

УДК 539.14+543.4

Метод определения потоков электронов в конденсированных средах, возникающих при гамма-облучении

П. М. Косьянов

Приведены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия фотонов ионизирующего излучения с различными веществами. В частности, рассмотрены фотоэффект и комптоновское рассеяние этих фотонов. При помощи разработанного автором нового метода определения отношения числа комптоновских электронов к числу фотоэлектронов через измерение отношения интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного излучений показано, что тем самым можно определить отношение массового коэффициента сечения некогерентного рассеяния первичного излучения к массовому коэффициенту фотоэлектрического поглощения первичного излучения. Впервые получены новые соответствующие результаты для молибдена и вольфрама. Анализ результатов показал, что имеются существенные расхождения между прежними теоретическими расчётами и опытными данными.

PACS: 78.70.-q

Ключевые слова: фотоэффект, комптоновское рассеяние, отношение числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов, отношение интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного рентгеновского и гамма-излучений.

Введение

При исследовании и моделировании взаимодействия проникающих излучений с веществом [1, 2] одним из источников информации являются потоки электронов, возникающих при некогерентном (комптоновском) рассеянии и при фотопоглощении фотонов гамма- или рентгеновского излучения в различных веществах. Теория фотопоглощения, когерентного и некогерентного рассеяния фотонов с рождением электронов отдачи достаточно детально разработана [3, 4].

Однако экспериментальные данные по одновременному измерению отношений потоков электронов отдачи к потокам фотоэлектронов при облучении вещества «жестким» излучением, т. е. рентгеновским или гамма-излучением, очень скудны. Можно указать только на опыты Д. В. Скобельцына

в газах при помощи камеры Вильсона [5]. Как правило, проводятся отдельные измерения потоков фотоэлектронов или электронов отдачи, при этом для определения соответствующих сечений привязываются к интенсивности первичного потока ионизирующего излучения. Анализ показывает, что данные методы могут приводить к большому числу систематических (аппаратурных и методических) и динамических (временных) погрешностей, требующих отдельного и кропотливого учета. Кроме того, при работе с твердыми телами обычно экспериментально можно регистрировать только электроны с поверхности вещества, загрязнения и дефекты которой приводят к дополнительным трудноразрешимым проблемам.

Поскольку методы энергодисперсионной регистрации электронов отдачи и фотоэлектронов (например, с помощью камеры Вильсона или электронной спектроскопии [5—8]) в конденсированных средах проблематичны, то на первый план выходят задачи по разработке новых экспериментальных методов определения отношений указанных электронных потоков (причем регистрируемых одновременно). Это актуально как для дальнейшего обоснования и уточнения теории взаимодействия жестких квантов излучения с веществом, так и для решения различных прикладных задач

Косьянов Петр Михайлович, профессор.
Тюменский государственный нефтегазовый университет,
Нижневартовский филиал.
Россия, 628600, Тюменская обл. г. Нижневартовск,
ул. Ленина, 2/П.
Тел.: 8 (922) 655-29-49; 8 (3466) 49-10-89.
E-mail: nvftgngu@nv-net.ru, kospiter2012@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

© Косьянов П. М., 2016

материаловедения, включая моделирование рас-
сматриваемых явлений и процессов.

Ранее в работе автора [12] рассмотрена воз-
можность использования потоков характеристиче-
ского и рассеянного веществом первичного излу-
чений в качестве источника информации об ука-
занных электронных потоках. Показано, что от-
ношение массового коэффициента сечения неко-
герентного рассеяния первичного излучения к
массовому коэффициенту фотоэлектрического по-
глощения первичного излучения можно опреде-
лять по отношениям интенсивностей характери-
стического и некогерентно рассеянного излуче-
ний, измеряемых одновременно. При этом (что
важно с экспериментальной точки зрения!) авто-
матически учитываются систематические и дина-
мические погрешности.

Целью данной работы являлось определение
отношения числа комптоновских электронов к
числу фотоэлектронов при помощи вышеуказан-
ного нового метода [12] применительно к молиб-
дену и вольфраму, что является новым экспери-
ментальным результатом, позволяющим, в частно-
сти, сравнить прежние теоретические расчёты и
опытные данные.

Теоретические и экспериментальные основания

В исследуемом диапазоне энергий прони-
кающего излучения (10÷150 кэВ) возможными
процессами взаимодействия жестких фотонов

(γ -квантов) с веществом являются фотоэффект,
комптоновское (некогерентное) и когерентное
рассеяние. В зависимости от энергии излучения и
от вещества преобладающим является тот или
иной тип взаимодействия. Для низких энергий ос-
новную роль играет фотопоглощение фотонов.
Вероятность фотоэффекта быстро падает с ростом
энергии γ -кванта. В случае, если величина переда-
ваемого импульса мала, то рассеяние γ -квантов на
атомных электронах происходит практически без
потери энергии (т. н. рэлеевское или когерентное
рассеяние). При увеличении энергии рентгенов-
ского излучения основным механизмом взаимо-
действия фотонов с веществом становится ком-
птоновское (некогерентное) рассеяние. Причем
необходимо учитывать, что характеристическое
излучение возникает как при фотоэффекте, так и
при некогерентном комптоновском рассеянии.
В обоих случаях из K, L или другой внутренней
оболочки атома выбивается электрон, а затем по-
следующее заполнение возникающей вакансии
электроном с верхней оболочки и приводит к по-
явлению характеристического излучения. Схема
описываемых процессов приведена на рис. 1.

Как уже было сказано, первые опыты по
экспериментальному обнаружению электронов
отдачи и фотоэлектронов при рассеянии рентге-
новских и гамма-лучей в воздухе были выполнены
при помощи камеры Вильсона [5]. Результаты из-
мерений отношений приведены в табл. 1.

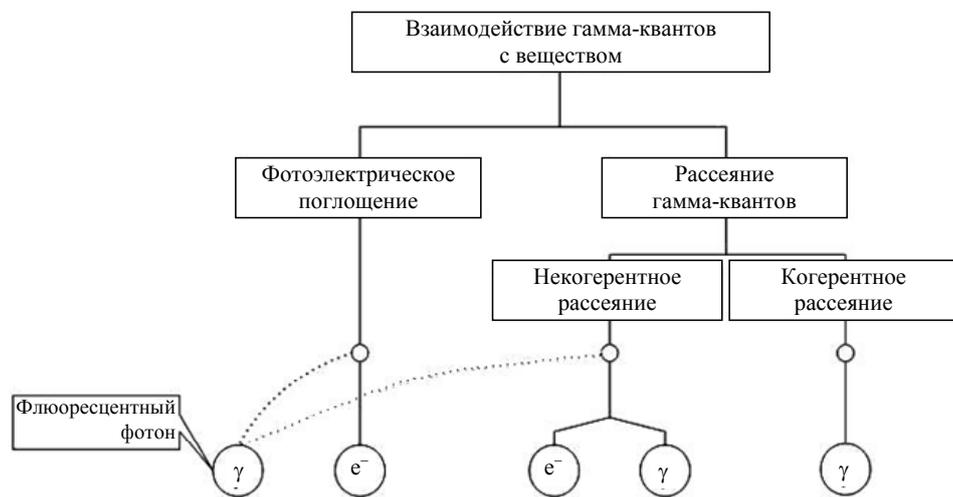


Рис. 1. Схема взаимодействия гамма-квантов с веществом.

Таблица 1

Экспериментальные данные отношений чисел электронов отдачи и фотоэлектронов и соответственно их сечений

№	Длина волны (Å)	Энергия (кэВ)	N_c/N_{pe}	σ/τ
1	0,71	17,49	0,10	0,27
2	0,44	28,23	0,90	1,20
3	0,29	42,83	2,70	3,80
4	0,20	62,21	9,0	10,0
5	0,17	73,06	17,0	17,0
6	0,13	95,55	72,0	32,0

В табл. 1 использованы обозначения: N_c/N_{pe} — отношение числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов, σ/τ — отношение массового коэффициента сечения некогерентного рассеяния первичного жесткого излучения к массовому коэффициенту фотоэлектрического поглощения первичного жесткого излучения. Причём из теоретических предпосылок вытекает, что должно бы выполняться равенство $N_c/N_{pe} = \sigma/\tau$. Однако видно, что с ростом энергии γ -квантов наблюдается значительное отклонение от указанного равенства.

На рис. 2 для сравнения показаны: экспериментальная и теоретическая кривые, причем последняя рассчитана на основе модели [1] с учетом влияния рассеяния на связанных электронах атомов. Как видно, расхождение между кривыми растет с увеличением энергии E первичного кванта излучения. При её превышении 100 кэВ расхождение достигает порядка и более по величине. Понятно, что для согласия теории и опыта подобных экспериментальных данных не достаточно.

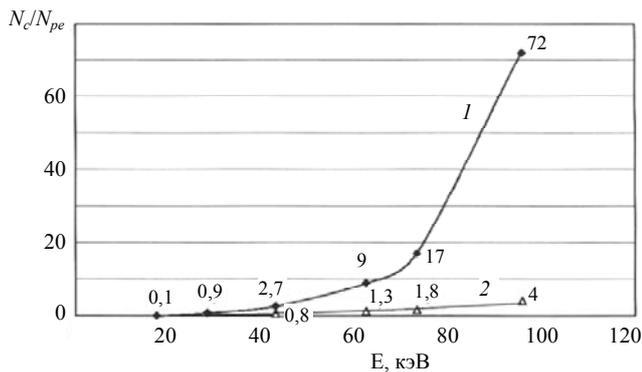


Рис. 2. Зависимости отношения числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов от энергии E первичного кванта излучения: кривая 1 (верхняя) — экспериментальная зависимость; кривая 2 (нижняя) — теоретическая зависимость.

Новый метод и новые результаты

Ранее уже было отмечено, что использовать метод регистрации электронных потоков при помощи камеры Вильсона или методами электронной спектроскопии в твёрдых веществах (особенно в проводящих средах) проблематично. Действительно, на фоне «электронного газа» в глубине проводника выделить и различить фотоэлектроны и электроны отдачи чрезвычайно сложно. Поэтому автором в работе [12] исследована возможность определения электронных потоков по вторичному рентгеновскому или гамма-излучению. При этом необходимо учитывать его изменение при прохождении из глубины вещества наружу (т. н. «матричный эффект»). Наиболее простым и эффективным способом учета матричного эффекта является метод спектральных отношений.

Исследованию и использованию способа спектральных отношений посвящено много работ [9—11]. При этом накоплены данные экспериментально измеренных отношений интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного рентгеновского и гамма-излучений в различных веществах. Учет матричного эффекта в новом методе позволит определять электронные потоки не только в чистых (однокомпонентных), но и в многокомпонентных веществах (например, в сплавах).

В работе [12] обоснован новый метод определения отношения числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов N_c/N_{pe} через измерение отношения интенсивностей характеристического J_1 и некогерентно рассеянного рентгеновского и гамма-излучений J_2 . Это позволяет определить и искомое отношение массового коэффициента сечения некогерентного рассеяния первичного излучения к массовому коэффициенту фотоэлектрического поглощения первичного излучения по формуле:

$$\frac{\sigma_n}{\tau_m} = \frac{N_c}{N_{pe}} = \frac{J_2}{J_1} 2\eta \frac{S_K - 1}{S_K} \frac{p_k}{\alpha} \frac{C}{\left[\frac{(E_0/E_i)^3}{S_k} + 1 \right]} \quad (1)$$

В формуле (1) использованы обозначения: η — коэффициент выхода флуоресценции (в безразмерных единицах); p_k — вероятность перехода атома, возбужденного на K -уровень с испусканием характеристического излучения i -линии; S_K — величина K (или L)-скачка поглощения анализируемого элемента; τ_m — массовый коэффициент фотоэлектрического поглощения первичного излучения определяемого элемента [$\text{м}^2/\text{кг}$]; E_i и E_0 — энергии характеристического и некогерентно рассеянного излучений; C — массовая концентрация (весовая доля) анализируемого элемента; α — коэффициент анизотропии углового распределения некогерентно рассеянного излучения.

Для угла рассеяния $\theta = 90^\circ$ и для энергий от 10 кэВ до 100 кэВ α меняется в пределах от 0,4 до 0,2. При этом вероятность перехода атома, возбужденного на K -уровень с испусканием характеристического излучения i -линии, $p_k \geq 0,9$ [13], выход флуоресценции η для K -серии можно рассчитать по формуле Стефенсона [14]:

$$\eta = \frac{bZ^4}{1 + bZ^4} \quad (2)$$

В формуле (2) Z — атомный номер элемента, $b = 1,127 \cdot 10^{-6}$.

Полученное выражение (1) позволяет определить отношение массового коэффициента сечения некогерентного рассеяния первичного излучения к массовому коэффициенту фотоэлектрического

ского поглощения первичного излучения по экспериментально измеренным отношениям интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного излучений известной энергии в данном веществе, а, следовательно, и искомое отношение числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов.

На рис. 3 и 4 представлены экспериментальные зависимости отношений интенсивностей характеристического J_1 и некогерентно рассеянного гамма-излучения с учётом матричного эффекта J_3 (то есть J_2 без искажения [10]) соответственно для вольфрама и молибдена.

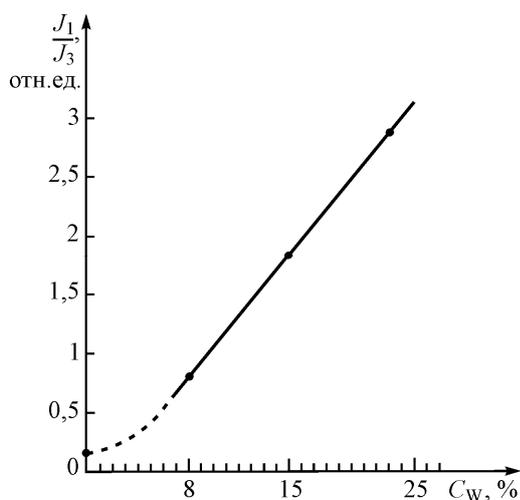


Рис. 3. Зависимость измеренных отношений интенсивностей характеристического J_1 и некогерентно рассеянного гамма-излучения с учётом матричного эффекта J_3 от содержания W в синтезированных эталонных пробах.

Измерения проводились как в искусственно синтезированных эталонных пробах (с гарантированно известным содержанием элементов), так и в концентратах с установленными методами ГОСТ содержаниями элементов.

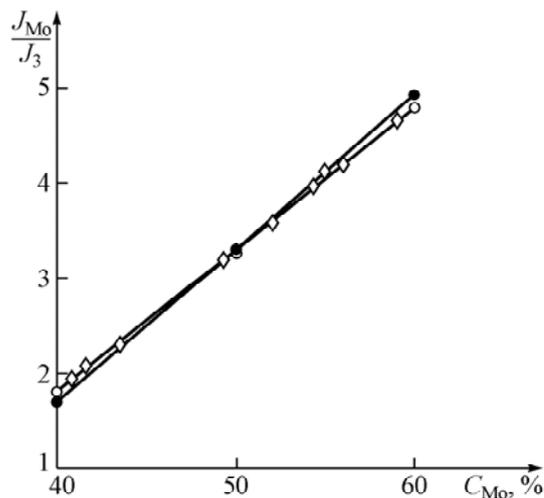


Рис. 4. Зависимость отношений интенсивностей характеристического J_{Mo} (J_1) и некогерентно рассеянного гамма-излучения с учётом матричного эффекта J_3 от содержания молибдена. Синтезированные эталоны • — проба 1, ○ — проба 2; ◇ — молибденовый концентрат.

Экстраполируя результаты измерений, при облучении $Mo(Z = 42)$ гамма-излучением радионуклида Am^{241} ($E_0 = 60$ кэВ) получаем отношение $\frac{J_2}{J_1} = 0,12 \pm 0,03$ (для $C = 1$), соответственно, отношение $\frac{\sigma_n}{\tau_m} = 0,075 \pm 0,02$. При облучении $W(Z = 74)$ гамма-излучением радионуклида Co^{57} ($E_0 = 120$ кэВ) получаем отношение $\frac{J_2}{J_1} = 0,08 \pm 0,02$ (для $C = 1$), соответственно, отношение $\frac{\sigma_n}{\tau_m} = 0,25 \pm 0,05$.

Для сравнения в табл. 2 приведены расчеты отношений сечений электронов отдачи к сечениям фотоэлектронов, полученных на основе теоретических данных, приведенных в работе [3].

Таблица 2

Теоретические данные отношений сечений электронов отдачи к сечениям фотоэлектронов для различных элементов в зависимости от энергии первичного излучения

	C (Z = 6)	Al (Z = 13)	Cu (Z = 29)	Sn (Z = 50)	Pb (Z = 82)
E (кэВ)	σ_n/τ_m	σ_n/τ_m	σ_n/τ_m	σ_n/τ_m	σ_n/τ_m
5,12	0,003	0,00001	—	—	—
10,24	0,096	0,0030	0,000096	—	—
25,60	0,184	0,092	0,000092	0,000092	—
51,20	2,80	0,084	0,00084	0,000084	0,000084
102,4	24,67	0,587	0,0074	0,00074	0,000074
256,0	190	5,70	0,180	0,0057	0,00057

Из сравнения результатов следует, что предварительные выводы о возможном существенном расхождении теоретических и экспериментальных

данных подтверждаются. Действительно, для $Mo(Z = 42)$, который находится в таблице Менделеева между Cu ($Z = 29$) и Sn ($Z = 50$), следовало

ожидать значение отношений сечений (по данным табл. 2 для $E = 51,20$ кэВ) в пределах $0,000084 < \frac{\sigma_n}{\tau_m} < 0,0084$, а не экспериментального значения

$\frac{\sigma_n}{\tau_m} = 0,075 \pm 0,02$. Аналогично для $W(Z = 74)$, который находится между $Sn(Z = 50)$ и $Pb(Z = 82)$,

ожидаемое значение отношений сечений (по данным табл. 2 для $E = 102,4$ кэВ) в пределах $0,000074 < \frac{\sigma_n}{\tau_m} < 0,00074$, но никак не экспериментального значения

значения $\frac{\sigma_n}{\tau_m} = 0,25 \pm 0,05$.

Таким образом, основываясь на предложенном новом методе определения отношения числа комптоновских электронов к числу фотоэлектронов через измерение отношения интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного излучений, показано, что тем самым можно одновременно определить отношение массового коэффициента сечения некогерентного рассеяния первичного излучения к массовому коэффициенту фотоэлектрического поглощения первичного излучения. Впервые получены новые соответствующие результаты для молибдена и вольфрама. Анализ результатов показывает, что имеются существенные (на порядок и более) однонаправленные расхождения между прежними теоретическими расчётами и опытными данными при определении отношений соответствующих сечений для тяжелых атомов. То же самое утверждение можно сделать и применительно к прежним измерениям этих отношений для легких атомов (в воздухе) при помощи камеры Вильсона.

Заключение

Впервые определены отношения числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов по экспериментально измеренным отношениям интенсивностей характеристического и некогерентно рассеянного гамма-излучения с учетом матричного эффекта на атомах молибдена и вольфрама. Новые результаты измеренных одновременно отношений сечений для тяжелых атомов при помощи разрабо-

танного автором метода, а также старые измерения этих отношений для легких атомов (в воздухе) при помощи камеры Вильсона при их сравнении с теоретическими расчетами показывают, что для рентгеновского и гамма-излучений рассматриваемого диапазона энергий (10÷150 кэВ) наблюдается значительное (на порядок и более) однонаправленное расхождение.

Необходимы дальнейшие исследования выявленного эффекта для возможно большого числа элементов в средней области таблицы Менделеева в интересах установления причин расхождения теоретических расчетов и экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянова Е. Г., Подоляко С. В. Численное моделирование трансформации рентгеновского излучения в объектах с учетом влияния форм-факторов на угловое распределение фотонов. Препринт ИПМ № 6. — М.: Издательство ИПМ, 2004.
2. Косьянов П. М., Клочков А. А., Матейко А. И. / Труды международной научно-технической конференции «Современные металлургические материалы и технологии» (Санкт-Петербург. 2011.). С. 154—157.
3. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. — М.: ИИЛ, 1956.
4. Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. — М.: Наука, 1981.
5. Шпольский Э. В. Атомная физика. Т. 1. — М.: Наука, 1974.
6. Шпольский Э. В. // Успехи физических наук. 1950. Т. 42. № 2. С. 315.
7. Бриггс Д. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. — М.: Мир, 1987.
8. Thompson M., Baker M. D., Christie A., Tyson J. F. Auger Electron Spectroscopy, Chemical analysis: a series of monographs on analytical chemistry and its applications. Vol. 74. — New York: Wiley-Interscience, 1985.
9. Мамиконян С. В. Аппаратура и методы флуоресцентного рентгенорадиометрического анализа. — М.: Атомиздат, 1976.
10. Косьянов П. М. Учёт матричного эффекта при количественном рентгеновском анализе вещества сложного химического состава. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005.
11. Косьянов П. М. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 15.
12. Косьянов П. М. // Инженерная физика. 2014. № 9. С. 17.
13. Моррисон Д. Физические методы анализа следов элементов. — М.: Мир, 1967.
14. Лосев Н. Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. — М.: Наука, 1969.

New results on the electron streams measurements in condensed substances during their gamma irradiation

P. M. Kosianov

Nizhnevartovskii Branch of the Tyumen State Oil-and-Gas University
2/P Lenin str., Nizhnevartovsk, 628600, Russia
E-mail: nvftgngu@nv-net.ru

Received February 10, 2016

We present new results of theoretical and experimental studies of the interaction of the ionizing radiation photons with various substances. In particular, the photoelectric effect and Compton scattering of these photons are examined. Using a new developed method of determining the ratio of the number of Compton electrons to the number of photoelectrons, the corresponding results for molybdenum and tungsten have been obtained for the first time. Analysis of the results showed that there are significant discrepancies between previous theoretical calculations and experimental data.

PACS: 78.70.-q

Keywords: photo effect, Compton scattering, ratio of the number of recoil electrons to the number of photoelectrons, ratio of the intensities of the characteristic and incoherently scattered of X-ray and gamma emissions.

REFERENCES

1. E. G. Luk'yanova and S. V. Podolyako, *Numerical simulation of X-ray transformation in the objects, taking into account the effect of form factors on the angular distribution of photons* (Preprint IPM No. 6, Moscow, 2004).
2. P. M. Kosianov, A. A. Klochkov, and A. I. Mateyko, in *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Advanced Metal Materials and Technologies»* (Saint Petersburg, 2011.). pp. 154-157.
3. W. Heitler, *The quantum theory of radiation* (At the Clarendon Press, Oxford, 1954; IIL, Moscow, 1956).
4. A. I. Akhiezer and V. B. Beresteckiy, *The Quantum Electrodynamics* (Nauka, Moscow, 1981) [in Russian].
5. E. V. Shpol'skiy, *Atomic Physics, V.1* (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
6. E. V. Shpol'skiy, *Phys. Usp.* **42**, 315 (1950).
7. D. Briggs, *Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy* (Mir, Moscow, 1987) [in Russian].
8. M. Thompson, M. D. Baker, A. Christie, and J. F. Tyson, *Auger Electron Spectroscopy, Chemical Analysis: a Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications, Vol. 74*, (Wiley-Interscience, New York, 1985).
9. S. V. Mamikonyan, *Apparatus and Methods of Fluorescent X-ray Radiometric Analysis* (Atomizdat, Moscow, 1976) [in Russian].
10. P. M. Kosianov, *Calculations of Matrix Effects in Quantitative X-ray Analysis of the Substance Having Complex Chemical Composition* (Izd-vo YuUrGU, Chelyabinsk, 2005) [in Russian].
11. P. M. Kosianov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 15 (2012).
12. P. M. Kosianov, *Inzhenernaya Fizika*, No. 9, 17 (2012).
13. G. H. Morrison, *Trace Analysis of Physical Methods* (A division of John Wiley and Sons, New York – London – Sydney, 1965; Mir, Moscow, 1967).
14. N. F. Losev, *Quantitative X-ray Spectrum Fluorescence Analysis* (Nauka, Moscow, 1969) [in Russian].