

УДК: 622.276 + 542.8 + 0 04.622

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСЧЛЕНЕНИЯ ПЛАСТА ФОРМАЦИИ ЯММАМА (ЮЖНЫЙ ИРАН)

© 2022 г. Amir Hossein Shasti<sup>1</sup>, Golnaz Jozanikohan<sup>\*,1</sup>, Payam Hassanzadeh<sup>2</sup>, Sohaila Aslani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Senior Geochemist, Exploration Directorate, NIOC, IRAN

\* E-mail: gjkohan@ut.ac.ir

Поступила в редакцию 11 мая 2021 г.

После доработки 18 августа 2022 г.

Принята к публикации 31.01.2023

Важной темой в исследованиях нефтяных пластов любого месторождения является разделение их на различные участки. Для классификации участков пласта Яммама, Южный Иран, с использованием FTIR-спектроскопии и методов многомерной статистики отобрано одиннадцать проб нефти из различных скважин. Из диаграмм FTIR-анализа получены пять различных показателей содержания алифатических, и ароматических соединений, соединений с длинной цепью, а также определены индексы замещения (1 и 2). Полученные результаты использованы в качестве входных данных в методах (алгоритмах) иерархической кластеризации и кластеризации  $k$ -средних. Показано, что пласт Яммама состоит из двух участков, различающихся по химическому составу содержащейся в них нефти. Скважины, расположенные в северо-западной и юго-восточной частях исследуемой территории, отнесены к двум различным кластерам. Полученное разделение на основе FTIR-анализа и методов кластеризации хорошо согласуется с предыдущими выводами.

**Ключевые слова:** метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье; метод кластеризации; пластовая порода; участки продуктивного пласта

DOI: 10.53392/27823857-2023-3-1-103; EDN: MDLYRX

Важной темой в исследованиях нефтяных пластов любого месторождения является их разделение на различные участки. Разделение углеводородного пласта на конечные участки с уникальными характеристиками называется расчленением пласта [1]. Органическая геохимия помогла решить такую важную задачу, как расчленение с помощью анализа методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR-анализа) [2–4]. FTIR-анализ обнаруживает небольшие различия в химическом составе нефти. Эта способность может быть использована для расчленения пласта, что крайне важно для планирования добычи и извлечения углеводородов [1, 5–7]. FTIR-анализ использует энергию инфракрасных электромагнитных волн для распознавания различных химических связей в соединении [8]. Ключевым применением FTIR-анализа при изучении пластов является идентификация функциональных групп и молекулярной структуры органических веществ [9, 10].

Кроме того, такой математический метод, как кластеризация, может помочь ввести данные, полученные методом FTIR-анализа в несколько отдельных кластеров. Метод кластеризации позволяет классифицировать входные данные на основе количественных и качественных характеристик [11]. Соответственно, предполагается, что точки данных в одном кластере больше похожи друг на друга, чем на точки данных в других кластерах. Таким образом, наиболее похожие точки данных группируют в один кластер, а наименее похожие распределяют в отдельные другие кластеры [12, 13]. При выборе различных мер результаты кластеризации могут существенно отличаться.

Предыдущее исследование расчленения пласта с использованием FTIR-анализа было выполнено на нефтяном месторождении Салам (Salam Oilfield), Западный Египет, в 2002 г. [2]. В двух других работах применяли FTIR-анализ для проведения расчленения Таррагонского бассейна (Tarragona

Basin), западное Средиземноморье, и пласта Эль-Фурриаль (EL Furrrial reservoir), Венесуэла, в 2005 и 2007 гг. соответственно [3, 4]. Сообщалось еще об одном исследовании расчленения пласта с помощью FTIR-анализа — в юго-восточном районе Сеуты (Ceuta Southeast Area), на юге Венесуэлы [14].

Во всех предыдущих исследованиях результаты расчленения пласта на основе FTIR-анализа превосходно согласовывались с данными, полученными при анализе с помощью газовой хроматографии (ГХ). В исследованиях, проведенных на пласте Эль-Фурриаль, расчленение пласта на основе данных FTIR-анализа было даже более точным, чем при использовании газовой хроматографии [4].

Образованная в Персидском заливе на юге Ирана формация Яммама (Yammama Reservoir) представляет собой мощный карбонатный продуктивный пласт, возраст которого датируется нижнемеловым периодом. Решение проблемы расчленения пластов этого месторождения было сложной задачей из-за его неоднородного характера, продуктивный пласт месторождения пререзает крупный разлом. В данной работе пласт Яммама был разделен на участки на основе результатов ГХ высокого разрешения. На основе этих данных предположено, что пласт состоит из двух разных участков, разделенных горизонтальной границей [15].

Ниже представлено обсуждение расчленения пласта Яммама на нефтяном месторождении в южном Иране с применением кластеризации нескольких индексов, полученных в результате FTIR-анализа. Данные FTIR-анализа были подтверждены результатами расчленения пласта с использованием данных ГХ и предыдущих исследований Американского института нефти (API).

### Геологические условия

Формация Яммама сформировалась как массивный нижнемеловой карбонатный продуктивный пласт в Персидском заливе [16]. Пласт сложен биокластическими карбонатными толщами мощностью от 25 до 45 м. Эта карбонатная порода-коллектор эквивалентна формации Фахлиян (Fahliyan Formation), крупной залежи углеводородов на юге Ирана [16, 17]. На рис. 1 показана обзорная карта изучаемой территории.

Как показано на рис. 1, формация Яммама пререзана разломом протяженностью 3.33 км, простирающимся с юго-запада на северо-восток. Этот разлом делит пласт на два разных сегмента. В общей сложности, формация Яммама вскрыта, как пластовая порода, 11 скважинами. Из них три скважины распо-

ложены к северу от разлома, а остальные восемь — к югу [15].

### Материалы и методы

Были отобраны пробы нефти из 11 скважин по обеим сторонам разлома, пересекающего пласт Яммама. Затем из проб были извлечены асфальтены, из-за их сходной структуры с керогеном. Сообщается, что во время миграции нефти данная структура обычно сохраняется [18–21]. Поэтому, для изучения расчленения пласта Яммама, извлеченные асфальтены были подвергнуты FTIR-анализу. Ниже описываются методы, использованные в настоящем исследовании.

**Извлечение асфальтенов из нефти.** Нефть состоит из четырех основных компонентов, а именно насыщенных соединений, асфальтенов, смол и ароматических соединений. Асфальтены являются наиболее тяжелым компонентом нефти [22]. Они растворимы в ароматических растворителях и мало растворимы в легких нормальных алканах [22–25].

Для отделения асфальтенов использовали метод анализа SARA в соответствии со стандартной процедурой IP 143. Объем всех 11 образцов нефти составлял 20 см<sup>3</sup>, а масса асфальтенов, извлеченных из сырой нефти, различна. В табл. 1 приведена масса асфальтенов, извлеченных из каждой скважины.

Видно, что разные скважины показали разное содержание асфальтенов, что может быть связано со зрелостью соответствующей пробы нефти или различиями в концентрации полярных соединений [26].

**Таблица 1.** Масса асфальтенов, извлеченных из различных скважин пласта Яммама

Номер скважины	Масса, мг*
1	44
2	55
3	46
4	21
5	23
6	27
7	25
8	28
9	48
10	27
11	32

\* В расчете на 20 см<sup>3</sup> образца нефти.

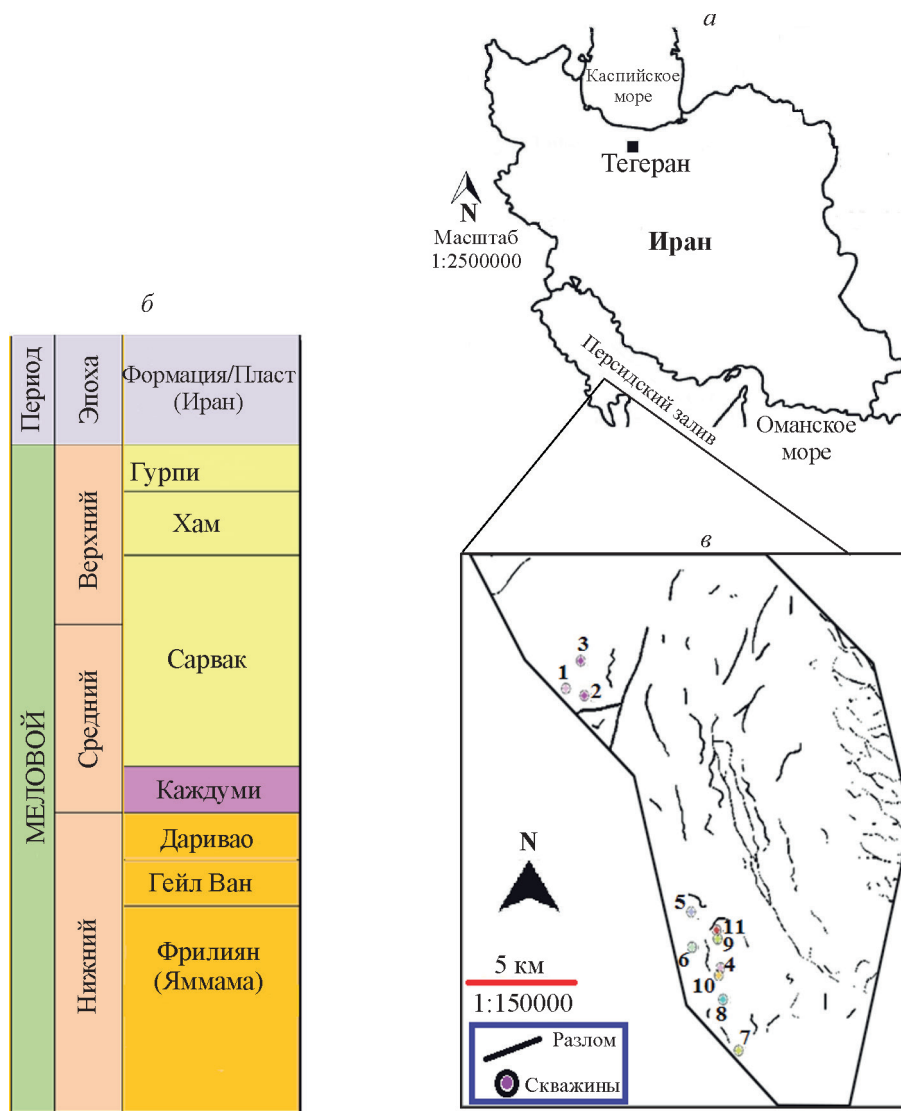


Рис. 1. Обзорная карта изучаемой территории:

*a* — Иран; *б* — стратиграфическая колонка; *в* — обзорная карта местности с указанием основных разломов региона и пробуренных скважин.

**Анализ методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR-анализ).** FTIR-анализ дает надежную информацию о содержании ароматических и алифатических соединений в пробе нефти [27, 28]. Метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье основан на поглощении излучения и изучении колебаний в атомах, молекулах и ионах. Когда органическая проба подвергается воздействию инфракрасного излучения, происходят изменения в колебательной энергии атомных связей компонентов. Как правило, такие колебания бывают двух типов: валентные и деформационные. Валентные колебания могут быть симметричными или асимметричными. Кроме того, исследователи различают четыре типа деформаци-

онных колебаний: ножничные, маятниковые, веерные и крутильные [9]. Преобразование Фурье применяется к спектру ИК-поглощения для снижения уровня помех. Данный метод может применяться к твердым, жидким и газообразным пробам как в режиме поглощения, так и в режиме пропускания [29] FTIR-спектроскопия является хорошим способом идентификации различных функциональных групп и молекулярных структур [30].

В данном исследовании была использована средняя часть ИК-электромагнитных волн, соответствующая волновым числам 4000–400 см<sup>-1</sup>. Для проведения FTIR-спектроскопии небольшое количество полностью измельченной навески асфальтена смешивали с полностью сухим КВг в соотношении

1:100, смесь загружали в специальную металлическую форму и прессовали на гидравлическом прессе (5–8 т/см<sup>2</sup>) для получения прозрачных гранул. Идеальные гранулы можно получить при использовании абсолютно сухих КВг и асфальтенов и проведении процесса приготовления в вакууме. Исследование проводили при помощи комбинированного спектрометра Perkin Elmer Spectrum 3, работающего в ближней, средней и дальней ИК-областях спектра (NIR/MIR/FIR), при комнатной температуре с разрешением 1 см<sup>-1</sup> в режиме поглощения в диапазоне частот от 4000 до 400 см<sup>-1</sup> и усреднении по 16 сканированиям.

Для нормализации пиков FTIR-спектров проб из формации Яммама использовали самый острый и интенсивный пик во всех спектрах, соответствующий асимметричным валентным колебаниям связи С—Н на метилена (волновое число 2923 см<sup>-1</sup>). После этого рассчитывали показатели (индексы), описанные в уравнениях (1)–(6), и использовали их для сравнения различных проб по структуре и химическому составу [2–4, 31].

Определения символов, используемых в уравнениях (1)–(6): полезная площадь под любым волновым числом обозначается символом А с таким же числом, напр. А<sub>2953</sub>, А<sub>2923</sub> и т. д.

Алифатический индекс

$$(A_{1460} + A_{1376})/\Sigma A \quad (1)$$

представляет все алифатические соединения в пробе:

$$\begin{aligned} \Sigma A = & A_{2953} + A_{2923} + A_{2862} + A_{1700} + \\ & + A_{1600} + A_{1460} + A_{1376} + A_{1030} + A_{864} + \\ & + A_{814} + A_{743} + A_{724}. \end{aligned} \quad (2)$$

Индекс ароматичности

$$A_{1600}/\Sigma A \quad (3)$$

является мерой содержания ароматических веществ в пробе.

Индекс длинных цепей

$$A_{724}/(A_{1460} + A_{1376}) \quad (4)$$

показывает количество алканов, имеющих прямую цепь с четырьмя или более атомами углерода, в пробе.

Индекс замещения 1

$$A_{864}/(A_{864} + A_{1376}) \quad (5)$$

характеризует бензольные структуры, которые имеют один общий атом Н, присоединенный к атому С бензольного кольца, по отношению к другим структурами.

Индекс замещения 2

$$A_{814}/(A_{864} + A_{814} + A_{743}) \quad (6)$$

представляет бензольные структуры, которые имеют три общих атома Н, присоединенные к атомам С бензольного кольца, по отношению к другим структурами.

**Кластеризация.** Для оптимизации кластеров применяли два метода кластеризации: иерархическую и кластеризацию *k*-средних. Метод иерархической кластеризации основан на итерации алгоритмов кластеризации данных, а метод кластеризации *k*-средних используется для однородного группирования набора наблюдений [13, 32, 33].

Для расчленения пласта Яммама, индексы, полученные из FTIR-анализа, вводили в качестве входных данных в программу SPSS 2016, использующую два метода кластеризации.

## Результаты и их обсуждение

Обычно асфальтены имеют в своем составе ароматические кольца, алифатические боковые цепи и содержат гетероатомы [34–36].

Ниже приводится сравнение различных проб асфальтенов с точки зрения структуры для исследования расчленения пласта Яммама на основе результатов FTIR-анализа. На рис. 2 показаны FTIR-спектры проб асфальтенов пласта Яммама.

Полезную площадь под кривой FTIR-спектра для каждой пробы измеряли от впадины до впадины [2]. Уравнения (1)–(6) использовали для определения упомянутых в разделе «FTIR-анализ» индексов для 11 проб асфальтенов. Затем пробы асфальтенов были охарактеризованы на основе различий в значениях индексов. Именно различие в молекулярной структуре проб асфальтенов может привести к расчленению пласта Яммама.

Индексы ароматичности и замещения 1 и 2 служат мерой содержания ароматических соединений в пробах асфальтенов. Индексы замещения 1 и 2 показывают степень конденсации полиароматических соединений [37, 38]. Для сравнения различных проб по структуре ароматичности были построены зависимости индексов замещения 1 и 2 от индекса ароматичности (рис. 3, 4). Диаграмма, приведенная на рис. 3, используется для сравнения структуры проб асфальтенов из разных скважин пласта Яммама. Согласно данной диаграмме, пласт Яммама был

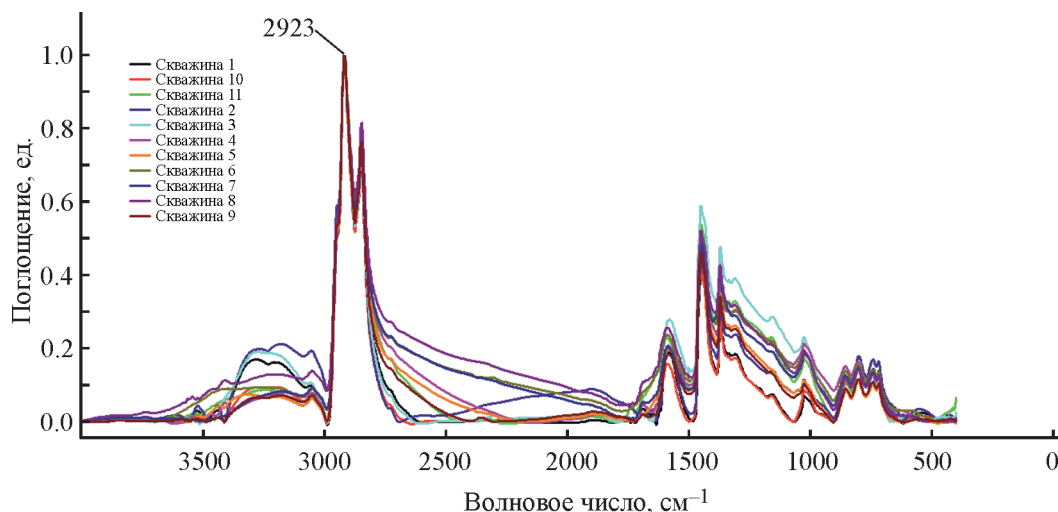
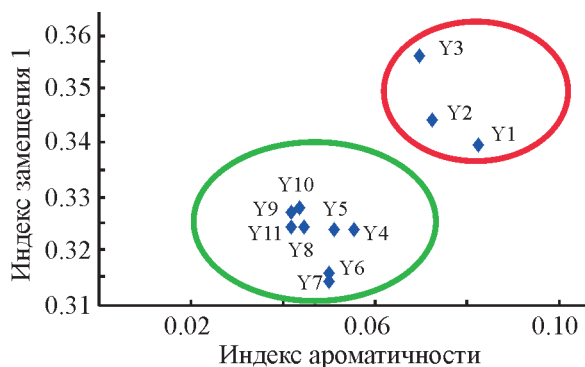
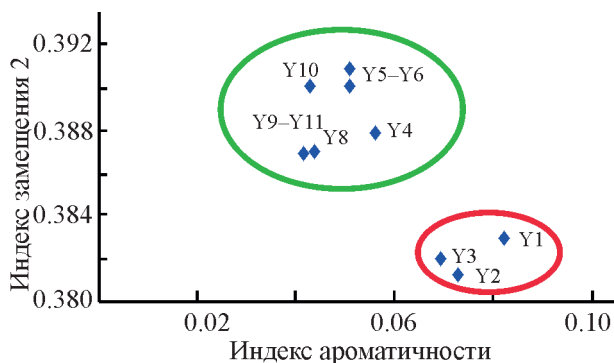


Рис. 2. FTIR-спектры проб асфальтенов, пласта Яммама.



Значение доверительного интервала = 95%

Рис. 3. Диаграмма индекса замещения 1 в зависимости от индекса ароматичности для проб пласта Яммама.



Значение доверительного интервала = 95%

Рис. 4. Диаграмма индекса замещения 2 в зависимости от индекса ароматичности для проб пласта Яммама.

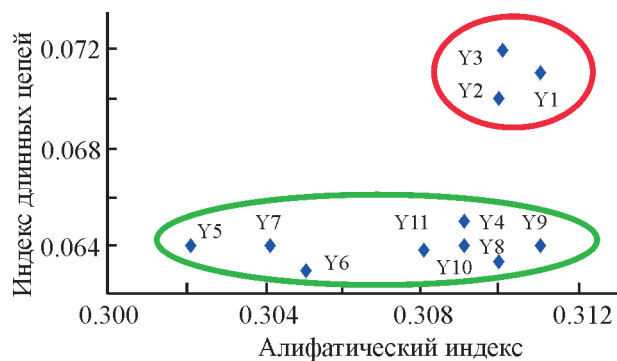
разделен на два основных участка. В соответствии с этими диаграммами очевидно, что в пласте Яммама были обнаружены две различные группы.

Алифатический индекс и индекс длинных цепей отражают содержание алифатических соединений в пробах асфальтенов [37]. Для сравнения был построен график зависимости разброса алифатического индекса от разброса индекса длинных цепей (рис. 5).

На основании рис. 3–5, в пласте Яммама были идентифицированы два типа групп нефти, а именно: пробы, взятые из скважин 1–3, и пробы, отобранные из скважин 4–11.

**Расчет значений доверительного интервала.**

Для расчета значений доверительного интервала использовали программный продукт SPSS 2016. Существуют два метода расчета доверительного интервала для количественных переменных: метод одновыборочного *t*-критерия и исследовательский



Значение доверительного интервала = 95%

Рис. 5. Алифатический индекс в сравнении с индексом длинных цепей для проб асфальтенов, взятых из пласта Яммама.

Таблица 2. Расчет значений доверительного интервала

Индекс	df	Среднее значение	Средне-квадратическое отклонение	Средне-квадратическая погрешность	Значимость (двусторонняя)	95% доверительный интервал разности	
						верхнее значение	нижнее значение
Ароматичности	10	0.054	0.139	0.004	0.000	0.063	0.044
Замещения 1	10	0.329	0.125	0.003	0.000	0.337	0.320
Замещения 2	10	0.387	0.003	0.001	0.000	0.389	0.384
Алифатический	10	0.308	0.003	0.0009	0.000	0.310	0.306
Длинных цепей	10	0.605	0.003	0.001	0.000	0.068	0.063

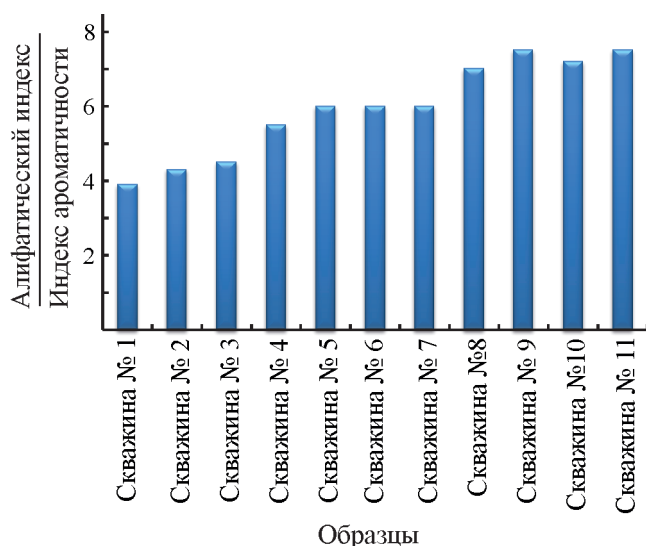


Рис. 6. Уровень зрелости нефти в разных скважинах.

метод. Числовые данные по пяти показателям (индекс ароматичности, индекс замещения 2, индекс замещения 1, алифатический индекс и индекс длинных цепей) вводили в программу SPSS и рассчитывали доверительный интервал при помощи метода одновыборочного  $t$ -критерия (табл. 2).

В таблице указаны размеры выборки:  $df = N - 1$  и, следовательно,  $N = df + 1$ , где  $df$  — число степеней свободы,  $N$  — объем полной выборки.

**Уровень зрелости.** В качестве меры зрелости использовали отношение содержания алифатических и ароматических соединений. (рис. 6), более высокое отношение характеризовало более зрелую пробу нефти [2].

Исследования показали более низкую степень зрелости в северо-западной части пласта по сравнению с юго-восточной частью. Результаты оценки зрелости с использованием данных FTIR-анализа прекрасно согласуются с результатами данных API из предыдущего исследования [15].

### Подтверждение достоверности результатов.

В предыдущем исследовании для расчленения пласта Яммама использовали результаты анализа методом ГХ. Результаты показали наличие двух отдельных участков по всему пласту. Кроме того, результаты теста API, проведенного на пробах, продемонстрировали, что пробы нефти, взятые из скважин 1, 2 и 3 (расположенных в северо-западной части пласта), были относительно менее зрелыми, чем другие пробы. Этот вывод дополнительно подтверждается результатами настоящего исследования [15].

**Метод кластеризации.** Для проверки точечных диаграмм (рис. 3–5) индексы, полученные в результате FTIR-анализа, были загружены в программу SPSS2016. К индексам применяли как метод кластеризации  $k$ -средних, так и метод иерархической кластеризации. Все индексы безразмерны.

**Метод кластеризации  $k$ -средних.** Для выполнения метода кластеризации  $k$ -средних установили максимальное количество итераций равным 10. Параметр « $k$ » (т. е. количество кластеров) приняли

Таблица 3. Кластерный анализ  $k$ -средних ( $k = 2$ )

Кластер	Номер скважины	Расстояние, см
1	4	0.847
1	5	0.408
1	6	0.784
1	7	0.940
1	8	0.366
1	9	0.739
1	10	0.655
1	11	0.645
2	1	1.021
2	2	0.382
2	3	1.080

**Таблица 4.** Дисперсионный анализ (ANOVA)

Индекс	Среднеквадратическое значение	F	Значимость
Ароматичности	16.6	53.326	0.000
Замещения 1	12.480	35.526	0.000
Замещения 2	1.031	37.312	0.000
Длинных цепей	1.108	204.483	0.000

**Таблица 5.** Расстояния между конечными центрами кластеров, см

Номер кластера	1	2
1	—	3.783
2	3.783	—

равным 2. Окончательные результаты представлены в табл. 3. Расстояние, указанное в табл. 4, показывает, насколько далеко каждый член находится от центра соответствующего кластера. Для ранжирования различных переменных по их влиянию на реакцию метода кластеризации может быть использован дисперсионный анализ (ANOVA) (табл. 4). В данной таблице также приведены сходства и различия между двумя кластерами. Кроме того, в табл. 5 представлена информация, которую можно использовать для оценки качества алгоритмов кластеризации. Тот факт, что значения критерия Фишера  $F$  в табл. 5 достаточно велики и очень похожи

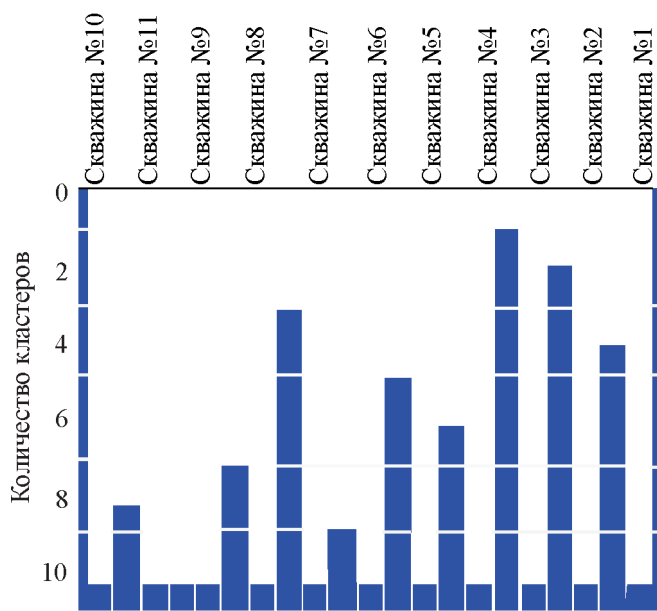
на значения  $F$  различных индексов, указывает на правильное выполнение кластеризации, что привело к величине значимости, близкой к нулю. Алифатический индекс был удален из расчетов кластеризации  $k$ -средних из-за того, что у него относительно низкое значение  $F = 2.587$  и высокая величина значимости  $Sig = 0.142$ . В табл. 5 показаны расстояния между конечными центрами кластеров.

**Метод иерархической кластеризации.** Для выполнения метода иерархической кластеризации индексы, полученные по результатам FTIR-анализа, были загружены в программу SPSS. Для кластеризации использовали все доступные расстояния. Из 39 возможных режимов иерархической кластеризации наиболее подходящий результат был получен при использовании метода кластеризации межгрупповых связей с квадратом евклидова расстояния. Упомянутый метод и способ определения расстояния оказались наиболее оптимальным подходом благодаря лучшей симметрии, представленной в выходной дендрограмме, по сравнению с другими подходами. Данный подход позволил получить кластеры с более близкими расстояниями (рис. 7, 8).

По результатам применения двух методов кластеризации пласт Яммама был разделен на две отдельные части по различиям в химическом составе асфальтенов. Из предыдущих исследований [38, 39] следует, что каждая фрагментация пластов связана с серьезными изменениями геологических факторов и факторов пласта.

### Выводы

Показано, что извлеченные из нефти асфальтены могут использоваться для изучения расчленения пласта. Структура асфальтенов охарактеризована с помощью FTIR-анализа. Для классификации индексов FTIR-анализа, а затем для расчленения пласта Яммама использовали два метода кластеризации:  $k$ -средних и иерархической кластеризации. На основании индексов, полученных по результатам FTIR-анализа, в пласте Яммама были идентифицированы два участка (т. е. две характерные нефтяные группы), различающиеся по химическо-



**Рис. 7.** Количество кластеров в различных скважинах.



**Рис. 8.** Дендрогрaмма проб из пласта Яммама.

му составу асфальтенов. Результаты FTIR-анализа прекрасно согласовывались с результатами газовой хроматографии. С использованием данных FTIR-анализа была оценена зрелость проб нефти, взятых из разных скважин пласта Яммама. Результаты этой оценки согласуются с данными Американского института нефти. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье является подходящим методом для расчленения пласта и оценки зрелости нефти.

### Благодарности

Авторы хотели бы сердечно поблагодарить г-на Александра Содерхольма (Alexander Soderholm) за его разрешение на использование программного обеспечения SPSS, версия 2016.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующих раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

*Amir Hossein Shasti*

ORCID: <https://orcid.org/00000-0002-7602-4688>

*Golnaz Jozanikohan*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5920-0424>

*Payam Hassanzadeh*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-2682>

*Sohaila Aslani*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4755-0512>

### Список литературы

1. *Jolley S.J., Fisher Q.J., Ainsworth R.B.* Reservoir compartmentalization: an introduction // Geological Society, London, Special Publications. 2010. V. 347. N 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1144/SP347.1>
2. *Permanyer A., Douifi L., Lahcini A., Lamontagne J., Kister J.* FTIR and SUVF spectroscopy applied to reservoir compartmentalization: a comparative study with gas chromatography fingerprints results // Fuel. 2002. V. 81. N 7. P. 861–866. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00211-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00211-3)
3. *Permanyer A., Douifi L., Dupuy N., Lahcini A., Kister J.* FTIR and SUVF spectroscopy as an alternative method in reservoir studies. Application to Western Mediterranean oils // Fuel. 2005. V. 84. N 2–3. P. 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.027>
4. *Permanyer A., Rebufa C., Kister J.* Reservoir compartmentalization assessment by using FTIR spectroscopy // J. Petrol. Sci. Eng. 2007. V. 58. N 3–4. P. 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.09.009>
5. *England W. A., Muggeridge A. H., Clifford P. J., Tang Z.* Modelling density-driven mixing rates in petroleum reservoirs on geological time-scales, with application to the detection of barriers in the Forties Field (UKCS) // Geological Society, London, Special Publications. 1995. V. 86. N 1. P. 185–201. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.086.01.13>
6. *England W. A.* Reservoir geochemistry—A reservoir engineering perspective // J. Petrol. Sci. Eng. 2007. V. 58. N 3–4. P. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>
7. *Márquez G., Escobar M., Lorenzo E., Gallego J. R., Tocco R.* Using gas geochemistry to delineate structural



- compartments and assess petroleum reservoir-filling directions: A Venezuelan case study // *J. South Am. Earth Sci.* 2013. V. 43. P. 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.008>
8. *Larkin P.* Infrared and Raman Spectroscopy: Principles and Spectral Interpretation. 2nd ed., Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00806-1>
  9. *Skoog D. A., Holler F. J., Nieman T.* Principles of Instrumental Analysis. Thomson Brooks. Cole, Canada, 2007. ISBN 0495012017, 9780495012016
  10. *Brown J. M.* Chapter 30. Infrared spectroscopic analysis of petroleum, petroleum products, and lubricants. In: *Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing*, 2nd Edition, Totten G. E., Shah R. J., Forester D. R., eds. ASTM International, 2019. P. 1125–1136.  
<https://doi.org/10.1520/MNL3720160023>
  11. *Rokach L., Maimon O.* Chapter 15. Clustering methods. In: *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, Maimon O., Rokach L. eds., Springer, Boston, MA, 2005. P. 321–352.  
[https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X\\_15](https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X_15)
  12. *Diday E., Simon J.* 3. Clustering Analysis. *Digital Pattern Recognition*, 1976. Corpus ID: 126385035
  13. *Aggarwal C. C.* *Data Mining: The Textbook*. Vol. 1. New York: Springer, 2015.
  14. *Marquez G., Escobar M., Lorenzo E., Duno L., Esquinas N., Gallego J. R.* Intra- and inter-field compositional changes of oils from the Misoa B4 reservoir in the Ceuta Southeast Area (Lake Maracaibo, Venezuela) // *Fuel*. 2016. V. 167. P. 118–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.046>
  15. *Hassanzadeh P., Rabbani A. R., Hezarkhani A., Khajooie S.* Assessing lateral continuity within the yammama reservoir in the Foroozan Oilfield, Offshore Iran: An Integrated Study // *Acta Geologica Sinica, English Edition*. 2018. V. 92. N 6. P. 2405–2415.  
<https://doi.org/10.1111/1755-6724.13736>
  16. *Alsharhan A. S., Nairn A. E. M.* *Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East*. Elsevier, 1997. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82465-3.X5000-1>
  17. *Rabbani A. R.* *Petroleum Geology and Geochemistry of the Persian Gulf*. Tafresh: Tafresh University, 2013.
  18. *Behar F., Pelet R.* Pyrolysis-gas chromatography applied to organic geochemistry: Structural similarities between kerogens and asphaltenes from related rock extracts and oils // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 1985. V. 8. P. 173–187.  
[https://doi.org/10.1016/0165-2370\(85\)80024-3](https://doi.org/10.1016/0165-2370(85)80024-3)
  19. *Peters K. E., Fraser T. H., Amris W., Rustanto B., Hermanto E.* Geochemistry of crude oils from Eastern Indonesia // *AAPG Bulletin*. 1999. V. 83. N 12. P. 1927–1942. <https://doi.org/10.1306/e4fd4643-1732-11d7-8645000102c1865d>
  20. *di Primio R., Horsfield B., Guzman-Vega M. A.* Determining the temperature of petroleum formation from the kinetic properties of petroleum asphaltenes // *Nature*. 2000. V. 406. N 6792. P. 173–176.  
<https://doi.org/10.1038/35018046>
  21. *Bazin D., Guczi L.* Soft X-ray absorption spectroscopy in heterogeneous catalysis // *Appl. Catal. A: Gen.* 2001. V. 213. N 2. P. 147–162.  
[https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00895-4](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00895-4)
  22. *Speight J. G.* Petroleum Asphaltenes — Part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum // *Oil Gas Sci. Technol.* 2004. V. 59. N 5. P. 467–477.  
<https://doi.org/10.2516/ogst:2004032>
  23. *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics* / Eds. O. C. Mullins, E. Y. Sheu, A. Hammami, A. G. Marshall. New-York, Springer Science, 2007. 670 p.  
<https://doi.org/10.1007/0-387-68903-6>
  24. *Hemmati-Sarapardeh A., Dabir B., Ahmadi M., Mohammadi A. H., Husein M. M.* Toward mechanistic understanding of asphaltene aggregation behavior in toluene: The roles of asphaltene structure, aging time, temperature, and ultrasonic radiation // *J. Mol. Liq.* 2018. V. 264. P. 410–424.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.061>
  25. *Plata-Gryl M., Jungnickel C., Boczkaj G.* An improved scalable method of isolating asphaltenes // *J. Petrol. Sci. Eng.* 2018. V. 167. P. 608–614.  
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.039>
  26. *Peters K. E., Walters C. C., Moldowan J. M.* *The Biomarker Guide*. Vols. 1, 2. 2nd ed. Cambridge University Press, 2005.  
<https://doi.org/10.1017/S0016756806212056>
  27. *Boukir A., Guiliano M., Doumenq P., El Hallaoui A., Mille G.* Caractérisation structurale d'asphaltènes pétroliers par spectroscopie infrarouge (IRTF). Application à la photo-oxydation Structural characterization of crude oil asphaltenes by infrared spectroscopy (FTIR). Application to photo-oxidation // *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIC — Chemistry*. 1998. V. 1. N 10. P. 597–602.  
[https://doi.org/10.1016/S1387-1609\(99\)80013-9](https://doi.org/10.1016/S1387-1609(99)80013-9)
  28. *Tay F. H., Kazarian S. G.* Study of petroleum heat-exchanger deposits with ATR-FTIR spectroscopic imaging // *Energy Fuels*. 2009. V. 23. N 8. P. 4059–4067.  
<https://doi.org/10.1021/ef900304v>
  29. *Griffiths P. R., De Haseth J. A.* *Fourier transform infrared spectrometry*. John Wiley & Sons, 2007. 375 p.  
<https://doi.org/10.1002/047010631X>
  30. *Rouessac F., Rouessac A.* *Chemical Analysis: Modern Instrumentation Methods and Techniques*. John Wiley & Sons, 2013. Corpus ID: 92896519
  31. *Lamontagne J., Dumas P., Mouillet V., Kister J.* Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens // *Fuel*. 2001. V. 80. N 4. P. 483–488.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00121-6)
  32. *Jain A. K., Murty M. N., Flynn P. J.* Data clustering: A review // *ACM Computing Surveys*. 1999. V. 31. N 3. P. 264–323. <https://doi.org/10.1145/331499.331504>
  33. *Gan G., Ma C., Wu J.* *Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.  
<https://doi.org/10.1137/1.9780898718348>

34. *Koots J. A., Speight J. G.* Relation of petroleum resins to asphaltenes // *Fuel*. 1975. V. 54. N 3, P. 179–184. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(75\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0016-2361(75)90007-1)
  35. *Groenzin H., Mullins O. C.* Molecular size and structure of asphaltenes from various sources // *Energy Fuels*. 2000. V. 14. N 3. P. 677–684. <https://doi.org/10.1021/ef990225z>
  36. *Spiecker P. M., Gawrys K. L., Trail C. B., Kilpatrick P. K.* Effects of petroleum resins on asphaltene aggregation and water-in-oil emulsion formation // *Colloids Surf. A. Physicochem. Eng. Asp.* 2003. V. 220. N 1–3. P. 9–27. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00079-7)
  37. *Asemani M., Rabbani A. R.* Oil-oil correlation by FTIR spectroscopy of asphaltene samples // *Geosci. J.* 2016. V. 20. N 2. P. 273–283. <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0042-1>
  38. *Jozanikohan G., Abarghoeei M. N.* The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir // *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.* 2022. V. 12. P. 2093–2106. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01449-y>
  39. *Jozanikohan G.* On the development of a non-linear calibration relationship for the purpose of clay content estimation from the natural gamma ray log // *Geo-Engineering*. 2017. V. 8. Art. N 21. 18 pp. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0058-7>
-