. При успешной реализации поисков УВ в глубокопогруженных горизонтах на территории Восточной Сибири станет возможным расширить существующие центры газодобычи. Благоприятствует этому и государственная «Восточная газовая программа», утвержденная в сентябре 2007 года приказом Министерства промышленности и энергетики РФ. С вводом в эксплуатацию магистрального газопровода «Сила Сибири» в 2019 году, в рамках упомянутой выше программы, его экспортная производительность уже составляет 38 млрд м³ газа в год. Представленные в настоящей работе результаты могут быть использованы для расширения ресурсной базы в изучаемом регионе.

Фактический материал. Благодаря А.Н. Фомину, отобравшему и доставившему в ИНГГ СО РАН керн из скв. Средневилюйская-27, была получена уникальная коллекция образцов, позволяющая изучить характеристики террагенного ОВ в широких пределах катагенетической зрелости, включая апокатагенез. На базе этой коллекции был сформирован

банк данных, положенный в основу настоящей работы:

– данные ГИС по скважине Средневилюйская-27, сканы дела скважины с основными результатами бурения;

– 71 образец пород из скважины Средневилюйская-27 (глубины 3370-6458);

– набор шлифов и аншлифов по образцам пород из скважины;

– результаты геохимического исследования ОВ по полученной коллекции: содержание органического углерода ($C_{орг}$) и его изотопный состав ($\delta^{13}C$); уровень зрелости органического вещества ($R^o_{вт}$); его пиролитические характеристики (S_1 , S_2 , HI , T_{max}); масс-спектры и соотношения УВ-биомаркеров в ароматической и насыщенной фракциях хлороформенного битумоида и данные по его групповому составу (УВ-СМ-АСФ).

Методы исследования. Аналитическое изучение рассеянного органического вещества (РОВ) проведено по разработанной под руководством А.Э. Конторовича схеме, применяемой в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) [Борисова и др., 2019], которая включает определения: концентраций органического углерода в породе и его изотопного состава, уровня зрелости, пиролитических характеристик, хромато-масс-спектрометрии насыщенной и ароматической фракций хлороформенного битумоида, а также его группового состава. Построение детального разреза скважины проводилось с использованием данных геофизических исследований (ГИС), материалов из дела скважины, фотографий керна и привлечением опубликованной литературы. Численное моделирование выполнено на основании данных, полученных перечисленными выше методами, в программном обеспечении, соответствующем мировым стандартам. В ходе аналитических работ была использована следующая техническая база:

– пиролитический анализатор Source Rock Analyzer SRA – ТРН/ТОС фирмы Weatherford Laboratories для определения суммарного выхода пиролитических УВ и общего содержания органического углерода;

– УВ-биомаркеры изучались с помощью хромато-масс-спектрометрического метода на системе, состоящей из газового хроматографа 6890 с масс-селективным детектором Agilent 5973N;

– экспресс-анализатор на углерод АН-7529, для определения содержания органического углерода;

– микроскоп-спектрофотометр МСФП-2, для замеров отражательной способности витринита в полированных аншлифах.

Защищаемые положения и результаты:

1. На природной коллекции образцов пород, содержащих террагенное

ОВ, установлена схема изменения группового и углеводородного состава битумоидов и пиролитических характеристик керогена в позднем мезо- и апокатагенезе. Подтверждено отсутствие в битумоидах зоны апокатагенеза асфальтенов, возрастание по мере катагенетических преобразований ОВ относительной массы низкомолекулярных и убывание массы высокомолекулярных алифатических и циклоалифатических углеводородов, в составе ароматических углеводородов возрастает концентрация н-алкил-бензолов, моно- и триароматических стероидов и снижается относительная концентрация фенантронов.

2. На нативной коллекции образцов подтверждено формирование керогена в апокатагенезе за счет конденсации асфальтенов (эпиасфальтеновый кероген – ЭПАК) и впервые показано, что первоначально по пиролитической характеристике (T_{max}) он отвечает незрелому ОВ.

3. Показано, что классические биомаркерные показатели катагенеза ОВ (стерановые коэффициенты K_1 и K_2 , Ts/Tm) возрастают только до конца градации MK_2 ($R_{vt}^0 - 1,15\%$). Показатели, характеризующие тип исходного ОВ (отношение стеранов C_{29}/C_{27} , I_{TC}) и обстановки диагенеза (Pr/Ph , $Reagr/Reg$), теряют диагностическую роль на градации MK_3^1 ($R_{vt}^0 - 1,55\%$). Для более высоких градаций катагенеза предложено использовать метилфенантроновые показатели зрелости $(2-MP + 3-MP)/(1-MP + 9-MP)$ [Петров, 1984] и $1-MP/(2-MP + 3-MP)$ [Alexander et al., 1986], для которых найдены регрессионные зависимости расчета значений R_{vt}^0 .

Степень достоверности научных результатов обусловлена уникальностью коллекции образцов керна, использованной в исследовании, применением широкого спектра современных методов исследования органического вещества, постоянным внутренним и внешним контролем полученных результатов.

Личный вклад автора. Проведено уточнение интерпретации хроматограмм и хромато-масс-фрагментограмм. Выполнено самостоятельное обобщение полученных данных по содержанию органического углерода и хлороформенных битумоидов в породах, пиролитических параметров пород, группового состава битумоидов, по распределению углеводородов-биомаркеров, отражательной способности витринита. Математическими методами на базе специализированного ПО восстановлена история погружения осадочных комплексов и динамики нафтидогенеза в них. Получены интерполирующие уравнения для расчета уровня зрелости террагенного ОВ в глубокопогруженных толщах на основании фенантроновых индексов. В дополнение к имевшимся данным, автор самостоятельно выполнил аналитические работы по получению пиролитических данных (71 образец декарбонизированной породы, 5

образцов керогена).

Апробация работы и публикации. Полученные научные результаты достаточно полно изложены в 16 публикациях, в том числе в 5 статьях в журналах («Доклады академии наук», «Геология и геофизика», «Геохимия», «Георесурсы») из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки. Основные результаты, представленные в работе, были доложены автором на 11 всероссийских и международных конференциях в виде устных докладов и постеров: 2016 г., Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016, XII Международный научный конгресс: Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология", г. Новосибирск; 2016 г., 54-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2016, г. Новосибирск; 2016 г., XX Международный симпозиум им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, г. Томск; 2017 г., The 28th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG - 2017), Florence, Italy; 2017 г., Всероссийская молодежная научная конференция с участием иностранных ученых «Трофимуксовские чтения – 2017», г. Новосибирск; 2017 г., Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ, г. Пермь; 2018 г., Международная конференция "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций", г. Томск; 2019 г., Всероссийская молодежная научная конференция с участием иностранных ученых «Трофимуксовские чтения – 2019», г. Новосибирск; 2020 г., «Геологические, геохимические и экологические проблемы эффективного освоения месторождений углеводородов Сибирской платформы», г. Якутск; 2020 г., Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020, XVI Международный научный конгресс: Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология", г. Новосибирск; 2021 г., Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа - XXI век: Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых, посвященная 150-летию академика АН СССР И.М. Губкина и 110-летию академика АН СССР и РАН А.А. Трофимука, г. Новосибирск. Часть результатов исследований вошла в итоговый отчет о научно-исследовательской работе по индивидуальному проекту РФФИ № 18-35-00337 за 2018-2019 гг.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем работы 209 страниц, включая

55 рисунков, 20 таблиц, 2 приложения. Список литературы включает 178 наименований.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН под руководством д.г.-м.н. Александра Николаевича Фомина. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, а также искренне благодарен за консультации, рекомендации, предоставленные материалы и литературу, советы и поддержку при подготовке работы Л.С. Борисовой, Л.М. Бурштейну, А.А. Дешину, В.А. Каширцеву, Н.С. Ким, В.Н. Меленевскому, А.П. Родченко, П.А. Сафронову, Е.А. Фурсенко. Особую благодарность за постановку научной проблемы, кураторство на протяжении всего процесса работы и всестороннюю помощь автор выражает академику Алексею Эмильевичу Конторовичу. Отдельная признательность выражается инженерному составу лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН за выполнение химико-аналитических исследований, в особенности Н.В. Аксеновой, Н.П. Вертаковой, Е.А. Зубовой, Е.А. Ивановой, Н.М. Леминой за консультации по методической части.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «**Анализ современного состояния проблемы**» представлено два основополагающих для настоящей работы теоретических раздела, которые необходимы для понимания положения результатов диссертации в современной системе знаний о биогенном происхождении нефти и газа. Первый «**История формирования представлений о превращениях аквагенного и террагенного ОВ в катагенезе**» посвящен основам современной осадочно-миграционной теории нефтидогенеза, заложенной К. Энглером, Г. Потонье, Д. Уайтом, Г.П. Михайловским, Н.И. Андрусовым, В.А. Соколовым, А.Ф. Добрянским, и в особенности В.И. Вернадским, И.М. Губкиным, А.Д. Архангельским, П. Траском, А. Трейбсом, получившим развитие в работах И.О. Брода, Н.Б. Вассоевича, В.А. Успенского, А.А. Трофимука, и продолженных в трудах В.С. Вышемирского, Н.А. Еременко, А.Э. Конторовича, С.П. Максимова, С.Г. Неручева, И.И. Нестерова и др. По мере изложения истории формирования теории акцентируется, что террагенное (гумусовое) и аквагенное (сапропелевое) ОВ необходимо изучать по отдельности (Н.Б. Вассоевич, В.С. Вышемирский, А.Э. Конторович, А.А. Трофимук, В.А. Успенский, С.Г. Неручев, И.И. Нестеров и др.). Здесь же отмечается, что в настоящей работе будет предпринята попытка продолжить вслед за Н.Б. Вассоевичем, А.А. Трофимук, В.А. Успенским, В.С. Вышемирским, В.П. Казариновым, А.А. Карцевым, А.Э. Конторовичем, С.Г. Неручевым,

И.И. Нестеровым, Н.Н. Ростовцевым, С.Н. Белецкой, В.П. Даниловой, И.Д. Поляковой, Е.А. Rogozinoy, О.Ф. Стасовой, В.В. Шиманским, А.С. Фомичевым и другими изучение преобразований ОВ террагенного (гумусового) происхождения. Во втором разделе **«Геохимическое изучение террагенного органического вещества на примере объекта исследований»** приведены наиболее значимые результаты по изучению террагенного ОВ верхнепалеозойского комплекса Вилюйской гемисинеклизы, в том числе по материалам скв. Средневилюйская-27, в работах Л.И. Богородской, Е.И. Бодунова, В.П. Даниловой, И.Н. Зуевой, В.А. Каширцева, А.Э. Конторовича, Г.Н. Перозио, И.Д. Поляковой, Е.И. Соболевой, П.А. Трушкова, А.С. Фомичева, и др.

Во второй главе **«Материалы и методы исследования»** дано описание фактического материала, программного обеспечения, материально-аналитической базы, а также широкого спектра методов от пиролитических до химико-аналитических, использованных в работе и предназначенных для комплексного исследования ОВ и нефтяных осадков согласно схеме, применяемой в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН).

В третьей главе **«Геологическое строение и нефтегазоносность верхнепалеозойских отложений Хапчагайского мегавала Вилюйской гемисинеклизы»** приводится обзор истории изучения верхнего палеозоя Вилюйской гемисинеклизы, описание осадочных комплексов, тектонического строения и истории развития Вилюйского палеобассейна, нефтегазоносности отложений Хапчагайского мегавала на примере продуктивных комплексов в общем и Средневилюйского многопластового газоконденсатного месторождения в частности. Помимо этого, автором, опираясь на работы И.И. Голубевой, В.В. Граусман, С.В. Мейен, В.П. Жерновского и других, выполнена интерпретация данных ГИС для построения детального литологического разреза и характеристики угленосного комплекса верхнепалеозойских отложений, вскрытых скважиной Средневилюйская-27.

В четвертой главе **«Геохимия террагенного органического вещества верхнепалеозойского комплекса в позднем мезо- и апокатагенезе»** представлены главные научные результаты настоящей работы. Глава состоит из трех разделов и пяти подразделов, обособление которых основано преимущественно на группах методов, использованных для изучения: углепетрография и пиролиз; битуминологические характеристики и хромато-масс-спектрометрия; одномерное математическое моделирование.

Первый раздел – **«Углепетрографические и пиролитические**

характеристики террагенного органического вещества». На основании показателей R°_{vt} , T_{max} , HI установлена глубинная зональность катагенеза и, в соответствии с динамикой процессов нефтегазообразования (согласно работам Н.Б. Вассоевича, В.С. Вышемирского, А.Э. Конторовича, С.Г. Неручева, А.А. Трофимука), были выделены:

- зона интенсивных процессов новообразования углеводородных флюидов преимущественно состава C_{6+} включает в себя кюндейскую и большую часть харыйасской толщи в интервале от 3370 (первый замер R°_{vt}) до 3800 м (конец MK_2), обладающих умеренным потенциалом (по классификации [Лопатин, Емец, 1987]; $HI - 100-190$ мг УВ/г $C_{орг}$);

- зона постепенного перехода продуктов новообразования к преобладанию УВ состава C_{1-6} (градации MK_3^1 , MK_3^2) включает в себя нижнюю часть харыйасской, хомустахскую и практически всю кубалангдинскую толщи (3815-4700 м), характеризующихся от небольшого газового до умеренного потенциала ($HI - 25-75$ мг УВ/г $C_{орг}$);

- зона остаточной генерации сухого газа (градации AK_1 , AK_2), представлена приподошвенной частью кубалангдинской, харбалахской и чочосской толщами (4700-5500 м), обладающих минимальным потенциалом до полного истощения ($HI - 5-15$ мг УВ/г $C_{орг}$);

- зона высокотемпературной деструкции с остаточным образованием метана охватывает юрэнскую и юнкюрскую толщи (5500-6519 м).

Отмечено смещение преобразованности ОВ в разрезе исследованной скважины относительно северо-западного и южного бортов Вилюйской гемисинеклизы, а также менее приподнятых участков Хапчагайского мегавала, которое можно оценить в диапазоне 250-500 м. На основании показателя R°_{vt} уточнены границы градаций катагенеза по T_{max} . Для террагенного ОВ верхнепалеозойского субугленосного комплекса Вилюйской гемисинеклизы установлены следующие значения параметра T_{max} : градации MK_2 соответствует $T_{max} 440-460^{\circ}C$, $MK_3^1 - 460-490^{\circ}C$, $MK_3^2 490-525^{\circ}C$, $AK > 525^{\circ}C$.

В области апокатагенеза установлен ряд аномальных показателей HI и T_{max} (Рисунки 1-2). Они характеризуется очень низкими значениями T_{max} от $450^{\circ}C$ до $380^{\circ}C$ и даже ниже и повышенными для зоны апокатагенеза значениями HI (до 60 мг УВ/г $C_{орг}$) [Конторович и др., 2020]. Все эти образцы входят в ту часть коллекции, где асфальтены в составе битумоидов отсутствуют и перешли в нерастворимые формы. Предполагается, что керогены этих образцов представляют собой продукты, образовавшиеся из перешедших в апокатагенезе в нерастворимую форму асфальтенов. Предложено называть это вещество эпиасфальтеновые керогены (ЭПАК) [Конторович и др., 2020].

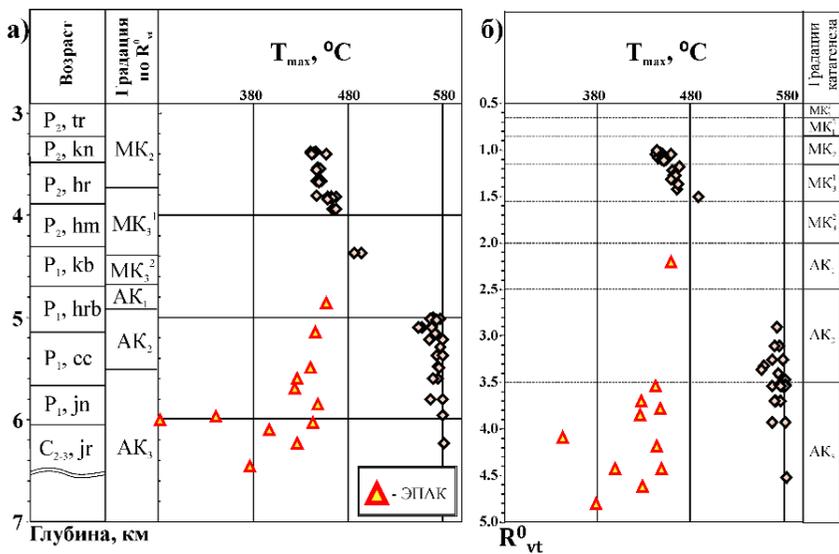


Рисунок 1 – Изменение температуры максимальной скорости выхода УВ (T_{max}) с глубиной (а) и с увеличением отражательной способности витринита (R^0_{vt}) (б) в скв. Средневилюйская-27

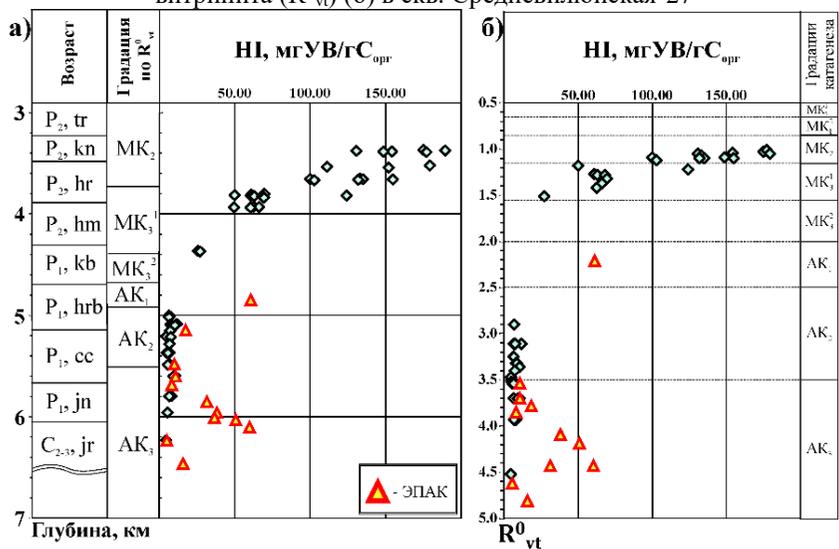
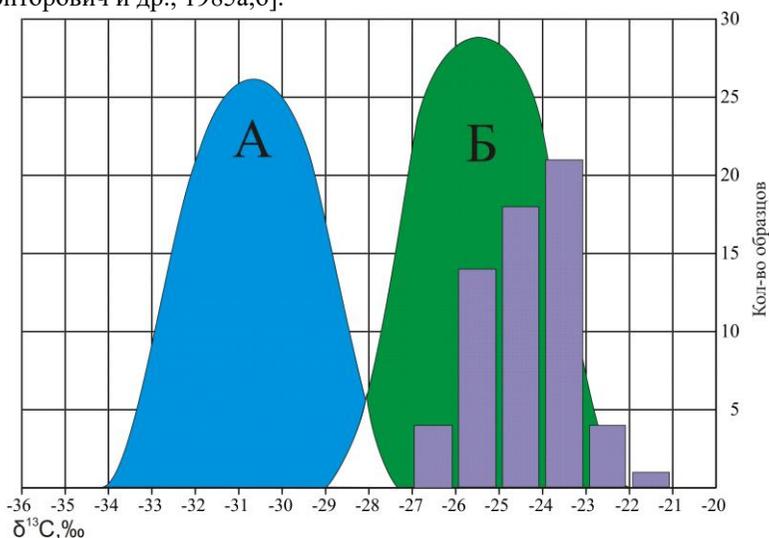


Рисунок 2 – Изменение остаточного генерационного потенциала (HI) с глубиной (а) и с увеличением отражательной способности витринита (R^0_{vt}) (б) в скв. Средневилюйская-27

Второй раздел «Изменение геохимических параметров террагенного органического вещества с ростом катагенеза». В подразделе 2.1 рассматривается распределение органического углерода и его изотопный состав. На основании имеющейся коллекции образцов (71 обр.) установлено, что для большей их части значения $C_{орг}$ превышают кларковые [Вассоевич, 1972] (53 обр. >0,9 %), а максимум распределения приходится на интервал 0,9-1,9 %. Изотопный состав углерода рассеянного органического вещества пермской и верхнекаменноугольной систем Виллюйской гемисинеклизы варьирует от -26,9 ‰ до -21,8 ‰, чаще всего от -25,0 ‰ до -23,0 ‰ (Рисунок 3). Такие показатели характерны для углерода, источником которого была высшая наземная растительность [Конторович и др., 1985а,б].



Распределение изотопов органического углерода:

На основании работы [Конторович и др., 1985] по образцам Западно-Сибирской и Сибирской платформ в прото- и мезокатагенезе

По образцам в скв. Средневиллюйская-27 в мезо- и апокатагенезе

А - Аквагенное ОВ Б - Террагенное ОВ - Террагенное ОВ

Рисунок 3 – Распределение изотопного состава органического углерода ($\delta^{13}C$) в породах верхнепалеозойского комплекса скв. Средневиллюйская-27 в сравнении с опубликованными данными по западной Сибири [Конторович и др., 1985]

В подразделе 2.2 представлены данные по изменению группового и молекулярного составов битумоида под действием факторов катагенеза [Долженко и др., 2019]. По соотношениям УВ-смола-асфальтенов и

изменению гомологических рядов n-алканов и n-алкилбензолов было выделено 4 различных по геохимическим параметрам области, отражающие влияние преобразованности. В первом интервале 3370-3810 м (середина-конец градации МК₂) доминирующим компонентом в составе битумоидов являются УВ (35-45 %), смолы в среднем не превышают 35 %, асфальтены – 25 % (Рисунки 4-5, (Рисунок 5 см. вклейку)). Распределение n-алканов характерно для континентального ОВ – максимум на С₂₁₋₂₅, пристан (Pr) значительно преобладает над фитаном (Ph). N-алкилбензолы здесь имеют бимодальное распределение, с главным максимумом на С₁₆₋₂₀ и второстепенным на С₂₃₋₂₆. К концу градации максимум n-алканов смещается на С₁₉₋₂₃, падает отношение Pr/Ph, а в n-алкилбензолах снижаются относительные содержания соединений выше С₂₂. В этом интервале процессы деструкционного характера на молекулярном уровне проявляются к концу градации МК₂. Второй интервал 3810-4853 м соответствует грациям МК₃¹⁻² – началу АК₁. Углеводородная часть (15-25 %) в составе битумоида испытывают снижение относительных содержаний, а число смол (45-50 %) незначительно растет. Количество асфальтенов колеблется в пределах 30-35 % и снижается к концу мезокаатагенеза. Здесь уменьшается содержание насыщенных УВ по отношению к ароматическим. Параллельно максимум распределения n-алканов все больше смещается к С₁₉. Среди n-алкилбензолов на первый план выходит С₁₈, снижаются относительные содержания соединений с меньшим количеством атомов углерода, продолжается снижение высот пиков высокомолекулярных гомологов. Процессы деструкции или конденсации не проявлены в явном виде на уровне группового состава, но находят отражение в распределении исследованных гомологических рядов. Последнее указывает на то, что перестройка вещества под действием высоких температур начинается до явных изменений в соотношении компонент битумоида. Третья, переходная зона начинается при достижении градации АК₁ (термобарический рубеж – ~4853 м). В групповом составе начинают преобладать смолы (>60 %), а также отмечен резкий рост содержаний насыщенных соединений в компоненте УВ. Значительно сокращаются относительные содержания n-алканов с количеством атомов углерода больше 22. Этому этапу соответствует резкое увеличение концентрации смол в составе битумоидов за счет деструкции асфальтенов, и, вероятно, конденсации ароматических соединений, если судить по сокращению их содержаний в составе УВ. Наиболее погруженный интервал 5148-6458 м относится к глубинам, на которых ОВ является истощенным. Здесь, при достижении середины градации АК₂, происходит существенное смещение в сторону компонент углеводородов (40-45 %) и смол (55-60 %), с сокращением содержания

асфальтенов (<10 %), вплоть до неопределимых количеств от глубины 5482 м и ниже. Отмечены незначительный рост количества УВ (~5 %) и соответствующее ему снижение числа смол с ростом катагенеза. Эта зона отражает дальнейшее упрощение, где крупные структуры (главным образом асфальтены) деалкилируются, что обуславливает рост УВ составляющей, а их остатки конденсируются и формируют высокомолекулярные блоки, которые переходят в состав нерастворимой фазы. Переходы в групповом составе битумоида соответствуют схеме, предложенной Конторовичем А.Э.: разукрупнение, упрощение структуры, в последовательности асфальтены → смолы → УВ, протекающее параллельно с конденсацией отдельных блоков, в основном ароматических, укрупнением структуры в последовательности УВ → смолы → асфальтены, вплоть до превращения части растворимой фазы в нерастворимую и выпадения ее в кероген [Конторович и др., 1988]. Все переходы осуществляются через компоненту смол, как метастабильную в термобарических условиях.

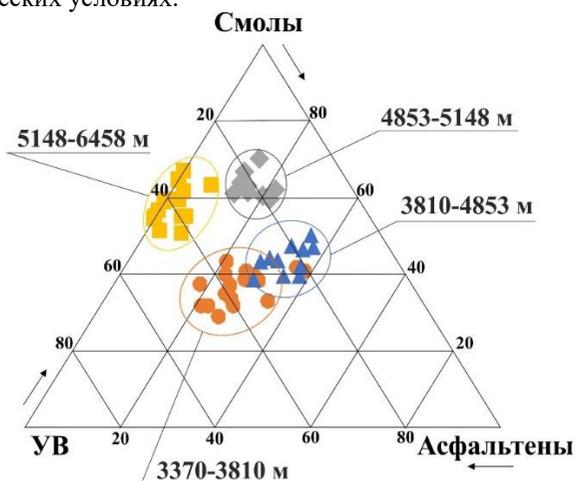


Рисунок 4 – Тригонограмма изменения группового состава битумоидов

В подразделе 2.3 был изучен традиционно применяемый набор насыщенных УВ-биомаркеров (Рисунки 6-7, см вклейку). Совокупность данных по углеводородам-биомаркерам в интервале 3370-4300 (МК₂-МК₃¹) указывает на то, что их источником была высшая наземная растительность: преобладание стерана C₂₉ в позднепалеозойских толщах, показания трицикланового индекса >1, максимум распределения n-алканов (без хомустанской толщи) приходится на УВ с количеством атомов углерода >19, область значений на диаграмме Коннона-Кассоу (Рисунок 8). В диагенезе преобладали слабоокислительные условия:

значения $\text{Dia}/\text{Reg} > 0,5$, отношение гомогенов $\text{Hh}_{35}/\text{Hh}_{34}$ варьирует в пределах 0,5-1, преобладает над фитаном. По совокупности CPI , K_1 , K_2 , T_s/T_m однозначно можно сказать, что ОВ находится в ГЗН. Единичные отскоки значений, вероятно, связаны с восходящей миграцией битумоидов из более погруженных (преобразованных) отложений. В этом интервале подтверждена работоспособность изученного набора УВ-БМ и соответствия данных молекулярных соотношений другим методам определения генезиса и уровня зрелости ОВ (углепетрография, пиролиз, определение стабильных изотопов).

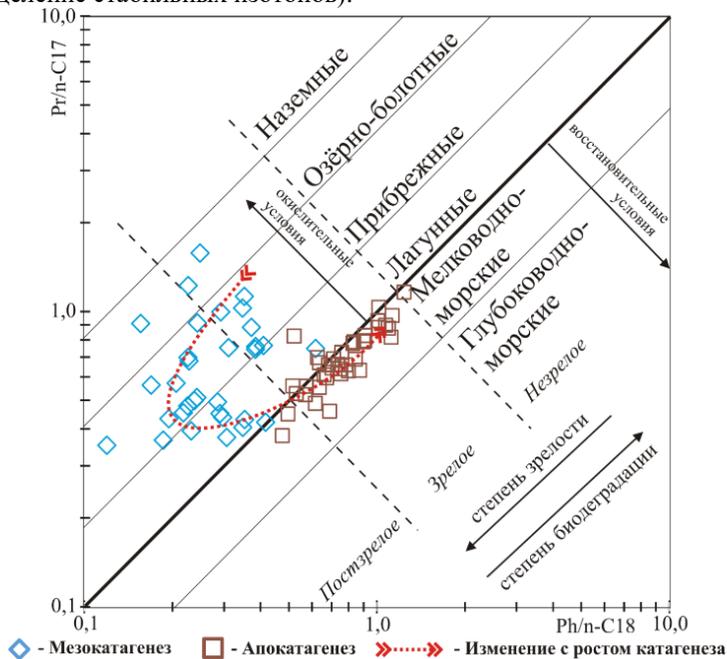


Рисунок 8 – Диаграмма Коннона-Кассоу для образцов мезо- и апокатагенеза верхнепалеозойских пород, вскрытых скв. Средневилуйская-27

На глубинах 4300-6458 м (МК_3^2 - АК_1 -3) биомаркерные показатели в большинстве своём теряют свойства индикаторов из-за высокой степени преобразованности. Индексы зрелости K_1 , K_2 достигают равновесных значений $\sim 0,4$ и ~ 2 , соответственно. Значение коэффициента CPI практически не изменяется. Показатели, характеризующие тип исходного органического вещества ($\text{C}_{27}/\text{C}_{17}$, $\text{C}_{29}/\text{C}_{27}$, I_{TC}) смещаются в сторону значений аквагенного ОВ. Отношение Pr/Ph указывает на восстановительные условия осадконакопления, как и отношение

Rear/Reg, которое закономерно снижается до границы градаций МК₃¹-МК₃² и не показывает значительных изменений в более погруженной части разреза. Отношение гомогпанов Нh₃₄ и Нh₃₅ также достигает равновесного значения без значительных изменений с ростом глубины. Молекулярные особенности битумоидов на больших глубинах обусловлены процессами деструкции и конденсации, рассмотренными ранее. Вследствие процессов деструкции и конденсации показатели, характеризующие тип исходного органического вещества, теряют свою диагностическую роль на градации МК₃¹, а индикаторы катагенеза с градации МК₂.

В *подразделе 2.4* представлен состав УВ в ароматической фракции битумоида. Были рассмотрены *n*-алкилбензолы (NAB), фенантрены (P+MP), моноароматические (MAS) и триароматические (TAS) стероиды, дибензтиофены (DBT; 1-4MDBT). Наибольшее внимание было уделено фенантренам, так как показатели зрелости, основанные на них, демонстрируют высокую степень корреляции с отражательной способностью витринита даже в условиях позднего апокатагенеза. Был проанализирован набор коэффициентов, предлагаемый в литературных источниках: МФИ [Петров, 1984]; MPI-1 [Radke et al., 1982a,b]; MPI-1mod. [Cassani et al., 1988]; PP-1 [Alexander et al., 1986]; ФИ [Конторович и др., 2004]. Построенные графики зависимости изменения фенантреновых отношений от уровня зрелости почти во всех случаях показали большое сходство с литературными источниками в области мезокатагенеза (кроме MPI-1mod.). Для трёх показателей (МФИ, PP-1, MPI-1) наблюдается смена корреляции при одной и той же степени преобразованности, кроме того индексы, основанные на разных комбинациях метилзамещенных производных P, показывают различную дисперсию от общего тренда. Это связано с более устойчивым поведением 2-, 3- и 1-MP и менее стабильным собственно P и 9-MP [Szczerba, Rospondek, 2010; Долженко, Фомин, 2022]. Наилучшую сходимость с R^o_{vt} продемонстрировали индексы PP-1 и МФИ, для них были выполнены построения для получения уравнений расчета R^o_(МФИ) и R^o_(PP-1) (Рисунок 9, см. вклейку). Между значениями R^o_{vt} и R^o_(МФИ) установлена следующая взаимосвязь: индекс нелинейной корреляции r^o=0,989, коэффициент детерминации R²=0,979, среднее отклонение 5,33%. Для R^o_{vt} и R^o_(PP-1) показатели следующие: r^o=0,993, R²=0,985, среднее отклонение равно 5,8 %. Такие показатели указывают на высокую достоверность полученных моделей расчетных значений отражательной способности витринита.

В *подразделе 2.5* описан набор не идентифицированных ранее на хроматограммах УВ. Среди них определены: два гомологических ряда ненасыщенных углеводородов, один с исключительно нечетными, другой

– с четными номерами атомов углерода; два гомологических ряда 3,4- и 3,7-диметилалканов, с исключительно четными номерами атомов углерода для первого, с нечетными – для второго; алкилциклогексаны с преобладанием нечетных атомов углерода; четыре новых диастереомера моноароматических стероидов C_{27} [Каширцев и др., 2016, 2017]. Эти соединения проявляют себя при достижении термобарического рубежа на глубине 4853 м и выходе из группового состава асфальтенов, на основании чего был сделан вывод, что в ходе деструкции происходит высвобождение окклюзированных и адсорбированных УВ. С учетом полученных автором и опубликованных [Каширцев, 2018] данных установлены температурные зоны захвата ($\sim 90^\circ\text{C}$), транзита и открытия ($\sim 200^\circ\text{C}$) полостей в асфальтенах.

Третий раздел – **«Восстановление истории погружения осадочных комплексов и генерации углеводородов террагенным органическим веществом верхнепалеозойских пород»**. Здесь приведены результаты одномерного математического моделирования процессов нефтидогенеза по скважине Средневилюйская-27. По имеющимся данным ГИС, делу скважины и опубликованной литературе были установлены отметки кровли и подошвы свит, а также соотношение глинистой и песчанистой составляющих [Граусман и др., 1978; Голубева и др., 1980; Тектоника, геодинамика..., 2001]. Тепловая история отложений восстановлена на основе данных по современным температурам в скважине (дело скважины) и результатам исследования геотермических условий Вилюйской гемисинеклизы [Семенов и др., 2013], и откалибрована посредством вычислительных экспериментов. По комплексу геохимических параметров генерирующими толщами были выбраны кюндейская ($C_{\text{орг}}$ – среднее 3,19 %, HI – среднее 163 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, середина градации MK_2), харыйасская ($C_{\text{орг}}$ – ср. 1,67 %, HI – ср. 113 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, середина градации MK_2 – середина MK_3^1) и хомустанская ($C_{\text{орг}}$ – ср. 1,56 %, HI – ср. 60 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, градация MK_3^1). В соответствии с полученными ранее геохимическими данными был использован кероген III-го типа из встроенной библиотеки Genex, который соответствует террагенному ОВ. Исходное содержание $C_{\text{орг}}^0$ было рассчитано по [Peters et al., 2005], начальный HI^0 рассчитан на основании степени трансформации керогена. Плотность генерации УВ состава C_1 - C_5 в окрестностях скважины составила 30 тыс. т/км² – кюндейская свита, 140 тыс. т/км² – харыйасская, 580 тыс. т/км² – хомустанская; УВ состава C_{6+} : 230 тыс. т/км² – кюндейская свита, 860 тыс. т/км² – харыйасская, 1610 тыс. т/км² – хомустанская [Долженко, 2017]. Полученные результаты можно использовать в качестве опорных для построения трехмерных моделей нефтидогенеза на территории Вилюйской гемисинеклизы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании комплекса геохимических методов, в том числе исследования состава насыщенной и ароматической фракций на молекулярном уровне, был выполнен анализ структуры и катагенетических превращений террагенного ОВ в позднем мезо- и апокатагенезе. Приведены результаты, демонстрирующие влияние последовательного термического созревания в природных условиях на пиролитические характеристики, распределение индивидуальных углеводородов в битумоидах, их групповой состав и динамику деструкционно-конденсационных взаимодействий. Такое детальное и разностороннее изучение эволюции террагенного ОВ на примере уникального, более чем 3-х километрового разреза практически однородной по мацериальному составу верхнекарбово-пермской угленосной толщи проведено впервые.

Основным аспектом работы являлось изменение ОВ под действием термобарических факторов, поэтому в первую очередь был установлен уровень зрелости в изучаемом разрезе. В качестве абсолютного палеотермометра использовалась отражательная способность витринита (R°_{vt}). Исследуемые толщи были привязаны к грациям катагенеза ОВ. Дополнительным методом оценки зрелости послужил пиролитический показатель T_{max} . Сравнение T_{max} с параметром R°_{vt} показало коэффициент корреляции – 0,98. В зависимости от условий формирования керогена и преобладания тех или иных функциональных групп положение температурного максимума может смещаться, поэтому границы граций по T_{max} были уточнены для изучаемого типа ОВ.

На основании распределения водородного индекса по стадиям катагенеза установлено, что потенциал от бедного до умеренного (по классификации Н.В. Лопатина и Т.П. Емец) характерен для верхнепалеозойских отложений, достигших середины мезокатагенеза, а к его концу значения водородного индекса значительно снижаются. В соответствии с динамикой процессов нефтегазообразования (согласно работам Н.Б. Вассоевича, В.С. Вышемирского, А.Э. Конторовича, С.Г. Неручева, А.А. Трофимука), были выделены следующие границы: главная зона нефтеобразования до глубины 3,6 км; глубинная зона газогенерации – 4,9 км.

С целью подтверждения роли высшей наземной растительности, как основного источника ОВ в разрезе перми Вилуйской скв №27 был изучен изотопный состав углерода. На протяжении всего разреза показатели $\delta^{13}C$ указывают на ОВ террагенного генезиса (согласно работам А.Э. Конторовича, Л.И. Богородской, С.И. Гольшева). Косвенно на это

указывают результаты изучения материалов ГИС, керны и шлифов: высокая угленосность разреза и преобладание терригенного, обломочного материала в составе пород. Полученные данные согласуются с палинологическими исследованиями Т.Е. Михайловой, Л.М. Фартунатовой и Л.Г. Сандаковой, которыми было установлено, что пермская флора рассматриваемого района представлена преимущественно голосеменными растениями (кордаиты, гинкго, саговники) и травянистыми сосудистыми папоротниками.

В соответствии с изложенным изменения геохимических параметров ОВ рассмотрены в работе с точки зрения последовательной эволюции практически однородного ОВ террагенного генезиса в мезо- и апокатагенезе.

Был изучен традиционно используемый набор насыщенных УВ-биомаркеров. На грациях МК₂-МК₃¹, (3370-4300 м) совокупность параметров хемофоссилий указывает на то, что их источником была высшая наземная растительность, а в диагенезе преобладали слабовосстановительные условия. По совокупности катагенетических показателей однозначно можно сказать, что ОВ находится в ГЗН. В этом интервале подтверждена информативность изученного набора УВ-БМ и соответствия данных молекулярных исследований изотопному, пиролитическому и углепетрографическому методам определения генезиса и уровня зрелости ОВ. На грациях МК₃¹-АК₃ (4300-6458 м) УВ-БМ в большинстве своём теряют свойства индикаторов из-за высокой степени преобразованности: показатели зрелости достигают равновесных значений, генетические соотношения смещаются в сторону значений аквагенного ОВ, ряд индексов указывает на восстановительные условия осадконакопления.

Такие изменения в молекулярном составе являются следствием процессов деструкции и конденсации под действием термобарических факторов больших глубин. Схема протекания этих взаимодействий была предложена ранее А.Э. Конторовичем, и была уточнена и детализирована под его руководством А.Н. Фоминым и автором: разукрупнение, упрощение структуры, в последовательности асфальтены → смолы → УВ, протекающее параллельно с конденсацией отдельных блоков, в основном ароматических, укрупнением структуры в последовательности УВ → смолы → асфальтены, вплоть до превращения растворимой в органических растворителях части ОВ в нерастворимую и выпадения ее в кероген. Установлено, что наиболее чувствительными являются высокомолекулярные углеводородные соединения. С применением пиролитического метода установлено формирование нерастворимого ОВ при конденсации асфальтенов – эпиасфальтеновых керогенов (ЭПАК).

Впервые показано что ЭПАК имеют низкие значения $T_{\text{макс}}$ при пиролизе. Помимо этого, при достижении глубин, соответствующих выходу из группового состава асфальтенов был установлен ряд не идентифицированных ранее на хроматограммах УВ. Предполагается, что при деструкции асфальтенов и формировании ЭПАКов происходит высвобождение окклюдированных и адсорбированных УВ. Согласно опубликованным данным и восстановлению истории погружения осадочных комплексов палеотемпература «открытия» составляет около 200°C.

В качестве альтернативы традиционным показателям зрелости, основанным на УВ насыщенной фракции, были рассмотрены ароматические соединения: н-алкилбензолы, фенантрены, моноароматические и триароматические стероиды, дибензтиофены. Среди них наибольшую степень корреляции с отражательной способностью витринита даже в условиях позднего апокатагенеза показали фенантрены. Автором предложены уравнения расчета значений отражательной способности витринита по фенантреновым индексам в мезо- и апокатагенезе. Помимо этого, показаны особенности изменения относительных содержаний фенантрена и его метилзамещенных производных в жестких термобарических условиях – более устойчивое поведение 2-, 3- и 1-метилфенантрена и менее стабильное 9-метилфенантрена.

На основе полученных пиролитических, геохимических и углепетрографических данных была восстановлена история погружения осадочного комплекса и генерации УВ верхнепалеозойскими материнскими толщами посредством одномерного математического моделирования. Наибольшее количество УВ генерировала хомустахская толща, к настоящему моменту она полностью истощила генерационный потенциал. Харыйасская толща прошла пик генерации УВ C_6^+ , но только вступает в пик образования C_1-C_5 . Кюндейская толща – наименее преобразованная из всех, изученных автором в качестве материнских, обладает наибольшим средним содержанием органического углерода и показателем водородного индекса, в связи с чем можно ожидать реализации её потенциала в более погруженных участках района исследований.

Полученные автором результаты превращений террагенного ОВ в мезо- и апокатагенезе могут быть использованы в качестве критериев при прогнозе и поисках УВ-скоплений на больших глубинах.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Необходимо определить уровень глобальности полученных результатов, другими словами – подтвердить общий для террагенного ОВ характер

установленных закономерностей. В рамках этой задачи логичным продолжением станет сопоставление геохимических параметров ОБ верхнепалеозойского комплекса Вилюйской гемисинеклизы, вскрытых скв. Средневилюйская-27, с другими коллекциями аналогичного генезиса и углями (тюменская свита Западной Сибири, Кузнецкий угольный бассейн и др.).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

1. **Долженко, К.В.** Информативность фенантроновых показателей зрелости органического вещества в позднем мезокатагенезе и апокатагенезе (на примере сверхглубокой скважины Средневилюйская-27, Восточная Сибирь) / **К.В. Долженко**, А.Н. Фомин // Геохимия. – 2022. – Том 67. – № 1. – С.37-46.
2. **Конторович, А.Э.** Закономерности преобразования террагенного органического вещества в мезо- и апокатагенезе / А.Э. Конторович, **К.В. Долженко**, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2020. – Том 61. – № 8. – С.1093-1108.
3. **Долженко, К.В.** Геохимическая характеристика террагенного органического вещества Верхнепалеозойского комплекса вилюйской синеклизы и некоторые особенности его преобразования под действием термобарических условий больших глубин / **К.В. Долженко**, А.Н. Фомин, В.Н. Меленевский // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 4. – С.4-12.
4. **Каширцев, В.А.** Углеводородный состав битумоидов террагенного органического вещества больших глубин (зоны апокатагенеза) / В.А. Каширцев, **К.В. Долженко**, А.Н. Фомин, А.Э. Конторович, Н.П. Шевченко // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58 – №6. – С.869-879.
5. **Каширцев, В.А.** Новые моноароматические стероиды в органическом веществе зоны апокатагенеза / В.А. Каширцев, А.Н. Фомин, Н.П. Шевченко, **К.В. Долженко** // Доклады РАН. – 2016. – Том 469. – № 4. – С.465-469.

Материалы конференций, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации:

6. **Долженко, К.В.** Изучение эписасфальтовых керогенов пиролитическим методом / **К.В. Долженко** // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа - XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященной 150-летию академика АН СССР И.М. Губкина и 110-

летию академика АН СССР и РАН А.А. Трофимука (г. Новосибирск, 14-15 сентября 2021 г.). – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С.107-110.

7. **Долженко, К.В.** Изменения в составе углеводородов-биомаркеров насыщенной фракции в позднем мезокатагенезе // **К.В. Долженко** // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2020. – С.85-92.

8. **Долженко, К.В.** Поведение фенантроновых показателей зрелости органического вещества в зоне апокатагенеза (на примере сверхглубокой скважины Средневилюйская-27, Восточная Сибирь) / **К.В. Долженко** // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых «Трофимуковские чтения – 2019» (Новосибирск, 7-12 октября 2019 г.). – Новосибирск, 2019– С.106-109.

9. **Долженко, К.В.** Изменения группового состава битумоидов с глубиной по разрезу сверхглубокой скважины Средневилюйская-27 / **К.В. Долженко** // Тезисы докладов Международных конференций "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" (г. Томск, 1-5 октября 2018 г.). – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2018. – С.703.

10. Каширцев, В.А. Необычные углеводороды / В.А. Каширцев, А.К. Головкин, **К.В. Долженко**, Е.А. Костырева // Тезисы докладов Международных конференций "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" (г. Томск, 1-5 октября 2018 г.). – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2018. – С.660.

11. **Долженко, К.В.** История генерации углеводородов органическим веществом верхнепалеозойских отложений по материалам сверхглубокой скважины Средневилюйская-27 / **К.В. Долженко** // Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ (г. Пермь, 24–26 ноября 2017 г.): Сборник научных статей. – Пермь: 2017. – С.100-108.

12. **Долженко, К.В.** История генерации углеводородов органическим веществом баженовской свиты по материалам сверхглубокой скважины Тюменская СГ-6 / **К.В. Долженко**, П.И. Сафронов // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием

иностранных ученых «Трофимуковские чтения – 2017» (г. Новосибирск, 8-14 октября 2017 г.). – Новосибирск, 2017. – С.76-78.

13. **Dolzhenko, K.V.** Simulation of naftidogenesis processes by Bazhenov formation organic matter in Tumen SG-6 well (Western Siberia) / **K.V. Dolzhenko, P.I. Safronov, A.N. Fomin, V.N. Melenevsky** // The 28th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG - 2017) (Florence, Italy, 17-22 September 2017). – Florence, Italy, 2017. – P.257.

14. **Долженко, К.В.** Геохимическая характеристика органического вещества верхнепалеозойских отложений Вилуйской синеклизы (на примере сверхглубокой скважины Средневилуйская-27) / **К.В. Долженко** // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 120-летию со дня основания Томского политехнического университета (г. Томск, 4-8 апреля 2016 г.). – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — том Т.1. – С.313-315.

15. **Долженко, К.В.** Глубинная зональность катагенеза органического вещества верхнепалеозойских отложений в центральной части Вилуйской синеклизы (на примере сверхглубокой скважины Средневилуйская-27) / **К.В. Долженко** // Материалы 54-й международной научной студенческой конференции МНСК-2016 (г. Новосибирск, 16-20 апреля 2016 г.): Геология. – Новосибирск: НГУ, 2016. – С.97.

16. **Фомин, А.Н.** Прогноз зон генерации жидких и газообразных углеводородов в центральной части Вилуйской синеклизы (на примере сверхглубокой скважины Средневилуйская-27) / **А.Н. Фомин, К.В. Долженко, В.Н. Меленевский** // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология" (г. Новосибирск, 18-22 апреля 2016 г.): Сборник материалов в 4 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Том Т.1. – С.29-34.

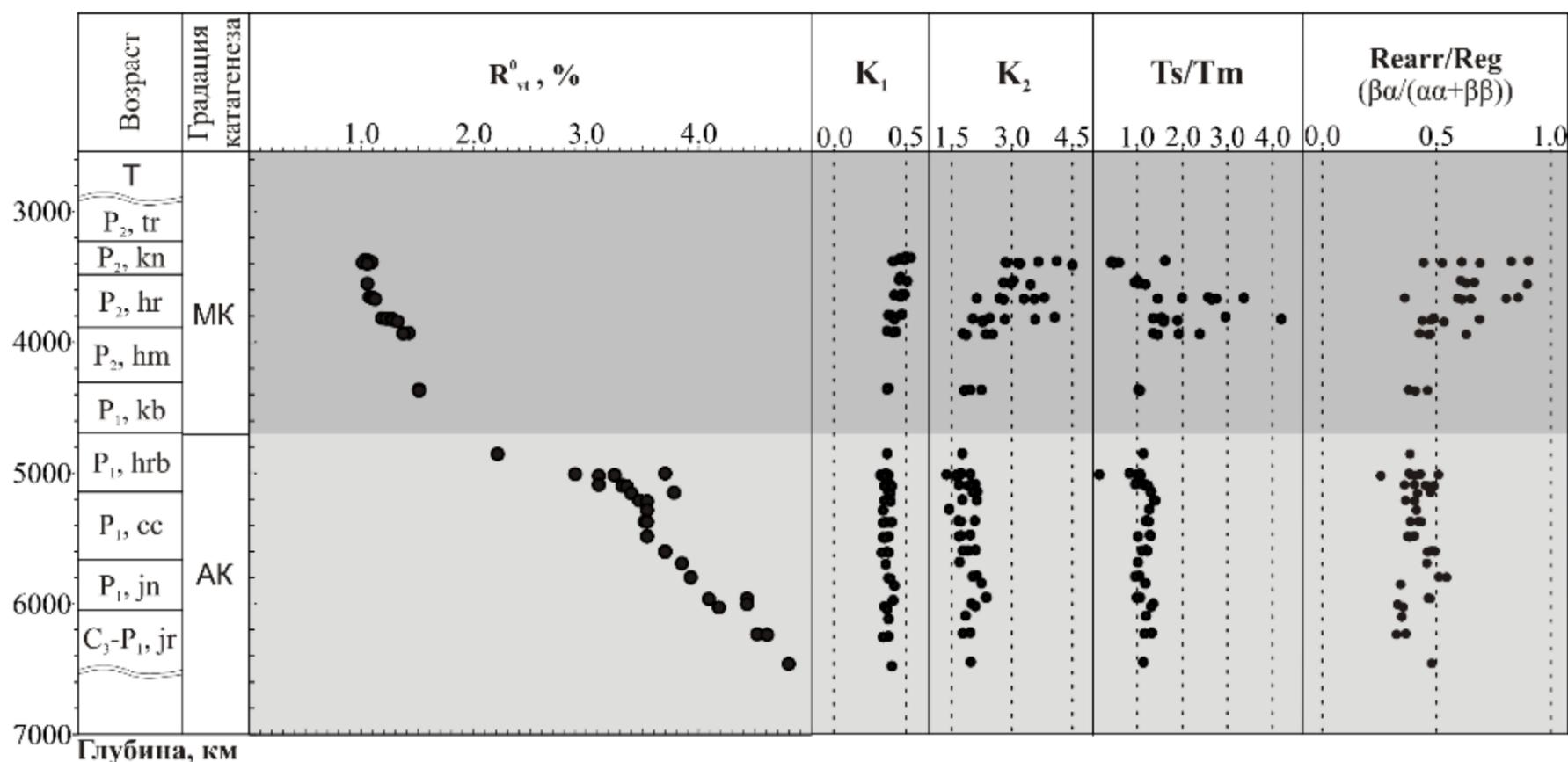
Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 30.06.2022

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 144. Зак. № 210

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3



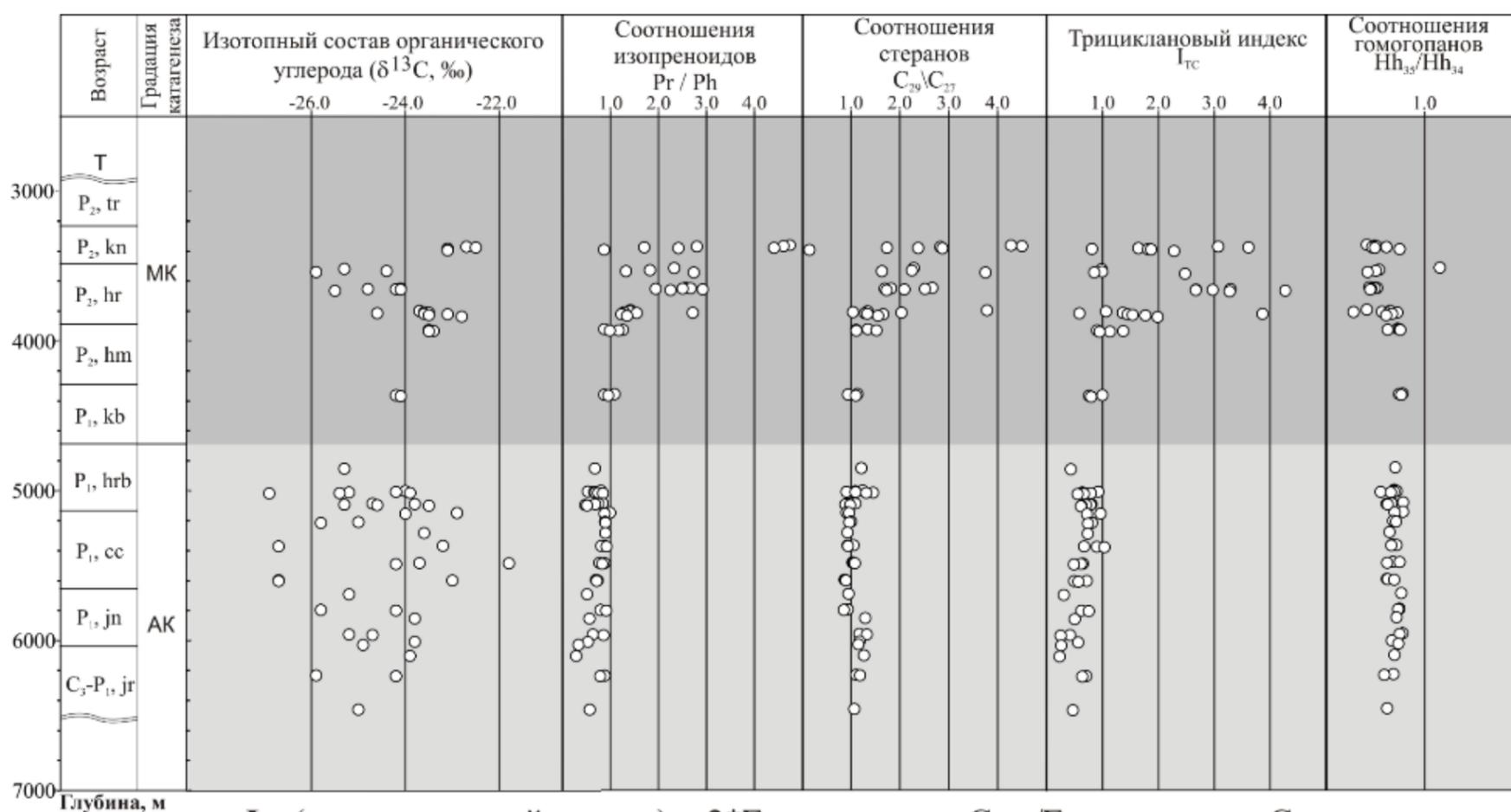
K_1 - соотношение стереохимических эписмеров $\alpha\alpha$ -стеранов C_{29} [$K_1=20S/20(S+R)$]

K_2 - соотношение между изостеранами и исходными биостеранами состава C_{29} [$K_2=\beta\beta 20(S+R)/\alpha\alpha 20R$]

Ts/Tm - соотношение 18 α (H)-22,29,30-триснорнеогопана (Ts) и 17 α (H)-22,29,30-трисноргопана (Tm)

Rearr/Reg - соотношение диа- (Rearrangement - $\beta\alpha$) и регулярных (Regular - $\alpha\alpha+\beta\beta$) стеранов

Рисунок 6 – Биомаркерные показатели катагенеза органического вещества (+ отношение диа- и регулярных стеранов)



$$I_{TC} (\text{трициклановый индекс}) = 2 * \frac{\sum \text{трицикланов } C_{19-20}}{\sum \text{трицикланов } C_{23-26}}$$

Рисунок 7 – Биомаркерные показатели генезиса и обстановок диагенеза органического вещества

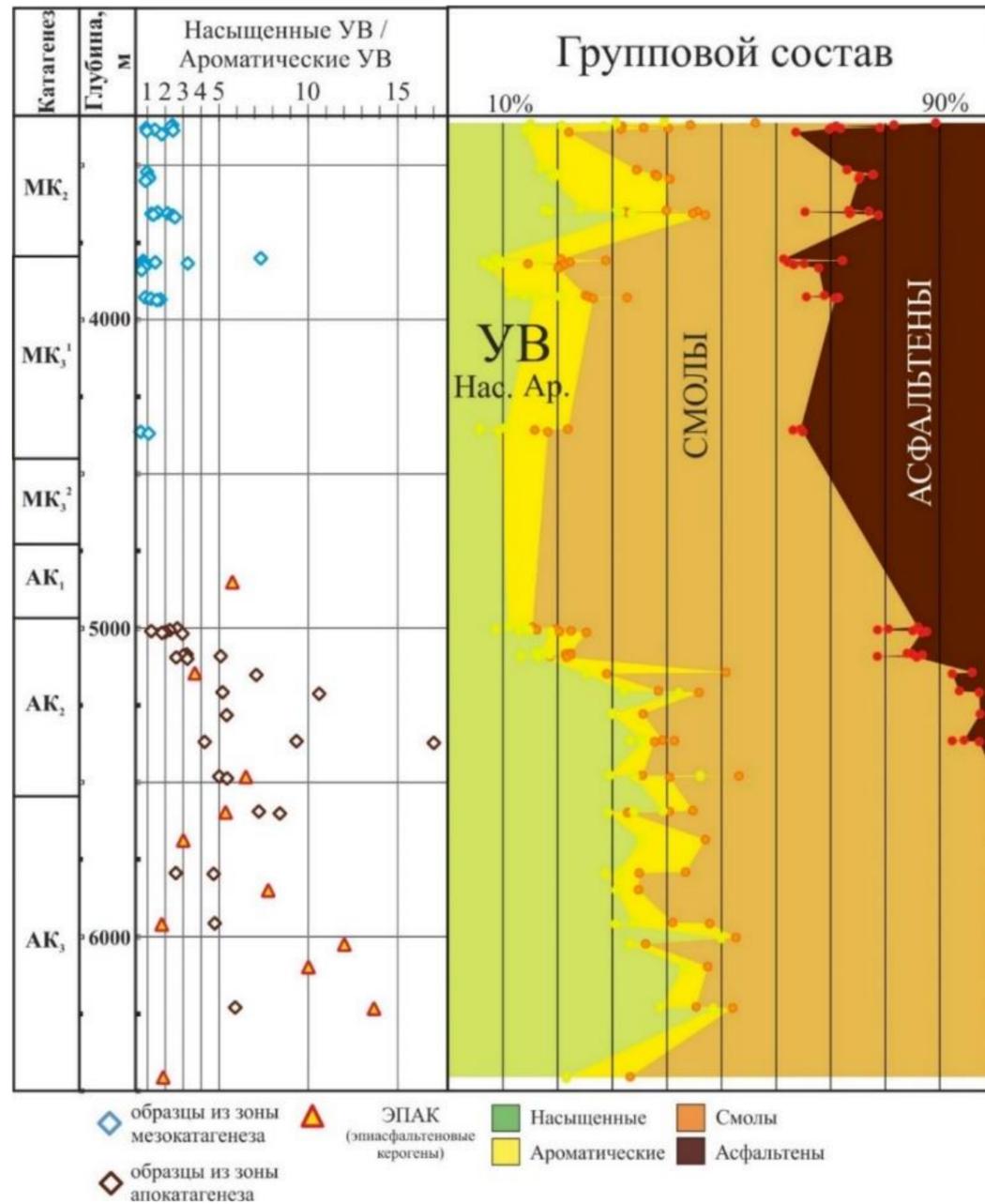


Рисунок 5 – Изменение отношения насыщенных углеводородов к ароматическим и группового состава битумоидов с ростом катагенеза в скв. Средневиллойская-27

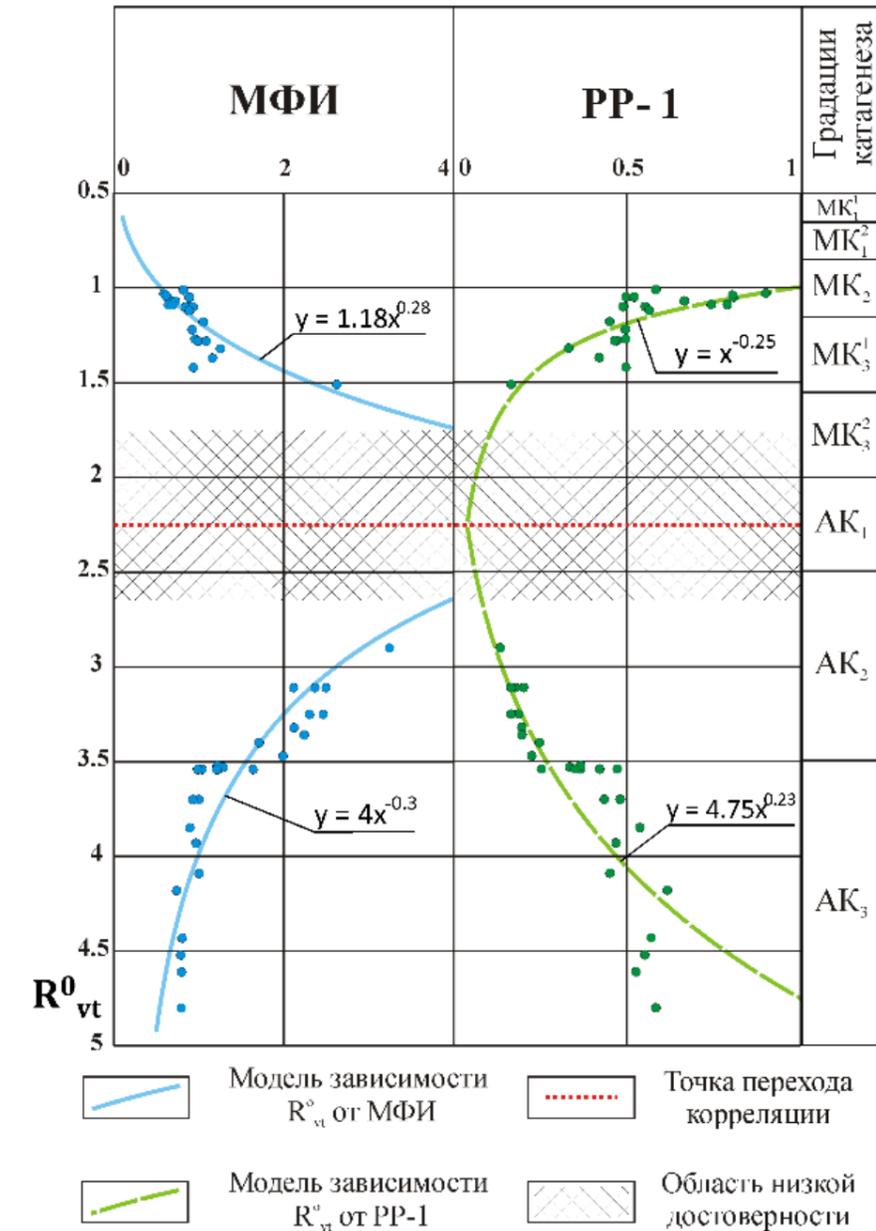


Рисунок 9 – Построение моделей зависимости отражательной способности витринита (R_{vt}^0 , %) от феноантроновых индексов МФИ [Петров, 1984] и PP-1 [Alexander et al., 1986]