

А.А. Медведев, А.И. Посеренин, В.В. Романов

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК НА БАЗЕ МОЩНЫХ НУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НЕФТЕЙ

Аннотация. Для определения микроэлементного состава нефти применяются химические, физические и ядерно-физические методы анализа. Из числа ядерно-физических методов наибольшее применение находит нейтронный активационный анализ с применением ядерного реактора. Преимуществом этого метода является его высокая чувствительность и возможность одновременного определения широкого круга элементов из одной навески. К недостаткам метода следует отнести необходимость озоления проб нефти и наличие охлаждаемого канала реактора, что накладывает ограничение на возможность анализа образцов сырой нефти. Рассмотрена возможность нейтронного активационного анализа элементного состава нефтей с применением установок на базе мощных источников нейтронов. В качестве источника использовался сурьяно-бериллиевый ($^{124}\text{Sb-Be}$) источник с выходом нейтронов $\sim 10^{10}$ н/с. Анализируемые образцы нефтей располагаются в щели между бериллием и графитом в полиэтиленовых кассетах, вмещающих 800—900 г нефти. Измерение облученных образцов проводилось с помощью спектрометрической установки на базе полупроводникового Ge(Li) детектора в специальных кассетах, которые плотно одевались на защитный кожух детектора. Выбор временных режимов анализа (времени облучения, остывания и измерений) определяется необходимой чувствительностью, производительностью и зависит от состава нефтей. Получены пределы определения 10 микроэлементов в нефтях по их долгоживущим изотопам.

Ключевые слова: микроэлементы нефти, нейтронно-активационный анализ, сурьяно-бериллиевый источник нейтронов, полупроводниковый детектор, время измерения, время облучения, время остывания, предел определения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-121-128

Исследованию микроэлементного состава нефтей в последние годы уделяется большое внимание. Соотношение ряда микроэлементов в нефти позволяет получить информацию о природе ее происхождения, возрасте, миграционных процессах, и зачастую определяет стратегию разведки нефтяных месторождений [1, 2]. С другой стороны, ряд микроэлементов (V, Ni, Fe, As, Se и др.) даже в незначительных количествах наносит существенный вред технологическому оборудованию, вызывая коррозию и выход из строя основных узлов

нефтеперерабатывающих установок, отравляет катализаторы переработки нефтяного сырья, снижает качество товарных нефтепродуктов. Кроме того, в связи со сжиганием большого количества нефтепродуктов повышается концентрация элементов, входящих в состав нефтей в атмосфере. Ряд соединений микроэлементов (V, Co, Ni, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Se, Tl, F, Be, Cd, Hg, Pb, Sn, Mo) относят к высокотоксичным веществам, опасным как для окружающей среды, так и для здоровья человека, выбросы которых в атмосферу существенно осложняют эко-

логическую обстановку в регионах нефтедобычи.

Микроэлементы нефти — элементы, присутствующие в нефти в количестве 0,02–0,03% от общей ее массы. Обнаружено более 60 микроэлементов, большая часть которых представлена металлами. Для определения микроэлементного состава нефтей широко применяются химические, физические и ядерно-физические методы анализа [3–6].

Из числа физических методов для анализа нефтей широко применяются атомно-абсорбционная спектрометрия и атомно-эмиссионная спектроскопия, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, спектрофотометрия и рентгенофлуоресцентный анализ [7–8].

В работе [9] показана возможность определения общего содержания ванадия и никеля, а также их термостабильных и летучих форм в образцах сырой нефти. В работе [10] приведены данные по одновременному определению хрома и железа в образцах Венесуэльской и Бразильской нефти. В работе [11] определяли содержание Cu, Fe и V в образцах сырой нефти. Виейра и соавторы [12] определяли ванадий и никель в 64 образцах нефти Бразилии, отличающихся по плотности и вязкости.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) из-за недостаточной чувствительности метода для определения многих микроэлементов в нефтепродуктах часто требует использования различных физических и химических способов предварительного концентрирования [13, 14]. В работе [15] предложен способ прямого определения Ca, Fe, Ni и V в сырой нефти методом РФА.

Основным достоинством физических методов является то, что они способны определять одновременно большое количество различных микроэлементов в широком диапазоне их концентраций.

Из числа ядерно-физических методов, наибольшее применение находит нейтронный активационный анализ (НАА) с применением ядерного реактора [16–18].

Нейтронный активационный анализ является прямым методом определения элементов, однако требует тщательной подготовки образца сырой нефти и ее фракций [19, 20].

Преимуществом этого метода является его высокая чувствительность, и возможность одновременного определения широкого круга элементов из одной навески.

К настоящему времени с помощью реакторного нейтронного активационного анализа в нефтях месторождений мира выявлено более 26 элементов с пределом определения от 10^{-6} г/г до 10^{-11} г/г. К числу этих элементов относятся Na, V, Ni, Fe, Zn, Mn, As, Br Hg и др.

Типичная методика реакторного НАА состоит из следующих операций:

- Центрофугирование сырой нефти для удаления технических примесей и водяных капель. Вес сырой нефти 1–10 г.
- Коксование или озоление нефти.
- Облучение золы или кокса в течение нескольких часов в канале реактора с плотностью потока нейтронов 10^{12} — 10^{13} н/см² · с.
- Измерение наведенной активности пробы с помощью полупроводникового гамма спектрометра.

Следует отметить, что при озолении обычно происходит частичная потеря важных летучих компонент (V, As, Br Hg и др.) и возрастает возможность загрязнения пробы [21].

Таким образом, не менее важным является разработка методики анализа проб сырой нефти, что требуется наличие охлаждаемого (до 60–70 °С) канала реактора и накладывает ограничения на массу пробы нефти и время ее облучения.

В этой связи представляет интерес изучение возможностей определения микроэлементного состава нефтей с применением установок на базе радионуклидных источников с выходом нейтронов $10^9 - 10^{10}$ н/с. Подобный выход можно обеспечить с применением сурьяно-бериллиевых и калифорниевых источников нейтронов. В пользу такого эксперимента говорит возможность анализа представительных навесок сырой нефти, длительного облучения и простота подготовки пробы к активации.

Авторы исследовали возможность определения микроэлементов в нефтях и нефтепродуктах с применением установки на базе мощного сурьяно-бериллиевого ($^{124}\text{Sb-Be}$) источника нейтронов [18, 22, 23]. Установка состоит из бериллиевого блока — конвертора нейтронов размером $300 \times 300 \times 300$ мм в центре которого помещен источник сурьмы. Бериллиевый блок окружен графитовым замедлителем размером $700 \times 700 \times 700$ мм. Между бериллиевым блоком и графитом имеется две горизон-

тальные щели, в которые помещались кассеты из органического стекла объемом ~ 1000 см³, вмещающие 800—900 г нефти. Активность источника сурьмы-124 составляла ~ 1000 К и, что обеспечивает выход нейтронов 10^{10} н/с и плотность потока нейтронов в зоне активации $\sim 10^7$ н/см²·с.

В качестве образцов использовались пробы нефти и нефтепродуктов с известной концентрацией микроэлементов. Ввиду высокой активности источника сурьмы установка располагалась в защитной камере при ядерном реакторе (рис. 1).

Измерения облученных образцов проводилось с помощью полупроводникового гамма спектрометра, включающего Ge(Li) детектор с чувствительным объемом 50 см³ и разрешением 2 кэВ на линии 1333 кэВ. Перед измерениями образцы переливались в кассеты из органического стекла, имеющие вид полового цилиндра, которые плотно одевались на защитный кожух детектора. Время облучения, остывания и измерения образ-

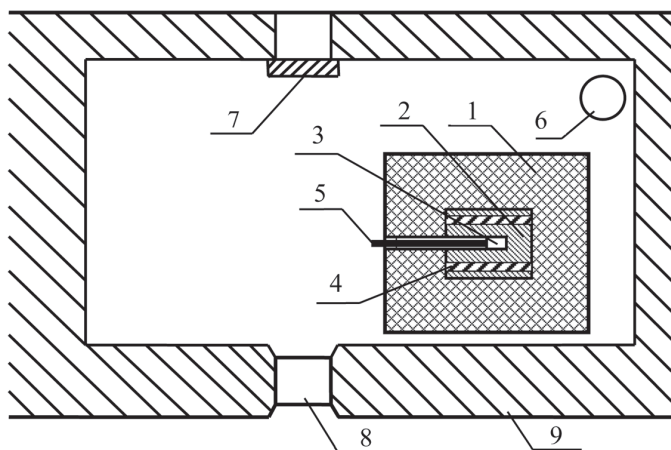


Рис. 1. Схема нейтронно-активационной установки: 1—графитовый замедлитель; 2—бериллиевый блок; 3—контейнер с источником ^{124}Sb ; 4—щель для активации образцов нефти; 5—шток; 6—дозиметрический прибор; 7—смотровое окно; 8—бериллиевый цилиндр; 9—защита из тяжелого бетона

Fig. 1. Neutron activation facility: 1—graphite decelerator; 2—beryllium block; 3—container with ^{124}Sb source; 4—slot for oil activation; 5—rod; 6—dose meter; 7—viewport; 8—beryllium cylinder; 9—protection made of heavy concrete

Элементы, определяемые в нефтях с применением установки с выходом нейтронов 1010 н/с
Elements identified in oil using facility with the neutron yield of 1010 n/s

Элемент	Na 10 ⁻³	K 10 ⁻³	Mn 10 ⁻³	Fe 10 ⁻²	Co 10 ⁻⁵	Cu 10 ⁻³	As 10 ⁻⁵	Br 10 ⁻³	Sb 10 ⁻⁴	Au 10 ⁻⁵	Hg 10 ⁻⁴
Диапазон концентраций, мг/г	0,1–5	0,4–30	0,6–7	3–120	0,02–13	0,02–13	0,04–11	0,01–6,6	0,3–1,1	0,6–30	0,2–30
Предел определения, мг/г	2	5	2	4	7	5	5	2	1	1	5

цов нефти составляло 48 ч, 5–7 ч и 1 ч, соответственно.

По результатам измерений эталонов, в качестве которых использовались пробы нефти и водные растворы с известной концентрацией микроэлементов, были оценены пределы определения ряда ра-

дионуклидов с относительно большим (более 2 ч) периодом полураспада.

Предел определения вычислялся по формуле [14, 18]:

$$L = \frac{3 \cdot \sqrt{S_{\phi}}}{S_{\Pi}} \cdot C_{ЭТ}$$

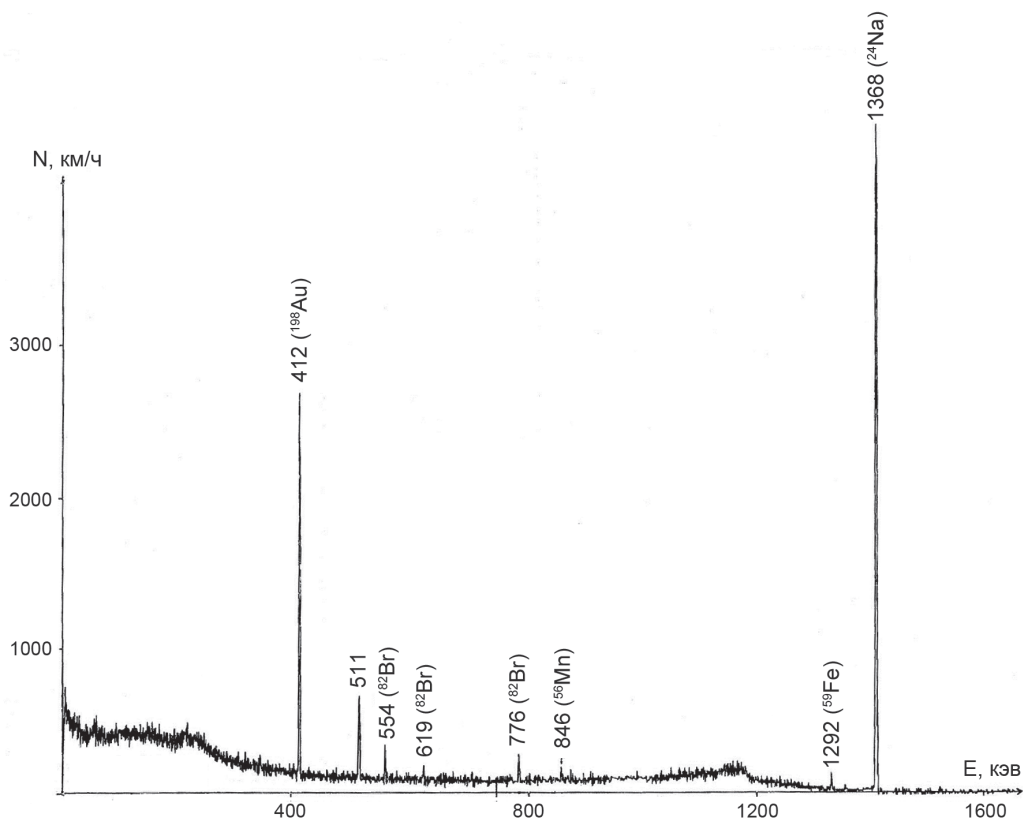


Рис. 2. Гамма-спектр пробы нефти, облученной с помощью сурьяно-бериллиевого источника ($t_{\text{обл}} = 48$ ч, $t_{\text{ост}} = 5$ ч, $t_{\text{изм}} = 1$ ч)

Fig. 2. Gamma range of oil sample exposed to stibate-beryllium source ($t_{\text{ex}}=48$ h; $t_{\text{cool}}=5$ h; $t_{\text{meas}}=1$ h)

где S_n — площадь аналитического пика определяемого элемента за вычетом фона; S_ϕ — площадь фона под аналитическим пиком; $C_{\text{эт}}$ — концентрация определяемого элемента в эталоне.

Как показали эксперименты с применением подобной установки возможно определение свыше 10 элементов по их долгоживущим нуклидам. Перечень этих элементов и их пределы определения приведены в таблице.

Предварительные эксперименты показали также возможность успешного определения короткоживущих радионуклидов в нефтях, прежде всего ^{52}V , а также ^{37}S и ^{38}Cl .

На рис. 2 приведен гамма-спектр полученной на рассмотренной выше установке образца нефти.

Для определения элементного состава нефти разработан ряд нормативных документов: ГОСТ, UOP (Universal Oil Products), ISO (Международная организация по стандартизации), ASTM (Американское общество испытания материалов). Для анализа сырой нефти выбор стандартных методик весьма ограничен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готтих Р. П., Писоцкий Б. И., Плотнокова И. Н. Информативность малых элементов в нефтяной геологии // Георесурсы. — 2012. — Т. 5. — № 47. — С. 24–31.
2. Лурье М. А. // Глубинная нефть. — 2014. — Т. 2. — № 7. — С. 175. http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-7-2014/4_Lurje_2-7-2014.pdf (21.08.2018).
3. Колодяжный А. В., Ковальчук Т. Н., Коровин Ю. В., Антонович В. П. Определение микроэлементного состава нефтей и нефтепродуктов. Состояние проблемы (Обзор) // Методы и объекты химического анализа. — 2006. — Т. 1. — № 2. — С. 90–104.
4. Яценко И. Г. Тяжелые ванадиевоносные нефти России // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 321. — № 1. — С. 105–111.
5. Марютина Т. А., Катасонова О. Н., Савонина Е. Ю., Спиваков Б. Я. Современные способы определения микроэлементов в нефти и ее отдельных фракциях // Журнал аналитической химии. — 2017. — Т. 72. — № 5. — С. 417–436.
6. Хаджиев С. Н., Шпирт М. Я. Микроэлементы в нефтях и продуктах их переработки. — М.: Наука, 2012. — 222 с.
7. Sanchez R., Todoli J. L., Lienemann C-P., Mermet J-M. Determination of trace elements in petroleum products by inductively coupled plasma techniques: a critical review // Spectrochim. Acta B. 2013. V. 88. P. 104–126.
8. Manar El-Sayed Abdul-Raouf. Crude oil emulsions-composition stability and characterization. Rijeka: InTech, 2012. 230 p.
9. Silva M. M., Damina I. C.F., Vale M. G.R., Welz B. Feasibility of using solid sampling graphite furnace. atomic absorption spectrometry for speciation analysis of volatile and non-volatile compounds of nickel and vanadium in crude oil // Talanta, 2007. V. 71. P. 1877–1885.

Это связано, прежде всего, с тем, что нефть является сложной многокомпонентной системой, характеризуется разными величинами плотности и вязкости, разнообразием форм входящих в ее состав элементов [24–26].

Оценка правильности и воспроизводимости анализа для нефтей выполнялась в соответствии с требованиями [24, 27].

Аналогичные по чувствительности результаты при микроэлементном анализе нефтей могут быть получены с применением установок на базе источников спонтанного деления (калифорний, ^{252}Cf) с выходом нейтронов 10^9 – 10^{10} н/с. Преимуществом калифорниевых источников является относительно большой период полураспада ^{252}Cf ($T \approx 2,6$ г) и отсутствие сопутствующего высокоэнергетического гамма-излучения.

Приведенные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности применения установок на базе мощных источников нейтронов для определения содержания микроэлементов в нефтях и нефтепродуктах.

10. Dittert I. M., Silva J. S. A., Araujo R. G. O., Curtius A. J., Welz B., Becker-Ross H. Direct and simultaneous determination of Cr and Fe in crude oil using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry // *Spectrochim. Acta B*. 2009. V. 64. P. 537–543.
11. Brandao G. P., Campos R. C., Castro E. V. R., Jesus H. C. Determination of copper, iron and vanadium in petroleum by direct sampling electrothermal atomic absorption spectrometry // *Spectrochim. Acta B*. 2007. V. 62. P. 962–969.
12. Vieira L. V., Rainha K. P., de Castro E. V. R., Filgueiras P. R., Carneiro M. T. W. D., Brandao G. P. Exploratory data analysis using API gravity and V and Ni contents to determine the origins of crude oil samples from petroleum fields in the Espírito Santo Basin (Brazil) // *Microchem.* 2016. V. 124. P. 26–36.
13. Margue E., Zawisza B., Sitko R. Trace and ultratrace analysis of liquid samples by X-ray fluorescence spectrometry // *Trends Anal. Chem.* 2014. V. 53. P. 73–83.
14. Медведев А. А., Посеренин А. И. Лабораторный практикум по ядерной геофизике. — М., 2013.
15. Doyle A., Saavedra A., Tristao M. L. B., Aucelio R. Q. Determination of S, Ca, Fe, Ni and V in crude oil by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry using direct sampling on paper substrate // *Fuel*. 2015. V. 162. P. 39–46.
16. Бобров В. А. К вопросу анализа микроэлементов в нефтях (нейтронно-активационным методом) / *Физические методы анализа в геохимии. Сборник научных трудов.* — Новосибирск, 1978. — С. 97–103.
17. Shah K. R., Filby R. H., Haller W. A. Determination of trace elements in petroleum by neutron activation analysis. // *Radioanalytical chemistry*. 1970. V. 6. P. 185–192.
18. Посеренин А. И., Медведев А. А. Аналитические методы определения состава горных пород. — М., 2011.
19. Filby R. H., Olsen S. P. A comparison of instrumental neutron activation analysis and inductively coupled plasma-mass spectrometry for trace element determination in petroleum geochemistry // *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* 1994. V. 180. No 2. P. 285–294.
20. Olsen S. D., Filby R. H., Brekke T., Isaken G. Determination of trace elements in petroleum exploration samples by inductively coupled plasma mass spectrometry and instrumental neutron activation analysis // *Analyst*. 1995. V. 120. P. 1379–1390.
21. Paola A. Mello, Juliana S. F. Pereira, Marsia F. Mesko, Juliano S. Barin, Erico M. M. Flores. Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals in crude oil. A review // *Anal. Chim. Acta.* — 2012. — 746. — P. 15–36.
22. Флеров Г. Н., Бурмистенко Ю. Н., Дядин Ю. В., Медведев А. А. и др. О перспективах развития нейтронно-активационных установок на базе мощных сурьмяно-бериллиевых источников // *Атомная энергия*. 1982. Т. 53. С. 255
23. Медведев А. А., Посеренин А. И. Нейтронный активационный анализ горных пород на скандий с применением установок на базе мощных нуклидных источников нейтронов // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2017. — № 12. — С. 170–175. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-170-175.
24. ГОСТ 10354-90 Нефть и нефтепродукты. Метод определения ванадия. Сборник национальных стандартов. — М.: Стандартинформ, 2006. — 7 с.
25. UOP 389-15 Trace Metals in Organics by ICP-OES. UOP LLC: A Honeywell Company, 2015. 13 p.
26. ASTM D5708-15 Standard test methods for determination of nickel, vanadium, and iron in crude oils and residual fuels by inductively coupled plasma (ICP) atomic emission spectrometry. West Conshohockm, PA: American Society for Testing and Materials, 2015. 9 p.
27. Романов В. В., Посеренин А. И., Мальский К. С. Метрология, стандартизация и сертификация. — М., 2015. **ПТАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Медведев Андрей Александрович — кандидат технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: medvedev747@yandex.ru,
 Посеренин Алексей Игоревич¹ — старший преподаватель, e-mail: poserenin83@gmail.com,

Романов Виктор Валерьевич¹ — кандидат технических наук,

доцент, e-mail: roman_off@mail.ru,

¹ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 121–128.

Microelement analysis of oils using plants based on high-energy nuclide neutron sources

Medvedev A.A., Candidate of Technical Sciences, Professor,

e-mail: medvedev747@yandex.ru,

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Poserenin A.I.¹, Senior Lecturer, e-mail: poserenin83@gmail.com,

Romanov V.V.¹, Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor, e-mail: roman_off@mail.ru,

¹ Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU), 117997, Moscow, Russia.

Abstract. The microelement analysis of oils is a science-and-technology problem of current concern. Ratios of some microelements in oils provide information on the oil nature, age, migration and, often, govern development strategy selected for an oil reservoir. On the other hand, some microelements, even if present in small quantities, can essentially damage processing equipment, induce corrosion and breakdown of basic assemblies of oil refineries, poison catalytic agents and impoverish quality of marketable products. Furthermore, some compounds of microelements belong to highly toxic substances which are hazardous for the ecology and health while their emissions in the atmosphere greatly complicate environmental situation in oil production regions. The microelement analysis of oil is carried out using chemical, physical and nuclear physics methods. Amongst the nuclear physics methods, the neutron activation analysis using nuclear reactors find the most often application. The advantage of this method is high sensitivity and feasible determination of many elements in a sample at the same time. The disadvantages can be described as the need of oil sample calcination and the presence of cooled channel of the reactor, which limits the analysis of crude oil samples. The authors of this article discuss applicability of the neutron activation analysis of oil elements using plants based on powerful neutron sources. A stibate–beryllium source (124Sb–Be) with the neutron yield of 1010 n/s was used as a source. Oil samples were placed in a slot between beryllium and graphite, in polyethylene cartridges with a capacity of 800–900 g. Exposed samples were processed on spectrometer facility based on semi-conductor Ge(Li) detector in special cartridges tightly put on the protection enclosure of the detector. The choice of the analysis times (periods of exposure, cooling and measurement) is governed by the required sensitivity, productivity and oil composition. The determination limits are obtained for 10 microelements based on long-lived isotopes in oil.

Key words: oil microelements, neutron activation analysis, stibate–beryllium neutron source, semi-conductor detector, measurement time, exposure time, cooling time, determination limits.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-121-128

REFERENCES

1. Gottikh R. P., Pisotskiy B. I., Plotnikova I. N. Informativnost' malykh elementov v neftyanoy geologii [The informative value of small elements in petroleum geology], *Georesursy*. 2012, vol. 5, no 47, pp. 24–31. [In Russ].

2. Lur'e M. A., *Glubinnaya neft'*. 2014, vol. 2, no 7, pp. 175. http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-7-2014/4_Lurje_2-7-2014.pdf (21.08.2018).

3. Kolodyazhnyy A. V., Koval'chuk T. N., Korovin YU. V., Antonovich V. P. Opredelenie mikroelementnogo sostava neftey i nefteproduktov. Sostoyanie problemy (Obzor) [Definition of microelement composition of oil and oil products. State of the problem (a Review)], *Metody i ob'ekty khimicheskogo analiza*. 2006, vol. 1, no 2, pp. 90–104. [In Russ].

4. Yashchenko I. G. Tyazhelye vanadievonosnye nefti Rossii [Heavy vanadium bearing oils of Russia], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012, vol. 321, no 1, pp. 105–111. [In Russ].

5. Maryutina T. A., Katasonova O. N., Savonina E. Yu., Spivakov B. Ya. Sovremennyye sposoby opredeleniya mikroelementov v nefti i ee otdel'nykh fraktsiyakh [Modern methods of trace elements determination

- in crude oil and its individual fractions], *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2017, vol. 72, no 5, pp. 417–436. [In Russ].
6. Khadzhiev S. N., Shpirt M. Ya. Mikroelementy v neft'yakh i produktakh ikh pererabotki [Trace elements in oils and products of their processing], Moscow, Nauka, 2012, 222 p.
 7. Sanchez R., Todoli J. L., Lienemann C-P., Mermet J-M. Determination of trace elements in petroleum products by inductively coupled plasma techniques: a critical review, *Spectrochim. Acta B*. 2013. Vol. 88. P. 104–126.
 8. Manar El-Sayed Abdul-Raouf. *Crude oil emulsions-composition stability and characterization*. Rijeka: InTech, 2012. 230 p.
 9. Silva M. M., Damina I. C. F., Vale M. G. R., Welz B. Feasibility of using solid sampling graphite furnace. atomic absorption spectrometry for speciation analysis of volatile and non-volatile compounds of nickel and vanadium in crude oil, *Talanta*, 2007. Vol. 71. P. 1877–1885.
 10. Dittert I. M., Silva J. S. A., Araujo R. G. O, Curtius A. J., Welz B., Becker-Ross H. Direct and simultaneous determination of Cr and Fe in crude oil using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry, *Spectrochim. Acta B*. 2009. Vol. 64. P. 537–543.
 11. Brandao G. P., Campos R. C., Castro E. V. R., Jesus H. C. Determination of copper, iron and vanadium in petroleum by direct sampling electrothermal atomic absorption spectrometry, *Spectrochim. Acta B*. 2007. Vol. 62. P. 962–969.
 12. Vieira L. V., Rainha K. P., de Castro E. V. R., Filqueiras P. R., Carneiro M. T. W. D., Brandao G. P. Exploratory data analysis using API gravity and V and Ni contents to determine the origins of crude oil samples from petroleum fields in the Espírito Santo Basin (Brazil), *Microchem.* 2016. Vol. 124. P. 26–36.
 13. Margue E., Zawisza B., Sitko R. Trace and ultratrace analysis of liquid samples by X-ray fluorescence spectrometry, *Trends Anal. Chem.* 2014. Vol. 53. P. 73–83.
 14. Medvedev A. A., Poserenin A. I. *Laboratornyy praktikum po yadernoy geofizike* [Laboratory workshop on nuclear geophysics], Moscow, 2013.
 15. Doyle A., Saavedra A., Tristao M. L. B., Aucelio R. Q. Determination of S, Ca, Fe, Ni and V in crude oil by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry using direct sampling on paper substrate, *Fuel*. 2015. Vol. 162. P. 39–46.
 16. Bobrov V. A. K voprosu analiza mikroelementov v neft'yakh (neytronno-aktivatsionnyy metod) [Analysis of microelements in oils (neutron activation method)], *Fizicheskie metody analiza v geokhimi*. Collection of scientific papers. Novosibirsk, 1978, pp. 97–103.
 17. Shah K. R., Filby R. H., Haller W. A. Determination of trace elements in petroleum by neutron activation analysis, *Radioanalytical chemistry*. 1970. Vol. 6. P. 185–192.
 18. Poserenin A. I., Medvedev A. A. *Analiticheskie metody opredeleniya sostava gornykh porod* [Analytical methods to determine the composition of rocks], Moscow, 2011.
 19. Filby R. H., Olsen S. P. A comparison of instrumental neutron activation analysis and inductively coupled plasma-mass spectrometry for trace element determination in petroleum geochemistry, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* 1994. Vol. 180. No 2. P. 285–294.
 20. Olsen S. D., Filby R. H., Brekke T., Isaken G. Determination of trace elements in petroleum exploration samples by inductively coupled plasma mass spectrometry and instrumental neutron activation analysis, *Analyst*. 1995. Vol. 120. P. 1379–1390.
 21. Paola A. Mello, Juliana S. F. Pereira, Marsia F. Mesko, Juliano S. Barin, Erico M. M. Flores. Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals in crude oil. A review, *Anal. Chim. Acta*. 2012. 746. P. 15–36.
 22. Flerov G. N., Burmistenko Yu. N., Dyadin Yu. V., Medvedev A. A. O perspektivakh razvitiya neytronno-aktivatsionnykh ustanovok na baze moshchnykh sur'myano-berillievyykh istochnikov [Prospects for the development of analytical arrangement for neutron activation analysis based on antimony-beryllium sources of high intensity], *Atomnaya energiya*. 1982, vol. 53, pp. 255.
 23. Medvedev A. A., Poserenin A. I. Neytronnyy aktivatsionnyy analiz gornykh porod na skandiy s primeneniem ustanovok na baze moshchnykh nuklidnykh istochnikov neytronov [Neutron activation analysis of scandium in rocks using installations based on powerful nuclide sources of neutrons], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 12, pp. 170–175. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-170-175.
 24. *Neft' i nefteprodukty. Metod opredeleniya vanadiya*. GOST 10354-90 [Oil and petroleum products. Method for determination of vanadium. State Standard 10354-90], Moscow, Standartinform, 2006, 7 p.
 25. *UOP 389-15 Trace Metals in Organics by ICP-OES*. UOP LLC: A Honeywell Company, 2015. 13 p.
 26. *ASTM D5708-15 Standard test methods for determination of nickel, vanadium, and iron in crude oils and residual fuels by inductively coupled plasma (ICP) atomic emission spectrometry*. West Conshohock, PA: American Society for Testing and Materials, 2015. 9 p.
 27. Romanov V. V., Poserenin A. I., Mal'skiy K. S. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification], Moscow, 2015.