

УДК 54.061, 543.51

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0028

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛОВ В НЕФТИ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 4181-4737

AuthorID: 432595

ORCID: 0000-0002-1545-7607

СЕМЕНОВ Владимир Всеволодович, доктор технических наук,
профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
(190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49, e-mail: semenovv50@yandex.ru)

SPIN: 2144-4276

AuthorID: 708424

ORCID: 0000-0003-4651-8211

ResearcherID: L-1764-2013

ScopusID: 57442237000

ИВАХНЮК Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, заместитель начальника НИИ
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: sgi78@mail.ru)

SPIN: 3913-7751

AuthorID: 586844

ORCID: 0000-0002-2407-5061

ScopusID: 57217937956

МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)

Аннотация. В статье определен круг вопросов, возникающих при решении задач идентификации источников нефтяного загрязнения. Осуществлен выбор надежных способов идентификации нефтяных углеводородов с учетом процессов их трансформации (деградации) при попадании в окружающую природную среду (испарение, окисление, деструкция и т.п.). Исследован вещественный и элементный состав семи образцов нефти различных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа с целью выявления характерных признаков, которые можно использовать для идентификации источника нефтяного загрязнения. Для нефтей одного географического региона показано, что применение метода капиллярной газовой хроматографии, в целях выявления значимых различий в компонентном составе, не является эффективным. В свою очередь, данные о содержании в нефтях разных месторождений примесей ряда металлов, главным образом ванадия, позволяют установить их различия, применимые для решения задач идентификации. На примере соотношений между концентрациями примесей металлов показана возможность идентификации нефтей, при которой временная трансформация не будет оказывать существенного влияния.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, источник загрязнения, идентификация нефтей, состав нефтей, деградация нефтяных углеводородов, временная трансформация, металлы-индикаторы, примеси металлов, ванадий.

PROCEDURE FOR IDENTIFICATION OF SOURCES OF OIL POLLUTION BY THE CONTENT OF METAL IMPURITIES IN OIL

© The Author(s) 2022

SEменов Vladimir Vsevolodovich, doctor of technical sciences,
professor of the department of engineering environmental protection

St. Petersburg State Technological Institute
(190013, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 24-26/49, e-mail: semenovv50@yandex.ru)

ИВАХНЮК Sergey Grigorievich, candidate of technical sciences, deputy head of research institute
Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia

(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: sgi78@mail.ru)

МОТОРЫГИН Yuri Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the department of criminalistics and engineering and technical expertise

Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)

Abstract. The article defines a range of issues that arise when solving problems of identifying sources of oil pol-

lution. The choice of reliable methods for identifying petroleum hydrocarbons has been made, taking into account the processes of their transformation (degradation) when released into the environment (evaporation, oxidation, destruction, etc.). The material and elemental composition of seven oil samples from various fields of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug was studied in order to identify characteristic features that can be used to identify the source of oil pollution. For oils of one geographic region, it has been shown that the use of the capillary gas chromatography method, in order to identify significant differences in the component composition, is not effective. In turn, data on the content of impurities of a number of metals, mainly vanadium, in oils from different fields make it possible to establish their differences applicable to solving problems of identification. Using the example of the ratios between the concentrations of metal impurities, the possibility of identifying oils is shown, in which the time transformation will not have a significant effect.

Keywords: oil pollution, source of pollution, identification of oils, composition of oils, degradation of petroleum hydrocarbons, temporal transformation, tracer metals, metal impurities, vanadium.

Для цитирования: Семенов В.В. Методика идентификации источников нефтяных загрязнений по содержанию примесей металлов в нефти / В.В. Семенов, С.Г. Ивахнюк, Ю.Д. Моторыгин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 182-187. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0028.

Введение. Основной проблемой при обнаружении источников нефтяных загрязнений является установление виновника нефтяного загрязнения. Нефтяные аварийные разливы являются одним из наиболее опасных видов загрязнения природной среды. По оценкам компетентных специалистов и экспертов ООН, уже к 80-м годам прошлого столетия, растущее распространение нефтяных поллютантов нефти, являющихся основными загрязнителями Мирового океана, приобрело планетарный характер [1-3].

Особенно эта проблема актуальна в нефтяном добычном районе Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) Северо-Западной Сибири, где большое количество различных нефтяных компаний ежегодно добывает более 200 млн. тонн нефти [4]. Надо отметить, что территория ХМАО равняется территории Франции. Существенные масштабы добычи нефти в автономном округе являются причиной многочисленных аварий и инцидентов на объектах бурения и добычи, а также связанной с ними инфраструктуры, которые в свою очередь провоцируют поступление поллютантов в атмо-, гидро- и педосферу [5, 6].

Ввиду отсутствия достоверных методов идентификации нефтяных углеводородов виновник подобных загрязнений окружающей среды зачастую уходит от ответственности. Стоит отметить, что здесь под идентификацией понимается установление тождественности образца нефти, полученного с места ее аварийного поступления в окружающую среду, и образца нефти из вероятного источника загрязнения.

Одним из надежных и оптимальных методов для идентификации источника, применительно к нефтяному загрязнению природных вод, в настоящее время за рубежом считается применение капиллярной газовой хроматографии (КГХ). Данный метод позволяет определять вещественный состав нефтей [7]. Существующие нормативные документы Российской Федерации: «Система идентификации нефтяных разливов на море» [8] и «Инструкция по идентификации источника загрязнения нефтью водного объекта» [9] в качестве одного из основных методов анализа также предполагают применение КГХ в различных модификациях. Применение метода КГХ основано на

предположении о том, что дифференциация нефтей разных регионов добычи определяется нахождением соотношениями содержания в них некоторых классов веществ.

Сложность проблем, связанных с установлением источников поступления нефти в окружающую среду, для ХМАО заключается не только в том, что имеется близко расположенные друг к другу объекты бурения и добычи [10], но и в неминусовости окисления, деградации, испарения и прочих видов трансформации нефти при ее попадании в природные объекты. В результате перечисленных процессов состав углеводородов нефти во времени изменяется [11-13].

Округ расположен на огромной территории, на которой большую часть года преобладают низкие температуры. Кроме того, на территории округа расположено множество озер и болот, а также протекает большое количество рек, в том числе такие великие сибирские реки, как Обь и Иртыш, воды которых в последнее время все чаще подвергаются нефтяному загрязнению. Указанные моменты объективно затрудняют решение задач идентификации нефтяных углеводородов. Существует значительная потребность в методиках, учитывающих факторы временной и биодеградации нефтей при поступлении в объекты охраны окружающей среды.

Методология. Основной задачей работы было исследование вещественного и элементного состава ряда образцов нефти различных месторождений ХМАО (табл. 1) с целью выявления характерных признаков, которые можно использовать для идентификации нефтей.

Таблица 1 – Пробы нефти, отобранные для исследования в ХМАО

№ пробы	Месторождение	№ пробы	Месторождение
1	Алехинское	6	Приразломное
2	Лянторское	7	Приобское
4	Красноленинское	8	Петелинское
5	Трехозерное	(обводненная)	

В соответствии с [9] было проведено исследование семи проб нефти методом капиллярной газожидкостной хроматографии с помощью хроматографа с пламенно-ионизационным детектором «Хроматэк-Кри-

сталл 5000». Применялся метод термодесорбции исследуемой пробы из трубок со стекловолокном в начальный участок капиллярной колонки охлаждаемый жидким азотом и с дальнейшим газохроматографическим анализом десорбированных веществ на пламенно-ионизационном детекторе. Тяжелые фракции нефти оставались на стекловолочке трубок, которое удалялось по завершении каждого анализа. Полученные результаты свидетельствуют, что применительно к ХМАО метод КГХ (с использованием хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000») не позволяет решать вопросы, связанные с определением источника нефтяного загрязнения. Сопоставление полученных хроматограмм, их низкая воспроизводимость по временам выхода и высотам пиков не дали возможности выработать надежный количественный критерий для идентификации нефтей, добываемых в данном регионе.

Альтернативным подходом к решению проблемы идентификации источников нефтяных загрязнений, по сравнению с анализом вещественного состава нефтей, является определение в пробах нефтяных разливов ряда примесей металлов [14]. Определение содержания металлов и металлоорганических комплексов в нефтях может быть выполнено методами атомно-абсорбционной спектроскопии [15], рентгенофлуоресцентным [16], атомно-эмиссионным и другими аналитическими методами [17, 18]. Выбор авторов остановился на методе масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС, ICP-MS), который отличается возможностью одновременного многоэлементного анализа, низкими пределами обнаружения (около 0,01 мкг/дм³), большим динамическим диапазоном измерения (5–6 порядков изменения концентрации), возможностью реализации методов внутреннего стандарта и изотопного разбавления [19–21].

Результаты качественного и полуколичественного обзорного анализа методом ИСП-МС показали, что в нефтях содержатся различные металлы, а также ряд неметаллов с концентрациями от 0,1% до 10⁻⁵ % и ниже. Для исследования возможности идентификации нефтей по содержанию металлических примесей данным методом в качестве металлов-индикаторов были выбраны ванадий, медь, никель и хром. Данный выбор обусловлен тем, что в нефтях эти металлы присутствуют в количествах, позволяющих определять их в нефти с достаточной точностью. При этом природные почвы имеют достаточно низкий фон по этим металлам, что позволяет надежно идентифицировать источник нефтяного загрязнения.

Ввиду отсутствия специального оборудования, необходимого для распространенной при решении задач диагностики металлов методом ИСП-МС в нефтях пробоподготовки с использованием органических растворителей, была выбрана классическая процедура. Она основана на разложении и окислении органических компонентов нефти минеральными кислотами в результате чего примеси металлов переводятся в разбавленный кислотный раствор. Несмотря на длительность и трудоемкость указанных манипуляций,

это позволяет, во-первых, настраивать прибор по растворам анализируемых металлов, а, во-вторых, минимизировать влияние матричных помех на процесс проведения измерений.

С учетом изложенного пробоподготовка состояла из следующих этапов. В начале навеска сырой нефти массой около 0,5 г за два прохода обрабатывалась при постепенном нагревании на песчаной бане концентрированными H_2SO_4 (2 мл) и HNO_3 (5 мл). Очистка кислот проводилась в кварцевом перегонном аппарате. После добавления H_2SO_4 применяли следующий режим: выдержка при 40–60°C (2 часа), затем температуру поднимали до 120°C и нагревали пробу до полного испарения серной кислоты (около 1 часа). Затем, к уже охлажденной пробе, добавляли HNO_3 , увеличивая температура обработки сначала до появления гомогенного раствора (60°C), после чего пробу выпаривали до объема 1–2 мл при 100°C. После охлаждения пробу переносили в мерную колбу. Полученный раствор разбавлялся дистиллированной водой в 10 раз. В зависимости от содержания анализируемых металлов объем дозирования в электротермический атомизатор составлял 10–40 мкл. Параллельно аналогичная процедура осуществлялась в отношении холостой пробы. В каждый анализируемый раствор добавлялся индий в качестве внутреннего стандарта с концентрацией в растворе 100 мкг/дм³.

Измерения проводились на спектрометре ИСП-МС «Agilent 7900». Использовались, рекомендованные в документации на прибор, стандартные условия измерений. Градуировка прибора осуществлялась по многоэлементным стандартным растворам 0,5% HNO_3 для каждого из анализируемых элементов (с концентрациями 20, 50 и 100 мкг/дм³). Для реализации принципа внутреннего стандарта в каждый стандарт добавлялся индий с концентрацией в пробе 100 мкг/дм³. Для приготовления градуировочных многоэлементных растворов весовым методом разбавляли 0,5% HNO_3 из основных стандартных растворов для каждого элемента с концентрацией 1 г/дм³. Основные стандарты для каждого элемента изготавливались растворением чистых металлов в HNO_3 . Проведение анализа разбавленных проб с низкой минерализацией (не более 0,5 %) обеспечило высокую сходимость результатов измерения. Относительное среднеквадратичное отклонение для четырех параллельных измерений (содержание анализируемых металлов в диапазоне от 10 до 100 мкг/дм³) не превышало 5%. Воспроизводимость результатов измерений определялась, в основном, погрешностями процедуры пробоподготовки и составляла в среднем 15% относительного среднеквадратичного отклонения для пяти параллельных проб нефти.

Правильность результатов измерений контролировалась по интерпретации масс-спектров с помощью анализа соотношений интенсивностей линий для разных изотопов каждого определяемого элемента (при этом учитывалось природное распределение изотопов и эффективность их ионизации), а также примени-

ем метода стандартных добавок и разбавлений. Для повышения точности определения содержания металлов в нефтях реализовывался принцип внутреннего стандарта, учитывающий временную нестабильность характеристик масс-спектрометра. Анализировались от трех до пяти параллельных проб нефти для каждого месторождения. За окончательный результат принималось среднее значение. Результаты контроля точности измерений показали, что погрешность определения содержания металлов в пробах нефтей, в основном, определяется погрешностями процедуры пробоподготовки.

Результаты и обсуждение. В таблице 2 представлены результаты диагностики нахождения примесей V , Ni , Cu и Cr в образцах нефти. Как видно из полученных результатов содержания металлов в изученных образцах нефти варьирует в широких пределах. По суммарному значению концентраций примесей металлов исследованные нефти можно условно раз-

делить на три группы: с высоким содержанием (> 40 мг/кг) – пробы №№ 1, 2, 7; ко второй ($10 \text{ мг/кг} < \Sigma < 40 \text{ мг/кг}$) – пробы №№ 5, 6, 8; к третьей ($< 10 \text{ мг/кг}$) – проба № 4.

Результаты измерений показывают, что в случае анализа проб чистой нефти (не подвергнувшихся временной трансформации) для надежной идентификации источника загрязнения в большинстве случаев достаточно использовать один критерий – содержание в нефти ванадия. Для исследованных проб нефти, только для двух образцов № 6 и № 8 наблюдается близкие содержания ванадия, в пределах 10%.

Простым, но эффективным приемом для идентификации нефтяных загрязнений в случае временной трансформации нефти или ее разбавления при попадании в почву или воду является использование отношений содержаний металлов-индикаторов, что для исследованных образцов нефти визуализировано на рисунке 1.

Таблица 2 – Содержание металлических примесей в нефтях различных месторождений, мг/кг (10^{-4} % массовых)

Элемент	Проба						
	1	2	4	5	6	7	8
V	37	47	0,7	4,2	19	28	21
Ni	14	12	1,5	12	7,2	11	3,4
Cu	1,1	1,5	0,3	6,0	1,3	2,4	1,5
Cr	0,8	1,1	0,4	3,6	4,6	3,4	0,9
Σ	52,9	61,6	2,9	25,8	32,1	44,8	26,8

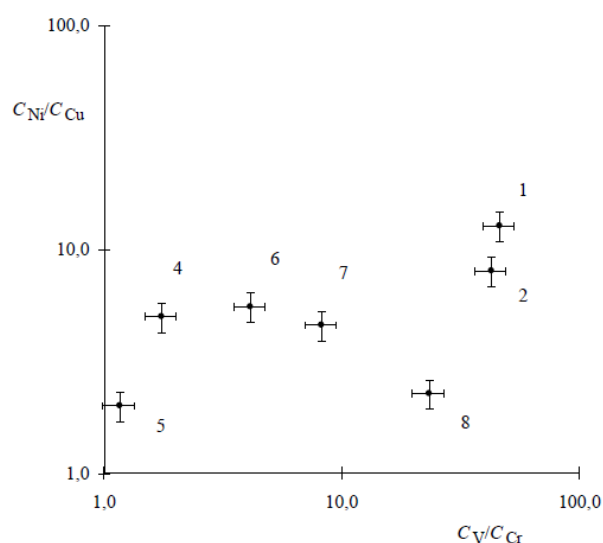


Рисунок 1 – Зависимости парных отношений концентраций металлов-индикаторов $C_{Ni}/C_{Cu} = f(C_V/C_{Cr})$ для нефтей различных месторождений ХМАО

Как видно, все пробы нефти разных месторождений однозначно различаются по значениям параметров идентификации даже с учетом 10% интервала варьирования содержаний металлов-индикаторов в нефтях, соответствующего порогу дискриминации для выявления неидентичных проб [9]. Использование отношений содержаний различных металлов позволяет также учесть возможные погрешности определения металлов, связанные с потерями металлов на стадии пробоподготовки и более точно идентифицировать различные нефти.

Для оценки значимости влияния временной деградации нефтей на возможность их идентификации была проведена специальная обработка проб нефти, имитирующая воздействие солнечной радиации и ветра, аналогичная процедуре, изложенной в [8].

Обработка заключалась в облучении проб нефти жестким ультрафиолетом (мощность лампы 1000 Вт) в течении 60 минут. При облучении пробы нефти располагались на расстоянии 40 – 50 см от лампы, температура поверхности пробы составляла примерно 90°C.

В таблице 3 приведены результаты определения металлов в пробах исходной и облученной ультрафиолетом нефти, а также результаты статистической обработки результатов измерительной информации. Как видно из представленных данных, временная деградация нефтей не оказывает значительного влияния на возможность их идентификации в случае применения в качестве характеристических параметров значений содержания примесей металлов. Под влиянием ультрафиолетового воздействия и нагревания металлы несколько концентрируются в нефтях, однако, соотношения между ними остается прежним, в пределах погрешности определения. Использование отношений содержаний металлов позволяет однозначно определить идентичные пробы для всех нефтей, независимо от фракционного состава нефти и степени концентрирования металлических примесей при облучении ультрафиолетом.

трафиолетового воздействия и нагревания металлы несколько концентрируются в нефтях, однако, соотношения между ними остается прежним, в пределах погрешности определения. Использование отношений содержаний металлов позволяет однозначно определить идентичные пробы для всех нефтей, независимо от фракционного состава нефти и степени концентрирования металлических примесей при облучении ультрафиолетом.

Таблица 3 – Содержание металлических примесей в пробах исходной и облученной (*) нефти, мг/кг (10^{-4} % массовых) и результаты статистической обработки

Элемент / параметр	Проба					
	5	5*	6	6*	7	7*
V	4,2	4,6	19	23	28	35
Ni	12	15	7,2	8,1	11	14
Cu	6,0	7,9	1,3	2,3	2,4	3,9
Cr	3,6	4,6	4,6	5,5	3,4	3,9
C_V / C_{Cr}	1,2	1,0	4,1	4,2	8,2	9,0
C_{Ni} / C_{Cr}	3,3	3,3	1,6	1,5	3,2	3,6
C_{Cu} / C_{Cr}	1,7	1,7	0,3	0,4	0,7	1,0

Для экспериментальной оценки влияния матрицы (солевого состава почвы) на возможность идентификации нефтей было проведено определение содержания *V* и *Ni* в загрязненной нефтью пробе почвы. Процедура пробоподготовки была аналогична процедуре, используемой при анализе чистых нефтей, за исключением большей массы навески пробы и в проведении фильтрования пробы после кислотной обработки. Из-за отсутствия данных о фоновых содержаниях металлов в почве, для оценки влияния матрицы на возможность идентификации нефтей был применен метод стандартных добавок. Полученные соотношения между содержаниями *V* и *Ni* в пробе почвы загрязненной нефтью и в пробе исходной нефти отличаются незначительно, в пределах погрешности измерения, что говорит о принципиальной возможности идентификации источника загрязнения по содержанию в нефти металлических примесей. Для более надежного определения источника загрязнения необходимо проводить сопоставление результатов определения содержания металлов-индикаторов для проб чистой почвы (определение фоновых концентраций) и почвы загрязненной нефтью. При малом содержании нефти в почве (менее 1% по массе) возможно использование процедуры экстракционного извлечения нефтепродуктов из почвы с определением содержания металлов в экстракте нефтепродуктов.

Полученный экспериментальный материал, по нашему мнению, может быть успешно использован не только для идентификации источников нефтяных загрязнений, но и при выявлении и исследовании объектов, изъятых с мест пожаров и взрывов.

Выводы. В случае нефтей, добываемых в одном географическом регионе, выявление значимых различий в их компонентном составе методом капиллярной газовой хроматографии не является эффективным. Сведения о содержании в нефтях разных месторожде-

ний примесей ряда металлов, главным образом ванадия, позволяет установить различия, применимые для решения задач их идентификации. На примере использования соотношений между концентрациями примесей металлов показана возможность идентификации нефтей, при которой временная трансформация не будет оказывать существенного влияния на результат. Для обеспечения достоверности результатов определения источника нефтяного загрязнения почвы по содержанию в нефтях примесей металлов необходимо учитывать их фоновый уровень. Учитывая минимальное фоновое содержание ванадия в почвах именно этот элемент должен стать основным при разработке соответствующей аналитической методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Jeffrey, L.M. Petroleum residues in the marine environment // Elsevier Oceanography Series. – Elsevier, 1980. – Т. 27. – С. 163-179.
2. Немировская, И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) / И.А. Немировская ; Российская Академия Наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Москва : Научный мир, 2013. – 432 с. – ISBN 978-5-91522-352-2.
3. Картамышева, Е.С. Загрязнение мирового океана нефтью и нефтепродуктами / Е.С. Картамышева, Д.С. Иванченко // Молодой ученый. – 2018. – № 25(211). – С. 20-23.
4. Рядинский, А.А. Оценка промышленной безопасности на нефтяных месторождениях (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) / А.А. Рядинский, Л.А. Казанцева // Культура и экология – основы устойчивого развития России. Человеческий капитал как ключевой ресурс зеленой экономики. Часть 1: материалы международного форума (Екатеринбург, 13-16 апреля 2018 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 124-127.
5. Сезонная динамика накопления нефтепродуктов в поверхностных водоемах Ханты-Мансийского района / С.Н. Русак, М.И. Куриленко, Т.И. Хоменушко, М.И. Куропаткина // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2017. – № 4. – С. 51-58. – DOI 10.12737/article_5a1c01bf5f9584.14292623.
6. Ивахнюк, С. Г. Идентификация источников нефтяных загрязнений по составу радионуклидов уранового и ториевого рядов / С. Г. Ивахнюк, Ф. В. Демехин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2014. – № 3(31). – С. 1-11.

7. Salder, D.A. / PONA Analysis by Gas Chromatography. Gulf Coast Instrumental Analysis Group. 69th Meeting. 1980.
8. Инструкция по идентификации источника загрязнения водного объекта нефтью. – М. – 1994. 84 с.
9. РД 52.10.243-92. Руководство по анализу морских вод. Система идентификации нефтяных разливов в море. – СПб. – 1993. С. 248-263.
10. Трудная нефть Югры / Д.А. Метт, В.Д. Немова, К.А. Щекотин [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 5-6. – С. 26-29.
11. Идрисов, Т.С. Дegradaция компонентов сырой нефти и нефтепродуктов в загрязненной морской воде под действием УФ-света / Т.С. Идрисов, М.А. Курбанов, У.А. Кулиева // Химическая безопасность. – 2018. – Т. 2. – №. 2. – С. 106-111.
12. Путилина, В.С. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты / В.С. Путилина, И.В. Галицкая, Т.И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2019. – №. 108. – С. 1-112.
13. Blumer M., Sass J. Oil pollution: persistence and degradation of spilled fuel oil // Science. – 1972. – Т. 176. – №. 4039. – С. 1120-1122.
14. Выбор оптимальных методов и их приборного обеспечения для решения проблемы идентификации источников нефтяных загрязнений / В.В. Семенов, О.Ю. Бегак, Г.К. Ивахнюк, А.Б. Дмитриевский // Экология энергетика экономика (выпуск IX). Промышленная и пожарная безопасность. – Межвуз. Сб. науч. Тр. – СПб. – Изд-во Менделеев. – 2005. С. 118-120.
15. Cantle J.E. (ed.). Atomic absorption spectrometry. – Elsevier, 1986.
16. Ojeda N. et al. Determination of V, Fe, Ni and S in petroleum crude oil by total-reflection X-ray fluorescence // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1993. – Т. 48. – №. 2. – С. 247-253.
17. Quimby B.D., Dryden P.C., Sullivan J.J. Selective detection of volatile nickel, vanadium, and iron porphyrins in crude oils by gas chromatography-atomic emission spectroscopy // Journal of High Resolution Chromatography. – 1991. – Т. 14. – №. 2. – С. 110-116.
18. Zeng Y., Uden P.C. High temperature gas chromatography-atomic emission detection of metalloporphyrins in crude oils // Journal of High Resolution Chromatography. – 1994. – Т. 17. – №. 4. – С. 223-229.
19. Pereira J.S.F. et al. Determination of metals and metalloids in light and heavy crude oil by ICP-MS after digestion by microwave-induced combustion // Microchemical Journal. – 2010. – Т. 96. – №. 1. – С. 4-11.
20. Walkner C. et al. Multi-element analysis of crude oils using ICP-QQQ-MS // Organic Geochemistry. – 2017. – Т. 103. – С. 22-30.
21. Olsen S.D. et al. Determination of trace elements in petroleum exploration samples by inductively coupled plasma mass spectrometry and instrumental neutron activation analysis // Analyst. – 1995. – Т. 120. – №. 5. – С. 1379-1390.

Статья поступила в редакцию 15.08.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022