

АНАЛИЗ ЗОЛОТА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИОНООБМЕННЫХ СМОЛАХ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО МЕТОДА

А. М. Музафаров¹, М. А. Мустафоев¹, Р. А. Кулматов², У. З. Шарафутдинов¹

¹ Навоийский горно — металлургический комбинат, г. Навои, Республика Узбекистан;

² Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация: В настоящее время для анализа ионообменной смолы на золото и сопутствующих элементов применяют химические, физико-химические и ядерно-физические методы. В большинстве золотоперерабатывающих комбинатах мира применяют наиболее точный пробирный метод анализа золота. Несмотря на ряд преимуществ, данный метод является трудоёмким, долгим и затратным. В статье приведены результаты инструментального нейтронно-активационного анализа золота и сопутствующих элементов в ионообменных смолах с использованием радионуклидов с различным временем жизни (короткоживущие и среднеживущие радионуклиды). Для определения содержания золота в ионообменных смолах в основном применяется классический — пробирный метод анализа. Найдены оптимальные условия облучения ионообменных смол с учетом мешающего влияния мышьяка при определении содержания золота. В условиях проведения данного эксперимента порог чувствительности золота составил 0,3 – 0,5 г/т. Для активации смолы использовали нейтронно-активационную установку на калифорний — НАУ-К с потоком нейтронов 1·10⁹ н/с. Ампульный источник — ²⁵²Cf с выходом 1·10⁹ нейтр/с установлен в контейнере для хранения источника нейтронов. Инструментальный нейтронно-активационный анализ с применением ампульных ²⁵²Cf — источников нейтронов имеет превосходство в таких аспектах, как экспрессность анализа, оперативность получаемой информации, низкие значения порога определяемых элементов и применимость в заводских условиях. Разработана методика инструментального нейтронно-активационного анализа золота и сопутствующих элементов в ионообменных смолах по короткоживущим и среднеживущим радионуклидам.

Ключевые слова: анализ золота, ионообменная смола, активации смолы, нейтронный поток, короткоживущие радионуклиды, среднеживущие радионуклиды, примесные элементы, порог чувствительности, нейтронно-активационный анализ, пробирный анализ.

Для цитирования: Музафаров А. М., Мустафоев М. А., Кулматов Р. А., Шарафутдинов У. З. Анализ золота и сопутствующих элементов в ионообменных смолах с помощью инструментального нейтронно-активационного метода // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 110–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_110.

Instrumental neutron activation analysis of gold and associated elements in ion-exchange resins

A. M. Muzafarov¹, M. A. Mustafoev¹, R. A. Kulmatov², U. Z. Sharafutdinov¹

¹ Navoi Mining and Metallurgical Combine, Navoi, Republic of Uzbekistan;

² National University of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

Abstract: The present-day analysis of gold and associated elements uses the chemical, physicochemical and nuclear–physical methods. The majority of gold proceeding plants in the world make use of the higher accurate gold assaying method. Irrespective of some advantages, assaying is the most labor-intensive, time-consuming and expensive method. This article presents the results of the instrumental neutron activation analysis of gold and associated elements in ion-exchange resins using radionuclides having different lifetimes (short- and medium-lived radionuclides). The content of gold in ion-exchange resins is mostly determined using the classical assaying method. The conditions of ion-exchange resin radiation with regard to interference of arsenic in the determination of gold content are optimized. In the optimization test, the gold susceptibility limit made 0.3–0.5 g/t. Resin was activated using a neutron emitter for californium with the neutron flow rate of $1 \cdot 10^9$ n/s. The encapsulated source of ^{252}Cf having a neutron yield of $1 \cdot 10^9$ n/s is placed in the neutron source storage container. The encapsulated ^{252}Cf source is advantageous for the quick analysis and real-time information, low detection threshold of elements and for the applicability on a large scale. The procedure of the instrumental neutron activation analysis of gold and associates in ion–exchange resins using short-lived and averaged-lived radionuclides is developed.

Key words: god analysis, ion-exchange resin, resin activation, neutron flow, short-lived radionuclides, average-lived radionuclides, foreign elements, susceptibility limit, neutron activation analysis, assaying.

Forcitation: Muzafarov A. M., Mustafoev M. A., Kulmatov R. A., Sharafutdinov U. Z. Instrumental neutron activation analysis of gold and associated elements in ion-exchange resins. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-1):110–118. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_110.

Введение

Анализ золота и сопутствующих элементов в ионообменной смоле необходим для контроля различных процессов технологии [1–3], а также для учета количества золота в составе смолы, передаваемой между подразделениями комбинатов [4–8]. Экспрессность и оперативность пробирного метода не всегда соответствуют предъявляемым требованиям технологического контроля [9–12]. По этой причине исследование возможности и разработка инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) золота и сопутствующих элементов в ионообменных смолах является актуальной задачей аналитической химии, ядерной физики и технологии [13–16].

Техника и методы эксперимента

Анализ золота и примесных элементов в ионообменной смоле марки

D301G (Производства Китай) проведён ИНАА по короткоживущим и среднеживущим радионуклидам (РН) – $^{197}\text{Au}(n, n' \gamma) ^{197m}\text{Au}$ и $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$, излучаемые гамма-кванты с энергией 278 кэВ и 412 кэВ. РН образуется при облучении смолы сплошным спектром нейтронов ^{252}Cf – источника нейтронов. Для активации ядер химических элементов в смоле использовали нейтронно-активационную установку на калифорний – НАУ-К с потоком нейтронов $1 \cdot 10^9$ н/с (рис. 1). Ампульный источник – ^{252}Cf с выходом $1 \cdot 10^9$ нейтр/с установлен в контейнере для её хранения. Источник при помощи электромотора, управляемого с пульта, устанавливается в блоке облучения для проведения процесса облучений.

Для облучения проб использован плоскопараллельный полиэтиленовый контейнер диаметром 80 мм и высотой 12 мм, куда помещается 70–75 г

воздушно-сухой смолы и 240—250 г набухшей смолы.

Обсуждение полученных результатов. Найден оптимальный режим ИНАА золота в смоле. Предел обнаружения при ИНАА проб (с погрешностью не более 20 % отн.) массой 7 г, при времени облучения 3 часа, остывания 1 час, измерения 5—10 минут составляет 0,09 г/кг. Использование навески весом 75 г позволяет сократить время облучения вдвое и увеличить производительность до 50—60 проб за смену.

Установлено, что содержание золота в смоле составляло от 0,02 г/кг до 10 г/кг. Метод пробирного анализа показал, что навеска массой 5,0 г смолы (содержащая золото от 0,1 мг до 50 мг), используемая в пробирной плавке, вполне достаточна при анализе золота в смоле [7].

При пробирном анализе смолы массой 60,0 г (сумма из 12 анализов при использовании навески массой 5,0 г) расхождение между результатами составляло ± 2 %. На основании вышеизложенного можно сказать, что при пробирном анализе золота в смоле представительной навеской является 5,0—7,0 г.

Совпадение результатов анализа золота в смоле с пробирным анализом и ИНАА в интервале содержания золота 0,5—4,5 г/кг составляет не более 8 %. Воспроизводимость результатов с повторением четырехкратного анализа составляет не менее 2 %.

Сравнение результатов анализа золота в смоле с пробирным методом приведено в табл. 1.

Одним из возможных вариантов экспрессного определения золота в смоле может быть метод, основанный на возбуждении изомерного состояния ядра золота $^{197}\text{Au}(n, n'\gamma)^{197\text{m}}\text{Au}$. При этом матрица из-за низких сечений активаци-

ции нейтронами спектра деления практически не активизируется.

При больших энергиях ($E > 1 \text{ МэВ}$) падающих нейтронов становится возможным их неупругое рассеяние — $(n, n'\gamma)$. Возбужденное ядро возвращается в основное энергетическое состояние, испуская γ -кванты. К таким радионуклидам относятся $^{197\text{m}}\text{Au}$ — ($T_{1/2} = 7,2 \text{ с}$) и $^{183\text{m}}\text{W}$ — ($T_{1/2} = 5,3 \text{ с}$).

Для экспрессного анализа по короткоживущим РН — ($^{46\text{m}}\text{Sc}$, $^{197\text{m}}\text{Au}$, ^{239}Np , $^{183\text{m}}\text{W}$ с периодом полураспада 18,6 с, 7,2 с, 23,5 мин, 5,3 с соответственно) в блоке облучения установки имеется 2 канала. В режиме анализа по короткоживущим РН подача проб осуществляется по пневмотранспортному каналу сжатым воздухом от компрессора, управляемого с пульта. Для увеличения отношения полезного сигнала к фону предусмотрен вариант циклического облучения проб.

Пробу насыщенной смолы всыпали в цилиндрический полиэтиленовый контейнер многогранового использования диаметром 80 мм и высотой 12 мм, куда помещается 70—75 г воздушно-сухой смолы.

При разработке методик анализа золота и конкретных элементов подбирали значения временных параметров анализа, исходя из периода полураспада аналитического РН и степени мешающего влияния других РН. Для оптимизации значений длительности «остывания» в качестве основного критерия использовалось значение предела обнаружения, вычисляемое по формуле:

$$LD = 2N_{\phi} / \eta \quad (1)$$

где η — значение измеряемого эффекта (счета импульсов) на единицу концентрации.

В табл. 2 приведены ядерно-физические характеристики радионуклидов

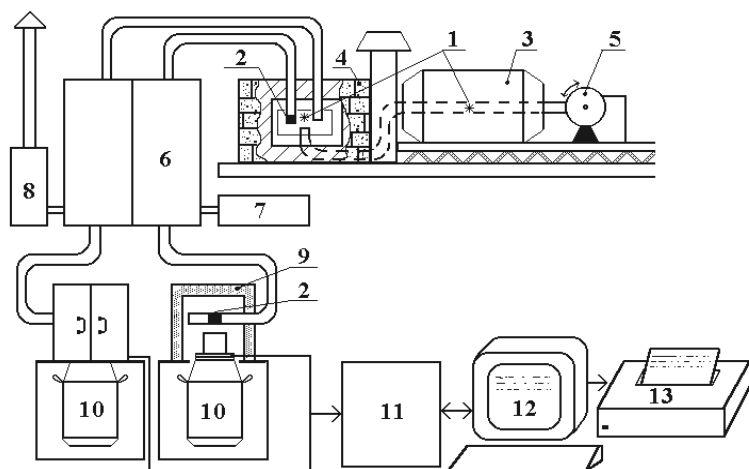


Рис. 1. Нейтронно-активационная установка на калифорний – НАУ-К с потоком нейтронов $1 \cdot 10^9$ н/с: 1 – ^{252}Cf -источник нейтронов; 2 – проба; 3 – контейнер для хранения источника нейтронов; 4 – блок облучения; 5 – электромотор; 6- пневмотранспортная система; 7 – компрессор; 8 – фильтр; 9 – свинцовый домик; 10 – ППД, находящийся в сосуде Дьюара с жидким азотом; 11 – аналого-цифровой преобразователь; 12 – ПК и 13 – принтер

Fig. 1. Neutron activation unit at California-NAU – K with a neutron flux of $1 \cdot 10^9$ n/s: 1 – ^{252}Cf – neutron source; 2 – sample; 3 – container for storing the neutron source; 4 – irradiation unit; 5 – electric motor; 6 – pneumatic transport system; 7 – compressor; 8 – filter; 9 – lead house; 10 – PPD located in a Dewar vessel with liquid nitrogen; 11 – analog-digital converter; 12 – PC and 13 – printer

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных с применением пробирного и ИНАА методов анализа золота в смоле

Comparison of the results obtained using assay and INAA methods of analysis of gold in resin

№ пробы	$C_{\text{Аи}}, \text{ г/кг}$		$\Delta_{\text{с}}, \%$
	Пробирный	ИНАА	
1	0,5	0,48	4,1
2	0,57	0,54	5,3
3	0,94	0,91	3,2
4	1,5	1,39	7,9
5	2,1	2,01	4,3
6	4,3	3,98	7,5
7	8,1	7,65	5,6
8	10,2	9,83	3,8
9	12,4	13,3	-7,2

и оптимальные временные режимы при анализе по короткоживущим РН с использованием ^{252}Cf – источника нейтронов ($f = 110^9$ нейтр/с; $t_{\text{обл}}, t_{\text{охл}}, t_{\text{изм}}$

– время облучения, остывания и измерения, соответственно; $m_{\text{обр}}$ – масса навески; $N_{\text{ц}}$ – число циклов или повторности облучения; LD – предел определения).

Таблица 2

Оптимальные условия ИНАА золота и сопутствующих элементов в ионообменной смоле
Optimal conditions for INAA of gold and related elements in ion exchange resin

Элемент → PH	$T_{1/2}$	$m_{обр}$, г	$t_{обл}$, $t_{охл}$, $t_{изм}$, с	N_p	LD, %
V → ^{52}V	3,75 м	70	300–100–300	1	0,05
Cu → ^{66}Cu	5,10 м	70	300–100–300	1	0,4
Se → ^{77m}Se	17,5 с	7	60–2–60	10	0,03
Ag → ^{110}Ag	24,4 с	7	60–2–60	10	0,06
W → ^{183m}W	5,30 с	7	20–2–20	10	1,0
Au → ^{197m}Au	7,20 с	250	40–5–40	5	0,4
Au → ^{197m}Au	7,20 с	7	40–2–40	10	0,8

Исследованы факторы, влияющие на точность и нижнюю границу порога определения золота, такие как время облучения, остывания и измерения, навеска пробы, влажность, представительность анализируемой навески, присутствие побочных материалов (щепа, резина и др.), геометрические условия облучения, измерения и другие.

Пределы обнаружения и пределы определения Au в смоле рассчитано с использованием следующих соотношений соответственно:

$$C_{\min}^{об} = \frac{3\sqrt{2I_{\phi}}}{I_{пол}} \cdot C_{эт} \quad (2)$$

$$C_{\min}^{опр} = \frac{3\sqrt{I_{\phi}}}{I_{пол}} \cdot C_{эт} \quad (3)$$

где I_{ϕ} — количество импульсов фона, $I_{пол}$ — количество импульсов полезного сигнала; $C_{эт}$ — концентрация эталона, г/т.

Нижний предел погрешности анализов для абсолютного метода расчета концентраций оценивался посредством расчета статистической погрешности площади пика с доверительной вероятностью $P = 95\%$:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{N + \left(\frac{n-2}{2}\right) - N_{\phi}}{N}} \quad (4)$$

где N_{ϕ} — площадь фона под пиком в пределах его границ, N — площадь полезного сигнала под пиком в пределах его границ, n — число каналов, занимаемых пиком.

Для сравнения наиболее надёжными являются стандартные образцы горных пород и руд (из-за отсутствия стандартного образца смолы), прошедшие государственную аттестацию, но даже в них содержания установлены с точностью, которая и определяет максимально достижимую точность ИНАА золота при их использовании.

После облучения и «остывания» пробы смолы извлекались из кассеты и передавались на измерение, где устанавливались на детектор, обращённый к источнику нейтронов, лицевой стороной. Длительность измерения составляла 3600 с.

Содержание золота в пробах смолы (г/т) найдено по формуле:

$$C_{Au} = \frac{I_{пр} \cdot C_{эт} \cdot P_{эт}}{I_{эт} \cdot P_{пр}} \quad (5)$$

где $I_{пр}$ — число импульсов для пробы, имп/сек; $C_{эт}$ — содержание золота в эталоне, г/т; $P_{эт}$ — вес эталона и пробы, г; $I_{эт}$ — число импульсов для эталона, имп/сек, $P_{пр}$ — вес пробы, г.

Найдены оптимальные условия облучения ионообменных смол с учётом

мешающего влияния примесных элементов на определение золота. В этих условиях эксперимента порог определения золота составлял 0,3–0,5 г/т.

В смолах, гравеоцентрированных и флотоцентрированных распределение золота неравномерно вследствие его неравномерного распределения в природных образованиях.

Как показали эксперименты, в используемых каналах ^{252}Cf — источника нейтронов плотность потока по высоте канала изменяется не сильно. Градиент потока составляет примерно 5 % на 10 см. В этих условиях применен способ мониторинга потока нейтронов с использованием трёх эталонных или контрольных проб, расположенных в верхней, средней и нижней частях канала. Этот подход позволил контролировать неоднородность потока с точностью до 2 %. При большем градиенте плотности потока целесообразно использование большего количества контрольных проб. В активной зоне, где происходит облучение образцов, помимо тепловых нейтронов имеется некоторая доля быстрых нейтронов, вызывающих пороговые реакции типа $(n, n'\gamma)$, (n, γ) и др. В данном случае замеряется радиоактивность Pn — ^{198}Au , образующегося по реакции радиационного захвата $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$.

Для проведения анализов по среднеживущим радионуклидам установлено 8 вертикальных каналов. В каждый канал размещаются в количестве 11 шт. плоские кассеты диаметром 80 мм и высотой 12 мм. В средней кассете с пробами поток нейтронов, испуска-

емый ^{252}Cf — источником нейтронов, имел максимальное значение, то есть 95 %, а в самых нижних кассетах с пробами поток нейтронов в два раза меньше и составлял 50 %. Численное значение геометрических коэффициентов менялось в пределах 0,5–0,95.

Результаты показали, что при облучении пробы смолы массой 100–120 г потоком нейтронов в 110^9 нейтр/с в течение 24 часов и при 9-ти дневном времени «охлаждения» предел обнаружения золота составляет 0,5 г/т.

Заключение

Таким образом установлено, что для определения содержания золота в ионообменных смолах в условиях НГМК (методика выполнения измерений массовой доли золота в ионообменной смоле пробирным методом — МВИ Ц-21:2019), в основном применяется классический пробирный метод анализа. Хотя данный метод имеет высокую точность, но не обладает экспрессностью и оперативностью анализа.

Инструментальный нейтронно-активационный анализ с применением ампульных ^{252}Cf — источника нейтронов имеет превосходство в таких аспектах, как экспрессность анализа, оперативность получаемой информации, низкие значения порога определяемых элементов и применимость в заводских условиях. На основании проведённого исследования разработана методика ИНАА золота и сопутствующих элементов в смолах по короткоживущим и среднеживущим радионуклидам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Casimiro S. Munita, Michael D. Glascock, Roberto Hazenfratz Marks. Neutron Activation Analysis: An Overview // Recent Advances in Analytical Techniques: Vol. 3. 2019. Pp. 179–227. doi: 10.2174/9781681085722119030007*

2. *Feray Koçan*. Environmental effects of cyanide gold production from ore // *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. 13 (1). 2021. Pp. 250–264. doi:10.29137/umagd.811352

3. *Иванников С. И.* Извлечение, концентрирование и нейтронно-активационное определение золота применительно к техногенным объектам Дальневосточного региона: дис. ... канд. техн. наук. — Владивосток, 2013. 138 с.

4. *Курбанов Б. И.* Экспрессные нейтронно-радиационные способы контроля процессов переработки золотосодержащих руд и рений содержащих технологических продуктов: дис. ... канд. техн. наук. — Ташкент, 2020. 156 с.

5. *Судыко А. Ф.* Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронно-активационным методом / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции. — Томск: 2016. — С. 620–624.

6. *Акпаралиев Р. Р., Никаноров А. В.* Опыт применения некоторых смол для сорбционного выщелачивания золота на золото извлекающей фабрике ООО «Соврудник» // *Вестник Иркутского Государственного Технического Университета*. — 2011. — № 10. — С. 147–153.

7. *Бекпулатов Ж. М.* Методика применения ионообменных смол при извлечении золота из руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2017. — № 8. — С. 121–125.

8. *Пулатов Х. Л., Турабжанов С. М.* Сорбционные свойства ионообменных смол поликонденсационного типа // *Universum: технические науки*. — 2016. — № 12. — С. 65–71.

9. *Андреева Е. В., Костов М. А., Наземцева Г. И., Чупрынин С. А.* Анализ и обобщение опыта методов переработки отработавших ионообменных смол // *Энергетические установки и технологии*. 2015. №1. — С. 71–77.

10. *Мухин К. Н.* Экспериментальная ядерная физика: монография. — «Атомиздат», Москва, 2012. — 432 с.


11. *Сивухин Д. В.* Атомная и ядерная физика: монография. — «ФИЗМАТЛИТ», Москва, 2016. — 784 с.

12. *Жебентяев А. И., Жерносек А. К., Талуть И. Е.* Аналитическая химия. Химические методы анализа: Учебное пособие. «ИНФРА-М», «Новое знание», Москва, 2011–546 с.

13. *Меретуков М. А.* Золото: химия, минералогия, металлургия: монография. — «Руда и металлы», Москва, 2018. — 528 с.

14. *Музафаров А. М., Самтаров Г. С., Кист А. А.* Опыт применения ядерно-физических методов в горно-металлургическом производстве // *Горный вестник Узбекистана*. — 2015. — №1 — С. 120–124.

15. *Самтаров Г. С., Камиров Ж. М., Музафаров А. М., Кадилов Ф., Латышев В. Е.* Информативные и оперативные ядерно-физические методы контроля технологического процесса // *Горный журнал (Специальный выпуск)*. — 2002. — С. 137–139.

16. *Музафаров А. М., Самтаров Г. С., Кист А. А.* Нейтронно-активационный анализ золота и сопутствующих элементов в технологических продуктах с использованием ^{252}Cf — источника нейтронов // *Горный вестник Узбекистана*. — 2007. — №2. — С. 92–95. 

REFERENCES

1. Casimiro S. Munita, Michael D. Glascock, Roberto Hazenfratz Marks. Neutron Activation Analysis: An Overview. *Recent Advances in Analytical Techniques*. Vol. 3. 2019. Pp. 179–227. doi: 10.2174/9781681085722119030007.

2. Feray Koçan. Environmental effects of cyanide gold production from ore. *Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi*. 13 (1). 2021. Pp. 250–264. doi:10.29137/umagd.811352.

3. Ivannikov S. I. *Iz vlecheniye, kontsentrirvaniye i neytronno-aktivatsionnoye opredeleniye zolota primenitel'no k tekhnogennym ob'yektam Dal'nevostochnogo regiona* [Extraction, concentration and neutron-activation determination of gold in relation to man-made objects of the Far East region], Candidate's thesis, Vladivostok, 2013, 138 p. [In Russ].

4. Kurbanov B. I. *Ekspressnyye neytronno-radiatsionnyye sposoby kontrolya protsessov pererabotki zolotosoderzhashchikh rud i reniy sodержashchikh tekhnologicheskikh produktov* [Express neutron-radiation methods for monitoring the processing of gold-bearing ores and rhenium-containing technological products], Candidate's thesis, Tashkent, 2020, 156 p. [In Russ].

5. Sudyko A. F. Determination of uranium, thorium, scandium and some rare earth elements in twenty-four standard reference materials by the instrumental neutron activation method. *Radioaktivnost' i radioaktivnyye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment]. Materials of the V International Conference. Tomsk, 2016, Pp. 620–624. [In Russ].

6. Akparalyev R. R., Nikanorov A. V. Experience of using some resins for sorption leaching of gold on gold at the extraction plant Sovrudnik LLC. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011, no 10, Pp. 147–153. [In Russ].

7. Bekpulatov Zh.M. Methods of using ion exchange resins in the extraction of gold from ores. *MIAB. Vining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 8, Pp. 121–125. [In Russ].

8. Pulatov H. L., Turabzhanov S. M. Sorption properties of ion-exchange resins of the polycondensation type. *Universum: technical sciences*. 2016, no 12. Pp. 65–71. [In Russ].

9. Andreeva E. V., Kostov M. A., Nazemtseva G. I., Chuprynin S. A. Analysis and generalization of experience in the methods of processing spent ion-exchange resins. *Power plants and technologies*. 2015, no 1. Pp. 71–77. [In Russ].

10. Mukhin K. N. *Eksperimental'naya yadernaya fizika: monografiya* [Experimental nuclear physics: monograph]. "Atomizdat", Moscow, 2012. 432 p. [In Russ].

11. Sivukhin D. V. *Atomnaya i yadernaya fizika: monografiya* [Atomic and Nuclear Physics: monograph]. "FIZMATLIT", Moscow, 2016. 784 p. [In Russ].

12. Zhebentyaev A. I., Zhernosek A. K., Talut I. E. *Analiticheskaya khimiya. Khimicheskiye metody analiza: Uchebnoye posobiye* [Analytical chemistry. Chemical methods of analysis: textbook]. "INFRA-M", "New knowledge", Moscow, 2011. 546 p. [In Russ].

13. Meretukov M. A. *Zoloto: khimiya, mineralogiya, metallurgiya: monografiya* [Gold: chemistry, mineralogy, metallurgy: monograph]. "Ore and Metals", Moscow, 2018. 528 p. [In Russ].

14. Muzafarov A. M., Sattarov G. S., Kist A. A. Experience in the use of nuclear-physical methods in mining and metallurgical production. *Gorniy vestnik Uzbekistan*. 2015, no 1. Pp. 120–124. [In Russ].

15. Sattarov G. S., Kamilov Zh.M., Muzafarov A. M., Kadirov F., Latyshev V. E. Informative and operational nuclear-physical methods of technological process control. *Gorniy Zhurnal (Special issue)*. 2002, Pp. 137–139. [In Russ].

16. Muzafarov A. M., Sattarov G. S., Kist A. A. Neutron – activation analysis of gold and accompanying elements in technological products using ^{252}Cf – a neutron source. *Gorniy vestnik Uzbekistan*. 2007, no 2. Pp. 92–95. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Музафаров Амрулло Мустафаевич – кандидат технических наук, доцент. Главный инженер ЦНИЛ (Центральная научно-исследовательская лаборатория) НГМК;

Мустафоев Муталжон Амрулло углы — инженер ПДО ГМЗ-2 (Планово-диспетчерский отдел гидromеталлургического завода №2) НГМК;

Кулматов Рашид Анорович — доктор химических наук, профессор Национального университета Узбекистана;

Шарафутдинов Улугбек Зиятвич — доктор технических наук, доцент. Заместитель начальника ИЦ по ВНТ (инновационный центр по внедрению новых технологий) НГМК.

Для контактов: Музафаров А. М., e-mail: aa.hamidov@ngmk.uz

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Muzafarov A. M., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Engineer of the Central Scientific Research Laboratory, NMMC;

Mustafоеv M. A., Engineer of the Planning and Dispatching Department of the Hydrometallurgical Plant No. 2, NMMC;

Kulmatov R. A., Professor, Dr. Sci. (Chemical), of the National University of Uzbekistan;

Sharafutdinov U. Z., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of innovation center for the introduction of new technologies, NMMC.

Corresponding author: A. M. Muzafarov, e-mail: u.sharafutdinov@ngmk.uz

Получена редакцией 13.10.2020; получена после рецензии 03.02.2021; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 13.10.2020; received after the review 03.02.2021; accepted for printing 10.02.2021.

