



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544.3

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12569

Газохроматографическая оценка профиля серосодержащих соединений в составе ароматических фракций

Анастасия Юрьевна Канатьева[✉], Александр Александрович Курганов,
Александр Александрович Королев, Елена Николаевна Викторова

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН),
Москва, Россия, kanatieva@ips.ac.ru[✉]

Аннотация. Для пяти ароматических фракций нефти различного происхождения показана возможность использования метода газовой хроматографии с пламенно-фотометрическим детектированием для оценки профиля серосодержащих соединений. Помимо этого, использование селективного к сере детектора позволяет проводить оценку образцов ароматических фракций нефти по общему содержанию соединений серы с учетом взаимного перекрытия пиков ароматических углеводородов и их серосодержащих аналогов. Для этого необходимо построение калибровочной характеристики по БТ и/или ДБТ, использующегося в работе для построения контрольных карт. Показано, что анализ с использованием ГХ с ПИД не позволял с достаточной уверенностью проводить различие между образцами ароматических фракций. С использованием метода ГХ-МС была уточнена природа некоторых сернистых соединений в составе образца и подтверждено наличие взаимного перекрытия пиков ароматических углеводородов и их серосодержащих аналогов. В связи с этим построение профиля сернистых соединений было выполнено с использованием селективного к сере детектора, в качестве которого был выбран ППФД. Для получения численного описания образцов в качестве характеристической величины предложено использование отношения площадей пиков изомерных метилэтилбенз[*b*]тиофенов, полученных с контролем процесса с использованием карт Шухарта. На примере годового исследования одного и того же образца показано, что величина отношения остается постоянной в пределах погрешности в течение года, что позволяет использовать эту величину как характеристическую для ароматических фракций.

Ключевые слова: сернистые соединения, нефть, селективное детектирование.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 21-73-20032.

Для цитирования: Канатьева А.Ю., Курганов А.А., Королев А.А., Викторова Е.Н. Газохроматографическая оценка профиля серосодержащих соединений в составе ароматических фракций // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 6. С. 924-933. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12569>

Original article

GC evaluation of the sulfur containing compounds profile in the petroleum aromatic fractions

Anastasiia Yu. Kanatieva[✉], Alexander A. Kurganov, Alexander A. Korolev, Elena N. Victorova
A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS (TIPS RAS), Moscow, Russian Federation,
kanatieva@ips.ac.ru[✉]

Abstract. The possibility of using gas chromatography with flame photometric detection for estimating of the profile of sulfur-containing compounds was demonstrated for five aromatic fractions of oil of different origin. Utilization of sulfur-selective detector allows one to evaluate samples of aromatic fractions by the total content



of sulfur compounds, considering the mutual overlap of peaks of aromatic hydrocarbons and their sulfur-containing analogs. This fact requires constructing a calibration characteristic for BT and/or DBT. The latter was used in the paper for construction of the Shewhart control charts. It was shown that GC-FID separation did not allow one to distinguish between samples of aromatic fractions with sufficient confidence. Using the GC-MS method, the nature of some sulfur compounds in the sample was clarified and the presence of mutual overlap of peaks of aromatic hydrocarbons and their sulfur-containing analogs was confirmed. In this regard, the construction of the profile of sulfur compounds was performed using a sulfur-selective detector, for which PFPD was chosen. To obtain a numerical description of the samples, it was proposed to use the ratio of the peak areas of isomeric methylethylbenz[b]thiophenes obtained with process control using Shewhart charts as a characteristic value. Using the one-year-long study of the same sample, it was shown that the ratio value remains constant within the error limits during the year, which allows this value to be used as a characteristic value for aromatic fractions.

Keywords: sulfur containing compounds, petroleum, selective detection.

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation as part of project No. 21-73-20032.

For citation: Kanateva A.Yu., Kurganov A.A., Korolev A.A., Victorova E.N. GC evaluation of the sulfur containing compounds profile in the petroleum aromatic fractions. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(6): 924-933. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12569>

Введение

Сернистые соединения различного происхождения, составляют большую группу соединений и включают как легкие газообразные соединения, так и сложные полициклические ароматические компоненты. Эти соединения могут присутствовать в различных, обычно весьма сложных, матрицах таких как воздух, водные системы, нефть и нефтяные фракции [1-3]. При этом общее содержание ССС в образце может изменяться в широком диапазоне, а сложность матрицы может также приводить к взаимному перекрытию пиков компонентов различной природы. При этом ССС обладают высокой реакционной способностью, что может приводить к необратимой сорбции целевых компонентов в различных частях хроматографической системы [4, 5]. Однако, в случаях, когда содержание серы относительно высоко, а матрица очень сложна, например, сырая нефть или прямогонные нефтяные фракции, где сера является основным гетероатомом, встречающимся в составе смеси, часто можно проводить непосредственный ГХ анализ образца, что сокращает время анализа и исключает возможность потерь аналита. Такие образцы из-за возможных перекрытий пиков целевых соедине-

ний с другими компонентами смеси требуют очень эффективных систем разделения и очень селективных детекторов, при этом выбор детектора с высокой селективностью к сере по сравнению с углеводородами имеет решающее значение. Определение и обнаружение следовых количеств серы в сырой нефти и различных нефтепродуктах традиционно затруднено из-за сложной углеводородной матрицы. Кроме того, тот факт, что соединения серы являются полярными, а углеводородные матрицы неполярными, способствует потере соединений серы на активных участках в аналитических приборах и сосудах для образцов. Разработка детекторов, специфичных к сере, для газовой хроматографии дала дополнительный импульс использованию этого метода для анализа нефтяных фракций [6, 7]. Например, селективность хемилюминесцентного (ХЛД) и пламенно-фотометрического (ПФД и ППФД) детектора позволяет обнаруживать и количественно определять соединения серы в концентрациях ниже единиц ppm в присутствии соэлюирующихся углеводородов в концентрациях единиц процентов [8-10]. Обычный подход к характеристике сложной смеси различных индивидуальных соединений серы в сырой нефти заключается во фракционировании нефти на фракции с узким диапазоном кипения

(предварительное фракционирование) и отдельном анализе каждой фракции, что упрощает разделение и интерпретацию полученных результатов [11].

В настоящей работе оценена возможность использования метода газовой хроматографии с пламенно-фотометрическим детектированием для первичной оценки образцов ароматических фракций нефти с точки зрения содержания соединений серы.

Экспериментальная часть

Содержание ССС в ароматических фракциях определяли методом газовой хроматографии с пульсирующим пламенно-фотометрическим детектором. Измерения проводили с использованием газового хроматографа Хроматэк-Кристалл 9000 (Россия, ЗАО СКБ «Хроматэк»). Отклик детектора на серу пропорционален квадрату концентрации серы, что обеспечивает его чрезвычайно высокую чувствительность, а также позволяет обнаруживать как идентифицированные, так и неидентифицированные ССС. Общее содержание серы в образце при необходимости может быть рассчитано как сумма концентраций детектируемых индивидуальных компонентов. Сбор данных и их первичную обработку проводили с помощью программы «Хроматэк-Аналитик». Хроматографические измерения с пламенно-ионизационным детектированием выполнены на хроматографе фирмы Shimadzu GC-2010, снабженном ПИД и инжектором с делителем потока. Температура детектора составляла 300°C, расход водорода 40 см³/мин, расход воздуха 300 см³/мин. Максимальное входное давление в системе составляло 400 кПа при выходном давлении равном 100 кПа (атмосферное). Сбор данных и их первичную обработку проводили с помощью программы «GC Solution». Для газохроматографического анализа с масс-спектральным детектированием использовали газовый хроматограф – масс-спектрометр Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra.

Детектирование веществ осуществляли по полному ионному току. Для поиска масс-спектров использовали базу данных NIST08 и Wiley09. Сбор данных и их первичную обработку проводили с помощью программы «GC-MS Solution». Разделение проводили с использованием капиллярной газовой колонки CP-Sil 5 CB (30м×0.25 мм×0.25 мкм). В качестве газоносителя во всех случаях использовался гелий класса А.

Обсуждение результатов

В работе использованы пять образцов ароматических фракций нефтей различного происхождения. Первичный анализ проводили с использованием ГХ с пламенно-ионизационным детектором, однако полученные результаты не позволяли с достаточной уверенностью проводить различие между образцами. Сера является самым распространенным гетероатомом в составе нефти и нефтяных фракций, что позволяет предположить, что использование профиля ССС, полученного с помощью селективного детектирования в одномерной ГХ системе позволит как применять метод «отпечатков пальцев» для различения образцов, так и проводить первичную оценку содержания серы в образце для решения о направлениях его дальнейшего исследования. Кроме того, разделение ССС в соответствии с температурами кипения позволяет оценить распределение сернистых соединений между собой. На рис. 1 приведены хроматограммы исследованных образцов, полученные с использованием детектора ППФД.

Как видно из приведенного рисунка, хроматограммы имеют сходную форму в области слабоудерживаемых соединений, однако могут быть различены при увеличении фактора удерживания до величин более 1.5. При использовании ППФД для определения соединений серы выходящие из колонки ССС сгорают в относительно холодном пламени, обогащенном водородом. Среди продуктов

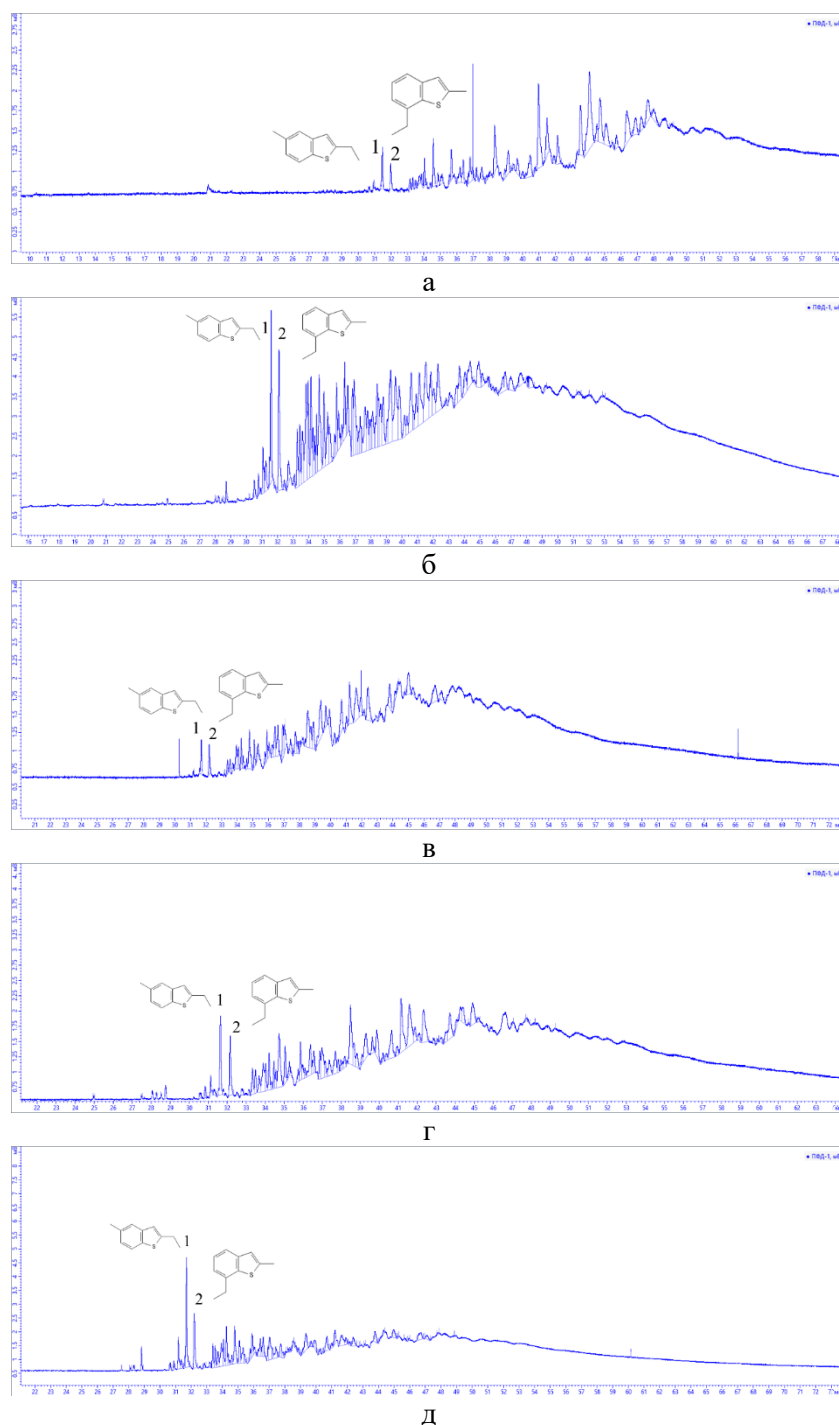


Рис. 1. Хроматограммы исследованных образцов, полученные с использованием детектора ППФД. Кодировка образцов: а – Д026, б – И014, в – Г006, г – И17, д – Г45.

1 – 2-этил-5-метилбенз[б]тиофен; 2 – 2-этил-7-метилбенз[б]тиофен.

Fig. 1. Chromatograms of the studied samples obtained using the PFPD detector. Encoding of samples: а – D026, б – I014, в – G006, г – I17, д – G45.

1 – 2-ethyl-5-methylbenz[b]thiophene; 2 – 2-ethyl-7-methylbenz[b]thiophene.

сгорания серосодержащих соединений присутствуют атомы серы, рекомбинация которых сопровождается хемивозбужде-

нием и испусканием света из возбужденного состояния в области 380-395 нм [12], которую фиксируют при длинах волн 384 или 394 нм (предпочтительно) (рис. 2):

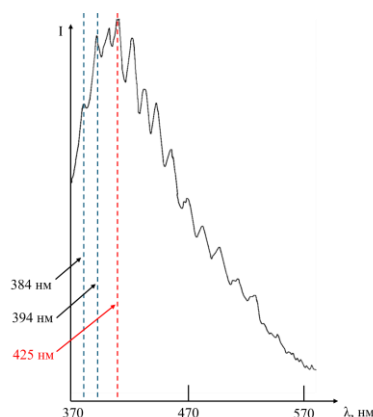
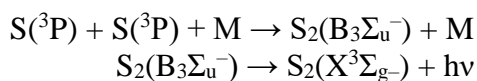


Рис. 2. Эмиссионный спектр ССС, ширина щели 3.3 нм, диапазон 5 нА [13].
 Fig. 2. CCC emission spectrum, slit width 3.3 nm, range 5 nA [13].



Эта схема достаточно точно описывает экспериментальную зависимость интенсивности испускаемого света (I) от концентрации аналита (c), которая близка к квадратичной степенной зависимости, как упоминалось выше:

$$I \sim c^\alpha, \text{ где } 1.7 < \alpha < 2$$

Кроме этого, при сгорании ССС могут образовываться частицы CS, хемилюминесценцию которых фиксируют при длине волны 257.6 нм, однако относительная интенсивность люминесценции этих частиц на порядок ниже соответствующей величины для частиц S_2 , что делает эту длину волны неподходящей для селективного определения серы.

Важно отметить, что область длин волн $\lambda=350-450$ нм присутствует также в спектре хемилюминесценции частиц, образующихся из моно-, ди- и триароматических соединений [14, 15], причем количественный анализ возможен уже при длине волны 425 нм [16], а при оптимальных условиях интенсивность хемилюминесценции прямо пропорциональна концентрации паров ароматических соединений (рис. 2). В связи с этим для ароматических фракций особенно актуальным становится вопрос различения сигнала ССС и сигналов ди-, три- и полиароматических соединений даже при использовании селективных к сере детекторов, в связи с чем для уточнения распределения

сернистых соединений образцы были проанализированы с использованием масс-спектрального детектирования. Хроматограммы, полученные по полному ионному току, обрабатывали с использованием программного обеспечения GC-MS Solution (Shimadzu) с использованием следующих параметров: минимальное соотношение сигнал/шум 2, минимальное число сканов на пик – 5, лист целевых аналитов включал производные бензотиофена, дибензотиофена, тиолы с импортом масс-спектров из базы данных NIST (mainlib). Для обнаружения целевых компонентов проводили анализ хроматограмм экспериментального образца, построенных по характеристичным для целевых веществ ионам в области их элюирования. Для подтверждения идентификации проводилось построение хроматограммы по иону подтверждения. На рис. 3 показано сравнение одной и той же области разделения для различных способов детектирования для образца Д026 (хроматограмма ППФД показана на рис. 1а).

В области меньших времен удерживания для всех изученных ароматических фракций с использованием ППФД явно выражены пики двух отдельных компонентов, которые не выделяются столь значимо ни при пламенно-ионизационном, ни при масс-спектральном детектировании. Как видно из рис. 3, эти пики могут быть обнаружены как при построении масс-хроматограмм по ионам $m/z =$

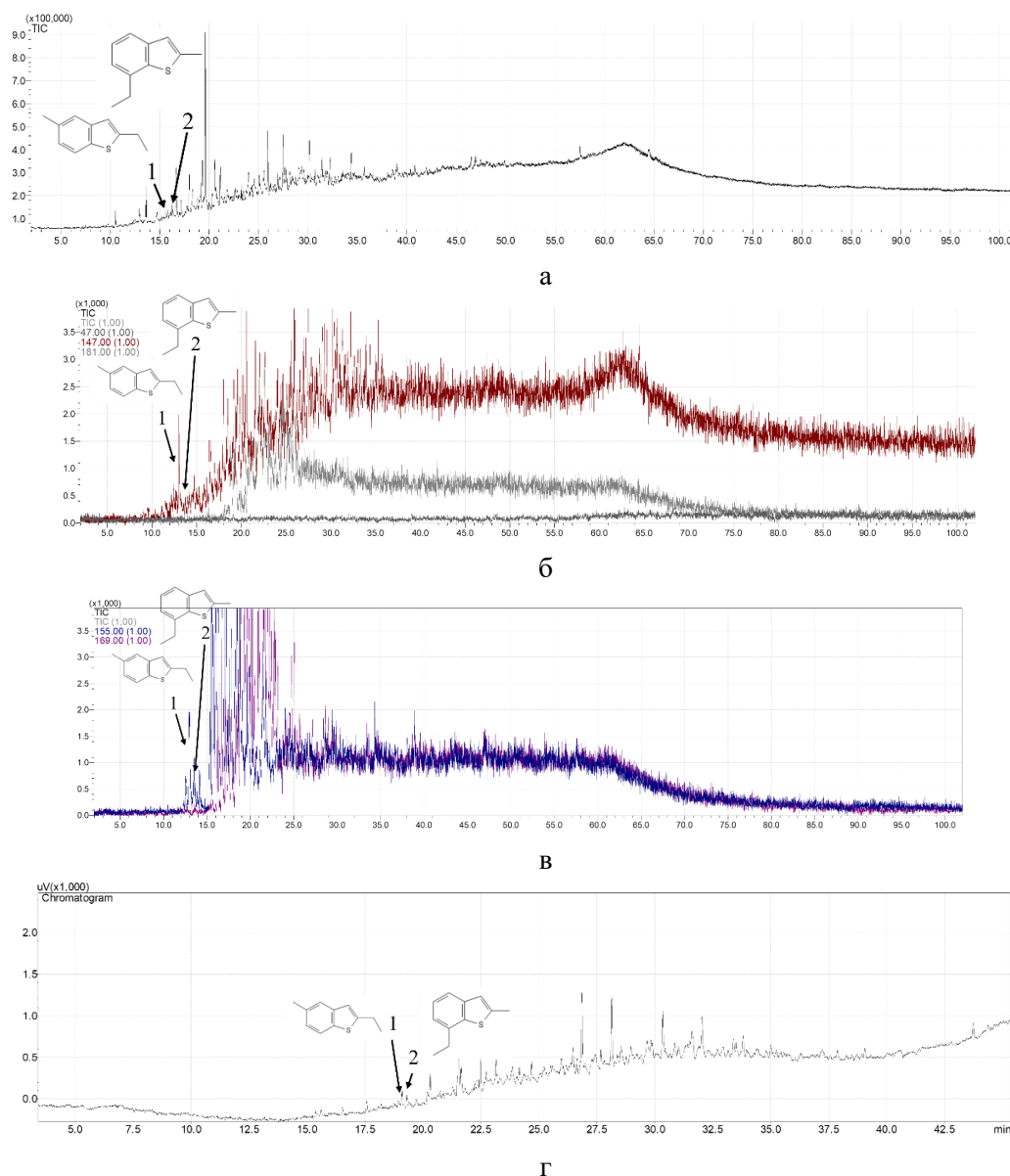


Рис. 3. Хроматограммы образца D026: а – масс-хроматограмма по полному ионному току; б – масс-хроматограмма по ионам $m/z=47$ (тиолы, тиоэфиры, диолы), 147 (бензтиофены, полиалкилбензолы), 181 (алкилзамещенные бифенилы, трициклические тиацикланы); в – масс-хроматограмма по ионам $m/z=155$ (метилалкилнафталины и бициклические тиацикланы), 169 (алкилнафталины и бициклические тиацикланы); г – хроматограмма ПИД.
 Fig. 3. Chromatograms of sample D026: a – mass chromatogram for total ion current; b – mass chromatogram for ions $m/z=47$ (thiols, thioesters, diols), 147 (benzothiophenes, polyalkylbenzenes), 181 (alkyl-substituted biphenyls, tricyclic thia cyclanes); c – ion mass chromatogram $m/z=155$ (methylalkylnaphthalenes and bicyclic thiacyclanes), 169 (alkylnaphthalenes and bicyclic thiacyclanes); g – chromatogram PID.

47, 147, 181, что соответствует и сернистым соединениям, в частности, бензтиофену и его производным, и полиалкилбензолам, так и на масс-хроматограмме, построенной по иону $m/z=155$ (нафталин и его производные) и $m/z=169$

(алкилнафталины и бициклические тиацикланы), поэтому поиск ССС с использованием одномерной хроматографической системы весьма затруднен даже с использованием МС детектирования и

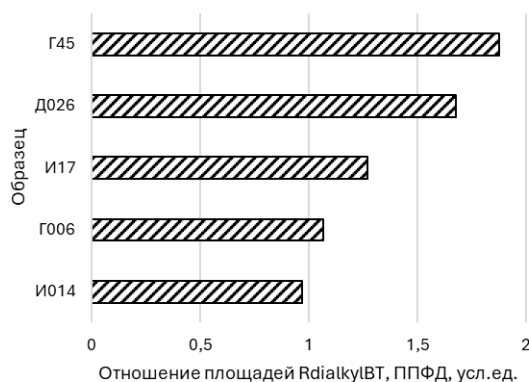


Рис. 4. Отношения $R_{dialkylBT}$ площади пика 2-этил-5-метилбенз[b]тиофена к площади пика 2-этил-7-метилбенз[b]тиофена для каждого из исследованных образцов, детектор ППФД.

Fig. 4. $R_{dialkylBT}$ ratio of the peak area of 2-ethyl-5-methylbenz[b]thiophene to the peak area of 2-ethyl-7-methylbenz[b]thiophene for each of the studied samples, PPFД detector.

требует существенных временных и ресурсных затрат, поскольку взаимное перекрытие пиков ароматических углеводородов и их серосодержащих аналогов может приводить к занижению определяемых степеней извлечения S-ПАУ. В случае использования ППФД выбор длины волны детектирования хемилюминесценции молекул S_2 позволяет исключить эмиссию компонентов матрицы (394 нм против 425 нм, см. рис. 2). С использованием масс-спектральных данных соединения 1 и 2 были определены как изомерные диалкилтиофены 2-этил-5-метилбенз[b]тиофен и 2-этил-7-метилбенз[b]тиофен, после чего для каждого из исследованных образцов было рассчитано отношение площади пика 2-этил-5-метилбенз[b]тиофена к площади пика 2-этил-7-метилбенз[b]тиофена $R_{dialkylBT} = S_{2\text{-этил-5-метилбенз[b]тиофен}} / S_{2\text{-этил-7-метилбенз[b]тиофен}}$ (рис. 4). Как видно из рисунка, величина отношений количеств изомеров метилэтилбенз[b]тиофена является индивидуальной характеристикой образца.

Для оценки возможности использования отношения как характеристического, стабильность этой величины была оценена во времени в течение года для открытых образцов для образца Д026. Фракцию хранили в открытой посуде, из которой раз в 2 месяца отбирали пробу,

растворяли ее в гексане и проводили хроматографический анализ с использованием ППФД. Для оценки стабильности работы прибора использовали метод контрольных карт Шухарта, который был предложен Уолтером Шухартом в 1931 г. [17]. Теория контрольных карт выделяет два вида изменчивости. Первый вид – случайная изменчивость, которая обусловлена набором различных факторов, которые на практике зачастую невозможно выявить. Каждая из таких причин формирует очень малую долю общей изменчивости, и ни одна из них не превалирует над другими (по аналогии со случайными погрешностями). Воздействие совокупности всех этих причин измеримо, и предполагается, что оно формирует внутренне присущую процессу изменчивость. Второй вид изменчивости представляет собой реальное изменение в процессе, являющееся следствием изменений, которые могут быть обнаружены и устранены, по крайней мере теоретически – это систематический вклад в общую изменчивость. К таким источникам изменений в процессе могут быть отнесены неоднородность материала, поломка инструмента, неправильная работа измерительного оборудования и др. Процесс находится в статистически управляемом состоянии, если изменчивость вызвана только случайными причинами. Как

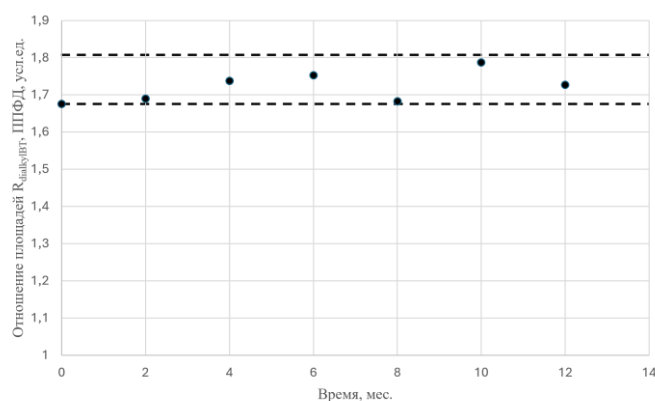


Рис. 5. Стабильность отношения $R_{dialky|BT}$ площади пика 2-этил-5-метилбенз[b]тиофена к площади пика 2-этил-7-метилбенз[b]тиофена для образца Д026 в течение года, детектор ППФД.

Fig. 5. Stability of the ratio of $R_{dialky|BT}$ of the peak area of 2-ethyl-5-methylbenz[b]thiophene to the peak area of 2-ethyl-7-methylbenz[b]thiophene for sample D026 during the year, PPFД detector.

только этот уровень изменчивости определен, любое отклонение от него считают результатом воздействия причин, которые необходимо выявить и исключить. Необходимость такого контроля в случае хроматографического анализа обусловлена длительностью проведения эксперимента и нелинейностью сигнала детектора. В качестве контрольного образца использовали раствор ДБТ в бензоле. Контрольный образец анализировали с каждым исследуемым раствором ароматической фракции образца Д026. Поскольку состав контрольного образца является неизменным, результат его анализа можно использовать в качестве критерия того, что произошел сдвиг калибровки или иные изменения в процедуре проведения анализа. Предполагая, что результаты анализа контрольного образца соответствуют нормальному распределению, считаем, что 68.3% любой совокупности повторных результатов должны попадать в область ± 1 СКО (среднеквадратическое отклонение) от среднего значения, 95.4% должно попадать в область ± 2 СКО и 99.7% должны попадать в область ± 3 СКО, то есть индивидуальный результат измерений по контрольному образцу (ДБТ в бензоле) может выйти за пределы области ± 3 СКО только в трех случаях из 1000 Это достаточно редкий случай, и по-

явление такого результата можно рассматривать как сдвиг калибровки, что особенно актуально при длительных измерениях. На рис. 5 показано изменение отношения площадей пиков изомерных метилэтилбенз[b]тиофенов, полученных с контролем процесса с использованием карт Шухарта по раствору ДБТ в бензоле.

Как видно из рисунка, величина отношения остается постоянной в пределах погрешности даже при общем логичном снижении содержания компонентов в составе образца, что говорит о возможности использования величины $R_{dialky|BT}$ в качестве характеристического отношения. При этом построение калибровочной характеристики по БТ и/или ДБТ, использовавшейся для построения контрольных карт, позволяет также использовать полученные ППФД хроматограммы для оценки общего содержания ССС в составе исследуемых образцов.

Заклучение

Для ароматических фракций нефти различного происхождения показана возможность использования метода газовой хроматографии с пламенно-фотометрическим детектированием для первичной оценки образцов ароматических фракций нефти с точки зрения содержания соединений серы с учетом взаимного перекры-

вания пиков ароматических углеводородов и их серосодержащих аналогов. В качестве характеристической величины предложено использование отношения площадей пиков изомерных метилэтилбенз[б]тиофенов, полученных с контролем процесса с использованием карт Шухарта и показано, что величина отношения остается постоянной в пределах погрешности.

Список литературы/References

1. Wardencki W. Sulfur compounds: gas chromatography, in: Encyclopedia of Separation Science, Ed. Wilson I. D. Academic Press, 2000: 4285-4301. <https://doi.org/10.1016/B0-12-226770-2/06201-3>
2. Lobachev A.L., Nikitina A.L., Revinskaya E.V., Fomina N.V., Gazovaya chromatografiya v opredelenii serosoderzhashchih soedinenij v nefiti i nefteproduktakh, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2013; 13(4): 523-527. (In Russ.)
3. Shen F., Qu S., Li J., Yang Z., Zhou C., Yang F., He Z., Xiang K., Shi M., Liu H., Development of chemical looping desulfurization method for high sulfur petroleum coke, *Fuel*, 2024; 357(A): 129658. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129658>
4. Yanagida A., Wakiya S., Kigawa R., Sato Y., Shiga S., Koizumi Y., Uchino T., Yasuki Y., Kohdzuma Y., What kind of corrosion products are “black spots”? —Effects of reduced sulfur compounds on corrosion of bronze artefacts, *Journal of Cultural Heritage*, 2024; 68: 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.06.010>
5. Rawat A., Joshi P., Singh R. K., Khatri O. P., Mohanty P., Utilizing polycyclic aromatic sulphur heterocycles to develop hypercrosslinked microporous polymeric adsorbents for deep desulphurization of fuels, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024: 683: 132996. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132996>

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

6. Hua Y., Hawryluk M., Gras R., Shearer R., Luong J., Flow injection gas chromatography with sulfur chemiluminescence detection for the analysis of total sulfur in complex hydrocarbon matrixes, *J. Sep. Sci.*, 2018; 41(2): 469-474. <https://doi.org/10.1002/jssc.201700897>
7. Prasantongkolmol T., Thongkorn H., Sunipasa A., Do H.A., Saeung C., Jongpatiwut S., Analysis of sulfur compounds for crude oil fingerprinting using gas chromatography with sulfur chemiluminescence detector, *Marine Pollution Bulletin*, 2023; 186: 114344. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114344>
8. Catalan L.J.J., Liang V., Jia C. Q., Comparison of various detection limit estimates for volatile sulphur compounds by gas chromatography with pulsed flame photometric detection, *Journal of Chromatography A*, 2006; 1136 (1): 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.09.056>
9. Torres-Herrera S., González-Cortés J. J., Almenglo F., Ramírez M., Cantero D., Development and validation of a sampling and analysis method to determine biogenic sulfur in a desulfurization bioreactor by gas chromatography coupled with a pulsed flame photometric detector (GC-PFPD), *Journal of Hazardous Materials*, 2022; 424: 127667. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127667>
10. Song X., Zhu L., Wang X., Zheng F., Zhao M., Liu Y., Li H., Zhang F., Zhang Y., Chen F., Characterization of key aroma-active sulfur-containing compounds in Chinese Laobaigan Baijiu by gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled



with sulfur chemiluminescence detection, *Food Chemistry*, 2019; 297: 124959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124959>

11. Wu J., Ma C., Zhang W., Chang W., Zhang Y., Shi Q., Molecular characterization of non-polar sulfur compounds in the full boiling range crude oil fractions, *Fuel*, 2023; 338: 127323. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127323>

12. Tsaplev Yu.B., Gl. 7. Hemilyuminescentnye detektory v chromatografii., In: *Lyuminescentnyy analiz*. Ed. Romanovskoy G.I. M., Nauka. 2014: 179-227. (In Russ.)

13. Arora P.K. Chath J.P.S., Chemiluminescence from the reactions of ozone with sulphur compounds, *Can. J. Chem*, 1983; 1: 417-423.

14. Matveeva A.G., Glebov E.M., Korolev V.V., Pozdnyakov I.P., Plyusnin V.F., Stas D.V., Reznikov V.A., Lyuminescentnye svoystva novykh naftilnitroksilnykh radikalov, *Himiya vysokih energiy*, 2011; 45(5): 450-456. (In Russ.)

15. Sibircev V.S., Molekulyarnaya lyuminometriya v biotekhnologicheskikh issledovaniyakh. Uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg. Universitet ITMO. 2018. 15 p. (In Russ.)

16. Rao Z., Liu L., Xie J., Zeng Y., Development of a benzene vapour sensor utilizing chemiluminescence on Y₂O₃, *Luminescence*, 2008; 23(3): 163-168. <https://doi.org/10.1002/bio.1027>

17. Shewhart W.A., *Economic Control of Manufactured Product*. New York. D. Van Norstrand. 1931. 501 p.

Информация об авторах / Information about the authors

А.Ю. Канатьева – ведущий научный сотрудник лаборатории спектральных и хроматографических исследований, руководитель группы хроматографии, к.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Москва, Россия

А.А. Курганов – главный научный сотрудник лаборатории спектральных и хроматографических исследований, д.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Москва, Россия

А.А. Королев – старший научный сотрудник лаборатории спектральных и хроматографических исследований, д.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Москва, Россия

Е.В. Викторова – старший научный сотрудник лаборатории спектральных и хроматографических исследований, к.х.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Москва, Россия

A.Yu. Kanateva – leading researcher, PhD, laboratory of spectral and chromatographic investigations, A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS), ORCID 0000-0003-1633-0197, Moscow, Russian Federation, kanatieva@ips.ac.ru

A.A. Kurganov – head researcher, Dr.Sc., laboratory of spectral and chromatographic investigations, A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS), Moscow, Russian Federation

A.A. Korolev – senior researcher, laboratory of spectral and chromatographic investigations, A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS), Moscow, Russian Federation

E.N. Victorova – senior researcher, PhD, laboratory of spectral and chromatographic investigations, A.V.Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences (TIPS RAS), Moscow, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 19.10.2024; одобрена после рецензирования 03.11.2024; принята к публикации 04.11.2024.

The article was submitted 19.10.2024; approved after reviewing 03.11.2024; accepted for publication 04.11.2024.