

Измерение интенсивности спектральных линий по дискретным отсчётам линейчатого спектра

***П.В. Ващенко^{1,2}, В.А. Лабусов^{1,2,3}**

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 1

²ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 1

³Новосибирский государственный технический университет,
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20

*Адрес для переписки: Ващенко Павел Владимирович, E-mail: vaschenko@vmk.ru

Поступила в редакцию 18 ноября 2021 г., после доработки – 22 ноября 2021 г

В атомно-эмиссионной спектрометрии в настоящее время в составе анализаторов спектров широко применяются линейки фотодетекторов. Спектр, полученный с помощью такого типа детектора, представляет собой дискретную последовательность цифровых значений выходных сигналов фотоячеек. Одним из способов количественного определения концентрации элемента в исследуемой пробе является измерение интенсивности его аналитической линии путем интегрирования участка спектра по нескольким отсчетам в окрестности этой линии или аппроксимация участка спектра профилем формы линии. Как правило, ввиду высокой насыщенности спектральными линиями атомно-эмиссионных спектров область расчета их интенсивности ограничивают несколькими отсчетами. Такое ограничение в случае дрейфа спектральной линии относительно фотоячеек линейки приводит к погрешности измерения её интенсивности, величина которой тем больше, чем меньше количество отчётов используется при интегрировании. Цель работы – поиск оптимального способа расчета интенсивности линии для снижения погрешности измерения её интенсивности, а также оптимального размера области расчета. Для имитации дрейфа спектральных линий относительно фотоячеек проведено моделирование и экспериментально зарегистрирован набор спектров лампы полого катода (Cu, Zn) с разными положениями спектральных линий относительно фотоячеек линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000. В каждом следующем спектре набора относительно предыдущего смещение линий составило 2 и 1 мкм для линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 соответственно. Установлено, что линейный способ интерполяции приводит к существенному снижению влияния дрейфа спектральных линий на относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерения интенсивности для обоих типов линеек в сравнении со ступенчатым. Также показано, что дальнейшее снижение этого разброса возможно путём выбора оптимальной области интегрирования. Для выбранных спектральных линий минимальная погрешность измерения, вызванная дрейфом спектра относительно фотоячеек линеек фотодетекторов, при линейном способе интерполяции для БЛПП-2000 составляет 0.25 и 0.23 % при размере области интегрирования 1.6 и 3.1 отсчета, для БЛПП-4000 – 0.4 и 0.28 % при 1.0 и 2.7 отсчета соответственно.

Ключевые слова: оптическая спектрометрия, атомно-эмиссионный, анализатор спектров, МАЭС, линейка фотодетекторов, спектральная линия, интенсивность, интерполяция.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2021, vol. 25, no. 4, pp. 350-357

DOI: 10.15826/analitika.2021.25.4.012

Measuring the intensity of spectral lines from discrete counts of line spectra

***P.V. Vashchenko^{1,2}, V.A. Labusov^{1,2,3}**

¹Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Koptuyuga, 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²VMK-Optoelektronika, pr. Akademika Koptuyuga, 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University,
pr. K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

*Corresponding author: Pavel V. Vashchenko, E-mail: vaschenko@vmk.ru

Submitted 18 November 2021, received in revised form 22 November 2021

In atomic emission spectrometry, photodetector arrays are widely used in spectrum analyzers. A spectrum obtained with detectors of this type is a discrete sequence of digital values of photocell output signals. One way to quantify the concentration of an element in a test sample is to measure the intensity of its analytical line by integrating a region of the spectrum over several counts in the vicinity of this line or by approximating a region of the spectrum with a line shape profile. As a rule, due to the high saturation of atomic emission spectra with spectral lines, the region for calculating the spectral line intensity is limited to several counts. In the case of spectral line drift relative to the photocells of photodetector arrays, this limitation leads to an intensity measurement error, which is the greater, the smaller the number of counts used in integration. The objectives of this study are to determine the optimal size of the computational domain and develop an optimal method for calculating the line intensity to reduce the intensity measurement error. To simulate the drift of spectral lines relative to photocells, we have simulated and recorded a set of spectra of a hollow cathode lamp (Cu, Zn) with different positions of spectral lines relative to the photocells of BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector arrays. In each next spectrum of the set, the spectral lines were shifted relative to those in the previous spectrum by 2 and 1 μm for BLPP-2000 and BLPP-4000, respectively. It has been shown that compared to stepwise interpolation, linear interpolation significantly reduces the effect of the drift of spectral lines on the RMSD of the measured intensities for both types of arrays. In addition, this effect can be further decreased by choosing an optimal range of integration. In the linear interpolation for the selected spectral lines, the minimum measurement error due to the spectrum drift relative to the photocells of photodetector arrays for BLPP-2000 is 0.25 and 0.23% for a range of integration of 1.6 and 3.1 counts, respectively, and for BLPP-4000, it is 0.4 and 0.28% for 1.0 and 2.7 counts, respectively.

Keywords: Optical spectrometry, atomic emission, spectrometer, spectrum analyzer, MAES, photodetector arrays, spectral line, intensity.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) широко применяются многоканальные анализаторы эмиссионных спектров (МАЭС) на основе сборок линеек фотодетекторов [1-3]. Спектр, полученный с помощью анализаторов МАЭС, представляет собой дискретную последовательность цифровых значений выходных сигналов фотодетекторов линеек фотодетекторов. Количественное определение концентрации элемента в исследуемой пробе методом АЭС проводится путем измерения интенсивности его аналитической линии [4].

Одним из способов расчета интенсивности линии является интегрирование и аппроксимация участка спектра в окрестности линии. Обычно атомно-эмиссионные спектры настолько насыщены спектральными линиями, что для измерения интенсивности выбранной линии приходится ограничивать область расчета интенсивности до 2-3 отсчетов с целью снижения влияния на неё близлежащих спектральных линий других элементов.

При изменении температуры корпуса спектрального прибора возможен дрейф спектральной линии вдоль фоточувствительной поверхности линеек фотодетекторов. Ограничение области расчета интенсивности спектральной линии и дрейф относительно фотодетекторов линейки приводит к погрешности измерения интенсивности, величина которой тем больше, чем меньшее количество отсчетов используется при расчете интенсивности. Снижение погрешности измерения интенсивности спектральной линии возможно путём выбора оптимального способа расчета интенсивности, а также оптимального размера области расчета интенсивности.

Целью работы является поиск оптимального способа расчета интенсивности спектральной линии для снижения погрешности её измерения, возникающей за счёт дрейфа линии относительно фотодетекторов линейки фотодетекторов, а также оптимального размера области расчета.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Зарегистрированный спектр можно представить в виде множества отсчетов $\{S_k\}$, где k – номер отсчета, S_k – значение амплитуды k -го отсчета. Интенсивность спектральной линии с центром в точке x_0 можно представить в виде определенного интеграла:

$$I = \int_{x_0 - \Delta/2}^{x_0 + \Delta/2} f(x) \cdot dx,$$

где $x \in R$ – координата вдоль линейки фотодетекторов, $f(x) = S_k$, Δ – область интегрирования.

В простейшем случае значение функции $f(x)$ в промежуточных значениях может быть определено ступенчатой интерполяцией – значением функции в ближайшем отчёте. Данный способ до недавнего времени использовался в качестве базового в ПО Атом [4].

При линейной интерполяции значение функции $f(x)$ в промежуточных значениях определяется по формуле:

$$f(x) = f(l) + \frac{f(m) - f(l)}{m - l} (x - l) \text{ при } l \leq x \leq m,$$

где l , m – ближайшие к x отчёты слева и справа соответственно.

На рис. 1 представлены примеры расчета интенсивности спектральной линии с областью

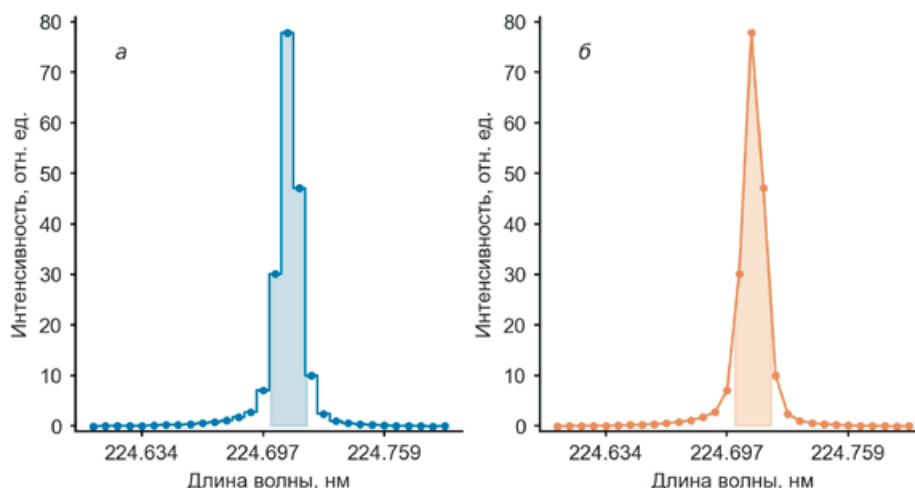


Рис. 1. Расчет интенсивности спектральной линии (область интегрирования $\Delta = 3$ отсчета) при разных способах интерполяции: *а* – ступенчатом, *б* – линейном.

Fig. 1. Calculation of the spectral line intensity (range of integration $\Delta = 3$ counts) using stepwise (*a*) and linear interpolation (*b*).

интегрирования $\Delta = 3$ отсчета при ступенчатом и линейном способе интерполяции.

Как правило, при использовании дуговых источников возбуждения спектра ширина спектральной линии много меньше аппаратной функции спектрального прибора. Таким образом, форма контура спектральной линии определяется аппаратной функцией спектрального прибора и апертурными характеристиками фотоячеек линейки [5]. Для её аппроксимации предлагается использовать функцию Фойгта, записанную в следующем виде [6]:

$$F(x) = (1 - r) \cdot G(x) + r \cdot L(x) \quad (1)$$

$$G(x) = \frac{I}{w(x)} \sqrt{\frac{4 \cdot \ln 2}{\pi}} e^{-4 \cdot \ln 2 \frac{(x-x_0)^2}{w(x)^2}}$$

$$L(x) = \frac{2I/\pi \cdot w(x)}{1 + 4(x - x_0)^2/w(x)^2}$$

$$w(x) = \frac{2w_0}{1 + e^{\alpha(x-x_0)}}$$

где w_0 , α , r – ширина, асимметрия и доля Лоренца соответственно – параметры, которые могут быть рассчитаны по одиночным близлежащим спектральным линиям [7].

На рис. 2 представлен пример расчета интенсивности спектральной линии путем аппроксимации формой контура спектральной линии при $\Delta = 3$ и $\Delta = 5$ отсчетов.

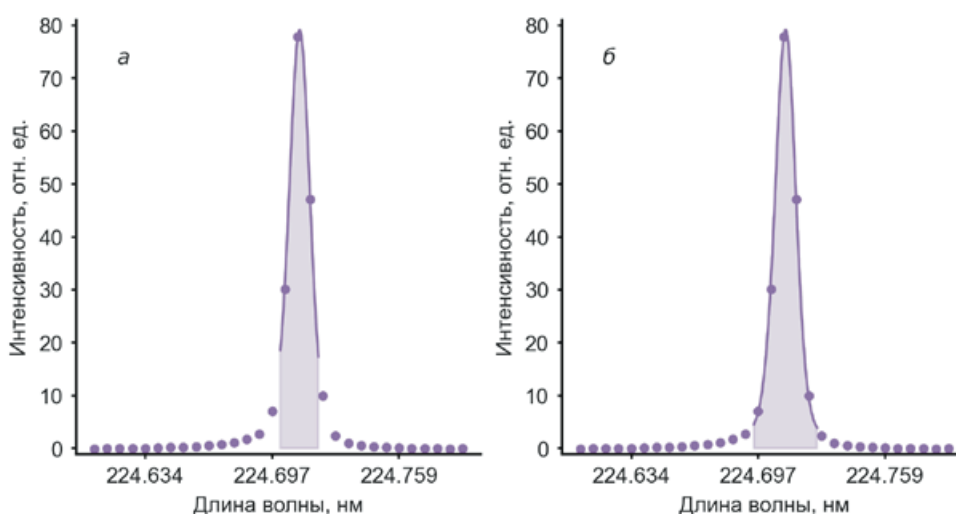


Рис. 2. Расчет интенсивности спектральной линии путем аппроксимации формой контура спектральной линии при разной области интегрирования Δ : *а* – 3 отсчета, *б* – 5 отсчетов.

Fig. 2. Calculation of the spectral line intensity by approximating the spectral line contour with a range of integration Δ of 3 counts (*a*) and 5 counts (*b*).

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Регистрацию эмиссионного спектра линейкой фотодетекторов можно представить в виде:

$$s_k = \bar{s}_k + \xi_k \text{ и}$$

$$\bar{s}_k = \int F(x - x_0) \cdot A(x - k) dx ,$$

где $\xi_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k^2)$ – случайный шум, $F(x)$ – форма контура спектральной линии (1) и $A(x)$ – форма контура апертурных характеристик. Расчет дисперсии шума σ_k^2 производится по формуле [8]:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{\text{чт}}^2 + \frac{100}{c} \cdot \bar{s}_k} ,$$

где $\sigma_{\text{чт}}$ – шум чтения фотоячейки, c – зарядовая емкость фотоячейки в электронах (е).

Для имитации дрейфа спектральной линии относительно фотоячеек линейки смоделирован набор спектров. В каждом спектре положение спектральной линии x_0 смещалось на 2 мкм относительно предыдущего при размере фотоячейки 14 мкм. Параметры формы контура спектральной линии были выбраны для типичных регистрируемых линий на спектральном приборе «Гранд» [3]: ширина $w_0 = 1.4, 2.0, 3.0$ и 4.0 отсчета, асимметрия $a = 0$, доля Лоренца $r = 0.1$. Форма контура апертурных характеристик была выбрана прямоугольной с шириной равной размеру фотоячейки. Дисперсия шума рассчитывалась при $\sigma_{\text{чт}} = 0.0125$ отн. ед., $c = 200000$ е, что соответствует параметрам линейки фотодетекторов БЛПП-2000 [8]. Каждый спектр получен со 100 накоплениями, интенсивность линии $I = 100$ отн. ед.

На рис. 3 изображена зависимость рассчитанной интенсивности спектральной линии с шириной

$w_0 = 1.4$ (рис. 3, а) и 3.0 (рис. 3, б) в случае, если область интегрирования $\Delta = 3$ отсчета. Видно, что при смещении спектральной линии наблюдается модуляция интенсивности и относительное среднее квадратическое отклонение (ОСКО) интенсивности зависит не только от ширины линии, но и от способа её расчета.

На рис. 4 представлены зависимости ОСКО рассчитанной интенсивности линии от области интегрирования при ширине линии $w_0 = 1.4, 2.0, 3.0$ и 4.0 соответственно. На графиках видно, что погрешность расчета интенсивности зависит от способа расчета: применение линейного метода интерполяции и аппроксимация профилем формы линии в среднем в 5 и 50 раз соответственно снижает уровень ОСКО интенсивности в сравнение с интегрированием со ступенчатым способом интерполяции.

Однако уменьшение количества накоплений приводит к росту шума регистрируемого сигнала, что отражается на ОСКО интенсивности спектральной линии. На рис. 5 в качестве примера приведены ОСКО измеренной интенсивности линии с шириной $w_0 = 1.4$ при 1 и 100 накоплениях. Видно, что в случае одного накопления уровень погрешности при интегрировании с линейной интерполяцией (рис. 5, б) и аппроксимацией формой контура (рис. 5, в) сравним. При этом математическая сложность расчета формы контура и интенсивности линии путем аппроксимации формой существенно выше.

Снижение интенсивности спектральной линии со 100 до 1 отн. ед. также приводит к росту ОСКО интенсивности. На рис. 6 видно, что расчет интенсивности путем аппроксимации формой контура (рис. 6, в) дает в среднем результаты не лучше, чем простое интегрирование сигнала с линейной интерполяцией (рис. 6, б).

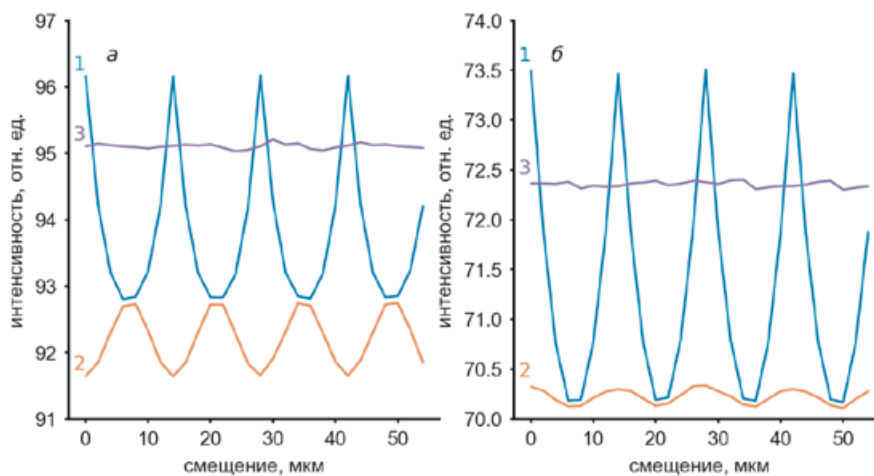


Рис. 3. Зависимость интенсивности спектральной линии (область интегрирования $\Delta = 3$ отсчета) при различной ширине линии w_0 : а – 1.4 отсчета, б – 3.0 отсчета (1 – интегрирование со ступенчатым способом интерполяции, 2 – интегрирование с линейным способом интерполяции, 3 – аппроксимация формой контура).

Fig. 3. Spectral line intensity (range of integration $\Delta = 3$ counts) for a line width w_0 of 1.4 counts (a) and 3.0 counts (b) (integration with stepwise interpolation (1), integration with linear interpolation (2), and line shape approximation(3))

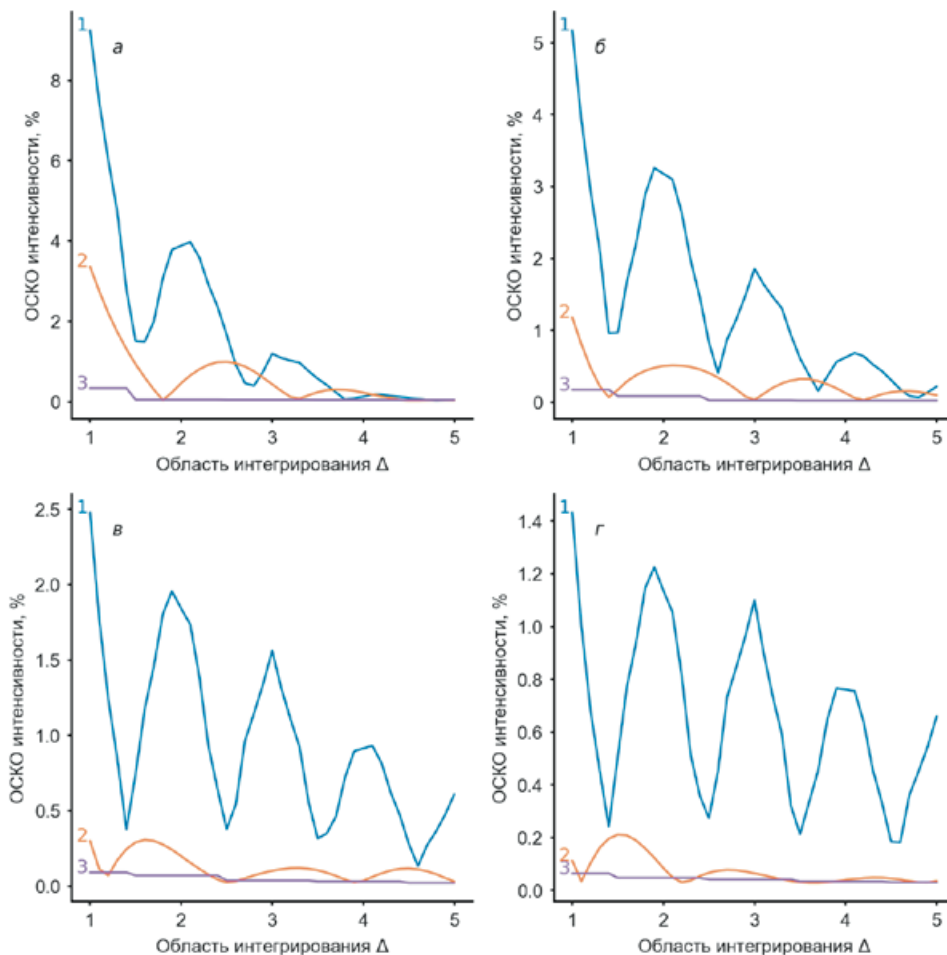


Рис. 4. Зависимость ОСКО измеренной интенсивности спектральной линии от области интегрирования при различной ширине линии w_0 : а – 1.4, б – 2.0, в – 3.0 и г – 4.0 отсчета (1 – интегрирование со ступенчатым способом интерполяции, 2 – интегрирование с линейным способом интерполяции, 3 – аппроксимация формой контура).

Fig. 4. RMSD of the measured spectral line intensity versus the range of integration for a line width w_0 of 1.4 (a), 2.0 (б), 3.0 (c), and 4.0 (d) counts (integration with stepwise interpolation (1), integration with linear interpolation (2), and line shape approximation(3)).

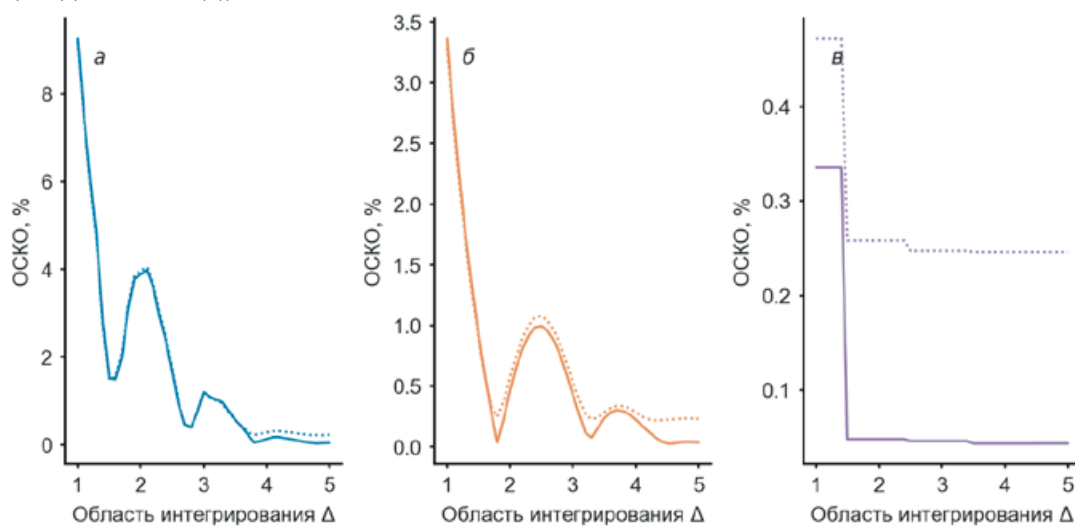


Рис. 5. Зависимость ОСКО измеренной интенсивности линии с 1 и 100 накоплениями при различных способах расчета интенсивности: а – интеграл со ступенчатым способом интерполяции, б – интеграл с линейным способом интерполяции, в – аппроксимация формой контура спектральной линии (пунктирной линией отмечена зависимость с 1 накоплением, непрерывной линией со 100 накоплениями).

Fig. 5. RMSD of the measured line intensity with 1 (dashed curves) and 100 (solid curves) accumulations for different methods of intensity calculation: integration with stepwise interpolation (a), integration with linear interpolation (б), and spectral line shape approximation (c).

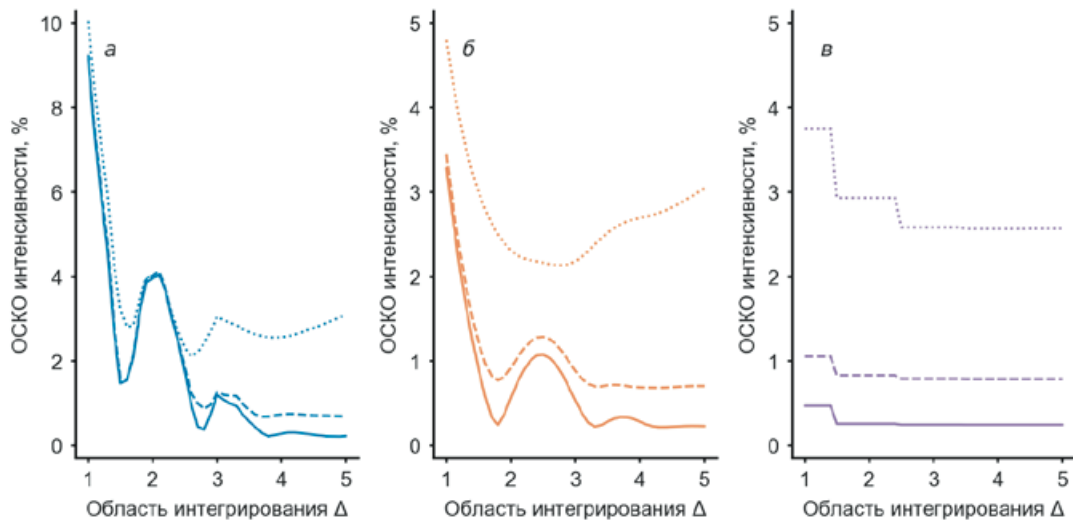


Рис. 6. Зависимость ОСКО измеренной интенсивности линии при интенсивности линии 1, 10 и 100 отн. ед. при различных способах расчета интенсивности: *а* – интеграл со ступенчатым способом интерполяции, *б* – интеграл с линейным способом интерполяции, *в* – аппроксимация формой контура спектральной линии (пунктирной линией отмечена зависимость полученная при интенсивности линии 1 отн. ед., прерывистой – 10 отн. ед., непрерывной – 100 отн. ед.).

Fig. 6. RMSD of the measured line intensity versus the range of integration at line intensities of 1, 10, and 100 rel. units for different methods of intensity calculation: integration with stepwise interpolation (*a*), integration with linear interpolation (*b*), spectral line shape approximation (*c*) (dotted curves correspond to a line intensity of 1 rel. units, dashed curves to 10 rel. units, and solid curves to 100 rel. units).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для имитации дрейфа спектральных линий относительно фотоячеек в работе использован спектральный прибор «Гранд» [3], в котором в качестве системы регистрации спектров по очереди устанавливались анализатор МАЭС со сборкой из 14 линеек фотодетекторов БЛПП-2000 (количество фотоячеек 2048 высотой 1 мм и шагом структуры

14 мкм) и анализатор МАЭС со сборкой из 14 линеек БЛПП-4000 (количество фотоячеек 4096 высотой 0,2 мм и шагом структуры 7 мкм). Входная щель спектрометра была установлена на подвижный столик с микровинтом, позволяющим смещать изображение спектра в плоскости регистрации относительно фотоячеек линеек. Величина шага смещения спектра составила 2 мкм и 1 мкм для линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 соответственно. В качестве стабильного

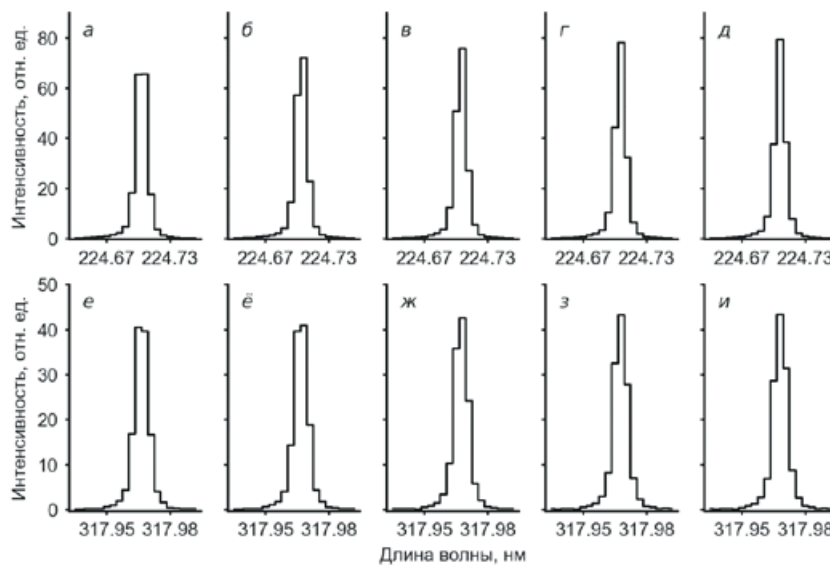


Рис. 7. Участки спектра лампы с полым катодом (Cu, Zn), зарегистрированные линейками: *а-д* – БЛПП-2000 (шаг смещения 2 мкм), *е-и* – БЛПП-4000 (шаг смещения 1 мкм).

Fig. 7. Regions of the spectrum of a hollow cathode lamp (Cu, Zn) recorded by BLPP 2000 (shift of 2 μm) (*a-d*) and BLPP 4000 (shift of 1 μm) (*e-i*).

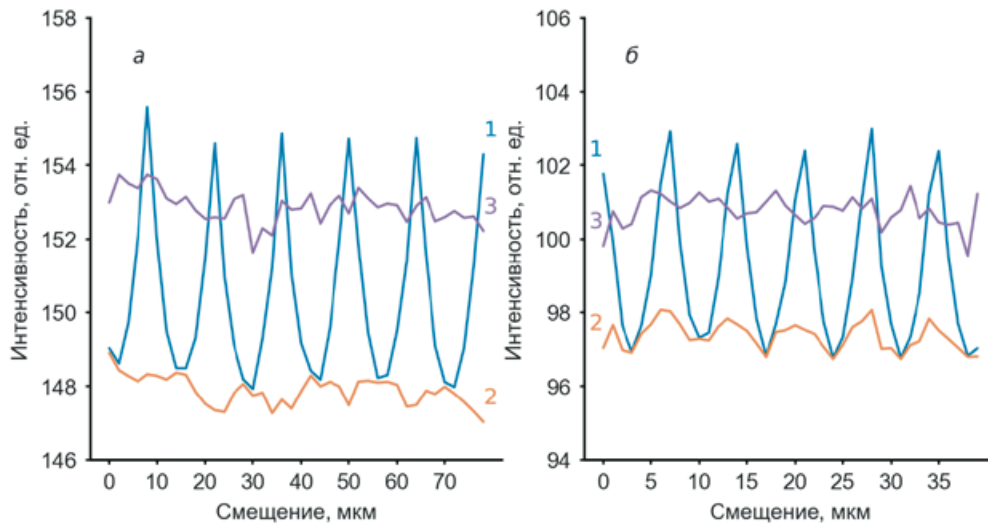


Рис. 8. Зависимость интенсивности спектральной линии от её смещения для линеек: *а* – БЛПП-2000, *б* – БЛПП-4000 (1 – интегрирование со ступенчатым способом интерполяции, 2 – интегрирование с линейным способом интерполяции, 3 – аппроксимация формой контура)

Fig. 8. Spectral line intensity versus line shift for BLPP 2000 (*a*) and BLPP-4000 (*b*) arrays (integration with stepwise interpolation (1), integration with linear interpolation (2), and line shape approximation (3)).

во времени источника линейчатого спектра использована лампа с полым катодом (Cu, Zn), дрейф интенсивности линий которой составляет не более 1 % в час. С помощью данной установки был получен набор спектров лампы полого катода с разными положениями спектральных линий относительно фотоячеек. Каждый спектр зарегистрирован с 10 накоплениями. На рис. 7 для примера приведены участки спектра лампы, зарегистрированные линейками БЛПП-2000 и БЛПП-4000, при нескольких последовательных смещениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8 представлена зависимость интенсивности линии от величины смещения при расчете интенсивности путем интегрирования со ступенчатым и линейным способом интерполяции, а также аппроксимации контуром формы линии. Область расчета интенсивности $\Delta = 3$ отсчета. Из графиков видно, что линейный способ интерполяции и аппроксимация формой контура спектральной линии приводит, как и при моделировании, к существенному снижению разброса результатов измерения интенсивности для обоих типов линеек.

На рис. 9 видно, как и при моделировании, что использование линейного способа интерполяции дает

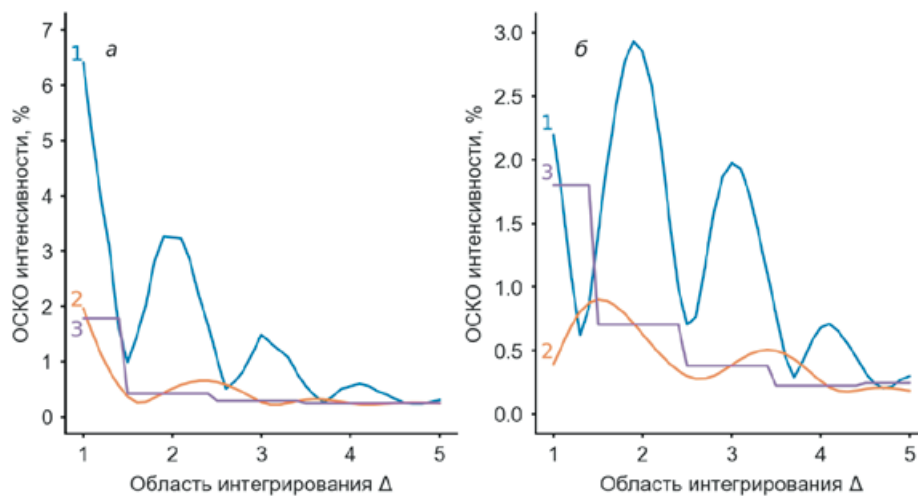


Рис. 9. Зависимость ОСКО интенсивности спектральной линии от области интегрирования Δ для линеек: *а* – БЛПП-2000, *б* – БЛПП-4000 (1 – интегрирование со ступенчатым способом интерполяции, 2 – интегрирование с линейным способом интерполяции, 3 – аппроксимация формой контура).

Fig. 9. RMSD of the spectral line intensity versus the range of integration Δ for BLPP 2000 (*a*) and BLPP-4000 (*b*) arrays (integration with stepwise interpolation (1), integration with linear interpolation (2), and line shape approximation (3)).

существенно более низкую ОСКО интенсивности в сравнении со ступенчатым способом интерполяции. Расчет интенсивности путем аппроксимации формой контура спектральной линии не дает заметного снижения ОСКО интенсивности при 10 накоплениях и интенсивностях линии даже около 185 и 130 отн. ед. При этом данный способ имеет значительно большую вычислительную сложность.

Для зарегистрированных спектральным прибором «Гранд» спектральных линий минимальная погрешность измерения, вызванная дрейфом спектра относительно фотоячеек линеек фотодетекторов, при линейном способе интерполяции для БЛПП-2000 (рис. 9, а) составляет 0.25 и 0.23 % при размере области интегрирования 1.6 и 3.1 отсчета, а для БЛПП-4000 (рис. 9, б) – 0.4 и 0.28 % при 1.0 и 2.7 отсчета соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для имитации дрейфа спектральных линий относительно фотоячеек было проведено моделирование и экспериментально зарегистрирован набор спектров лампы полого катода (Cu, Zn) с разными положениями спектральных линий относительно фотоячеек линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000. В каждом следующем спектре набора относительно предыдущего смещение линий составило 2 и 1 мкм для линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 соответственно.

Показано, что линейный способ интерполяции приводит к существенному снижению влияния дрейфа спектральных линий на ОСКО измеренной интенсивности для обоих типов линеек в сравнении со ступенчатым. Применение формы контура спектральной линии для расчета интенсивности свободных от наложений спектральных линий нецелесообразно.

Для спектральных линий, зарегистрированных спектральным прибором «Гранд», минимальная погрешность измерения, вызванная дрейфом спектра относительно фотоячеек линеек фотодетекторов, при линейном способе интерполяции для БЛПП-2000 составляет 0.25 и 0.23 % при размере области интегрирования 1.6 и 3.1 отсчета, а для БЛПП-4000 – 0.4 и 0.28 % при 1.0 и 2.7 отсчета соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Шелпакова И.Р. Многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров. Современное состояние и аналитические возможности // Журнал аналитической химии. 2012. Т. 67, № 7. С. 697-707.
2. Путьмаков А.Н., Попов В.И., Лабусов В.А., Борисов А.В. Новые возможности модернизированных спектральных приборов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 5. С. 26-28.
3. Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Зарубин И.А. Новые спектральные комплексы на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1, часть II. С. 15-20.

4. Программное обеспечение атомного спектрально-го анализа «Атом» / В.Г. Гаранин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 1, часть II. С. 103-111.
5. Ващенко П.В., Лабусов В.А., Бабин С.А., Шиманский Р.В. Апертурные характеристики линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 // Материалы XVII Межд. симп. «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2021. С. 226-228. [Электронный ресурс]: <http://www.vmk.ru/publications.html>. (дата обращения 15.11.2021)
6. Stancik A.L., Brauns E.B. A simple asymmetric lineshape for fitting infrared absorption spectra // *Vibrational Spectroscopy*. 2008. V. 47. P. 66-69
7. Гаранин В.Г., Неклюдов О.А., Петроченко Д.В., Семёнов З.В., Панкратов С.В., Ващенко П.В. Современное программное обеспечение для проведения АЭС анализа. Программа «Атом» // Материалы XV Межд. симп. «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2016. С. 206-207. [Электронный ресурс]: <http://www.vmk.ru/publications.html>. (дата обращения 15.11.2021)
8. Бабин С.А., Лабусов В.А. Оценка оптимальных параметров многоэлементных твердотельных детекторов для сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа // *Аналитика и контроль*. 2014. Т. 18, № 1. С. 40-49.

REFERENCES

1. Labusov V.A., Garanin V.G. & Shelpakova I.R. Multichannel analyzers of atomic emission spectra: Current state and analytical potentials. *J. Anal. Chem.*, 2012, vol. 67, pp. 632-641. <https://doi.org/10.1134/S1061934812070040>
2. Putmakov A.N., Popov V.I., Labusov V.A., Borisov A.V. [New possibilities of modernized spectral instruments]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]*, 2007, vol. 73, no. 5, pp. 26-28 (in Russian).
3. Labusov, V.A., Garanin, V.G. & Zarubin I.A. New Spectral Complexes Based on MAES Analyzers. *Inorganic Materials*, 2018, vol. 54, no. 14, pp. 1443-1448. DOI: 10.1134/S0020168518140133
4. Garanin V.G., Neklyudov O.A., Petrochenko D.V., Semenov Z.V., Pankratov S.V., Vashchenko P.V. [«Atom» software for atomic spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]*, 2019, vol. 85, no. 1, Part II, pp. 103-111 (in Russian). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111>
5. Vashchenko P.V., Labusov V.A., Babin S.A., Shimansky R.V. [Aperture characteristics BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetectors arrays]. *Materialy XIII Mezhdunarodnogo simpoziuma. «Primenenie analizatorov MAES v promyshlennosti» [Materials of the XVII International Symposium. "Application of MAES analyzers in industry"]*, 2021. Available at: <http://www.vmk.ru/publications.html>. (Accessed 15 November 2021).
6. Stancik A.L., Brauns E.B. A simple asymmetric lineshape for fitting infrared absorption spectra. *Vibrational Spectroscopy*, 2008, vol. 47, pp. 66-69. DOI: 10.1016/j.vibspec.2008.02.009
7. Garanin V.G., Neklyudov O.A., Petrochenko D.V., Semenov Z.V., Pankratov S.V., Vashchenko P.V. [Modern software for atomic emission analysis «Atom» software]. *Materialy XV Mezhdunarodnogo simpoziuma. «Primenenie analizatorov MAES v promyshlennosti» [Materials of the XIII International Symposium. "Application of MAES analyzers in industry"]*, 2016. Available at: <http://www.vmk.ru/publications.html>. (Accessed 15 November 2021).
8. Babin S.A., Labusov V.A. [Estimation of the Optimal Parameters of Multielement Solid-State Detectors for Atomic Emission Spectral Scintillation Analysis]. *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 40-49 (in Russian). <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2014.18.1.004>