

АНАЛІТЫЧНАЯ ХІМІЯ
ANALYTICAL CHEMISTRY

УДК 665.765; 543.51; 543.544.43; 543.061
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-114-123>

Поступила в редакцию 03.02.2026
Received 03.02.2026

С. Н. Громыко¹, А. А. Агабалаев², М. Ф. Заяц³, С. М. Лещёв³

¹Государственный комитет судебных экспертиз Республики Беларусь, Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОМАРКЕРОВ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ
С МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ**

Аннотация. Проведен анализ 12 образцов товарных моторных масел одного класса вязкости 10w-40 методами газовой хроматографии с пламенно-ионизационным (ГХ/ПИД) и масс-спектрометрическим (ГХ/МСД) детектированием. Показано, что идентификация моторных масел методом ГХ/ПИД, как и ГХ/МСД, со сбором данных в режиме полного ионного тока практически не позволяет выявить различия между исследованными моторными маслами ввиду весьма незначительных различий регистрируемых хроматограмм соответствующих образцов. Показано, что использование ГХ/МСД с регистрированием хроматограмм в режиме выбранных ионов, характерных для уникальных нефтяных биомаркеров, позволяет выявить различия в компонентном составе рассмотренных масел. Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможность использования полуколичественной оценки содержания нефтяных биомаркеров для идентификации масел при проведении судебной экспертизы нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов. По содержанию биомаркеров в товарных моторных маслах также можно выявить фальсификацию высокоочищенных моторных масел путем подмены или подмешивания минеральных масел, не прошедших должной технологической обработки.

Ключевые слова: судебная экспертиза, нефтепродукты, моторные масла, нефтяные биомаркеры, газовая хроматография, масс-спектрометрия

Для цитирования. Идентификация моторных масел с использованием биомаркеров методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием / С. Н. Громыко, А. А. Агабалаев, М. Ф. Заяц, С. М. Лещёв // Весті Національної академії наук Білорусі. Серія хімічних наук. – 2026. – Т. 62, № 2. – С. 114–123. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-114-123>

S. N. Hramyko¹, A. A. Ahabalaye², M. F. Zayats³, S. M. Leshchev³

¹State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

³Belarusian State University, Minsk, Belarus

**IDENTIFICATION OF ENGINE OILS USING BIOMARKERS BY
GAS CHROMATOGRAPHY WITH MASS SPECTROMETRIC DETECTION**

Abstract. Twelve samples of commercial engine oils of the same viscosity class 10w-40 were analyzed using gas chromatography with flame ionization and mass spectrometric detection (hereinafter referred to as GC/FID and GC/MSD, respectively). It was shown that the identification of engine oils by GC-FID, as well as GC/MSD with data collection in the total ion current mode, does not practically allow us to detect differences between the studied motor oils due to very minor differences in the recorded chromatograms of the corresponding samples. It is shown that the use of GC/MSD with the registration of chromatograms in the selected ion mode, characteristic of unique petroleum biomarkers, makes it possible to identify differences in the component composition of the considered oils. The obtained experimental data demonstrate the possibility of using a semi-quantitative assessment of the content of petroleum biomarkers for the identification of oils during forensic examination of petroleum products and fuels and lubricants (hereinafter referred to as PP and FL). Based on the content of biomarkers in commercial engine oils, it is also possible to detect adulteration of highly refined semi-synthetic or synthetic oils by substituting or mixing mineral oils made without proper processing.

Keywords: forensic examination, petroleum products, motor oils, petroleum biomarkers, gas chromatography, mass spectrometry

For citation. Hramyka S. N., Ahabalayeu A. A., Zayats M. F., Leshchev S. M. Identification of engine oils using biomarkers by gas chromatography with mass spectrometric detection. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 2, pp. 114–123 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-2-114-123>

Введение. Смазочные масла нефтяного происхождения находят широкое применение в промышленности, автомобиле- и авиастроении [1]. Идентификация масел представляет собой актуальную задачу для судебной экспертизы нефтепродуктов (НП) и горюче-смазочных материалов (ГСМ), назначаемой при расследовании уголовных дел и материалов проверки, связанных с пожарами, дорожно-транспортными происшествиями, авиационными катастрофами, хищениями, фальсификацией товарной продукции и др. Современные реалии таковы, что необходимо решать весь спектр востребованных задач в отношении масел: от относительно простых диагностических до сложных идентификационных задач (тождественности между маслами) [2]. Газохроматографические методы исследования с пламенно-ионизационным и масс-спектрометрическим типами детектирования остаются основными рутинными аналитическими инструментами при решении вышеуказанных задач экспертизы НП и ГСМ [3–7].

В настоящее время наряду с применением новых более высокоэффективных присадок не менее важным направлением в получении товарных моторных масел стало значительное улучшение качества базовых масел. Сущность технологии получения базовых масел заключается в последовательном многоступенчатом удалении нежелательных групп углеводородов (асфальтосмолистые, сернистые, непредельные соединения и парафиновые углеводороды) путем деасфальтизации, депарафинизации, селективной очистки и гидроочистки с применением экстракционных, адсорбционных и гидрогенизационных методов (гидрокрекинг высокого давления и гидроизомеризация дистиллятов нефтей, в том числе и непригодных для получения высокоиндексных масел в процессах экстракции) [3].

Как результат применения различных методов очистки основу базовых масел составляют смеси нафтенных, изопарафиновых и низкомолекулярных ароматических углеводородов с длинными боковыми цепями.

При получении базовых масел в процессе переработки нефти происходит удаление многих групп углеводородов, с одной стороны, нежелательных с точки зрения конечных эксплуатационных свойств моторных масел, а с другой – важных для решения идентификационных задач судебной экспертизы НП и ГСМ. Следовательно, особое значение приобретает идентификация сохранившихся в смазочных материалах после всех вышеуказанных процессов переработки углеводородов, так называемых нефтяных биомаркеров, сохранивших характерные черты строения исходных биологических молекул независимо от того, присутствовали ли данные углеводороды в исходной массе или образовались позднее из других соединений.

Объектами настоящей работы являются оригинальные товарные моторные масла, которые по спецификации SAE J300 относятся к классу вязкости 10w-40. Производители данных масел позиционируют их как полусинтетические. Регламентируемые требования и предписания к производителям в отношении того, в каком количестве синтетический компонент (как правило, высокоочищенное нефтяное базовое масло, полученное в результате каталитической гидрогенизации) необходимо использовать при изготовлении готового продукта, отсутствуют. При использовании классического скринингового метода ГХ/ПИД возникают трудности в дифференциации данного синтетического компонента. Так, на хроматограммах выявляются лишь «гребенки» неразделенных пиков высококипящих соединений. Следовательно, используя лишь метод ГХ/ПИД, установить факт фальсификации товарной продукции, выражающийся в подмене дорогостоящего моторного масла сходным по фракционному составу дешевым минеральным маслом, не представляется возможным.

Кроме того, в экспертной практике часто возникают проблемы уже на начальном этапе при решении диагностических задач. Например, при анализе ГХ/ПИД хроматограммы экстракта, полученного с вещественного доказательства с предполагаемыми следами масла, установить присутствие самого масла затруднительно по причине его содержания в ничтожно малом количестве (ниже уровня чувствительности детектора) и/или существенного влияния посторонних (не входящих в состав масел) соэкстрактивных веществ с предмета-носителя.

Таким образом, в настоящей работе необходимо акцентировать внимание на преимущественном использовании в экспертной практике метода ГХ/МСД при исследовании масел с целью предотвращения ошибочных выводов, касающихся как наличия/отсутствия масла на вещественных доказательствах, так и установления общей групповой принадлежности [2] масел, формирование которых выполняется лишь на основании визуального совпадения ГХ/ПИД профилей сравниваемых масел.

Цель – предложить способ идентификации моторных масел путем определения в них природы и относительного содержания характерных биомаркеров нефти методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим типом детектирования.

Экспериментальная часть. Реактивы. В ходе проведения исследований использовали разбавленные в 50 раз н-гексаном (квалификация «х. ч.») 12 товарных моторных масел и одно трансмиссионное масло, бренд, марка, дата изготовления и вязкостные характеристики которых представлены в табл. 1. В качестве газа-носителя для газовой хроматографии использовали гелий марки «6.0» (ООО «НИИ КМ», Россия).

Исследованные образцы масел

Tested samples of lubricating oils

Масло	Бренд	Марка	Дата изготовления	Вязкость SAE
1	Total	Quartz 7000	20.02.2018	10w-40
2			23.11.2019	
3			16.11.2017	
4			03.07.2017	
5	Mobil	Super 2000	06.07.2020	
6			05.07.2021	
7		Ultra	24.08.2021	
8			11.03.2019	
9	Elf	Evolution 700 STI	01.07.2021	
10		Evolution 700 Turbo Diesel	01.03.2018	
11	Castrol	Magnatec Diesel	28.03.2019	
12	Shell	Helix HX-7	04.09.2021	
13	Нафтан	ТЭп-15	16.07.2021	90 (SAE 306)

Аппаратура. Анализ масел выполняли методом ГХ/МС с использованием хромато-масс-спектрометра Agilent Technologies GC7890/MSD5977 (Agilent Technologies, США) и методом ГХ/ПИД с использованием газового хроматографа Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, США) соответственно. Вышеуказанные хроматографические системы укомплектованы автоинжекторами и капиллярными хроматографическими колонками HP-1MS (длина – 30 м, внутренний диаметр – 0,25 мм, толщина пленки неподвижной фазы – 0,25 мкм) (Agilent Technologies, США).

Условия хроматографического разделения и детектирования. ГХ/МСД: объем вводимой автоматическим пробоотборником пробы составил 1 мкл в режиме с делением потока (300 : 1); температура испарителя – 300 °С, интерфейса – 300 °С; объемная скорость газа-носителя (гелия) – 1,1 мл/мин; температура термостата колонок – 42 °С (2 мин), 5,4 °С/мин до 300 °С (30 мин); параметры масс-детектора: температура источника ионов – 230 °С, квадрупольного фильтра масс – 150 °С; энергия ионизации – 70 eV. Данные получали в режиме как селективного мониторинга ионов (SIM), так и полного ионного тока (TIC) в диапазоне отношений массы к заряду (m/z) от 33 до 550 а. е. м.

ГХ/ПИД: объем вводимой автоматическим пробоотборником пробы составил 1 мкл в режиме с делением потока (100 : 1); температура испарителя – 300 °С, детектора – 300 °С; объемная скорость газа-носителя (гелия) – 1,4 мл/мин; температура термостата колонок – от 100 °С (3 мин), 6 °С/мин до 300 °С (30 мин); параметры детектора: расход водорода – 35 мл/мин, расход кислорода – 350 мл/мин.

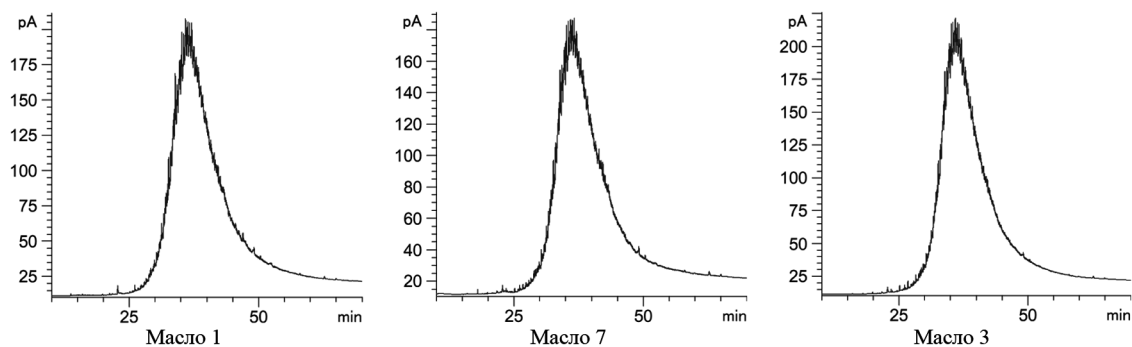


Рис. 1. ГХ/ПИД-хроматограммы моторных масел SAE 10w-40

Fig. 1. GC/FID chromatograms of SAE 10w-40 engine oils

Результаты и их обсуждение. Проявлением сходности углеводородного состава проанализированных 12 образцов моторных масел считается совпадение их профилей ГХ/ПИД. Так, при визуальном сопоставлении «гребенки» неразделенных пиков веществ очевидных различий во времени начала подъема, времени максимума интенсивности сигнала и формах не установлено.

Таким образом, на примере проанализированных моторных масел не только в пределах одной марки, но и разных марок продемонстрировано, как на качественном уровне выявленная сходность углеводородного состава с учетом большого разнообразия состава масел является одним из признаков общей родовой принадлежности. Однако малая информативность профилей ГХ/ПИД (на рис. 1 для примера представлены профили трех из 12 моторных масел; остальные ГХ/ПИД профили имеют аналогичный вид) не позволяет решать вопрос об установлении общей групповой принадлежности масел (общность сырья, технологическая схема, условия хранения и транспортировки).

К числу наиболее важных нефтяных биомаркеров относятся терпеноиды [4, 9] – органические соединения, в состав которых входят изопреновые звенья. Терпеноиды составляют основу растительного и животного мира. Неразветвленная алифатическая цепь и изопреновая единица являются основными строительными блоками биологического исходного вещества. Первыми обнаруженными в нефтях изопреноидными углеводородами являлись пристан (2,6,10,14-тетраметилпентадекан) и фитан (2,6,10,14-тетраметилгексадекан).

Данные соединения имеют характерное для насыщенной цепи полиизопрена строение и являются своеобразными биологическими метками. Такими же метками являются и циклические терпеноиды (стераны, терпаны). Стераны представляют собой соединения, в основе структуры которых находится полициклический углеводород – стеран (рис. 2, латинские буквы обозначают конденсированные кольца, цифры – нумерацию атомов).

С точки зрения анализа ГХ/МСД к важным особенностям наличия и распределения нефтяных биомаркеров в смазочных материалах, а следовательно, идентификации масел нефтяного происхождения относятся следующие аспекты:

для производства смазочных масел отбирают фракции C20–C40, в которых повышено содержание нафтеновых углеводородов с максимальным фрагментарным ионом m/z 83; содержание изопреноидных алканов с максимальным фрагментарным ионом m/z 113 крайне мало, в то время как присутствие циклических терпеноидов изопреноидного типа строения существенно повышено (2 000–6 000 ppm) по сравнению с большинством сырых нефтей (не более 100 ppm);

применение гидрогенизационных методов очистки базовых масел подразумевает удаление ненасыщенных структурных молекул, в том числе таких важных биомаркеров нефти, как моноароматические (с ненасыщенным C-кольцом) стераны с характерным ионом с m/z 253 и триароматические (с ненасыщенными ABC-кольцами) стераны с характерным ионом с m/z 231;

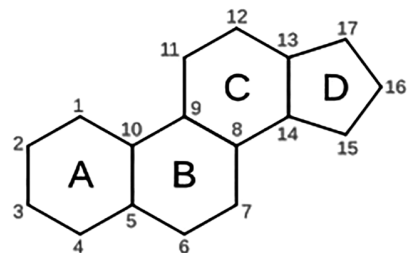


Рис. 2. Стеран

Fig. 2. Steran

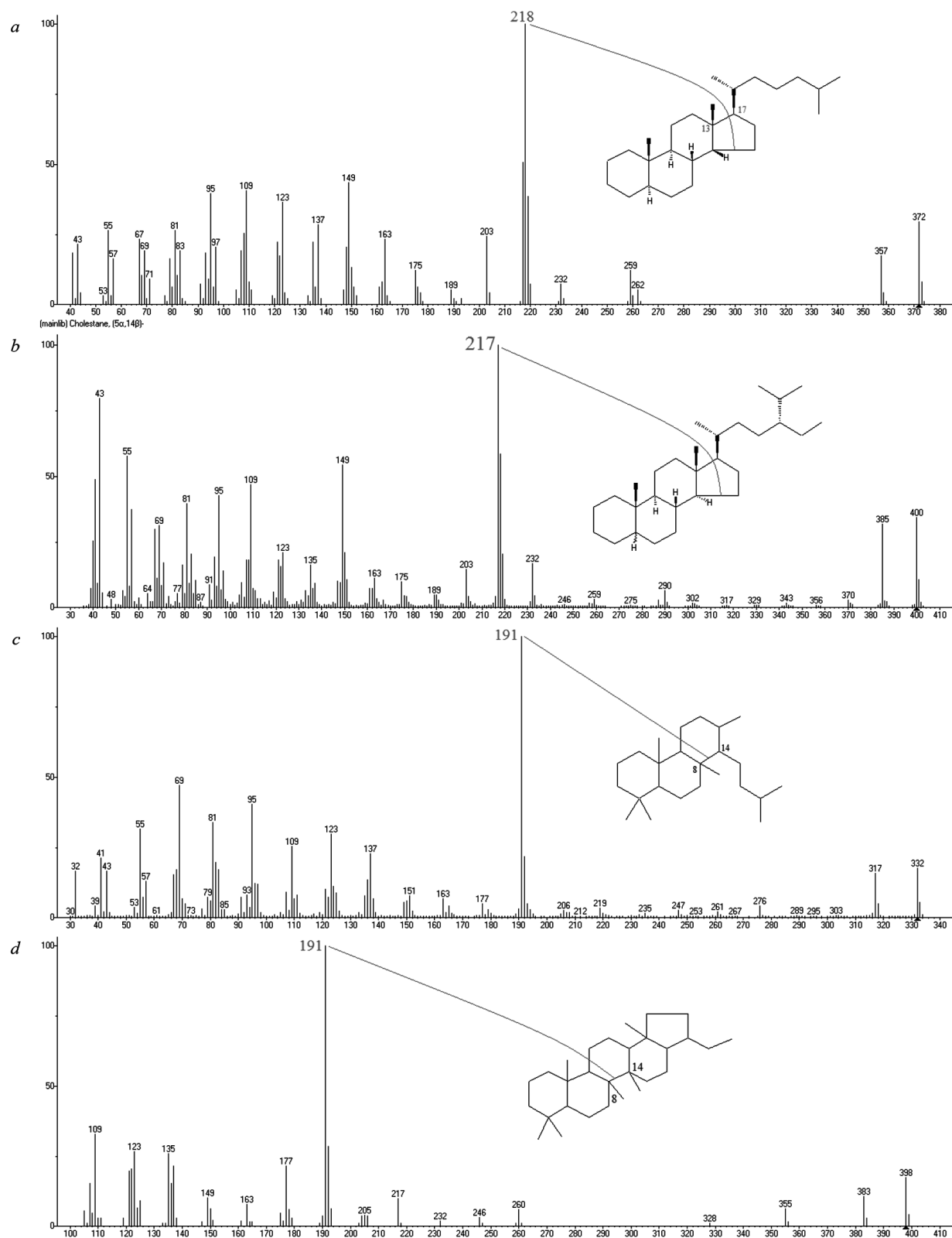


Рис. 3. Масс-спектры 5α,14β-холестана (а), стигмастана (b), представителей трициклических терпанов (с) и гопанов C29 (d) (библиотека масс-спектров NIST)

Fig. 3. Mass spectra of 5α,14β-cholestane (a), stigmasterane (b), representatives of tricyclic terpanes (c) and hopanes C29 (d) (NIST Mass Spectral Library)

в смазочных маслах очевидно преобладание также тетрациклических нафтеновых углеводородов (терпанов состава C21–C30, или стеранов). Стераны представлены как регулярными стеранами, так и перегруппированными стеранами (по сравнению с регулярными стеранами в них произошла миграция метильных групп от C-10 к C-5 и от C-13 к C-14). Среди них серия гомологов C27–C28–C29 с регулярной структурой ввиду их специфичности являются наиболее распространенными и полезными стеранами для химической идентификации смазочных масел. Наиболее вероятным источником нефтяных стеранов являются природные стероиды (например, стеролы). Характерной особенностью масс-спектров этих углеводородов является максимальный фрагментарный ион с m/z 217 или 218. Во всех стереоизомерах, имеющих *цис*-сочленение колец C/D, интенсивность иона с m/z 218 выше, чем интенсивность иона с m/z 217. На рис. 3, а, б представлены масс-спектры и структурные формулы 5 α ,14 β -холестана (стерана состава C27) и стигматана (стерана состава C29) соответственно с указанием места разрыва;

подобная с пентациклическими терпанами фрагментация под воздействием электронного удара с образованием иона с m/z 191 характерна и для масс-спектров трициклических терпанов состава C23–C30, имеющих в основе ядро пергидрофенантрена (рис. 3, в);

в смазочных маслах заметно преобладание пентациклических нафтеновых углеводородов – терпанов состава C27–C35, или гопанов [10, 11]. Наличие гопанов с конфигурацией 17 α (H), 21 β (H) состава C27–C35 является характерным признаком нефти из-за их значительного относительного содержания и термической стабильности по сравнению с другими эпимерными ($\beta\beta$, $\beta\alpha$) формами. В масс-спектрах гопанов отмечается характерная особенность этих углеводородов, выражающаяся в присутствии максимального по интенсивности фрагментарного иона с m/z 191, образующегося при разрыве лабильной связи, соединяющей два четвертичных атома углерода C-8 и C-14 (рис. 3, д).

При решении экспертных задач актуальным видится увеличение чувствительности МСД, выражающееся в снижении нижнего предела обнаружения целевых соединений и увеличении линейного диапазона их количественного определения, что позволит использовать количественную обработку хроматографических данных и существенно повысить уровень решаемых идентификационных задач. Подобное увеличение чувствительности МСД достигается за счет снижения фонового шума детектора путем перевода настроек конфигурации детектора в режим селективного мониторинга ионов (SIM): регистрируется ограниченное количество величин m/z , характеристичных для вышеописанных нефтяных биомаркеров; происходит переключение между выбранными величинами m/z , причем каждое измерение продолжается в течение запрограммированного времени задержки прежде, чем провести усреднение и перейти к следующему массовому числу.

Анализируя полученные ГХ/МСД-фрагментограммы масел 1–13, можно заключить, что достоверная идентификация моторного масла нефтяного происхождения достигается при следующих условиях:

преобладание ярко выраженной «гребенки» неразделенных пиков нафтеновых углеводородов (m/z 83-фрагментограмма), наличие которой также фиксируется методом ГХ/ПВД (рис. 4);

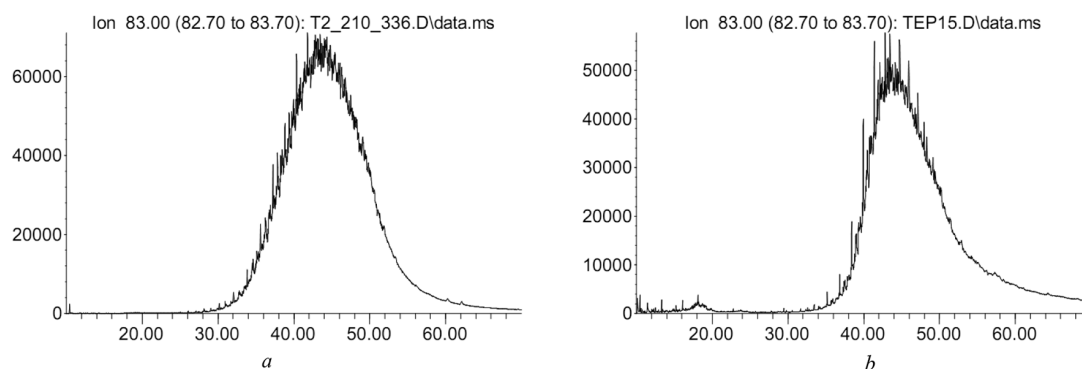


Рис. 4. m/z 83-фрагментограммы: а – моторное масло (масло 3); б – трансмиссионное масло (масло 13)

Fig. 4. m/z 83-fragmentograms: а – engine oil (lub oil 3); б – gear oil (lub oil 13)

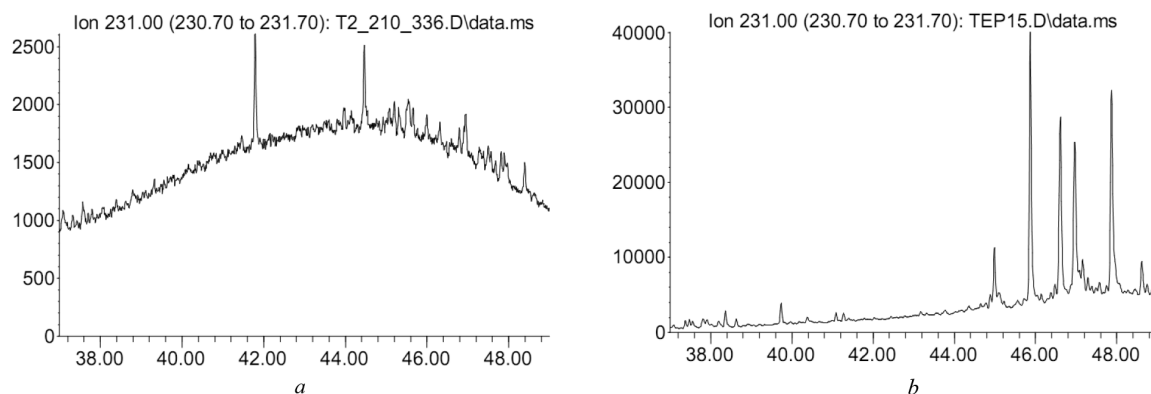


Рис. 5. m/z 231-фрагментогаммы: a – моторное масло (масло 3); b – трансмиссионное масло (масло 13)

Fig. 5. m/z 231-fragmentograms: a – engine oil (lub oil 3); b – gear oil (lub oil 13)

отсутствие значимой хроматографической информации на m/z 231-фрагментогаммах, свидетельствующей о применении гидрогенизационных методов очистки базовых масел, применяемых при производстве товарных масел, что, в свою очередь, является дифференцирующим признаком высокоочищенных масел (рис. 5);

m/z 191, 217, 218-фрагментогаммы характеризуются многокомпонентностью (на рис. 6 для примера представлены профили трех из 12 моторных масел), что в сочетании с их хорошей селективностью разделения способствует формированию уникальных хроматографических про-

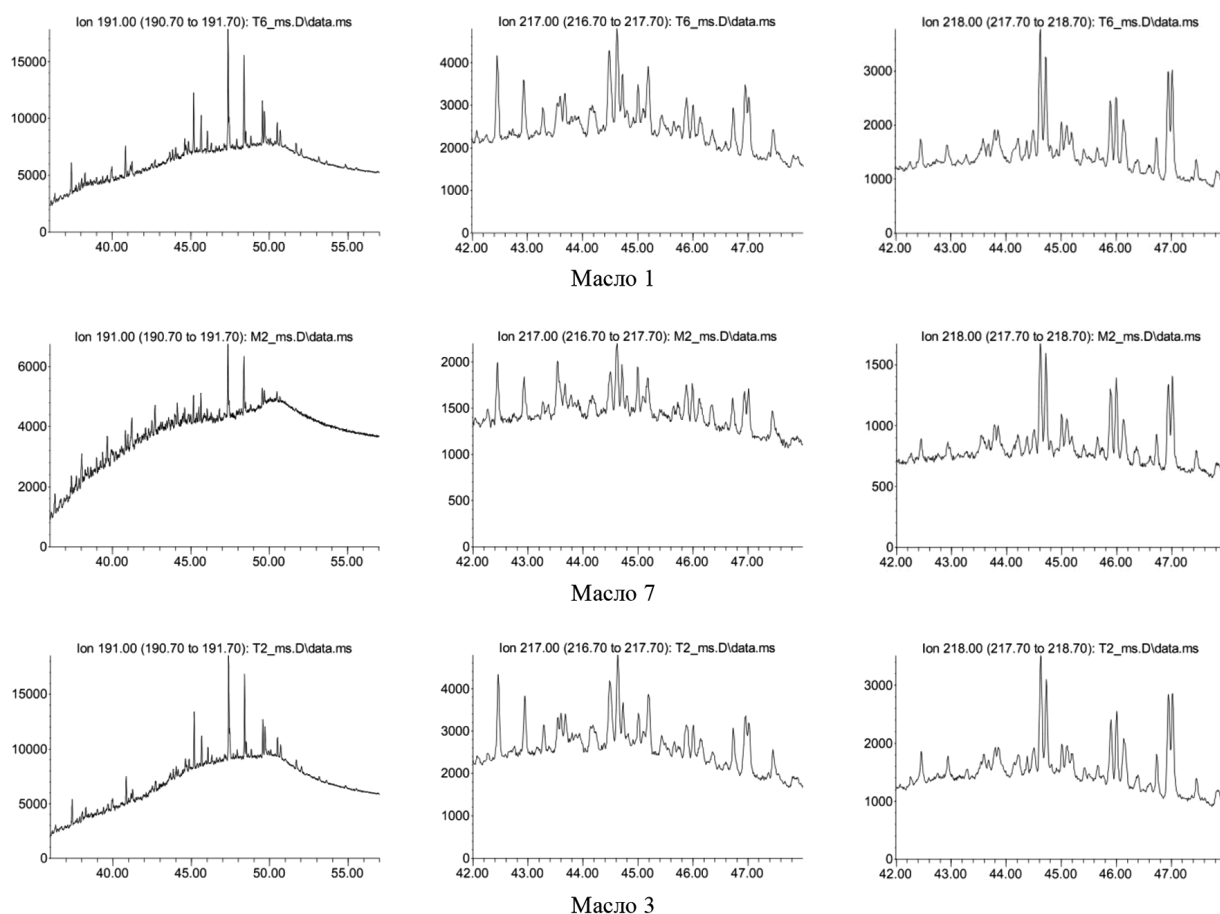


Рис. 6. m/z 191, 217, 218-фрагментогаммы (слева направо) моторных масел SAE 10w-40

Fig. 6. m/z 191, 217, 218-fragmentograms (from left to right) of SAE 10w-40 engine oils

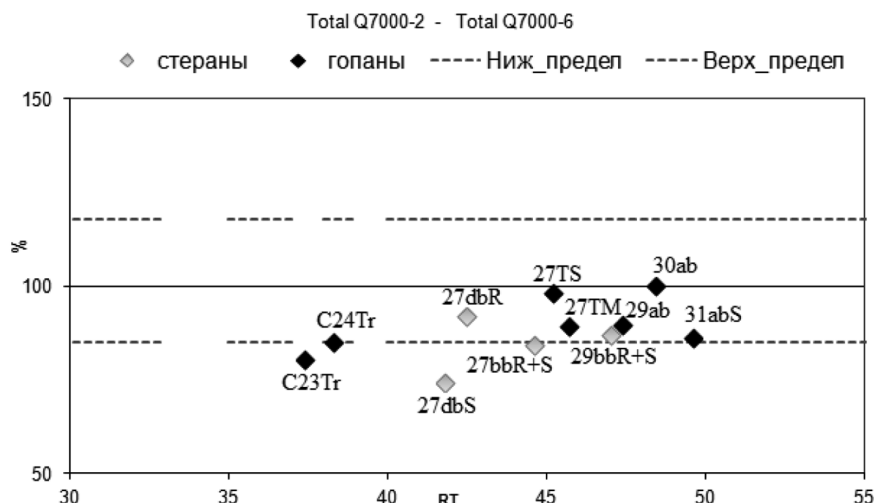


Рис. 7. Точечная диаграмма содержания биомаркеров в масле 3 относительно тех же биомаркеров в масле 1

Fig. 7. Scatter plot of biomarkers content in lub oil 3 relative to the same biomarkers in lub oil 1

филей нефтяных биомаркеров. Кроме того, полученные масс-фрагментограммы легко интерпретируемы в результате визуального сравнения полученных профилей распределения стеранов и гопанов с ранее опубликованными данными [6, 10, 12–14].

Визуальное попарное сравнение m/z 191, 217, 218-фрагментограмм масла 7 с аналогичными масс-фрагментограммами масел 1, 3, приведенных на рис. 6, позволяет заметить существенное различие в относительном распределении нефтяных биомаркеров и, следовательно, сделать категоричный отрицательный вывод, касающийся их общей групповой принадлежности. Однако пары m/z 191, 217, 218-фрагментограмм сравниваемых масел 1 и 3 не характеризуются столь очевидными различиями, что не обеспечивает их надежного дифференцирования. В данном случае вопрос об установлении общей групповой принадлежности между сравниваемыми маслами решается только посредством математической обработки хроматографических данных.

На основании анализа точечной диаграммы (рис. 7) относительного содержания биомаркеров (на диаграмме маркеры подписаны общепринятыми аббревиатурами стеранов и гопанов, полные названия которых представлены в руководстве [14]) можно заключить, что 4 из 11 выбранных терпеноидов находятся вне диапазона допустимых отклонений 85–118 %, что позволяет сделать категоричный отрицательный вывод, касающийся общей групповой принадлежности масел одной марки, но разных партий.

Заключение. В настоящей работе продемонстрирована неэффективность использования методов ГХ/ПИД и ГХ/МСД со сбором данных в режиме полного ионного тока для выявления различий между исследованными моторными маслами. Показано, что использование ГХ/МСД с регистрированием хроматограмм в режиме выбранных ионов, характерных для уникальных нефтяных биомаркеров, позволяет выявить различия в компонентном составе рассмотренных масел. Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможность использования полуколичественной оценки содержания нефтяных биомаркеров для идентификации масел при проведении судебной экспертизы НП и ГСМ. По наличию/отсутствию нефтяных биомаркеров в товарных моторных маслах также можно судить о факте фальсификации высокоочищенного моторного масла путем подмены или подмешивания минерального масла, не прошедшего должной технологической обработки.

Список использованных источников

1. Eneh, O. C. A review on petroleum: Source, uses, processing, products and the environment / O. C. Eneh // Journal of applied sciences. – 2011. – Vol. 11, iss. 12. – P. 2084–2091. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.2084.2091>
2. Криминалистическое исследование нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов : метод. пособие для экспертов, следователей и судей / под ред. И. А. Золоторевской [и др.]. – М. : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т судеб. экспертиз, 1989. – Вып. 2. – 178 с.

3. Chromatographic Fingerprinting Analysis of Crude Oils and Petroleum Products / Chun Yang, Z. D. Wang, B. Hollebone [et al.] // *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. – John Wiley & Sons, 2015. – P. 95–163. <https://doi.org/10.1002/9781118989982.ch5>
4. Barman, B. N. Chromatographic Techniques for Petroleum and Related Products / B. Barman, V. L. Cebolla, L. Membrado // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. – 2000. – Vol. 30, № 2–3. – P. 75–120. <https://doi.org/10.1080/10408340091164199>
5. Oil fingerprinting analysis using commercial solid phase extraction (SPE) cartridge and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) / Z. Yang, C. Yang, Z. Wang [et al.] // *Analytical Methods*. – 2011. – Vol. 3, № 3. – P. 628–635. <https://doi.org/10.1039/C0AY00715C>
6. Bayona, J. M. Analytical developments for oil spill fingerprinting / J. M. Bayona, C. Domínguez, J. Albaigés // *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. – 2015. – Vol. 5. – P. 26–34. <https://doi.org/10.1016/J.TEAC.2015.01.004>
7. Fingerprint characteristics of refined oils and their traceability in the groundwater environment / J. Sun, X. Wang, Q. Song [et al.] // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 333. – Art. 138868. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138868>
8. Trusell, F. C. Petroleum. Crude oils / F. C. Trusell // *Analytical Chemistry*. – 1977. – Vol. 49, № 5. – P. 231–235. <https://doi.org/10.1021/ac50013a017>
9. An overview of total petroleum hydrocarbons / S. Kuppusamy, M. N. Raju, M. Mallavarapu, V. Kadiyala // *Total Petroleum Hydrocarbons*. – Springer, Cham., 2020. – P. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6_1
10. Wang, Z. Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques / Z. Wang, M. F. Fingas // *Marine Pollution Bulletin*. – 2003. – Vol. 47. – P. 423–452. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00215-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00215-7)
11. Comprehensive two-dimensional gas chromatography in petroleum derived samples: a review on advances in source and weathering studies of spilled oil / A. M. Corrêa, J. M. Sousa, K. Z. Leal, M. C. Bernardes // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. – 2024. – Vol. 54, № 8. – P. 3409–3427. <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2250858>
12. Riazi, M.-R. Characterization and properties of petroleum fractions / M.-R. Riazi. – 1st ed. – Printed in Baltimore, MD First Printing January, 2005. – 407 p.
13. Gough, M. Characterization of unresolved complex mixtures of hydrocarbons in petroleum / M. Gough, S. Rowland // *Energy & Fuels*. – 1991. – Vol. 5, № 6. – P. 869–874. <https://doi.org/10.1021/ef00030a016>
14. The Norwegian Industry Guide to Organic Geochemical Analyses / H. M. Weiss, A. Wilhelms, N. Mills [et al.]. – Norsk Hydro, Statoil, Geolab Nor, 2000. – 102 c.

References

1. Eneh O. C. A review on petroleum: Source, uses, processing, products and the environment. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, iss. 12, pp. 2084–2091. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.2084.2091>
2. Zolotarevskaya I. A. (ed.). *Forensic examination of petroleum products and fuels and lubricants : a method. guide for experts, investigators and judges*. Moscow, All-union scientific and technical institute of forensic examinations, 1989, release 2. 178 p. (in Russian).
3. Chun Yang, Wang Z. D., Hollebone B., Brown C. E., Zeyu Yang, Landriault M. Chromatographic Fingerprinting Analysis of Crude Oils and Petroleum Products. *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. John Wiley & Sons, 2015, pp. 95–163. <https://doi.org/10.1002/9781118989982.ch5>
4. Barman B. N., Cebolla V. L., Membrado L. Chromatographic Techniques for Petroleum and Related Products. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2000, vol. 30, no. 2–3, pp. 75–120. <https://doi.org/10.1080/10408340091164199>
5. Yang Z., Yang C., Wang Z., Hollebone B., Landriault M., Brown C. E. Oil fingerprinting analysis using commercial solid phase extraction (SPE) cartridge and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). *Analytical Methods*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 628–635. <https://doi.org/10.1039/C0AY00715C>
6. Bayona J. M., Domínguez C., Albaigés J. Analytical developments for oil spill fingerprinting. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2015, vol. 5, pp. 26–34. <https://doi.org/10.1016/J.TEAC.2015.01.004>
7. Sun J., Wang X., Song Q., Li R., Xie J., Yang X., Cai L., Wang Z., Zhao C., Zhang X. Fingerprint characteristics of refined oils and their traceability in the groundwater environment. *Chemosphere*, 2023, vol. 333, art. 138868. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138868>
8. Trusell F. C. Petroleum. Crude oils. *Analytical Chemistry*, 1977, vol. 49, no. 5, pp. 231–235. <https://doi.org/10.1021/ac50013a017>
9. Kuppusamy S., Raju M. N., Mallavarapu M., Kadiyala V. An overview of total petroleum hydrocarbons. *Total Petroleum Hydrocarbons*. Springer, Cham., 2020, pp. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6_1
10. Wang Z., Fingas M. F. Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, no. 47, pp. 423–452. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00215-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00215-7)
11. Corrêa A. M., Sousa J. M., Leal K. Z., Bernardes M. C. Comprehensive two-dimensional gas chromatography in petroleum derived samples: a review on advances in source and weathering studies of spilled oil. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2024, vol. 54, no. 8, pp. 3409–3427. <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2250858>
12. Riazi M. R. *Characterization and properties of petroleum fractions*. Printed in Baltimore, MD First Printing January, 2005. 407 p.
13. Gough M., Rowland S. Characterization of unresolved complex mixtures of hydrocarbons in petroleum. *Energy & Fuels*, 1991, vol. 5, no. 6, pp. 869–874. <https://doi.org/10.1021/ef00030a016>
14. Weiss H. M., Wilhelms A., Mills N., Scotchmer J., Hall P. B., Lind K., Brekke T. *The Norwegian Industry Guide to Organic Geochemical Analyses*. Norsk Hydro, Statoil, Geolab Nor, 2000. 102 p.

Информация об авторах

Громыко Сергей Николаевич – заместитель начальника отдела. Государственный комитет судебных экспертиз Республики Беларусь (ул. Кальварийская, 43, 220073, Минск, Республика Беларусь). E-mail: siarheihramyka@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0005-9351-5138>

Агабалаев Александр Андреевич – кандидат химических наук. Белорусский национальный технический университет (пр-т Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexandrmailbox@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3201-3511>

Заяц Михаил Фёдорович – доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhail_zayats@tut.by; <https://orcid.org/0000-0002-8400-6359>

Лещёв Сергей Михайлович – доктор химических наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leschev.sergey54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5378-1718>

Information about the authors

Hramyka Siarhei N. – Deputy Head of Department. State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus (43, Kalvariyskaya Str., 220073, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: siarheihramyka@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0005-9351-5138>

Ahabalayeu Aliaksandr A. – Ph. D. (Chemistry). Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexandrmailbox@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3201-3511>

Zayats Mikhail F. – Dr. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhail_zayats@tut.by; <https://orcid.org/0000-0002-8400-6359>

Leschev Sergey M. – Dr. Sci. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leschev.sergey54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5378-1718>