

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ФЕНАНТРЕНОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗРЕЛОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЗДНЕМ МЕЗОКАТАГЕНЕЗЕ И АПОКАТАГЕНЕЗЕ (НА ПРИМЕРЕ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ СРЕДНЕВИЛЮЙСКАЯ-27, ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

© 2022 г. К. В. Долженко^{a, *}, А. Н. Фомин^{a, b, **}

^aИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
пр. Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^bНовосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: DolzhenkoKV@ipgg.sbras.ru

**e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 19.02.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Одним из распространенных способов определения уровня зрелости по ароматическим соединениям являются индексы, основанные на изменении относительных содержаний фенантрена и его метилзамещенных производных. На основании изучения этих соединений в террагенном органическом веществе (ОВ) по материалам сверхглубокой скв. Средневилюйская-27 был рассмотрен набор соотношений, применяемых повсеместно в отечественной и зарубежной практике (МФИ, МР1-1, МР1-1mod., РР-1, ФИ). Получены уравнения расчета синтетических значений отражательной способности витринита по фенантреновым индексам зрелости в мезо- и апокатагенезе. 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. Продемонстрирован широкий разброс относительных содержаний собственно фенантрена в апокатагенезе и влияние этого фактора на ухудшение показателей зрелости фенантреновых отношений. Показана необходимость подбора уравнений для разных углеводородных систем и поиска границы перехода положительной корреляции фенантреновых индексов от отражательной способности витринита к отрицательной. Проведено сравнение полученных результатов с классическими представлениями.

Ключевые слова: катагенез, отражательная способность витринита, фенантрены, сверхглубокая скважина, Вилюйская синеклиза

DOI: 10.31857/S001675252201006X

Представленная работа является продолжением цикла исследований по изучению рассеянного органического вещества (РОВ) террагенного генезиса и изменений, происходящих в нем, в конце мезо- и в апокатагенезе на примере материалов скв. Средневилюйская-27 (Вилюйская синеклиза, Восточная Сибирь). Ранее комплексом геохимических методов была изучена алифатическая фракция битумоидов. Полученные результаты позволили опубликовать ряд работ (Каширцев и др., 2016, 2017; Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020) и дополнить наши знания о превращениях битумоидов в жестких термобарических условиях больших глубин. В ходе этих исследований было установлено, что в глубинном мезокатагенезе и апокатагенезе биомаркерные показатели теряют информативность для диагностики уровня зрелости

ОВ и его генетической природы. Изучение ароматической фракции позволит продолжить этот цикл исследований и подойти к вопросу оценки уровня преобразованности ОВ в глубокопогруженных горизонтах на основании биомаркерных соотношений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фактическим материалом послужили 70 образцов керн из сверхглубокой скважины Средневилюйская-27 в диапазоне глубин от 3370 м до 6458 м. По этим породам было выполнено 56 замеров отражательной способности витринита (R_{vt}° , %) и 70 анализов ароматической фракции битумоидов. Органическое вещество экстрагировалось из породы хлороформом. Асфальтены оса-

ждались петролевым эфиром. Мальтеновая часть разделялась на фракции в хроматографических колонках. Фракции ароматических УВ исследовались методом хромато-масс-спектрометрии на системе, состоящей из газового хроматографа 6890 и масс-селективного детектора Agilent 5973N. Замеры отражательной способности проводились на микроскопе-спектрофотометре МСФП-2. При решении задач по построению зависимостей фенантеновых индексов от уровня зрелости (в эквиваленте отражательной способности витринита) за основу были взяты стандартные решения, предлагаемые программой Excel (MS Office), в которые вносились изменения коэффициентов функции (угол наклона, смещение, кривизна) для достижения наибольшего коэффициента корреляции расчетных значений с фактическими показателями R_{vt}° . Для оценки качества полученных моделей использовался регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В большинстве своем ароматические соединения в нефтях и битумоидах являются продуктами диагенетических превращений, процессов циклизации и дегидрирования, и потому не являются в широком смысле биометками исходного органического материала. Одними из наиболее важных для геохимии характеристик ароматических соединений являются большая термодинамическая устойчивость, энергетически выгодная структура сопряженных двойных связей (ароматическое кольцо) и склонность к реакциям замещения. Эти черты позволяют оценить степень преобразованности ОБ и вмещающих пород в области действия высоких температур, где насыщенные УВ-биомаркеры (углеводороды-биомаркеры) подвергаются сильной деструкции и перестают быть информативными. Среди соединений, часто используемых в качестве возможных индикаторов зрелости, были рассмотрены фенантены (P + MP), моноароматические (MAS) и триароматические (TAS) стероиды, дибензтиофены (DBT; 1-4MDBT). На основании их процентных содержаний на сумму указанных классов соединений было установлено, что относительные содержания фенантенов резко снижаются, приблизительно в половину от исходного (на сумму ранее указанных ароматических), при достижении конца апокатагенеза. Для моно- и триароматических стероидов они напротив увеличиваются от первых процентов до 6–8 и 10–15, соответственно, и здесь можно предположить влияние процессов ароматизации циклоалканов на основании уменьшения содержания стеранов на аналогичных глубинах (отмечено в работе (Конторович и др., 2020)). Установлено, что соотношение триароматических стероидов (TA(I)/TA(I+II), варианта C_{20-21} -TAS/(C_{26-28} (S + R)-TAS + C_{20-21} -TAS) (Peters et al., 2005)) и моно-

и триароматических стероидов (TA/(MA + TA), варианта C_{28} -TAS/(C_{29} -MAS + C_{28} -TAS) (Peters et al., 2005)) в апокатагенезе ($R_{vt}^{\circ} > 2.0\%$), показывает общий “коридор” с ростом отражательной способности витринита, но большой разброс (дисперсия) сильно ухудшает его информативность (рис. 1). Не все из рассмотренных соединений имеют выраженную реакцию на условия больших глубин. Так, в апокатагенезе пока не установлено четкой зависимости между дибензтиофенами и определениями уровня зрелости по витриниту.

Исходя из данной выше общей оценки рассмотренных соединений наибольшее внимание было уделено фенантеновым показателям зрелости, т. к. они демонстрируют высокую степень корреляции с отражательной способностью витринита даже в условиях позднего апокатагенеза (будет показано далее) и имеют выраженные и легко интерпретируемые пики на протяжении всего исследуемого интервала (рис. 2). По отношению к фенантенам в опубликованной литературе предлагаются различные варианты образования ароматических молекул из биологических предшественников. В работе (Петров, 1984) в качестве источников предложены стероиды. Авторы рукописи (Конторович и др., 2004) рассматривают пути образования через алкилирование низших ароматических УВ и дегидрирование стероидов и терпеноидов. В статье (Каширцев и др., 2018) проведено обобщение механизмов, предложенных зарубежными исследователями, где в качестве прекурсоров предполагаются трициклические терпеноиды с изопреноидной цепью, тетрахиманол, изоарборинол и абиетиновая кислота. Также фенантенам в качестве индикаторов уровня зрелости ОБ уделяется внимание как в зарубежной, так и в отечественной литературе (Radke et al., 1982a,b; Alexander et al., 1986; Cassani et al., 1988; Peters et al., 2005; Szczerba, Rospondek, 2010; Петров, 1984; Конторович и др., 2004; Каширцев и др., 2018).

В ходе работы в образцах битумоидов были рассмотрены относительные содержания фенантена и его метилзамещенных производных (P – фенантен, MP – метилфенантены: 1-MP, 2-MP, 3-MP, 9-MP). В литературных источниках, а также в сборнике Biomarker Guide vol.2 (Peters et al., 2005), предлагается ряд коэффициентов, рассчитываемых по указанным соединениям:

1. МФИ = $(2-MP + 3-MP)/(1-MP + 9-MP)$ (Петров, 1984);
2. MPI-1 = $1.5(2-MP + 3-MP)/(P + 1-MP + 9-MP)$ (Radke et al., 1982a,b);
3. MPI-1mod. = $1.89(2-MP + 3-MP)/(P + 1.26(1-MP + 9-MP))$ (Cassani et al., 1988);
4. PP-1 = $1-MP/(2-MP + 3-MP)$ (Alexander et al., 1986);
5. ФИ = $2-MP/P$ (Конторович и др., 2004).

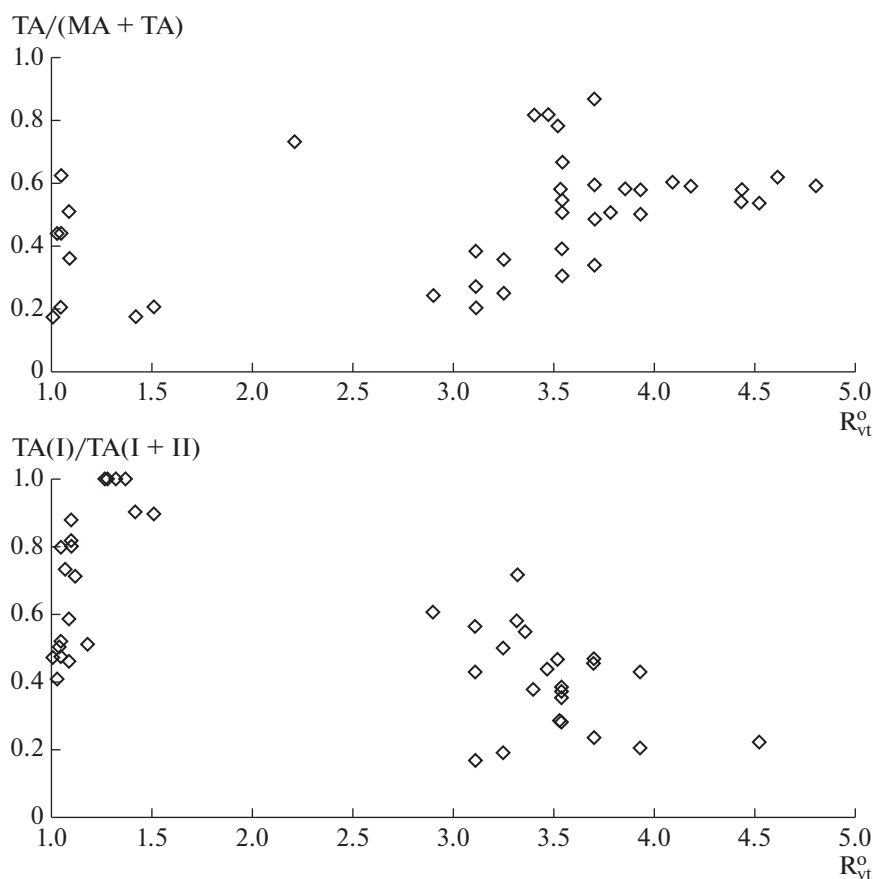


Рис. 1. Зависимости соотношений триароматических стероидов ($TA(I)/TA(I + II)$) и моно- и триароматических стероидов ($TA/(MA + TA)$) от отражательной способности витринита (R_{vt}^o , %).

Среди ограничений показателей 1–4, авторы сборника “The Biomarker Guide” указывают следующее: коэффициент необходимо калибровать для каждой УВ системы; образцы разного уровня зрелости могут показывать одно и то же значение, так как по наблюдениям авторов имеют место положительная корреляция от показателя R_{vt}^o в зоне активной генерации УВ (альфа-структуры (положения 1- и 9-) с ростом температуры переходят в бэта (2- и 3-)) и отрицательная при спаде интенсивности процессов новообразования (обусловлена деструкцией) (также отмечено в работе (Петров, 1984)); наличие карбонатных пород завышает данные показатели, что требует дополнительной калибровки; влияние процессов миграции. Показатель 5 был получен на основании изучения образцов битумоидов разнофациальных юрских пород Западной Сибири и показал линейную зависимость от отражательной способности витринита в диапазоне от 0.55 до 0.85% R_{vt}^o . На рис. 3 показано соблюдение описанных выше прямой и обратной зависимости (или наоборот в случае инвертирования гомологов в числителе и

знаменателе) изменения отношений метилзамещенных производных и собственно фенантрена от R_{vt}^o в мезо- и апокатагенезе. Построенные графики зависимости изменения фенантренных отношений от уровня зрелости почти во всех случаях показали высокую степень корреляции в области мезокатагенеза. Исключением стал MPI-1mod., для которого не было установлено зависимости во всем изученном интервале. Помимо этого, для трёх показателей (МФИ, PP-1, MPI-1) наблюдается смена корреляции при одной и той же степени преобразованности.

Очевидно, что соотношения, в которых при расчетах не используется собственно фенантрен имеют более высокую степень корреляции с отражательной способностью витринита в области апокатагенеза, помимо этого, индексы, основанные на разных комбинациях описываемых соединений, показывают различную дисперсию от общего тренда. Высокий разброс относительных содержаний фенантрена с началом апокатагенеза можно заметить и на масс-фрагментограммах (рис. 2). Отсюда вытекает, что в зависимости от положения метильной группы производные ме-

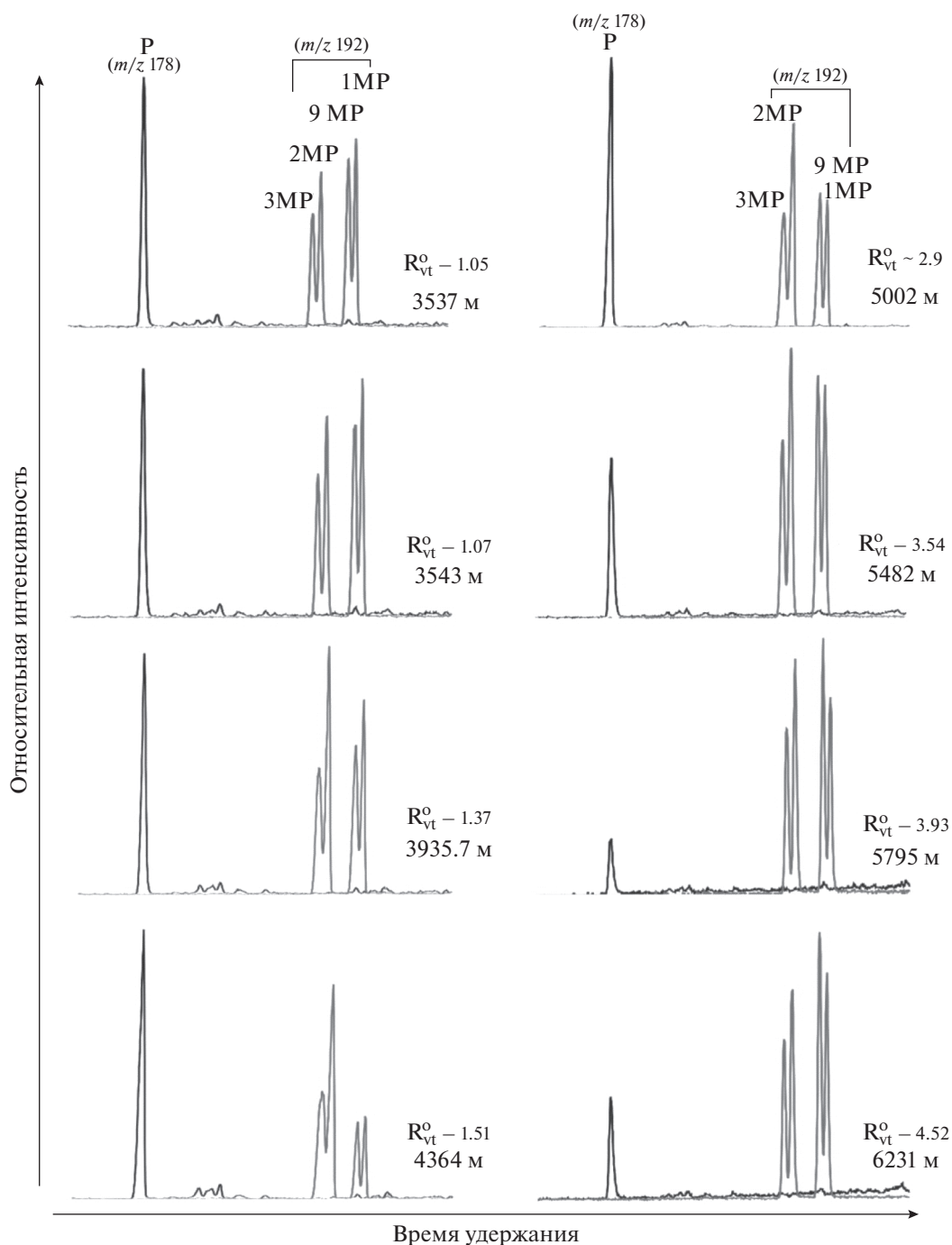


Рис. 2. Масс-фрагментограммы фенантрена (m/z 178) и его метил-замещенных производных (m/z 192) в мезо- (слева) и апокатагенезе (справа).

тилфенантрена имеют различную стабильность с нарастанием температуры и давления. В свою очередь, относительные содержания фенантрена в образцах битумоидов с большой вероятностью контролируются не столько уровнем зрелости, сколько комбинацией других факторов. Объяснение данному явлению представлено в работе (Szczerba, Rospondek, 2010), где проводилось

сравнение модельных данных по термодинамической стабильности и кинетике реакций деструкции и новообразования метилфенантронов как с собственными фактическими материалами, так и с опубликованными данными соотношения этих соединений в органическом веществе III-го типа (террагенного). Как отмечалось выше, из работ (Radke и Welte 1983; Peters et al., 2005; Петров,

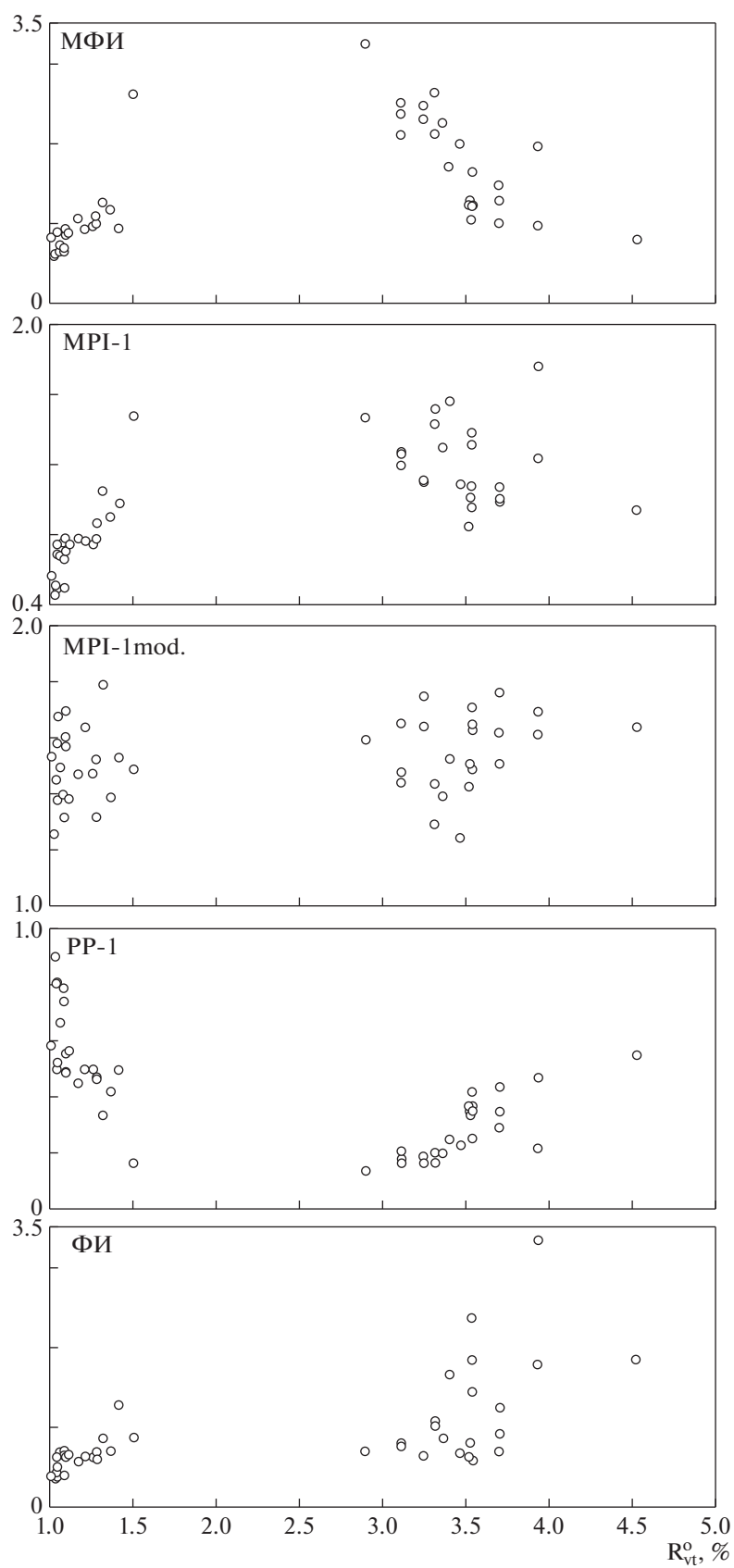


Рис. 3. Зависимости изменения фенантреновых показателей зрелости от отражательной способности витринита (R_{vt}^o).

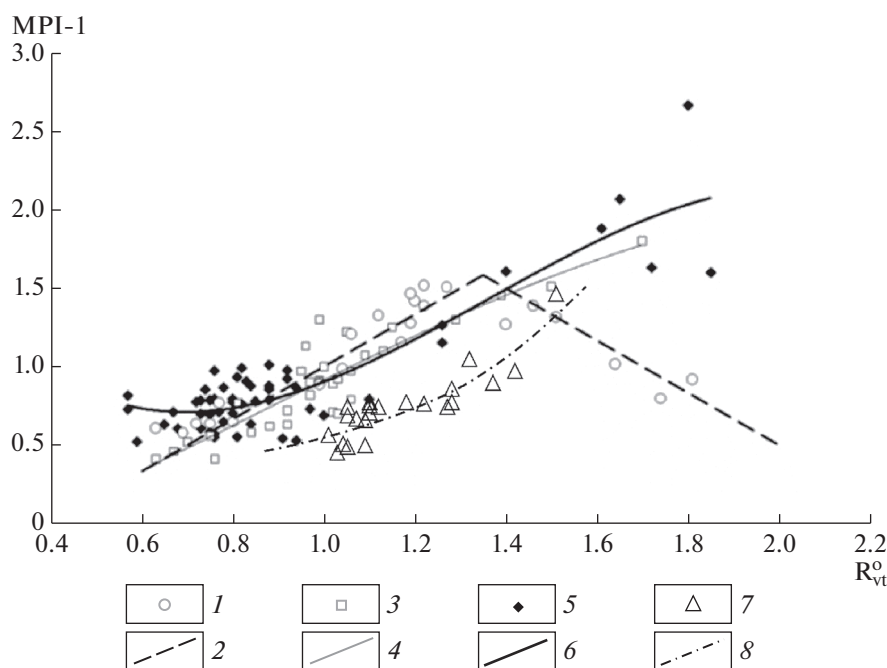


Рис. 4. Зависимость отношения фенантрена и его метилзамещенных производных MPI-1 от отражательной способности витринита (R_{vt}^o) в зоне мезокатагенеза по данным различных авторов (по (Szczerba, Rospondek, 2010)). Условные обозначения: 1 – Radke et al. (1982a); 2 – тренд изменения MPI-1 по Radke и Welte (1983); 3, 4 – Radke et al. (1982b) и линия тренда; 5, 6 – Szczerba, Rospondek, (2010) и линия тренда; 7, 8 – в скв. Средневилюйская-27 и линия тренда.

1984) известно, что имеют место положительная корреляция от показателя R_{vt}^o в зоне активной генерации УВ и отрицательная при спаде интенсивности процессов новообразования (для отношений вида MPI-1 и МФИ). В связи с этим авторы предприняли попытку оценить термодинамическую устойчивость каждого соединения и сопоставить полученные результаты с известными индексами. Во-первых, им не удалось обнаружить саму смену направления корреляции в диапазоне R_{vt}^o , от 0.6 до 2.0 (рис. 4; по (Peters et al., 2005) она приурочена к $1.35\% R_{vt}^o$), и, по их мнению, существует вероятность того, что изначальная коллекция Radke М. являлась непредставительной. В качестве возможных причин такого смещения Szczerba М. и Rospondek М.Ж. выделяют: каталитическую способность матрицы вмещающих пород, особенно влияющую на показатель при низких значениях содержания органического углерода в породе; последствия миграционных процессов; использование Р (в пределах мезокатагенеза авторы статьи получили коэффициент детерминации от R_{vt}^o – $R^2 = 0.2$) и 9-МР при расчетах. На основании фактического материала из скв. Средневилюйская-27 нам тоже не удалось проследить смену корреляции в предложенном диапазоне, она установлена в области апокатагенеза при значениях R_{vt}^o около

2.3% (рис. 3). Во-вторых, на основании моделирования термодинамического равновесия метилзамещенных производных фенантрена отмечено, что нет единой реакции, определяющей превращения этих молекул, что также указывает на необходимость подбора правила пересчета для различных осадочных бассейнов. Поэтому обычно применяемый индекс зрелости MPI-1, составленный на основе пяти переменных, скорее отражает не столько термодинамический контроль зрелости, а является молекулярным выражением сложных процессов в природе. Оценка свободной энергии Гиббса изомеров метилфенантрена показала, что наиболее стабильными являются 2- и 3-МР, а затем 9- и 1-МР. Авторами статьи показано, что 9-метилфенантрен имеет тенденцию к деметилированию с гораздо более высокими скоростями, чем другие изомеры, но только при наличии подходящих акцепторов метила. На основании наблюдения поведения этих соединений в процессе постепенного катагенеза в пермско-карбонных породах Вилюйской синеклизы установлено, что наиболее устойчиво себя ведут 2-, 3- и 1-МР, а изменение содержания 9-МР не так значительно, но отличается, что соответствует материалам, изложенным в статье. Отсюда совершенно логичен разброс степени корреляции для разных индексов (рис. 3). Стоит отметить, что для материалов, представленных в настоящей работе, предполага-

Таблица 1. Уравнения расчета отражательной способности витринита на основании изменении фенантrenoвых соотношений

Показатель	Интервал, % R_{vt}°	
	0.5–1.75	2.6–5.0
МФИ	$R_{(МФИ)}^{\circ} = 1.18(МФИ)^{0.28}$	$R_{(МФИ)}^{\circ} = 4(МФИ)^{-0.3}$
PP-1	$R_{(PP-1)}^{\circ} = (PP-1)^{-0.25}$	$R_{(PP-1)}^{\circ} = 4.75(PP-1)^{0.23}$

емой точке перегиба соответствует граница мезо- и апокатагенеза, где, как было показано ранее (Каширцев и др., 2016, 2017; Долженко и др., 2019; Конторович и др., 2020) проявляется множество признаков в глубокой перестройке ОВ: высвобождение окклюдированных УВ; высаживание асфальтенов в нерастворимый остаток; глубокая деструкция высокомолекулярных насыщенных УВ и другие.

Для зоны апокатагенеза наименьшая степень разброса у показателей МФИ и PP-1. В целом общий “коридор” показывают МР-1 и ФИ, но имеют слишком большую дисперсию для достоверной интерпретации. Для показателей, предложенных Петровым А.А. (1) и Alexander R. (4) характерно отсутствие собственно фенантрена в формуле, для расчета используются только метилзамещенные производные. При этом в области апокатагенеза у PP-1 несколько меньший уровень отклонения от предполагаемого среднего, чем МФИ, а его отличие от МФИ заключается в отказе от использования 9-МР при расчете. Для следующего шага – получения некоторой модели, с помощью которой можно было бы оценивать зрелость вмещающих пород в эквиваленте R_{vt}° на основании фенантrenoвых индексов, необходимо было задать граничные условия (рис. 5):

– заданный интервал ограничен в пределах 0.5–5.0% R_{vt}° , т.е. мезо- и апокатагенез;

– в диапазоне значений R_{vt}° от 1.75 до 2.6% построения имеют низкую степень достоверности, т.к. на неё приходится переходная зона между положительной и отрицательной корреляцией показателей и характер её распределения в отсутствии фактических замеров доподлинно неизвестен;

– в диапазоне значений R_{vt}° от 0.5 до 0.9% построения имеют слабую степень достоверности ввиду отсутствия фактических замеров R_{vt}° ;

– в заданном интервале любая экстраполяция модели не должна иметь отрицательных значений;

– при подборе функции, описывающей изменения параметра, её экстраполяция не должна

противоречить установленным геологическим фактам: закономерный рост или снижение отношений соответствующих производных метилфенантрена в зависимости от положения относительно точки перехода отрицательной корреляции в положительную ($R_{vt}^{\circ} = 2.3\%$).

На основании описанных выше представлений об изменении фенантrenoвых соотношений с ростом катагенеза и заданных граничных условий были получены уравнения расчета отражательной способности витринита для мезо- и апокатагенеза (табл. 1).

Для проверки гипотезы расчетные показатели отражательной способности витринита были сопоставлены с фактическими замерами (рис. 6). Оценка соответствия полученных пар множеств (за вычетом образцов аллохтонных битумоидов и замеров R_{vt}° с подозрением на переотложенность или локальный прогрев в корреляции участвовало 49 пар точек) выполнялась при помощи регрессионного анализа. Так как очевидно, что между значениями имеет место нелинейная зависимость, применялось уравнение квадратичной регрессии. Между значениями R_{vt}° и $R_{(МФИ)}^{\circ}$ установлена следующая взаимосвязь: индекс нелинейной корреляции $r^{\circ} = 0.989$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.979$, среднее отклонение 5.33%. Для R_{vt}° и $R_{(PP-1)}^{\circ}$ показатели следующие: $r^{\circ} = 0.993$, $R^2 = 0.985$, среднее отклонение = 5.8%. Такие показатели указывают на высокую достоверность полученных моделей расчетных значений отражательной способности витринита. Помимо этого, можно сделать вывод, что отсутствие 9-МР в соотношении фенантrenoв несколько повышает связь между расчетными и фактическими значениями, возросшая же ошибка в свою очередь говорит о более удачном подборе математического правила в случае МФИ.

Использование приведенных выше уравнений справедливо для террагенного органического вещества верхнепалеозойского комплекса Вилюйской синеклизы при сохранении типа его по простиранию, например, в пределах Хапчагайского поднятия. При значительном удалении от скважины Средневилюйская-27 и смене фаций верх-

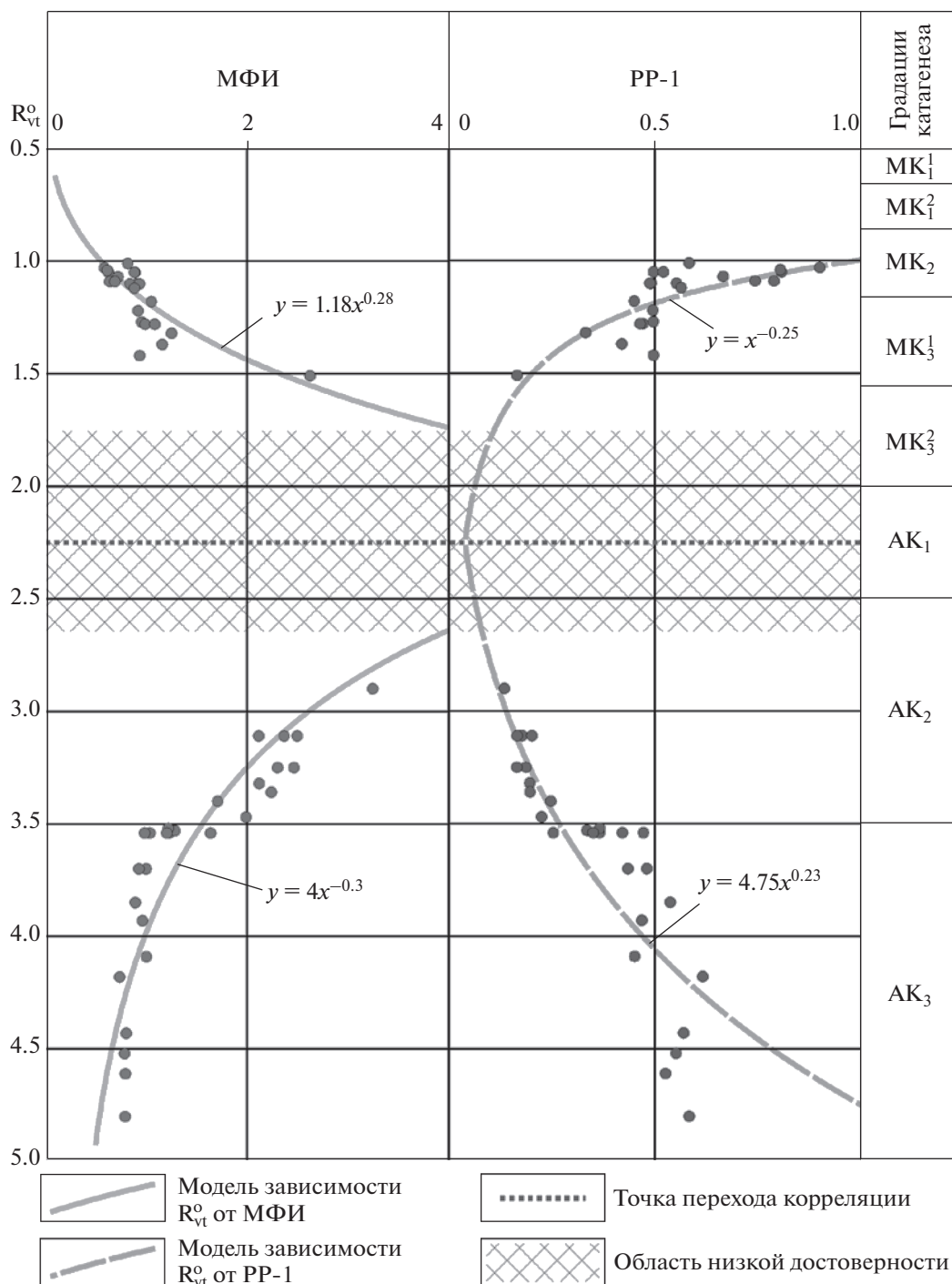


Рис. 5. Построение моделей зависимости отражательной способности витринита (R_{vt}^o , %) от фенантроновых индексов МФИ (Петров, 1984) и PP-1 (Peters et al., 2005).

непалеозойских пород достоверность предложенных способов расчета уровня зрелости может существенно снизиться. Также стоит учитывать указанные при составлении границ применимости модели диапазоны. Полученные результаты могут быть использованы при восстановлении максимальных палеотемператур достигнутых

органическим веществом и вмещающими его породами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как биомаркерные параметры зрелости основаны главным образом на изменении соот-

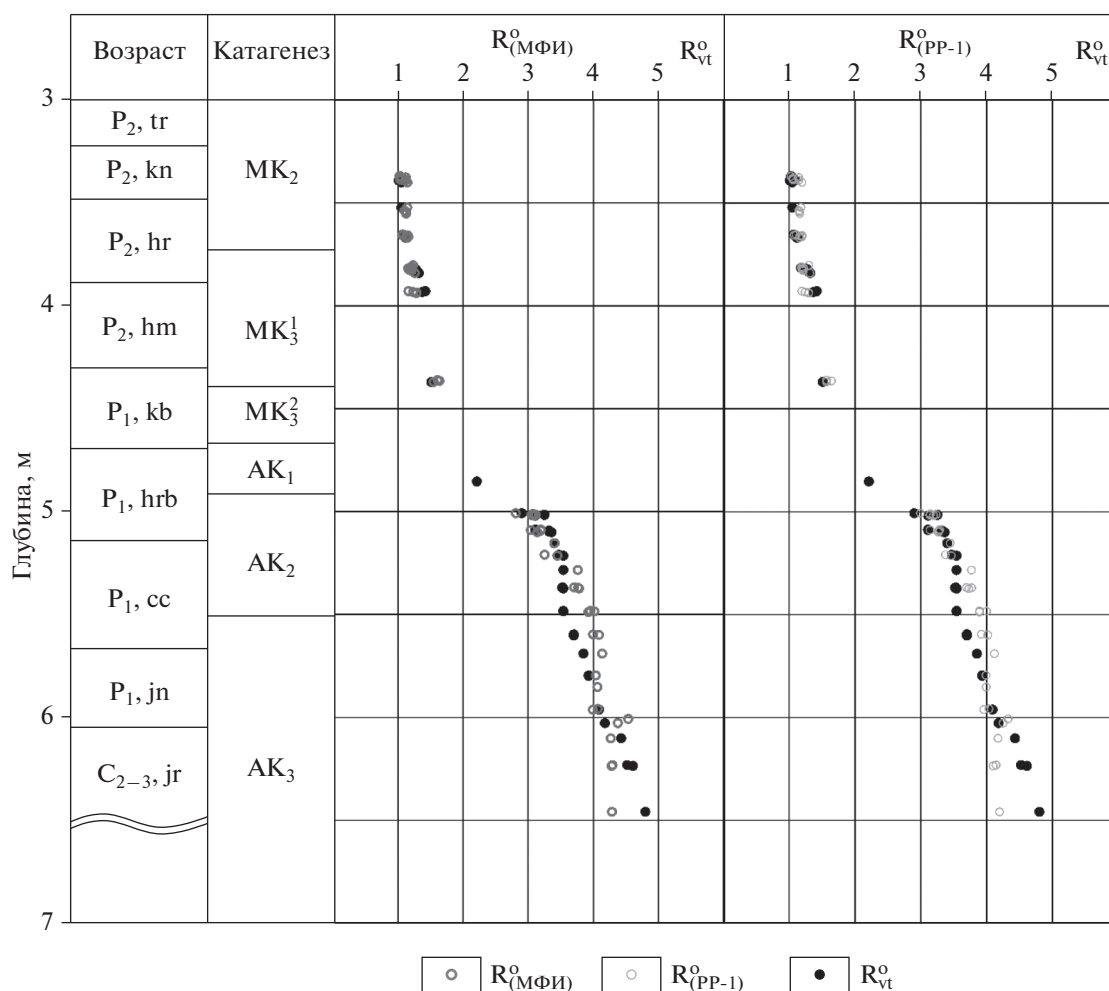


Рис. 6. Сравнение фактических замеров отражательной способности витринита (R_{vt}^o , %) с расчетными по фенантреновым индексам ($R_{(PP-1)}^o$ и $R_{(MFI)}^o$).

ношения биологических и новообразованных соединений, а показатели генезиса на унаследовании исходных биомолекул, с ростом влияния деструкции при высоких температурах позднего мезо- и апокатагенеза эти данные становятся неприменимы для оценки геохимических характеристик вещества. Представленные в настоящей работе результаты показали, что ароматические соединения не только более устойчивые по сравнению с алифатической фракцией, что было отмечено в более ранних работах цикла исследований рассеянного ОВ верхнепалеозойского комплекса Вилуйской синеклизы, но и показывают высокую степень корреляции с отражательной способностью витринита. Полученные нами данные подтвердили результаты лабораторных исследований по высокой стабильности 2-, 3-, и 1-МР и несколько меньшей для 9-МР. Несмотря на то, что пока механизм поведения собственно фенантрена в жестких термобарических условиях апокатагенеза не очевиден (допустимо предполо-

жить такие возможные сценарии: метилирование, конденсация, деструкция), очевидно, что исключение его из соотношений значительно повышает степень корреляции с уровнем преобразованности. Важно понимать, что метилфенантреновые индексы не являются абсолютным палеотермометром как мацералы углей, а отражают реакцию конкретного типа ОВ на рост температуры и давления, и, по всей вероятности, при каталитической роли минеральной матрицы. С другой стороны, продемонстрированная сходимость расчетных и фактических замеров говорит об их высокой чувствительности к этим процессам, а, следовательно, при необходимых расчетах и возможности калибровки с помощью других методов определения зрелости (пиролиз, мацералы углей, УВ-биомаркеры), могут стать надежным инструментом оценки преобразованности ОВ и вмещающих его пород. Последнее особенно важно при прогнозах реализации материнского потенциала глубокопогруженными материнскими толщами.

Обобщение в будущем подобных работ позволит разработать надежный аппарат для оценки геохимических характеристик ОБ в жестких термобарических условиях, а также прогноза количества сгенерированных УВ производящими толщами и сохранности залежей при усилении этих факторов. Таким образом, необходимо с одной стороны искать новые способы оценки катагенеза за пределами работоспособности привычных соотношений, с другой продолжать изучение влияния термической зрелости на молекулярный состав углеводородов.

Авторский коллектив выражает благодарность сотрудникам ИНГГ СО РАН “Лаборатории геохимии нефти и газа” за выполнение аналитических работ и “Лаборатории теоретических основ прогноза нефтегазонасности” за советы при выполнении математических построений.

Исследование выполнено в рамках проекта ФНИ № 0331-2019-0022 “Органическая геохимия и история геологического развития доминантных нефтегазовых систем верхнего протерозоя и фанерозоя Сибири”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Долженко К.В., Фомин А.Н., Меленевский В.Н. (2019) Геохимическая характеристика террагенного органического вещества Верхнепалеозойского комплекса виллюйской синеклизы и некоторые особенности его преобразования под действием термобарических условий больших глубин. *Георесурсы*. **21**(4), 4–12.
- Каширцев В.А., Фомин А.Н., Шевченко Н.П., Долженко К.В. (2016) Новые моноароматические стероиды в органическом веществе зоны апокатагенеза. *ДАН*. **496**(4), 465–469.
- Каширцев В.А., Долженко К.В., Фомин А.Н., Конторович А.Э., Шевченко Н.П. (2017) Углеводородный состав битумоидов террагенного органического вещества больших глубин (зоны апокатагенеза). *Геология и геофизика*. **58**(6), 869–879.
- Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Головки А.К., Никитенко Б.Л., Зуева И.Н., Чалая О.Н. (2018) Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фанерозойских отложений и в нефтях Сибирской платформенной области. *Геология и геофизика*. **59**(10), 1720–1729.
- Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Иванова Е.Н., Фомин А.Н. (2004) Фенантрены, ароматические стераны и дибензтиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии. *Геология и геофизика*. **45**(7), 873–883.
- Конторович А.Э., Долженко К.В., Фомин А.Н. (2020) Закономерности преобразования террагенного органического вещества в мезо- и апокатагенезе. *Геология и геофизика*. **61**(8), 1093–1108.
- Петров Ал.А. (1984) Углеводороды нефти. М.: Наука, 264 с.
- Alexander R., Strachan M.G., Kagi R.I., Van Bronswijk W. (1986) Heating rate effects on aromatic maturity indicators. *Org. Geochem.* **10**, 997–1003.
- Cassani F., Gallango O., Talukdar S., Vallejos C., Ehrmann U. (1988) Methylphenanthrene maturity index of marine source rock extracts and crude oils from the Maracaibo Basin. *Org. Geochem.* **13**, 73–80.
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005) *The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*. UK, Cambridge: UK Cambridge University Press, 1155 p.
- Radke M., Welte D.H., Willsch H., (1982a) Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **46**, 1–10.
- Radke M., Willsch H., Leythaeuser D., Teichmüller M., (1982b) Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **46**, 1831–1848.
- Radke M., Welte D.H., (1983) The MP Index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons. *Advances in organic geochemistry, 1981: proceedings of the 10th International Meeting on Organic Geochemistry, University of Bergen, Norway, 14–18 September 1981*, 504–512.
- Szczerba M., Rospondek M.J. (2010) Controls on distributions of methylphenanthrenes in sedimentary rock extracts: Critical evaluation of existing geochemical data from molecular modelling. *Org. Geochem.* **41**, 1297–1311.