

## АНАЛИЗ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЕЙ ПО ДАННЫМ ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ

Г.Ю. Колчина, О.Ю. Полетаева, А.Ю. Леонтьев, Э.М. Мовсумзаде, М.Е. Логинова, А.В. Колчин

Галина Юрьевна Колчина (ORCID 0000-0003-2808-4827)\*

Кафедра химии и химической технологии, Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, пр. Ленина, 49, Стерлитамак, Респ. Башкортостан, Российская Федерация, 453100

E-mail: kolchina.GYu@mail.ru\*

Ольга Юрьевна Полетаева (ORCID 0000-0002-9602-0051), Александр Юрьевич Леонтьев (ORCID 0000-0003-3363-6841)

Кафедра гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин, Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, Уфа, Респ. Башкортостан, Российская Федерация, 450062

E-mail: ol612@mail.ru, aleksandr\_leont@rambler.ru

Эльдар Мирсамедович Мовсумзаде (ORCID 0000-0002-7267-1351)

Кафедра общей, аналитической и прикладной химии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, Уфа, Респ. Башкортостан, Российская Федерация, 450062

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Садовническая ул., 33, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 117997

E-mail: eldarmm@yahoo.com

Марианна Евгеньевна Логинова (ORCID 0000-0001-7077-8705)

Кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Космонавтов, 1, Уфа, Респ. Башкортостан, Российская Федерация, 450044

Андрей Владимирович Колчин (ORCID 0009-0007-1583-017X)

Управление информационных технологий и связи, ООО «Газпромнефтехимсалават», ул. Молодогвардейцев, 30, Салават, Респ. Башкортостан, 453256

E-mail: kolchin.av@mail.ru

*Представлены результаты исследований  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектроскопии образцов тяжелой нефти Тимано-Печерского и Волго-Уральского нефтегазоносных бассейнов. Знание химического состава и физико-химических свойств сырой нефти, наряду с особенностями геологических и геохимических условий, имеет первостепенное значение для решения проблем происхождения сырой нефти и ее последующей переработки. Информация о химическом составе нефти позволяет комбинировать образцы сырой нефти с различных месторождений перед переработкой для достижения необходимых коммерческих и технических характеристик. В образцах обнаружено 59,7-60,5%  $\beta$ - $\text{C}\text{H}_3$ -групп, в  $\beta$ - $\text{C}\text{H}_2$ - и  $\text{C}\text{H}$ -группах к ароматическому кольцу, а также содержание  $\text{C}\text{H}_2$  и  $\text{C}\text{H}$ -групп насыщенных соединений. Разделение спектров  $^{13}\text{C}$  ЯМР на диапазоны показывает высокое содержание метильных групп, причем количество  $\text{C}\text{H}$ -групп в алкильных фрагментах и  $\text{C}\text{H}$ - и  $\text{C}\text{H}_2$ -алкильных групп нафтеновых фрагментов, присоединенных к  $\text{C}\text{H}$ -группе, составляет 14,37-24,17%. Определенный диапазон значений химических сдвигов от 9,4 до 11,4 м.д. указывает на метилзамещенный октан, нонан или декан. Установлено, что содержание первичных и вторичных атомов углерода находится в пределах от 59,4-60,7%. Исследуемые образцы обладают разветвленными алкановыми цепями. Сравнение содержания ароматического / алифатического компонентов позволяет определить образец Волго-Уральского бассейна как образец с высоким содержанием ароматического компонента. Содержание ароматических фрагментов варьируется в более широком диапазоне 17-25,9%. Из*

*данных  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров образцов тяжелых нефтей с различным происхождением, вязкостью и проведенной обработкой установлено, что неочищенные и рафинированные нефти могут различаться по содержанию олефиновых сигналов.*

**Ключевые слова:** тяжелые нефти, групповой состав углеводородов, спектроскопия  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР, геологические свойства

## ANALYSIS OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF HEAVY OILS ACCORDING TO NMR SPECTROSCOPY

G.Yu. Kolchina, O.Yu. Poletaeva, A.Yu. Leontev, E.M. Movsumzade, M.E. Loginova, A.V. Kolchin

Galina Yu. Kolchina (ORCID 0000-0003-2808-4827)\*

Department of Chemistry and Chemical Technology, Sterlitamak Branch of the Bashkir State University, Lenin ave., 49, Republic of Bashkortostan, 453100, Russia  
E-mail: kolchina.GYu@mail.ru\*

Olga Yu. Poletaeva (ORCID 0000-0002-9602-0051), Alexandr Yu. Leontev (ORCID 0000-0003-3363-6841)

Department of Hydro-Gas Dynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines, Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov st., 1, Ufa, 460062, Russia  
E-mail: ol612@mail.ru, aleksandr\_leont@rambler.ru

Eldar M. Movsumzade (ORCID 0000-0002-7267-1351)

Department of General, Analytical and Applied Chemistry, Ufa State Petroleum Technical University, Kosmonavtov st., 1, Republic of Bashkortostan, 450062, Russia  
Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Sadovnicheskaya st., 33, bld. 1, Moscow, 117997, Russia  
E-mail: eldarmm@yahoo.ru

Marianna E. Loginova (ORCID 0000-0001-7077-8705)

Department of Oil and Gas Drilling, Ufa State Petroleum Technical University, Kosmonavtov st., 1, Ufa, Republic of Bashkortostan, 450044, Russia

Andrew V. Kolchin (ORCID 0009-0007-1583-017X)

LLC "Gazprom neftekhim Salavat", Molodogvardeiskaya st., 30, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453256, Russia  
E-mail: kolchin.av@mail.ru

*The results of studies of  $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy of heavy oil samples from the Timan Pechersk, Volga Ural oil and gas basins are presented. Knowledge of the chemical composition and physicochemical properties of crude oil, along with the particularities of geological and geochemical conditions is of paramount importance for solving the problems of the origin of crude oil and its subsequent processing. Information on the chemical composition of oil allows you to combine samples of crude oil from various fields before refining to achieve the necessary commercial and technical characteristics. 59.7-60.5% of  $\beta\text{-CH}_3$  groups were found in the samples, in  $\beta\text{-CH}_2$  and  $\text{CH}$ -groups to the aromatic ring, as well as the content of  $\text{CH}_2$ - and  $\text{CH}$ -groups of saturated compounds. Dividing  $^{13}\text{C}$  NMR spectra into ranges shows a high content of methyl groups with the number of  $\text{CH}$ -groups in the alkyl fragments and  $\text{CH}$  and  $\text{CH}_2$ -alkyl groups of naphthenic moieties attached to  $\text{CH}$ -group being 14.37-24.17%. A specific range of values is from 9.4 to 11.4 ppm. indicates methyl substituted octane, nonane or decane. It was found that the content of primary and secondary carbon atoms was in the range from 59.4-60.7%. The studied samples possess branched alkane chains. Comparison of the content of aromatic / aliphatic components allows us to determine the sample of the Volga Ural basin as a sample with a high content of aromatic component. The content of aromatic fragments varies in a wider range of 17-25.9%. From the data of  $^1\text{H}$  NMR-spectra of samples of heavy oils with different origin, viscosity and treatment it was found that crude and refined oils can differ in the content of olefin signals.*

**Key words:** heavy oils, group composition of hydrocarbons,  $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy, rheological properties

**Для цитирования:**

Колчина Г.Ю., Полетаева О.Ю., Леонтьев А.Ю., Мовсумзаде Э.М., Логинова М.Е., Колчин А.В. Анализ состава и структуры тяжелых нефтей по данным ЯМР-спектроскопии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6783.

**For citation:**

Kolchina G.Yu., Poletaeva O.Yu., Leontev A.Yu., Movsumzade E.M., Loginova M.E., Kolchin A.V. Analysis of the composition and structure of heavy oils according to NMR spectroscopy. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 6. P. 94–101. DOI: 10.6060/IVKKT.20236606.6783.

## ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР) применяется в нефтехимии с первых дней ее коммерческого существования. ЯМР продолжает оставаться чрезвычайно полезным инструментом для изучения углеводородного состава нефти и продуктов нефтехимической переработки. В период широкого использования альтернативной энергетики важно знать возможности и пределы использования спектральных методов при изучении альтернативных источников энергии, таких как уголь в жидкости, газ в жидкости, биотопливо, преобразование биомассы и т.д. Синтетическое топливо и нефтепродукты глубокого передела будут становиться все более важными объектами исследований, и ЯМР-спектроскопия предлагает уникальную перспективу установления химического состава этих продуктов [1-7].

Нефть как природный объект содержит сотни веществ, в основном принадлежащих к трем гомологическим рядам углеводородов (алканы, циклоалканы и ароматические углеводороды), а также гетероатомные соединения (в частности, асфальтеносмолистые вещества), содержащие неметаллы (сера, кислород, азот) и микроэлементы (V, Ni, Fe, Zn и т. д.) [8-11]. В работах [12-18] представлены физико-химические свойства тяжелых высоковязких нефтей, а также методы их исследований. Ранее в работе [19] были исследованы тяжелые высоковязкие нефти месторождения Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна и установлено, что данные образцы характеризуются высокой плотностью, большим содержанием смолисто-асфальтеновых соединений и серы.

Информация о химическом составе нефти позволяет комбинировать образцы сырой нефти с различных месторождений перед переработкой для достижения необходимых коммерческих и технических характеристик.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Были исследованы образцы из следующих месторождений: нефть (I) плотностью – 933 кг/м<sup>3</sup>, вязкостью 2296 мПа·с, нефть (II) плотностью – 915 кг/м<sup>3</sup>, вязкость 260 мПа·с Тимано-Печерского бассейна; нефть (III) плотностью – 890 кг/м<sup>3</sup>, вязкость 184 мПа·с.

Регистрацию спектров  $^1\text{H}$  ЯМР (500.1 МГц) и  $^{13}\text{C}$  (125.8 МГц) образцов тяжелой нефти проводили на ЯМР-спектрометре AVANCE III 500MHz фирмы Bruker. Образцы нефти разбавлены дейтерированным  $\text{CDCl}_3$ . Объемная доля нефти составляла 35-40%. При записи спектров  $^1\text{H}$  ЯМР спектральная ширина 10,0 кГц, количество точек накопления 64 К, количество прохождений 8, время накопления 3,3 с, релаксационная задержка 20 с, длительность  $90^\circ$  импульса составила 11,5 мкс. Спектры  $^{13}\text{C}$  ЯМР с развязкой от протонов переменной мощности (power-gated) с использованием составных импульсов были зарегистрированы при следующих условиях: спектральное окно – 29,8 кГц, количество точек – 64 К, длительность возбуждающего импульса ( $30^\circ$ ) – 3,2 мкс, релаксационная задержка – 0,9 с, количество прохождений 4096. Химические сдвиги  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР измеряли относительно сигналов внутреннего эталона ТМС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно приведенному в литературе определению параметра химического сдвига в качестве количественного измерения, используемого в спектроскопии ЯМР, интегрирование может быть выполнено с использованием указанных областей в спектрах  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР. Применение  $^1\text{H}$  ЯМР-спектроскопии для анализа нефтяных фракций ограничено небольшим диапазоном значений химического сдвига для всех классов органических соединений (15 м.д.), поэтому соединения с аналогичной структурой в сложных смесях дают средний сильно уширенный сигнал. Спектр  $^1\text{H}$  ЯМР

позволяет определить степень ароматичности вещества в смеси. Также сравнение пропорций атомов ароматических колец в спектре  $^1\text{H}$  ЯМР и спектре  $^{13}\text{C}$  ЯМР позволяет определить степень замещенности ароматической фракции нефти.

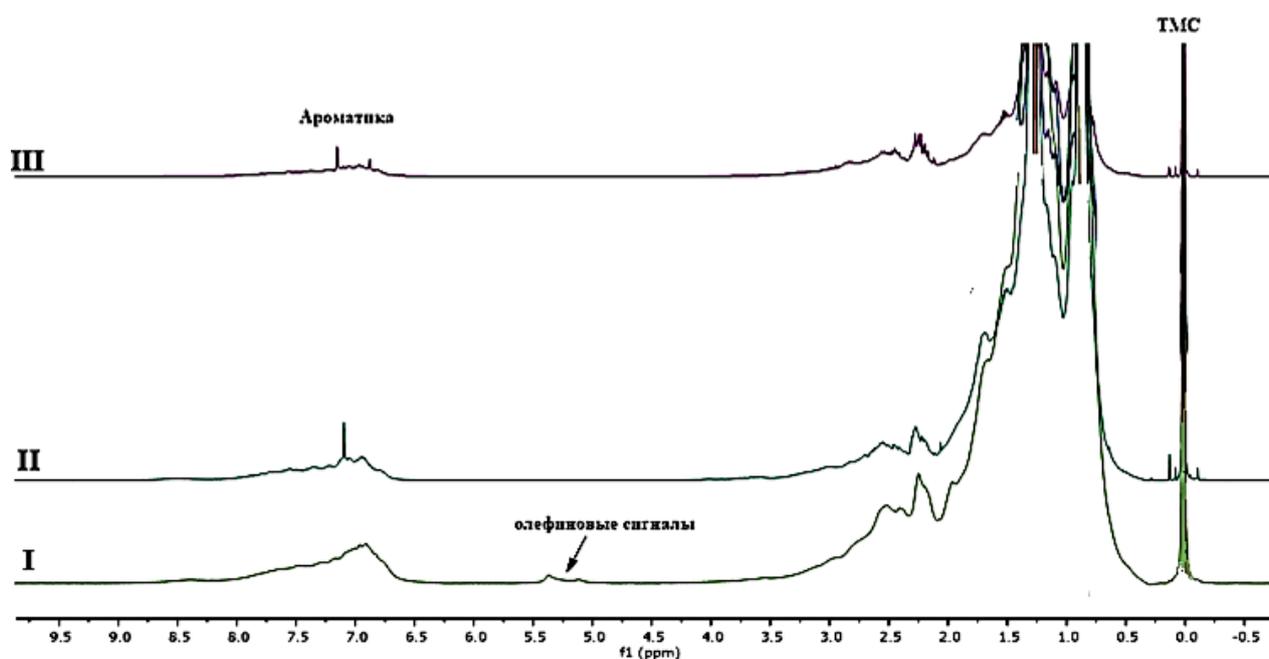
Анализ результатов, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет утверждать, что спектроскопия  $^{13}\text{C}$  ЯМР на больших частотах дает более адекватные количественные результаты в подобных исследованиях [20-22]. Содержание в исследуемых образцах нефти  $\beta\text{-CH}_3$ -групп,  $\beta\text{-CH}_2$ - и  $\text{CH}$ -группах к ароматическому кольцу, а также содержание  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}$ -групп насыщенных соединений (парафинов и нафтенов) составляет порядка 59,7-60,5% (табл. 1, рис. 1). Диапазон 1,01..0,30 м.д. показывает количественное содержание  $\text{CH}_3$ -групп, находящихся в  $\gamma$ -положении и далее к ароматическому кольцу, а также  $\text{CH}_3$ -группы насыщенных соединений.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований и содержания функциональных групп  $^1\text{H}$  ЯМР-спектроскопии образцов тяжелой нефти Тимано-Печерского и Волго-Уральского бассейнов, %

Table 1. Results of laboratory studies and the content of functional groups of  $^1\text{H}$  NMR spectroscopy of heavy oil samples from the Timan-Pechersk and Volga-Ural basins, %

Диапазон химических сдвигов, м.д.		I	II	III
H1	1,01..0,30	19,7	20,5	16,4
H2	2,05..1,01	59,9	59,7	60,5
H3	2,32..2,05	6,4	5,3	7,0
H4	4,40..2,32	6,0	5,8	7,7
H5	7,13..6,24	4,0	4,0	4,2
H6	8,30..7,15	3,7	4,3	4,0
H7	9,00..8,30	0,3	0,3	0,2
$F_{\text{HA}}$		0,039	0,039	0,043

Рис. 1.  $^1\text{H}$  ЯМР-спектры образцов тяжелой нефти (I-III)Fig. 1.  $^1\text{H}$  NMR spectra of samples of heavy oil (I-III)

В спектре (рис. 1) видно присутствие ненасыщенных олефиновых углеводородов на примере образца I по их сигналам в области от 5,1-5,4 м.д., которая для сырой нефти обычно не содержат других пиков.

Разделение спектров  $^{13}\text{C}$  ЯМР на диапазоны показывает (табл. 2, рис. 2, 3) содержание 44,35-45,51% метильных групп в исследуемых образцах тяжелой нефти (I-III). Значительное содержание олефиновых фрагментов в диапазоне 118..108 м.д. наблюдается у образца III. Количество  $\text{CH}$ -групп в алкильных фрагментах и  $\text{CH}$ - и  $\text{CH}_2$ -алкильные

группы нафтеновых фрагментов, присоединенных к  $\text{CH}$ -группе, составляет 14,37-24,17% в исследуемых образцах. Область 160..133 м.д. указывает на содержание замещенных аренов, причем в образце III наблюдается большое их содержание 10,64%.

Диапазон значений, полученный для исследуемых образцов нефтей (I-III), от 9,4 до 11,4 в среднем указывает на метилзамещенный октан, нонан или декан, которые можно рассматривать как типичные соединения в исследуемых углеводородных смесях.

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований и содержания функциональных групп <sup>13</sup>C ЯМР-спектроскопии образцов тяжелой нефти Тимано-Печерского и Волго-Уральского бассейнов, %

Table 2. Results of laboratory studies and the content of functional groups of <sup>13</sup>C NMR spectroscopy of heavy oil samples from the Timan-Pechersk and Volga-Ural basins, %

Диапазон химических сдвигов, м.д.		I	II	III
C1	22..4	15,24	14,52	14,22
C2	37..22	44,69	44,35	45,51
C3	60..37	20,62	24,17	14,37
C4	118..108	0,44	0,14	1,55
C5	129..118	8,09	7,73	10,31
C6	133..129	2,96	2,21	3,4
C7	160..133	7,97	6,88	10,64

Информация, полученная путем количественного интегрирования ароматических сигналов в отдельных спектральных диапазонах, пред-

ставлена долей соответствующих атомов углерода относительно их общего количества.

Если известны интегральные интенсивности сигналов отдельных групп в спектре <sup>13</sup>C ЯМР (рис. 2, 3), то соответствующие молярные доли третичного, первичного, вторичного и четвертичного углерода могут быть рассчитаны [15].

Основываясь на полученных данных, можно говорить, что содержание первичных и вторичных атомов углерода находится в пределах от 59,4-60,7%. Исследуемые образцы (I-III) обладают наиболее разветвленными алкановыми цепями (значительное разветвление наблюдается у образца III). Также при оценке ароматичности (таблица 1) наблюдается заметное увеличение относительного содержания ароматических атомов углерода в образце III. Сравнение содержания ароматического/алифатического компонента (рис. 2 и 3) позволяет определить образец III как образец с высоким содержанием ароматического компонента.

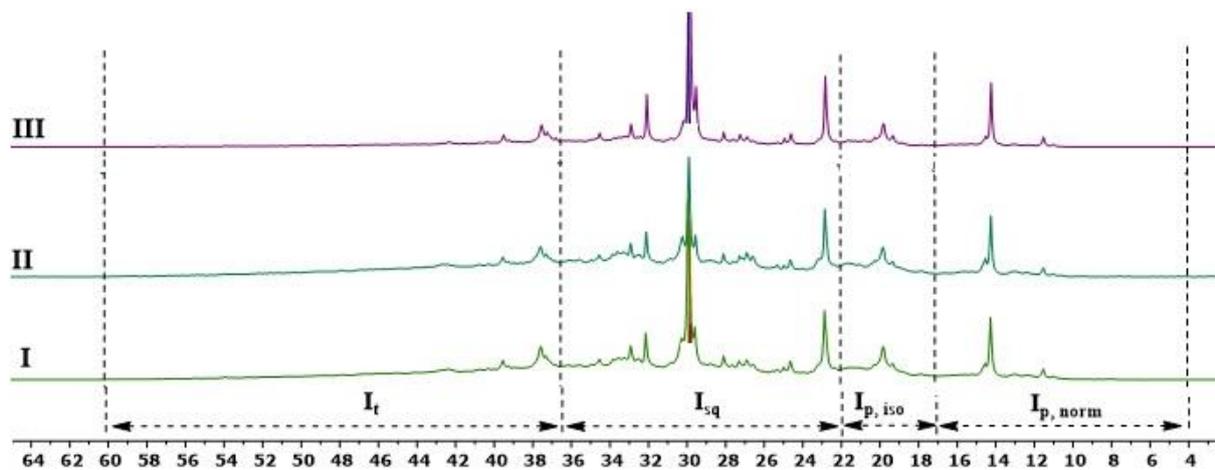


Рис. 2. <sup>13</sup>C ЯМР-спектры алифатической области образцов тяжелой нефти (I-III)

Fig. 2. <sup>13</sup>C NMR spectra of the aliphatic region of heavy oil samples (I-III)

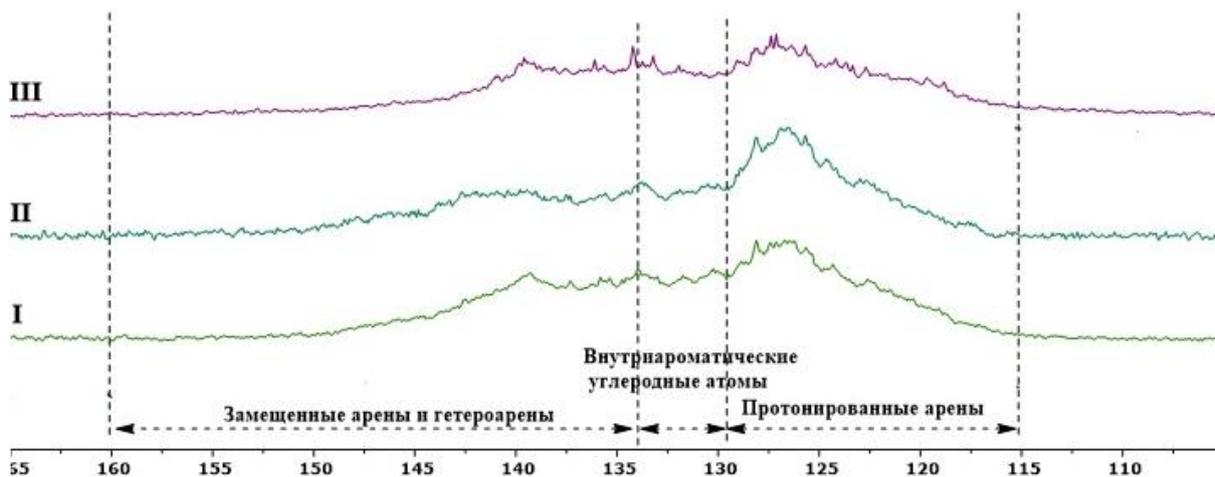


Рис. 3. <sup>13</sup>C ЯМР-спектры ароматической области образцов тяжелой нефти (I-III)

Fig. 3. <sup>13</sup>C NMR spectra of the aromatic region of samples of heavy oil (I-III)

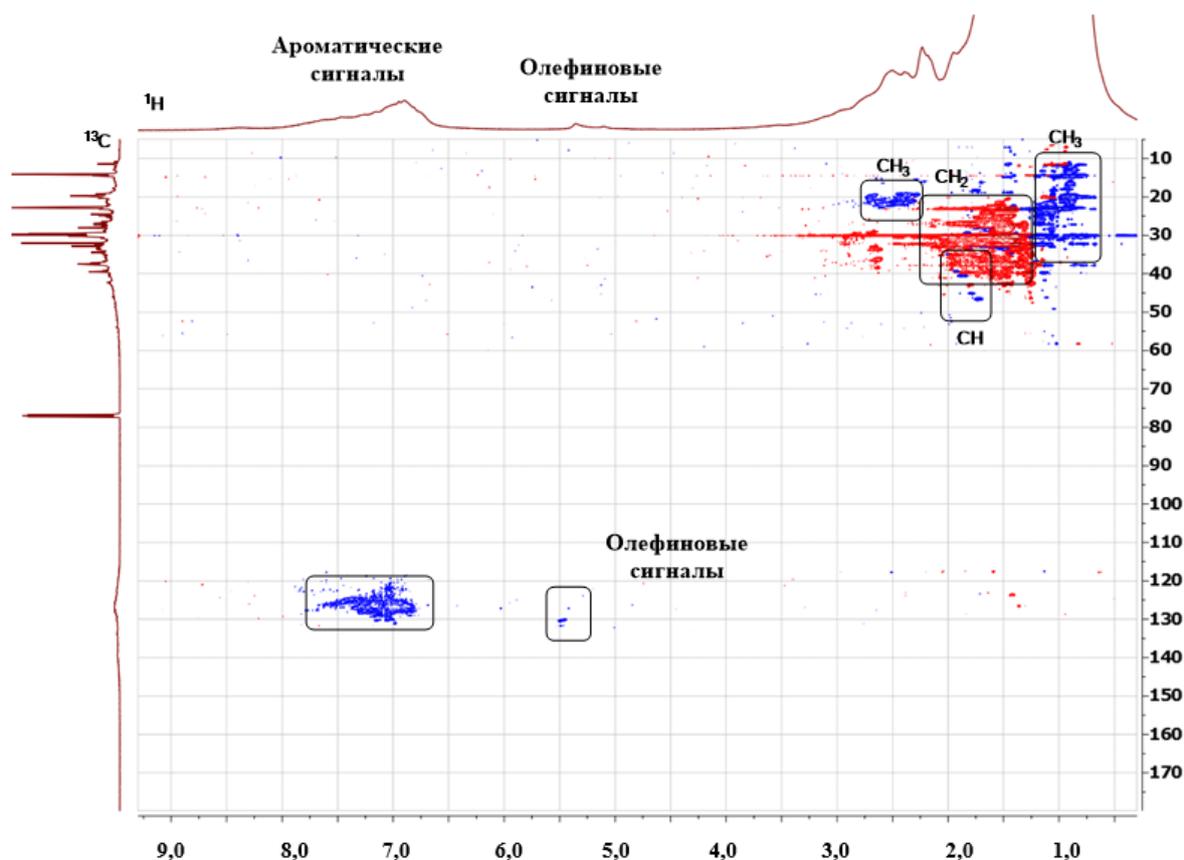


Рис. 4. Спектр ЯМР  $\{^1\text{H}, ^{13}\text{C}\}$  HSQCed образца нефти (I) в растворе  $\text{CDCl}_3$   
 Fig. 4. NMR spectrum of  $\{^1\text{H}, ^{13}\text{C}\}$  HSQCed oil sample (I) in a solution of  $\text{CDCl}_3$

Одной из важнейших особенностей, найденных по результатам анализа спектров  $^1\text{H}$  ЯМР и двумерных гетероядерных корреляционных спектров  $\{^1\text{H}, ^{13}\text{C}\}$  HSQCed, стало присутствие в образце I олефиновых сигналов (рис. 4).

По параметру ароматичности наиболее высокие показатели наблюдаются для образца III (0,049). Содержание ароматических фрагментов варьируется в более широком диапазоне 17-25,9%.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, из данных  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров нефтей с различным происхождением, вязкостью и проведенной обработкой следует, что неочищенные и рафинированные нефти могут различаться по содержанию олефиновых сигналов. Из анализа  $^{13}\text{C}$  ЯМР для нефтей наиболее важные результаты получены при оценке концентрации первичных, третичных и ароматических углеродов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Berger S., Braun S. 200 and More NMR Experiments. Weinheim: Wiley-VCH. 2004. 810 p.

Преимущество ЯМР заключается в том, что он позволяет получать непосредственно молекулярные детали, определяющие физико-химические свойства образца на макроскопическом уровне. Фактически, спектр ЯМР содержит информацию в терминах молекулярных функциональных групп и, если он записан с надлежащим разрешением, может позволить охарактеризовать образец на молекулярном уровне. Статистический анализ может быть успешно использован для прогнозирования важных свойств нефти (плотность по API, остаток углерода, температура появления воска и основной органический азот) на основе большого набора исследованных образцов.

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

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### REFERENCES

1. Berger S., Braun S. 200 and More NMR Experiments. Weinheim: Wiley-VCH. 2004. 810 p.

2. **Ernst R.R., Bodenhausen B., Wokaun A.** Principles of Nuclear Magnetic Resonance in One and Two Dimensions. Oxford: Oxford Univ. Press. 1987. 610 p.
3. **Van der Ven F.J.M.** Multidimensional NMR in liquids: basic principles and experimental methods. N.Y., Toronto: Wiley-VCH. 1995. 416 p.
4. **Яценко И.Г., Полищук Ю.М.** География высокосмолистых нефтей и особенности их физико-химических свойств. *Изв. Томск. политехн. ун-та.* 2011. Т. 318. № 1100. С. 99-102.
5. **Гаврилов В.П.** Концепция продления «нефтяной эры» России. *Геология нефти и газа.* 2005. № 1. С. 53–59.
6. **Максutow Р., Орлов Г., Осипов А.** Освоение запасов высоковязких нефтей в России. *Технологии ТЭК.* 2005. № 6. С. 36–40.
7. **Яценко И.Г., Полищук Ю.М.** Особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых видов нефти. *Технологии нефти и газа.* 2014. № 91(2). С. 3–10.
8. **Поконова Ю.В., Гайле А.А., Спиркин В.Г., Чертков Я.Б., Фахрутдинов Р.З., Сафиева Р.З., Тахистов В.В., Батуева И.Ю.** Химия нефти. Л.: Химия. 1984. 360 с.
9. **Рябов В.Д.** Химия нефти и газа. М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2014. 336 с.
10. **Ван-Нес К., Ван-Вестен Х.** Состав масляных фракций нефти и их анализ. М.: Издательство. 1954. 463 с.
11. ГОСТ Р 51858-2002. Нефть. Общие технические условия. М.: Госстандарт России. 2002. 11 с.
12. **Клочков В.В., Ефимов С.В., Маргулис Б.Я.** Качественный и количественный состав образцов нефти, добытой на различных месторождениях, по данным ЯМР-спектроскопии. *Уч. записки Казан. ун-та.* 2012. Т. 154. Кн. 1. С. 119-125.
13. **Поletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Leontev A.Yu., Babaev E.R., Movsumzade E.M., Khasanov I.I.** Геометрическое и электронное строение компонентов тяжелых высоковязких нефтей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 9. С. 40-45. DOI: 10.6060/ivkkt.20196209.6022.
14. **Leontev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Shakirov R.A., Khasanov I.I., Babaev E.R.** Влияние магнитного поля на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей. *НефтеГазoХимия.* 2019. № 3-4. С. 18–22. DOI: 10.24411/2310-8266-2019-10402.
15. **Lapidus A.L., Gyulmaliev A.M., Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Guseynova S.N., Movsumzade E.M.** Dependence of Reactivity on the Structural and Physico-chemical Characteristics of Heavy Highly Viscous Oil Components. *Solid Fuel Chem.* 2019. N 2. P. 23-29. DOI: 10.3103/S0361521919020083.
16. **Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Leontev A.Yu., Babaev E.R., Movsumzade E.M., Khasanov I.I., Lapidus A.L.** Influence of Heavy Oils Composition on the Physical Impact Processes during Transportation and Refining Pretreatment. *DGMK Tagungsbericht.* 2019. P. 163-170.
17. **Kolchina G.Yu., Movsumzade E.M., Adigezalova V.A., Poletaeva O.Yu.** Theoretical and experimental study of the reactivity of Naftalan petroleum biomarkers. *DGMK Tagungsbericht.* 2018. P. 177-182.
18. **Leontev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Movsumzade E.M.** Влияние физико-химического воздействия на вязкость тяжелых высоковязких нефтей. *Нефтеперераб. и нефтехимия.* 2017. № 6. С. 10-12.
2. **Ernst R.R., Bodenhausen B., Wokaun A.** Principles of Nuclear Magnetic Resonance in One and Two Dimensions. Oxford: Oxford Univ. Press. 1987. 610 p.
3. **Van der Ven F.J.M.** Multidimensional NMR in liquids: basic principles and experimental methods. N.Y., Toronto: Wiley-VCH. 1995. 416 p.
4. **Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M.** Geography of highly resinous oils and features of their physical and chemical properties. *Izv. Tomsk. Politekh. Univ.* 2011. V. 318. N 1100. P. 99-102 (in Russian).
5. **Gavrilov V.P.** The concept of extending the "oil era" of Russia. *Geologiya Nefti Gaza.* 2005. N 1. P. 53–59 (in Russian).
6. **Maksutow R., Orlov G., Osipov A.** Development of high-viscosity oil reserves in Russia. *Tekhnol. TEK.* 2005. N 6. P. 36–40 (in Russian).
7. **Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M.** Features of Physical and Chemical Properties of Hard-to-Recover Oils. *Tekhnol. Nefti Gaza.* 2014. N 91(2). P. 3–10 (in Russian).
8. **Pokonova Yu.V., Gaile A.A., Spirkin V.G., Chertkov Ya.B., Fakhrutdinov R.Z., Safieva R.Z., Takhistov V.V., Batueva I.Yu.** Chemistry of oil. L.: Khimiya. 1984. 360 p. (in Russian).
9. **Ryabov V.D.** Chemistry of oil and gas. M.: ID «FORUM»: INFRA-M. 2014. 336 p. (in Russian).
10. **Van Nes K., Van Westen H.** Composition of oil fractions of oil and their analysis. M.: Izdatinlit. 1954. 463 p. (in Russian).
11. ГОСТ Р 51858-2002. Oil. General specifications. M.: Gosstandart Rossii. 2002. 11 p. (in Russian).
12. **Klochkov V.V., Efimov S.V., Margulis B.Ya.** Qualitative and quantitative composition of oil samples produced at various fields, according to NMR spectroscopy data. *Uch. Zapiski Kazan. Univ.* 2012. V. 154. N 1. P. 119-125 (in Russian).
13. **Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Leontev A.Yu., Babaev E.R., Movsumzade E.M., Khasanov I.I.** Geometric and electronic structure of heavy highly viscous oil components. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 9. P. 40-45. DOI: 10.6060/ivkkt.20196209.6022.
14. **Leontev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Shakirov R.A., Khasanov I.I., Babaev E.R.** The influence of the magnetic field on the rheological properties of heavy high-viscosity oils. *NeftGazoKhimiya.* 2019. N 3-4. P. 18–22 (in Russian). DOI: 10.24411/2310-8266-2019-10402.
15. **Lapidus A.L., Gyulmaliev A.M., Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Guseynova S.N., Movsumzade E.M.** Dependence of Reactivity on the Structural and Physico-chemical Characteristics of Heavy Highly Viscous Oil Components. *Solid Fuel Chem.* 2019. N 2. P. 23-29. DOI: 10.3103/S0361521919020083.
16. **Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Leontev A.Yu., Babaev E.R., Movsumzade E.M., Khasanov I.I., Lapidus A.L.** Influence of Heavy Oils Composition on the Physical Impact Processes during Transportation and Refining Pretreatment. *DGMK Tagungsbericht.* 2019. P. 163-170.
17. **Kolchina G.Yu., Movsumzade E.M., Adigezalova V.A., Poletaeva O.Yu.** Theoretical and experimental study of the reactivity of Naftalan petroleum biomarkers. *DGMK Tagungsbericht.* 2018. P. 177-182.
18. **Leontev A.Yu., Poletaeva O.Yu., Movsumzade E.M.** The effect of physico-chemical effects on the viscosity of heavy high-viscosity oils. *Neftepererab. Neftekhim.* 2017. N 6. P. 10-12 (in Russian).

19. **Полетаева О.Ю., Колчина Г.Ю., Леонтьев А.Ю., Бабаев Э.Р., Мовсумзаде Э.М.** Исследование состава высоковязких тяжелых нефтей методом ядерной магнитно-резонансной спектроскопии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 1. С. 52-58. DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6261.
20. **Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарв Д.Ф.** Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия. 2000. 408 с.
21. **Колчина Г.Ю., Тептерева Г.А., Каримов О.Х., Чуйко Е.В., Каримов Э.Х., Мовсумзаде Э.М., Loginova M.E.** Гетероатомные модификаторы в процессах адсорбции и мембранной диффузии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 12-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6610.
22. **Чумаков А.А., Котельников О.А., Слизов Ю.Г., Минакова Т.С.** Оксидно-оксеноидная трактовка механизмов окисления бензилпенициллина и разложения окислителя в водно-гидропероксидном растворе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 68–75. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5771.
19. **Poletaeva O.Yu., Kolchina G.Yu., Leontiev A.Yu., Babayev E.R., Movsumzade E.M.** Study of the composition of high-viscosity oils by nuclear magnetic resonance spectroscopy. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 1. P. 52-58 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6261.
20. **Kalabin G.A., Kanitskaya L.V., Kushnarev D.F.** Quantitative NMR spectroscopy of natural organic raw materials and products of their processing. M.: Khimiya. 2000. 408 p. (in Russian).
21. **Kolchina G.Yu., Teptereva G.A., Karimov O.Kh., Chuiko E.V., Karimov E.Kh., Movsumzade E.M., Loginova M.E.** Heteroatomic modifiers in the processes of adsorption and membrane diffusion. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 12-19 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6610.
22. **Chumakov A.A., Kotelnikov O.A., Slizhov Yu.G., Minakova T.S.** Oxywater-oxenoid conception of mechanisms of benzylpenicillin oxidation and oxidant decomposition in aqueous hydrogen peroxide solution. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 4. P. 68–75. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5771.

*Поступила в редакцию 12.12.2022*

*Принята к опубликованию 13.03.2023*

*Received 12.12.2022*

*Accepted 13.03.2023*