

УДК 543.7/79; 543.8

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИК-СПЕКТРОСКОПИИ В ОЦЕНКЕ НЕФТЕГЕНЕРАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕФТЯНЫХ СЛАНЦЕВ

Ю.Ю. Петрова^{1*}, Н.Г. Таныкова¹, М.Ю. Спасенных², Е.В. Козлова²

⁽¹⁾ Сургутский государственный университет, кафедра химии Института естественных и технических наук; ⁽²⁾ Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов; *e-mail: yur.71@mail.ru)

Проведено исследование керогеносодержащей породы нефтяных сланцев с использованием методов ИК-спектроскопии и пиролиза (по методике Рок-Эвал). На примере пород доманиковых отложений показано, что исследования методом ИК-Фурье-спектроскопии в комплексе с пиролитическими исследованиями дают возможность получать информацию о групповом составе органического вещества и оценивать нефтегенерационный потенциал пород.

Ключевые слова: нетрадиционные коллекторы, ИК-Фурье-спектроскопия, пиролиз по методике Рок-Эвал, структурно-групповой анализ, спектральные коэффициенты.

В связи с истощением углеводородных запасов в последнее десятилетие фокус интересов в добыче нефти сместился от традиционных коллекторов с высокой пористостью и проницаемостью к нетрадиционным или трудноизвлекаемым ресурсам. В наиболее известных нетрадиционных коллекторах преобладают глинистые и кремнистые породы, имеющие низкую пористость и чрезвычайно низкую проницаемость. Кроме того, крайне ограничены знания о составе и свойствах находящихся в таких породах флюидов. Техническое совершенствование методов ИК-спектроскопии на современном уровне дает возможность детального исследования рассеянного органического вещества (ОВ) непосредственно в низкопористой среде коллектора и открывает широкие горизонты его изучения.

Повышенный интерес к высокоуглеродистым, обогащенным ОВ породам связан с их запасами и перспективами добычи сланцевой нефти [1–5]. Аналогом сланцевых толщ в России являются доманиковые отложения Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (НГБ), баженовская свита Западной Сибири, хадумский горизонт Предкавказья и т.д. Большая часть ОВ высокоуглеродистых доманиковых отложений приходится на смолисто-асфальтеновые компоненты, а также на кероген, который представляет собой нерастворимую часть ОВ, содержащего в основном химически прочно связанные компоненты внутри породы; лишь под действием температуры свыше 100 °С он превращается в углеводороды [6–8].

Содержание ОВ в нефтематеринских породах традиционно оценивают с помощью методов

сжигания, таких как анализ общего органического углерода или программируемый пиролиз [9]. Они выполняются путем нагревания небольшого количества измельченной породы до высокой температуры (300–1000 °С) и наблюдения за продуктами с помощью пламенно-ионизационного детектора для методов пиролиза (углеводороды) или инфракрасной ячейки для методов сжигания (СО и СО₂). Образцы пород необходимо предварительно обработать соляной кислотой для удаления карбонатов. В противном случае при нагревании образца присутствие неорганического углерода приводит к завышению содержания общего органического углерода.

ИК-спектроскопия с Фурье-преобразованием (FTIR) уже много лет используется для оценки минералогии пород [9], а также для проведения структурно-группового анализа ОВ экстрагированных битумоидов и выделенного керогена [10–15], в том числе для получения характеристики типов керогена и выявления нефтегенерационного потенциала пород. Для сравнительных сопоставлений используют спектральные коэффициенты ароматичности, окисленности, разветвленности, алифатичности, осерненности и др. [16, 17], характеризующие структурно-групповой состав исследованных продуктов. Хорошую корреляцию наблюдали [17] между отношением интенсивности полос поглощения ароматических и алифатических групп и отражательной способностью витринита R_0 . С увеличением зрелости керогена II типа черных сланцев девона [17] на ИК-спектрах наблюдали увеличение интенсивности полос поглощения ароматических

групп, уменьшение интенсивности поглощения алифатических групп, исчезновение полос карбонильных и карбоксильных групп и снижение отношения интенсивностей поглощения CH_2 - и CH_3 -групп.

Традиционные подходы в исследованиях ОВ пород требуют длительной и трудоемкой пробоподготовки (экстракция битумоидов в аппарате Сокслета, кислотное растворение минеральной матрицы). Кроме того, при выделении керогена путем растворения минеральных пород трудно полностью удалить пирит и кварц. В данной работе показаны возможности метода ИК-спектроскопии для структурно-группового анализа органического вещества непосредственно в нефтематеринских породах (на примере доманиковых отложений) и оценки его генерационного потенциала.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. Объектом исследования послужили образцы кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых отложений доманикового горизонта Волго-Уральского НГБ и глинисто-кремнистые образцы баженовской свиты Западно-Сибирского НГБ.

Пробоподготовка. Для регистрации ИК-спектров в режиме диффузного отражения использовали небольшие кусочки пород со шлифованной поверхностью размером до 1,5 см.

Порошки для регистрации ИК-спектров однократно нарушенного полного внутреннего отражения (ОНПВО) получали осторожным растиранием предварительно измельченных образцов в агатовой ступке с последующей обработкой 0,1 н. HCl (стандарт-титр) в течение суток для растворения карбонатов. После промывания водой порошки высушивали при температуре не выше 130 °С в сушильном шкафу.

Таблетки бромида калия (для ИК-спектроскопии, $\geq 99\%$, «Sigma-Aldrich») готовили пресованием с навеской пробы, содержащей 0,1% породы (после растворения карбонатов), и использовали для регистрации спектров в режиме пропускания.

Оборудование. Породы до и после обработки соляной кислотой исследовали методом ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры в режимах ОНПВО и пропускания снимали на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием «Spectrum 100 Series» («Perkin Elmer», США) в диапазоне 4000–450 cm^{-1} с разрешением 4 cm^{-1} , оснащенном приставкой НПВО с алмазным кристаллом. ИК-спектры в режиме диффузного

отражения (на шлифованной поверхности пород) снимали на ИК-микроскопе «AIM-9000» («Shimadzu», Япония) с МСТ-детектором, охлаждаемым жидким азотом в диапазоне 4000–700 cm^{-1} с разрешением 8 cm^{-1} .

Пиролитические исследования проводили на приборе «HAWK RW» («Wildcat Technology», США) классическим методом «bulk rock» для карбонатных пород при увеличении температуры пиролиза от 650 до 750 °С.

Спектральные коэффициенты и пиролитические параметры. Для сравнительных сопоставлений использовали спектральные коэффициенты, характеризующие структурно-групповой состав ОВ пород: $C_1 = A_{1600}/A_{2870}$ (ароматичность); $C_2 = A_{1380}/A_{1465}$ (разветвленность); $C_3 = (A_{2870} + A_{1380})/A_{1600}$ (алифатичность), где A – скоррелированные по базовой линии значения интенсивности пиков поглощения на ИК-спектрах [16, 17].

Пиролитические исследования по методике Рок-Эвал [18–22] представляют собой прямой метод определения углеводородного потенциала органического вещества исследуемых пород, а также степени его реализации. В процессе пиролиза измеряют общее количество выделяющихся углеводородов, окиси и двуокиси углерода при ступенчатом подъеме температуры в инертной атмосфере и потоке воздуха, фиксируя параметры: S_0 – количество термически десорбируемых газов и легких углеводородов, S_1 – количество нефтяных углеводородов, S_2 – количество продуктов крекинга керогена и смолисто-асфальтеновые компоненты, S_3 – параметр, дающий представление о содержании кислорода в ОВ, S_4 – параметр, отвечающий сжиганию непиролизуемого ОВ (кокса), S_5 – количество углекислого газа, образующегося при разложении карбонатов (минеральный углерод, CC); $T_{\text{макс}}$, °С – температура, отвечающая степени преобразованности ОВ и коррелирующая с показателем отражательной способности витринита R_0 . В процессе пиролиза рассчитывают показатели, характеризующие генерационный потенциал и тип керогена: $\text{PI} = S_1/(S_1 + S_2)$ – индекс продуктивности, отражающий степень реализации генерационного потенциала, TOC – количество органического углерода (Total Organic Carbon), $\text{HI} = (S_2 \cdot 100)/\text{TOC}$ – водородный индекс и $\text{OI} = (S_3 \cdot 100)/\text{TOC}$ – кислородный индекс [18–20].

Результаты и их обсуждение

ИК-спектроскопия пород доманикового горизонта и баженовской свиты. Учитывая сложный и гетерофазный состав нефтематеринских

пород, состоящих из минералов, битумоидов и ОВ керогена, можно предположить, что на ИК-спектрах пород будут присутствовать широкие полосы поглощения, отвечающие колебаниям связей как органических, так и неорганических соединений, входящих в состав известных минералов (доломита, кальцита, кварца, глинистых минералов и др.). При этом положение и интенсивность полос на спектрах зависят от

содержания и соотношения ОВ и минералов, входящих в состав пород. Были исследованы ИК-спектры измельченных пород доманикового горизонта и баженовской свиты методами ОНП-ВО и диффузного отражения (рис. 1). На полученных спектрах выделяли полосы поглощения и, используя литературные данные [9, 17, 23], соотносили их с областями, соответствующими колебаниям связей ОВ и минералов карбонатных,

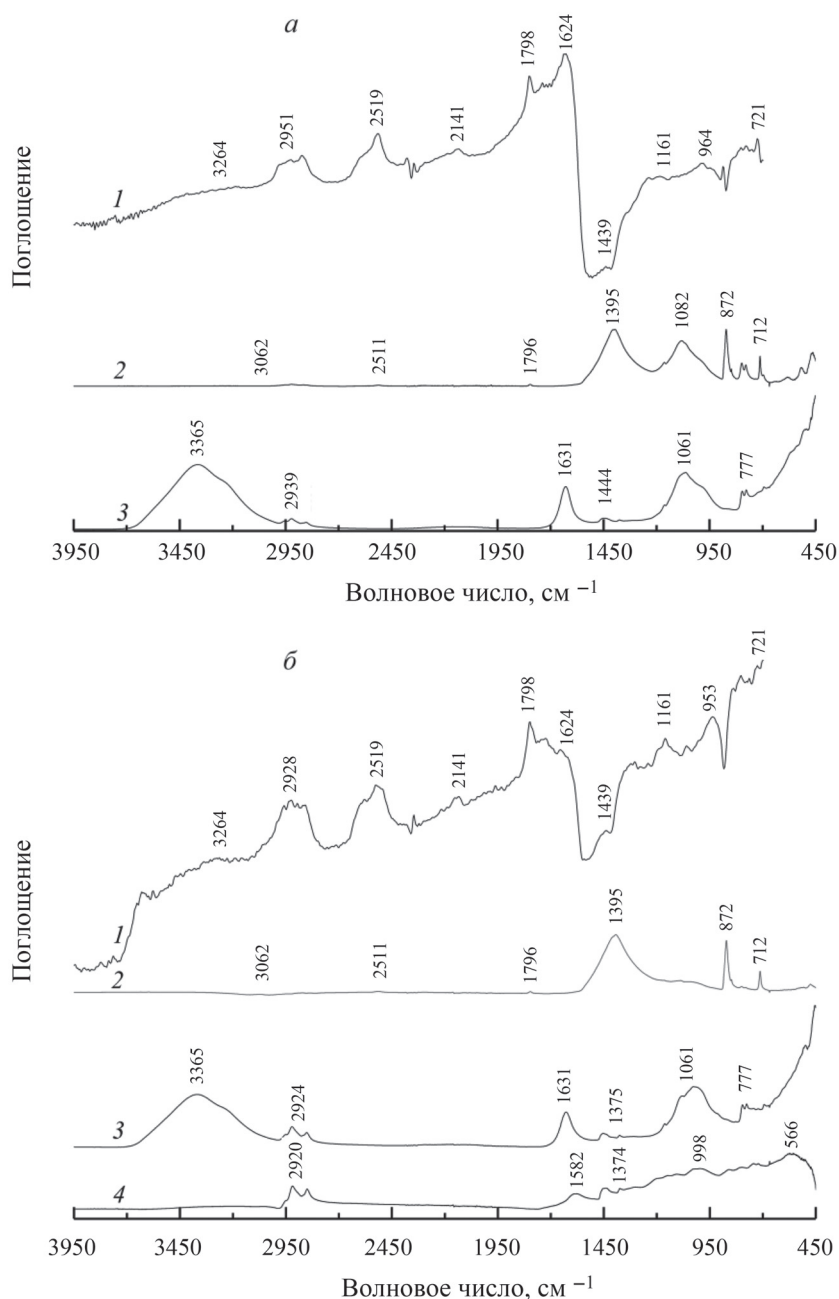


Рис. 1. ИК-спектры образцов пород и керогена доманикового горизонта (а) и баженовской свиты (б): 1 – диффузного отражения (порода), 2 – ОНПВО (порода), 3 – ОНПВО (порода после обработки HCl), 4 – ОНПВО (кероген)

Т а б л и ц а 1

Сравнение полос поглощения ИК-спектров органического вещества и минералов пород

Полоса поглощения, см ⁻¹	Колебания связей	
	органическое вещество [9, 17]	минералы [23, 24]
700–900	внеплоскостные деформационные колебания С–Н-групп ароматических фрагментов	Si–O в монтмориллоните, кварце, полево- шпате; CO ₃ ²⁻ в доломите, кальците
1370–1450	деформационные колебания CH ₂ и CH ₃ -групп алифатических фрагментов	С–O и С=O в кальците, доломите, араго- ните
1600–1640	валентные колебания С=C-связей в ароматических структурах	С=O в доломите, деформационные колеба- ния Н–O–Н в глинистых минералах
2800–3000	валентные колебания С–Н-групп али- фатических фрагментов	–

глинисто-карбонатных и кремнисто-карбонат- ных пород (табл. 1).

ИК-спектры диффузного отражения свидетель- ствуют о сложном составе изученных образцов (рис. 1, а, б, кривая 1), однако широкие полосы с низким разрешением не позволяют выделить от- дельные полосы, соответствующие characterи- стическим частотам колебаний различных группиро- вок как минеральной матрицы, так и ОВ.

На ИК-спектрах ОНПВО (рис. 1, а, б, кри- вая 2) можно выделить две широкие полосы в области 1400 и 1000 см⁻¹, соответствующие, с од- ной стороны, колебаниям связей Si–O, С–O, С=O, Al–O, Fe–S в известных минералах осадочного комплекса (кварц, доломит, кальцит, арагонит, каолинит, пирит и др.) [23], а с другой стороны, колебаниям CH₂- и CH₃-групп алифатических и С=C-связей ароматических фрагментов. По ИК- спектрам поглощения в длинноволновой области (700–900 см⁻¹) образцы пород характеризуется бо- лее сложным составом. Можно идентифицировать полосы (в том числе дублеты), соответствующие колебаниям связей как в минералах (α-кварц, ка- олинит, монтмориллонит и др.), так и в органиче- ском веществе (внеплоскостные деформационные С–Н-колебания ароматических фрагментов и С–С- колебания парафиновых фрагментов).

После растворения карбонатов ИК-спектры пород ОНПВО заметно меняются (рис. 1, а, б, кривая 3): на месте широкой полосы в области 1400 см⁻¹ появляются полосы 1375 и 1454 см⁻¹, отвечающие деформационным колебаниям групп CH₂ и CH₃ в ациклических и циклических струк- турах [17, 25]; полоса 1630 см⁻¹, отвечающая коле- баниям С=C-связей ароматических (в том числе гетероциклических) соединений [17]; полосы 2850, 2920 и 2950 см⁻¹, соответствующие ва-

лентным колебаниям групп CH₂ и CH₃. Однако в области 900–1200 см⁻¹ наблюдали широкую полосу, которая соответствует characterи- стическим полосам каолинита и пирита, а в области 720–800 см⁻¹ – characterи- стический дублет, от- носящийся к колебаниям Si–O–Si α-кварца [23]. В области 3400 см⁻¹ появляется широкая асимме- тричная полоса ОН-групп (в том числе за счет ад- сорбированной воды после обработки раствором соляной кислоты). ОНПВО ИК-спектр керогена баженовской свиты (рис. 1, б, кривая 4) демон- стрирует полосы, соответствующие деформа- ционным колебаниям CH₂- и CH₃-групп (1375 и 1440 см⁻¹), валентным колебаниям С=C-связей ароматических соединений (1600 см⁻¹) и валент- ным симметричным и асимметричным колеба- ниям групп CH₂ (2850 и 2920 см⁻¹). Следовательно, наиболее информативной для оценки ОВ нефте- материнских пород остается область 1300–3000 см⁻¹, где присутствуют полосы колебаний как ароматических, так и алифатических структур.

Оценка ОВ нефтематеринских пород.

Структурно-групповой состав ОВ пород до- маниковского горизонта и баженовской свиты оценивали методом ИК-Фурье-спектроскопии (ОНПВО) после растворения карбонатов. Для сравнительных сопоставлений использовали спектральные коэффициенты [16, 17], характе- ризующие соотношение ароматических и али- фатических структур, а также степень развет- вленности углеводородных цепей (табл. 2): C₁ = A₁₆₃₀/A₂₈₅₀ (ароматичность); C₂ = A₁₃₈₀/A₁₄₅₀ (раз- ветвленность) и C₃ = (A₂₈₅₀ + A₁₃₈₀)/A₁₆₃₀ (али- фатичность).

Наибольший разброс значений оптической плотности наблюдали в максимуме поглощения полос 1630 см⁻¹ (табл. 2). Коэффициенты арома-

Т а б л и ц а 2

Оценка структурно-группового состава ОБ пород доманикового горизонта и баженовской свиты после растворения карбонатов по данным ИК-спектроскопии

Образец	Оптическая плотность (A) в максимуме полос поглощения (ν см ⁻¹)				C_1	C_2	C_3
	1380	1450	1630	2850			
Отложения доманикового горизонта							
1	0,000	0,000	0,077	0,014	5,50	–	0,18
2	0,009	0,026	0,229	0,019	12,05	0,35	0,12
3	0,004	0,010	0,031	0,006	5,17	0,40	0,32
4	0,006	0,017	0,052	0,019	2,74	0,35	0,48
5	0,004	0,004	0,145	0,020	7,25	1,00	0,17
Отложения баженовской свиты							
6	0,015	0,031	0,158	0,047	3,36	0,48	0,39
7	0,014	0,013	0,006	0,042	0,14	1,08	9,33

Т а б л и ц а 3

Пиролитические параметры образцов пород доманикового горизонта по разрезу

Параметр пиролиза	Номер образца				
	1	2	3	4	5
	глубина отбора, м				
	2330	2342	2343	2344	2355
S_0 , мг УВ/г	0,05	1,04	1,16	0,66	0,30
S_1 , мг УВ/г	0,60	3,29	2,65	1,38	0,51
S_2 , мг УВ/г	2,97	46,05	38,93	19,52	8,57
S_3 , мг CO ₂ /г	0,36	0,35	0,31	0,19	0,13
ТОС, мас.%	0,70	10,90	10,32	6,44	2,45
$T_{\text{макс}}$, °С	439	445	440	446	444
НІ, мг УВ/г ТОС	425	422	377	303	350
ОІ, мг CO ₂ /г ТОС	52	3	2	2	5
PI, $S_1/(S_1 + S_2)$	0,17	0,07	0,06	0,07	0,06
СС, мас.%	1,07	3,34	6,42	3,18	5,22

тичности (C_1) и алифатичности (C_3) для пород доманикового горизонта варьировали в диапазонах 2,74–12,05 и 0,12–0,48 соответственно.

Полученные значения ИК-коэффициентов и оптической плотности в максимуме 1630 см⁻¹ сравнили с результатами пиролитических исследований (табл. 3). Снижение оптической плотности в области 1630 см⁻¹ наблюдали при увеличении S_1 до 3 мг УВ/г, что связано, вероятно, с преобладанием алифатических фрагментов в не-

фтяных углеводородах. По индексу продуктивности (PI) исследуемые породы относят к слабопреобразованным, а их нефтегенерационный потенциал (по значениям ТОС, S_1 и S_2) считается очень хорошим и превосходным [26]. По пиролитическим свойствам образцы обладают многообразием характеристик. Содержание органического углерода варьирует в широких пределах от долей единицы до 10,9 мас.%. Среднее значение ТОС составляет 6,16 мас.%. Генераци-

онный потенциал ($S_0 + S_1 + S_2$) достигает 50 мг УВ/г породы и изменяется пропорционально количеству органического углерода в породе.

Сравнительную оценку применимости метода ИК-спектроскопии пород нефтематеринских отложений к исследованиям их нефтегенерационного потенциала и параметров зрелости ОВ проводили путем сопоставления результатов, полученных методом ИК-спектроскопии пород после растворения карбонатов, и пиролизом (табл. 2, 3).

Нефтегенерационный потенциал пород доманикового горизонта оценивали по параметрам пиролиза ($ТОС$, S_1 и S_2), а затем сравнивали с ИК-коэффициентами и интенсивностью характеристических пиков (рис. 2). В узком интервале глубин (2340–2344 м) с уменьшением параметров $ТОС$, S_1 и S_2 наблюдали заметное уменьшение коэффициента ароматичности C_1 и, соответственно, увеличение коэффициента алифатичности C_3 (рис. 2, а). В случае сравнения пиролитических параметров со значениями оптической плотности, соответствующими характеристическим колебаниям ароматических и алифатических фрагментов (рис. 2, б), корреляция менее очевидна и наблюдается только для колебаний $C=C$ -связей ароматических фрагментов (1630 см^{-1}).

В исследуемом разрезе одной скважины в интервале глубин 2330–2355 м пиролитические параметры, отражающие степень реализации генерационного потенциала и характеризующие непосредственно генерационный потенциал и тип керогена (PI, NI и OI), меняются незначительно (табл. 3), что затрудняет сравнительную оценку с результатами ИК-спектроскопии пород (табл. 2).

Таким образом, исследованные образцы доманикового горизонта различаются по пиролитическим характеристикам, что согласуется с результатами структурно-группового анализа методом ИК-спектроскопии пород. Так, по результатам пиролитических исследований образец № 2 имеет максимальные значения параметров $ТОС$, S_1 и S_2 , характеризующих нефтегенерационный потенциал (табл. 3), а по результатам ИК-спектроскопии образец № 2 имеет максимальное соотношение интенсивности полос ароматических и алифатических фрагментов (C_1) и минимальное соотношение интенсивности полос алифатических и ароматических фрагментов (C_3), а также максимальную интенсивность полосы 1630 см^{-1} , характеризующую содержание ароматических структур (табл. 2). При этом в

образце № 4 наблюдали уменьшение интенсивности полосы 1630 см^{-1} , что приводит к уменьшению соотношения интенсивности полос ароматических и алифатических фрагментов (C_1) до минимального значения. С другой стороны, образец № 1 характеризуется минимальными значениями как пиролитических параметров, так и низкими значениями интенсивности полос колебаний ароматических и алифатических структур (1630 , 2850 , 1380 и 1450 см^{-1}). Интенсивность полос поглощения на ИК-спектрах, характеризующих ОВ, изменяется при переходе от доманикового горизонта к баженовской свите (табл. 2), что, вероятно, связано с изменением литотипа породы. Следовательно, ИК-коэффициенты C_1 и C_3 , а также интенсивность полос валентных $C=C$ - и $C-H$ -колебаний (A_{1630} и A_{2850}) ароматических и алифатических структур в комплексе с параметрами пиролиза можно использовать для оценки изменений структурно-группового состава ОВ в породе и ее нефтегенерационного потенциала.

Для сравнения спектральных характеристик были получены ИК-спектры пород (в режиме пропускания) после удаления карбонатов соляной кислотой (рис. 3). На примере образца № 1 показано, что по сравнению со спектром ОНПВО (рис. 3, кривая 1) интенсивность полосы $C=C$ -валентных колебаний ароматических структур (1630 см^{-1}) на спектре, полученном с использованием таблеток КВг (рис. 3, кривая 2), практически не меняется, а в области колебаний гидроксильных групп (широкая полоса с максимумом 3425 см^{-1}) заметно возрастает. Кроме того, на спектрах в режиме пропускания наблюдали полосы валентных и деформационных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп алифатических фрагментов, которые на спектре ОНПВО данного образца практически отсутствовали. Это повышает точность структурно-группового анализа органического вещества пород, однако пробоподготовка, включающая прессование измельченных пород в таблетки КВг, остается весьма трудоемкой и длительной.

Приведенные исследования нефтесодержащих пород доманиковых отложений методом ИК-Фурье-спектроскопии в комплексе с методом пиролиза дают возможность получать данные о групповом составе ОВ и оценивать нефтегенерационный потенциал пород, что важно для разработки технологий добычи сланцевой нефти.

Авторы выражают благодарность А.А. Пичугиной и Е.В. Булатовой за регистрацию ИК-

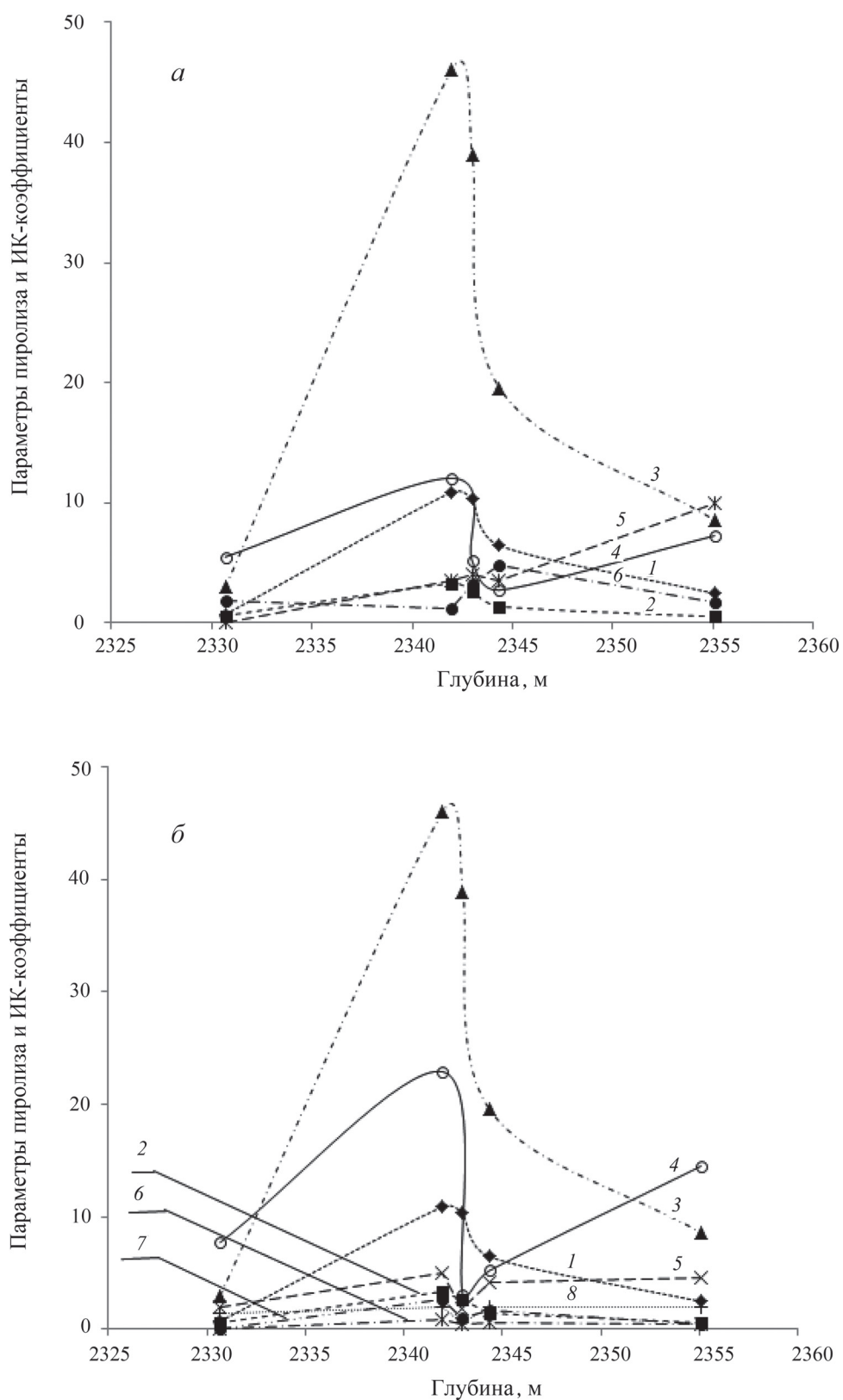


Рис. 2. Сравнительная оценка параметров пиролиза, характеризующих нефтегенерационный потенциал: ТОС, % (1), S_1 , мг/г (2) и S_2 , мг/г (3); полученные методом ИК-Фурье-спектроскопии характеристики пород доманикового горизонта по разрезу: *a* – коэффициент ароматичности C_1 (4), коэффициент разветвленности C_2 (5), коэффициент алифатичности C_3 (6); *б* – интенсивность характеристических полос поглощения (100 А) при 1600 (4), 720 (5), 1380 (6), 1465 (7) и 2870 (8) cm^{-1}

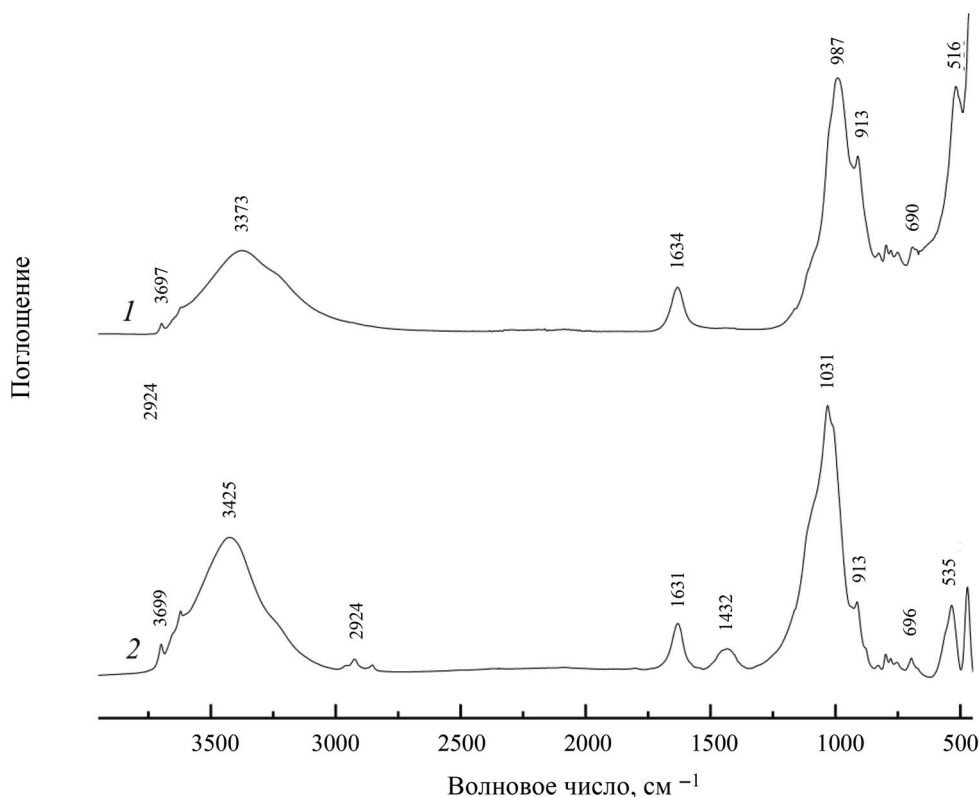


Рис. 3. ИК-спектр образца породы доманикового горизонта после обработки соляной кислотой, полученный методом ОНПВО (1) и пропускания в таблетках KBr (2) с содержанием породы 0,1%

спектров, Е.А. Леушиной и Л.В. Цыро за участие в обсуждении результатов исследования пород нефтяных сланцев методами ИК-спектроскопии и программируемого пиролиза.

Информация о вкладе авторов: М.Ю. Спасенных, Ю.Ю. Петрова, Е.В. Козлова участвовали в разработке плана эксперимента; Е.В. Козлова подбирала образцы пород доманикового горизонта и баженовской свиты и проводила их исследование методом пиролиза (по методике Рок-Эвал). Ю.Ю. Петрова и Н.Г. Таныкова провели исследования образцов методом ИК-спектроскопии. Ю.Ю. Петрова,

Н.Г. Таныкова и Е.В. Козлова участвовали в обработке данных. Все авторы участвовали в написании текста статьи и в обсуждении результатов.

Работа выполнена при поддержке Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (приказ № 1234 от 11.08.2017 о конкурсе научных проектов в области фундаментальных и прикладных исследований).

Конфликта интересов нет.

Статья размещается в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прищепа О.М., Аверьянова О.Ю. // Экономика и управление. 2013. № 1. С. 21.
2. Ананьев В.В. // Георесурсы. 2010. № 3. С. 30.
3. Кирюхина Т.А., Фадеева Н.П., Ступакова А.В., Полудеткина Е.Н., Сауткин Р.С. // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 76.
4. Муслимов Р.Х., Плотникова И.Н. // Нефть. хоз-во. 2014. № 1. С. 12.
5. Хисамов Р.С., Базаревская В.Г., Тарасова Т.И., Михайлова О.В., Михайлов С.Н. // Нефть. хоз-во. 2016. Июль. С. 10.
6. Бурдельная Н.С., Бушнев Д.А. // Геохимия. 2010. № 5. С. 525.
7. Бурдельная Н.С., Бушнев Д.А., Мокеев М.В. // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 6. С. 33.
8. Тараненко Е.И., Тарсис А.Д., Хакимов М.Ю. // Геология нефти и газа. 2000. № 4. С. 46.
9. Washburn K. E., Birdwell J. E., Foster M., Gutierrez F. // Energy & Fuels. 2015. Vol. 29. N 7. P. 4264.
10. Jemison H.B., Burr B.L., Davison R.R., Bullin J.A., Glover C.J. // Fuel Sci. Technol. Int. 1992. Vol. 10. P. 795.
11. Isacsson U., Karlsson R. // J. Mater. Sci. 2003. Vol. 23. P. 2835.

12. Ganz H., Kalkreuth W. // Fuel. 1987. Vol. 66. P. 708.
13. Kister J., Guiliano M., Largeau C., Derenne S., Casadevall E. // Fuel. 1990. Vol. 69. P. 1356.
14. Chen J., Ping L., Jinchao L. // Chinese Science Bulletin. 1998. Vol. 43. P. 681.
15. Petsch S.T., Berner R.A., Eglinton T.I. // Organic Geochemistry. 2000. Vol. 31. P. 475.
16. Михайлова А.Н., Габдрахманов Д.Т., Каюкова Г.П., Бабаев В.М., Вандюкова И.И. // Вестн. технологического университета. 2017. Т. 20. N 15. С. 45.
17. Lis G.P., Mastalerz M., Schimmelmann A., Lewan M.D., Stankiewicz B.A. // Organic Geochemistry. 2005. Vol. 36. P. 1533.
18. Espitalie J., Bordenave M.L. Applied Petroleum Geochemistry. Paris, 1993. P. 237.
19. Эспиталие Дж., Дроует С., Макуис Ф. // Геология нефти и газа. 1994. № 1. С. 23.
20. Lafargue E., Marquis F., Pillot D. // Revue de Institut Francais du Petrole. 1998. Vol. 53. N 4. P. 421.
21. Лопатин Н.П., Емец Т.П. / Пиролиз в нефтегазовой геологии. М., 1987.
22. Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Балушкина Н.С., Пронина Н.В., Полудеткина Е.Н., Костенко О.В., Юрченко А.Ю., Борисов Р.С., Бычков А.Ю., Калмыков А.Г., Хамидуллин Р.А., Стрельцова Е.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44.
23. Заворин А.С., Буваков К.В., Гладков В.Е., Красильникова Л.Г. // Изв. Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 4. С. 123.
24. Labus M., Lempart M. // J. Petrol. Sci. Eng. 2018. Vol. 161. P. 311.
25. Тараканова А.В., Кардашева Ю.С., Исиченко И.В., Анисимов А.В., Максимов А.Л., Караханов Э.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2016. Т. 57. № 5. С. 356.
26. Peters K.E., Cassa M.R. Applied source rock geochemistry / Eds. L.B. Magoon, W.G. Dow. The Petroleum System. From Source to Trap, American Association of Petroleum Geologists. Tulsa, 1994. P. 93.

Поступила в редакцию 03.04.2019
 Получена после доработки 25.04.2019
 Принята к публикации 14.06.2019

THE POSSIBILITY OF USING IR SPECTROSCOPY IN THE ESTIMATION OF OIL-GENERATING POTENTIAL OF OIL SHALES

Yu.Yu. Petrova^{1*}, N.G. Tanykova¹, M.Yu. Spasennykh², E.V. Kozlova²

(¹Chemistry Department, Institute of Natural and Technical Sciences, Surgut State University; ²Center for Hydrocarbon Recovery, The Skolkovo Institute of Science and Technology; *e-mail: yyp.71@mail.ru)

A study of kerogen-containing oil shale rock using IR spectroscopy and pyrolysis methods (Rock-Eval method) was carried out. Using the Domanic sedimentary rock samples, it was shown that study by IR Fourier spectroscopy in combination with pyrolytic method provide an opportunity to obtain information on the group composition of organic matter and to evaluate the oil-generation potential of the rock.

Key words: unconventional reservoirs, FTIR spectroscopy, Rock-Eval pyrolysis, structural group analysis, spectral coefficients.

Сведения об авторах: *Петрова Юлия Юрьевна* – доцент кафедры химии, директор института естественных и технических наук Сургутского государственного университета, канд. хим. наук (yyp.71@mail.ru); *Таныкова Наталья Геннадьевна* – лаборант кафедры химии института естественных и технических наук Сургутского государственного университета, аспирант (tanykova@yandex.ru); *Спасенных Михаил Юрьевич* – директор Центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, профессор, канд. хим. наук (m.spasennykh@skoltech.ru); *Козлова Елена Владимировна* – ст. науч. сотр. Центра добычи углеводородов Сколковского института науки и технологий, канд. геол.-минер. наук (e.kozlova@skoltech.ru).