

Анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 в сцинтилляционной атомно- эмиссионной спектрометрии

А.А. Дзюба^{1,2}, *В.А. Лабусов^{1,2,3}, С.А. Бабин^{1,2}

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1

²ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1

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

*Адрес для переписки: Лабусов Владимир Александрович, E-mail: labusov@vmk.ru

Поступила в редакцию – 31 октября 2018 г., после доработки – 3 ноября 2018 г.

Для развития спектрального комплекса «Гранд-Поток» и экспрессного высокочувствительно-го метода сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии предприятие «ВМК-Оптоэлектроника» создало новую высокочувствительную линейку фотодетекторов БЛПП-2000, которая была испытана в составе спектрального комплекса «Гранд-Поток», где были показаны ее преимущества при регистрации всплеск аналитической спектральной линии золота Au 267.595 нм по сравнению с линейкой БЛПП-369М1. В ходе дальнейших исследований детектора БЛПП-2000 была выявлена необходимость увеличения спектрального разрешения комплекса. Для этого была разработана новая линейка фотодетекторов БЛПП-4000, с использованием которой ожидается улучшение разрешения спектрометра «Гранд» во всём диапазоне длин волн, но возможно снижение чувствительности определений. Целью данной работы является экспериментальное сравнения разрешения и отношения сигнал-шум (ОСШ) спектрального комплекса «Гранд-Поток» с применением линеек фотодетекторов БЛПП-4000, БЛПП-2000 и БЛПП-369М1, а также сопоставление полученных результатов с характеристиками более высокоразрешающего спектрометра «Гранд-1500» с линейками БЛПП-2000, который зарекомендовал себя при определении благородных металлов в геологических пробах со сложной матрицей. В ходе работы из спектров стандартных образцов различного состава были получены данные об интенсивностях и ширинах спектральных линий, по которым проведено сравнение ОСШ и спектрального разрешения комплексов. Исследование показало, что применение новых анализаторов МАЭС на основе линеек БЛПП-4000 в спектрометре «Гранд» позволит увеличить разрешающую способность прибора в два раза, ОСШ прибора при этом снизится в 4–6 раз, что приведет к ухудшению пределов обнаружения в САЭС. Несмотря на это, спектрометр «Гранд» на основе БЛПП-4000 можно использовать вместо более высокоразрешающего «Гранд-1500» без потерь в пределах обнаружения, т.к. его светосила в 5–20 раз выше. Кроме того, возможно увеличение ОСШ и разрешающей способности в спектрометрах «Гранд», используемых в аналитических лабораториях с линейками БЛПП-369М1, путём замены детекторов на линейки БЛПП-4000.

Ключевые слова: спектральный комплекс «Гранд-Поток», быстродействующий МАЭС, спектральное разрешение, геологические пробы, сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектрометрия.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 35–42

DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.005

Testing of MAES analyzers with BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector linear arrays in a “Grand-Potok” spectral system

A.A. Dzyuba^{1,2}, *V.A. Labusov^{1,2,3}, and S.A. Babin^{1,2}

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

²VMK-Optoelektronika, pr. Akademika Koptuyuga, 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation³Novosibirsk State Technical University,
pr. K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

*Corresponding author: Vladimir A. Labusov, E-mail: labusov@vmk.ru

Submitted 31 October 2018, received in revised form 3 November 2018

For the development of "Grand-Potok" spectral systems and rapid high-sensitivity scintillation atomic emission spectrometry, the "VMK-Optoelektronika" company created a new BLPP-2000 photodetector linear array. Testing of the array as part of "Grand-Potok" spectral system had shown its advantages over a BLPP-369M1 array in recording scintillations of the gold Au 267.595 nm analytical spectral line. Further studies of the BLPP-2000 detector revealed the need to increase the spectral resolution of the system. For this, a new BLPP-4000 photodetector linear array has been developed. It was expected that its use would improve the resolution of the «Grand» spectrometer over the entire wavelength range, but a reduction in the sensitivity of the spectrometer could be possible. The objectives of this study were to experimentally compare the resolution and signal-to-noise ratio of the "Grand-Potok" spectral system using BLPP-2000, BLPP-4000, and BLPP-369M1 photodetector linear arrays and contrast the obtained results with the characteristics of the higher-resolution «Grand-1500» spectrometer with BLPP-2000, which had shown good performance in determination of noble metals in geological samples with complex matrix. The data on the intensities and widths of the spectral lines were obtained from the spectra of the standard samples of various compositions and used to compare the signal-to-noise ratio and spectral resolution of the systems. The study showed that the use of the new MAES analyzers based on BLPP-4000 linear photodetector arrays in the «Grand» spectrometer increased the resolution of the instrument by a factor of two, while the signal-to-noise ratio of the instrument decreased by a factor of 4-6, leading to the deterioration of the detection limits in the scintillation arc atomic-emission spectrometry. Nevertheless, «Grand» spectrometers based on BLPP-4000 could be used instead of higher-resolution «Grand-1500» spectrometers without deterioration of the detection limits as its aperture is 5–20 times higher. In addition, the signal-to-noise ratio and the resolution in «Grand» spectrometers with BLPP-369M1 detector arrays used in analytical laboratories could be increased by replacing the detectors with BLPP-4000 arrays.

Keywords: «Grand-Potok» spectral system, MAES high-speed analyzer, spectral resolution, geological samples, scintillation atomic emission spectrometry.

Введение

В настоящее время расширяется использование спектральных комплексов «Гранд-Поток», реализующих экспрессный высокочувствительный метод скинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии (САЭС) с вводом геологических и технологических порошковых проб в электрическую дугу переменного тока методом просыпки-вдувания [1]. Регистрация спектров в них осуществляется высокоскоростными многоканальными анализаторами эмиссионных спектров (МАЭС) с гибридными сборками линеек фотодетекторов БЛПП-369М1 [2]. Специально для решения задач САЭС предприятие «ВМК-Оптоэлектроника» создало новую высокочувствительную линейку фотодетекторов БЛПП-2000 [3], выполненную по технологии приборов с зарядовой связью с обратной засветкой. Она состоит из 2048 фотоячеек с шагом размещения 14 мкм, высотой 1 мм и шумом считывания 25 электронов. Линейка была испытана в составе спектрального комплекса «Гранд-Поток», в котором для регистрации спектров использовали быстродействующий МАЭС с комбинированной гибридной сборкой из 12 линеек фотодетекторов БЛПП-369М1 и одной линейки БЛПП-2000 [4]. В результате испытаний было экспериментально показано, что отношение сигнал/шум (ОСШ) всплесков (скинтилляций) аналитической спектральной линии золота Au 267.595 нм при регистрации их линейкой БЛПП-2000 в среднем в 10 раз выше значе-

ний, полученных с использованием линейки БЛПП-369М1. В ходе дальнейших исследований детектора БЛПП-2000 была показана [5] хорошая повторяемость полученных результатов САЭС при определении валового содержания золота в минеральном сырье, но выявлена необходимость дополнительных исследований по увеличению спектрального разрешения, в частности для разделения линии золота Au 267.595 нм с мешающей линией W 267.5867 нм. В работе [6] на спектрометре «Гранд-1500» с линейками БЛПП-2000 удалось до двух раз улучшить разрешение и разделить указанные линии, что позволило провести определение благородных металлов в геологических пробах ряда месторождений [7, 8]. Однако спектрометр «Гранд-1500» в настоящее время является уникальным, в отличие от спектрометров «Гранд», более пяти десятков которых работает в аналитических лабораториях. Поэтому для дальнейшего развития комплекса «Гранд-Поток» и метода САЭС компанией «ВМК-Оптоэлектроника» была разработана новая линейка фотодетекторов на основе технологии комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник БЛПП-4000, которая содержит 4096 фотоячеек с шагом их размещения 7 мкм, высотой 0,2 мм, шумом считывания 16 электронов. Уменьшение шага размещения фотоячеек позволит увеличить разрешение спектрометра «Гранд» во всём диапазоне длин волн, но возможно снижение чувствительности спектрометра за счёт 10-ти

кратного уменьшения их площади [9]. При этом линейки БЛПП-2000 и БЛПП-4000 имеют близкие и достаточно высокие значения квантовой эффективности в области 190–800 нм: от 40 до 70 %.

Целью данной работы является экспериментальное исследование разрешения и отношения сигнал/шум спектрального комплекса «Гранд-Поток» с применением новых линеек фотодетекторов БЛПП-4000 и БЛПП-2000 и сравнением их с базовыми линейками БЛПП-369М1, а также сопоставление полученных результатов с характеристиками более высокоразрешающего спектрометра «Гранд-1500».

Экспериментальная установка

Использование для эксперимента одного и того же спектрального комплекса, в котором производилась замена только МАЭС, дает возможность корректного сравнения ОСШ линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000. Для этого использовали комплекс «Гранд-Поток», схема которого представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения применяли электродуговую установку для анализа порошковых проб по способу просыпки-вдувания «Поток» в условиях, оптимизированных для САЭС [10]. Режим работы установки: дуга переменного непрерывного тока ± 22 А с частотой 100 Гц; обжиг электродов – 30 А в течение 2 с. Регистрацию сигнала проводили в течение 16.5 с при времени базовой экспозиции 3 мс. Ширина и высота щели спектрометра «Гранд» составляли 15 мкм и 5 мм соответственно. Были проанализированы геологические и технологические стандартные образцы (СО) различного состава. Навеску 150 мг исследуемого образца равномерно рассыпали на транспортере и подавали в дуговой разряд с линейной скоростью 13 мм/с. Сравнение спектрального разрешения спектрометра «Гранд» с применением различных линеек фотодетекторов производили при идентичных условиях. Кроме того, для сопоставления был добавлен спектрометр «Гранд-1500» в качестве базового образца, т.к. его разрешение превосходит разрешение спектрометра «Гранд» в 1.5–2 раза [6].

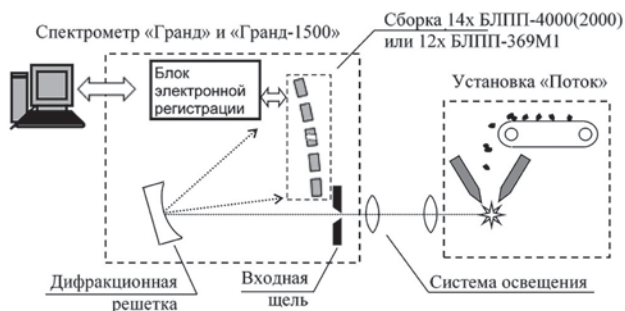


Рис. 1. Схема установки.

Fig. 1. Diagram of the setup.

Сравнение отношения сигнал/шум

Интенсивность спектральных линий определяли по двум фотоячейкам в окрестности максимума линий зарегистрированных интегральных спектров. Шум измеряли по среднеквадратическому отклонению (СКО) выходного сигнала, полученного с каждой фотоячейки в отсутствии света. В расчетах использовали его среднее значение по всей гибридной сборке из 14 линеек фотодетекторов: для БЛПП-2000 – 0.0125 %, БЛПП-4000 – 0.02 %. На рис. 2 представлена полученная в ходе эксперимента средняя зависимость отношения ОСШ линейки БЛПП-2000 к ОСШ линейки БЛПП-4000 от длины волны. Экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом четвертого порядка. Видно, что ОСШ спектральных линий, зарегистрированных линейками БЛПП-2000, в 4–6 раз больше, чем линейками БЛПП-4000, что соответствует теоретическим данным [9].

Оценку влияния ОСШ различных линеек фотодетекторов на сцинтилляционные измерения золота в геологических образцах проводили по количе-

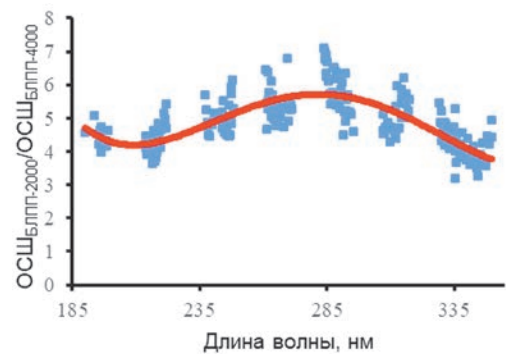


Рис. 2. Зависимость отношения ОСШ линейки БЛПП-2000 к ОСШ БЛПП-4000 от длины волны.

Fig. 2. Ratio of the SNR of BLPP-2000 array to the SNR of BLPP-4000 array versus wavelength.

ству зарегистрированных вспышек в СО, паспортные данные которых представлены в табл. 1. Для этого производили запись вспышек частиц-носителей золота в режиме «Сцинтилляция» [5]. В табл. 2 представлены способы вычисления и настройки алгоритмов обработки слабых сигналов для исследуемых фотодетекторов. В течение двух месяцев были получены и обработаны спектры СО четырех обучающих выборок, зарегистрированные с помощью линеек фотодиодов БЛПП-4000, по которым были построены четыре независимые линейные градуировки. Такие же данные для линеек фотодиодов БЛПП-2000 и БЛПП-369М1 были выбраны случайным образом из работы [5]. Способ вычисления аналитического сигнала, используемого для определения валового содержания золота и количества вспышек его частиц-носителей, подробно описан в работе [5].

Таблица 1

Стандартные образцы

Table 1

Standard samples

Индекс СО	Номер по реестру страны-производителя	Тип СО	Аттестованное содержание Au, г/т
ОСО 64-86	KZ.03/01.00208-2010, Казахстан	Почва	0.0076 ± 0.0008
СЛг-1	ГСО 8550-2004, РФ	Сланец черный (руда Сухого Лога)	2.5 ± 0.3
РСР-1	ОСО 202-90, РФ	Руда сульфидно-полиметаллическая	1.44 ± 0.05
РЗ-6	ОСО 283-96, РФ	Руда золотосульфидная	4.1 ± 0.1
СЗК-3	ГСО 2739-83, РФ	Флотоконцентрат золотосодержащей руды	34 ± 1
ХО-1	ГСО 1703-86, РФ	Хвосты обогащения	0.07 ± 0.01
РКЗ-7	ОСО 494-11, РФ	Руда кварцевая золотосодержащая	0.076 ± 0.006

Таблица 2

Условия настройки алгоритма обработки сигналов на аналитической линии Au 267.595 нм и вычисления аналитических параметров в режиме «сцинтилляция»

Table 2

Conditions for setting the signal processing algorithm at the Au 267.595 nm analytical line and calculating analytical parameters in the "scintillation" mode

Характеристики	Условия настройки и вычисления	Тип линеек фотодетекторов		
		БЛПП-2000	БЛПП-4000	БЛПП-369М1
Спектрально-го пика	Поиск границ линии	Минимум в зоне поиска, максимальная ширина ± 15 диодов	Минимум в зоне поиска, максимальная ширина ± 15 диодов	Минимум в зоне поиска, максимальная ширина ± 10 диодов
	Поиск центра линии	Полуавтоматический поиск в зоне 0.1 диода	Полуавтоматический поиск в зоне 0.1 диода	Полуавтоматический поиск в зоне 0.1 диода
	Количество диодов для вычисления интенсивности линии	2	2	2
Алгоритма	Порог интенсивности	0.136	0.0826	0.044
	Алгоритм обработки сигнала	Расширенный	Расширенный	Расширенный
	Характерный уровень шума	15·10 ⁻³ отн. ед.	16·10 ⁻³ отн. ед.	5·10 ⁻³ отн. ед.
	Граница интенсивности локальных минимумов	800·10 ⁻³ отн. ед.	800·10 ⁻³ отн. ед.	—

Примечание: «—» – настройка алгоритма не использовалась.

Пример полученных градуировочных зависимостей представлен на рис. 3. Угол наклона всех полученных графиков близок к 45°, что свидетельствует об оптимальности выбранных условий получения, регистрации и обработки аналитических сигналов. СКО градуировки графиков при регистрации линейками фотодиодов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 практически не отличалось, следовательно, влияние замены фотодетектора на повторяемость результата измерений не значительно. Полученные данные о количестве зарегистрированных вспышек в навеске 150 мг исследованных СО с применением различных типов фотодетекторов, представлены в табл. 3. Все доверительные интервалы здесь и далее даны для вероятности 95 %. Как и следовало ожидать,

снижение ОСШ линейки фотодетектора БЛПП-4000 относительно БЛПП-2000 приводит к уменьшению количества зарегистрированных вспышек, т.к. сцинтилляции от мелких золотых частиц становятся не различимы на фоне шума регистрируемого сигнала. Минимальное количество вспышек было зарегистрировано с помощью линейки БЛПП-369М1, она имеет самое низкое значение ОСШ.

Снижение количества сцинтилляций, которые способен зарегистрировать фотодетектор, говорит об увеличении пределов обнаружения прибора. Оценить их можно по значению нулевого порога (**Пр0**) – минимальной интенсивности одиночной вспышки, которую способен зарегистрировать спектральный прибор. Следовательно, увеличение значения Пр0

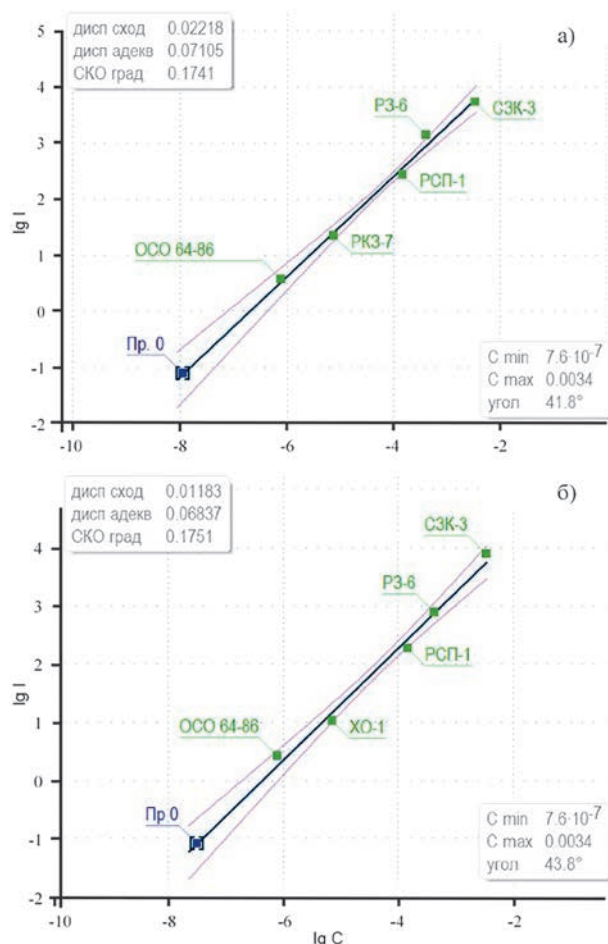


Рис. 3. Градуировочные зависимости интенсивности / (%) спектральных линий золота от его содержания C (г/т) в СО, полученные с использованием линеек БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б).

Fig. 3. Calibration curves of the intensity I (%) of the gold spectral lines on their C content (ppm) in CO obtained using BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) arrays.

приводит к тому, что для вычисления аналитического сигнала будут использоваться только интенсивности от более крупных частиц аналита. Подробное описание способа расчёта нулевого порога представлено в работе [11]. Сопоставив по графикам градуировочных зависимостей (рис. 3) какому содержанию соответствует интенсивность Pr_0 , были получены значения чувствительности прибора, соответствующие минимальному содержанию аналита в одной единственной вспышке от частицы-носителя золота. При регистрации линейками фотодиодов БЛПП-2000, БЛПП-4000 и БЛПП-369М1 эти значения равнялись 0.103 ± 0.020 , 0.7 ± 0.6 и 1 ± 0.4 мг/т соответственно. Необходимо пояснить, что содержания золота, вычисленные по значениям Pr_0 , не соответствуют реальным пределам обнаружения спектральных комплексов, а только показывают, какие самые слабые вспышки аналита могут регистрировать приборы. На практике величина предела обнаружения может оказаться выше из-за влияния внешних факторов, которые не учитывались в ходе эксперимента. Например,

Таблица 3

Количество зарегистрированных вспышек с применением различных типов линеек фотодетекторов (навеска 150 мг)

Table 3

Number of detected scintillations using different types of photodetector arrays (150 mg sample)

Стандартный образец	Тип линеек фотодетекторов		
	БЛПП-2000	БЛПП-4000	БЛПП-369М1
Количество вспышек, шт.			
ОСО 64-86	13.9 ± 3.9	7.8 ± 3.5	1.33 ± 0.33
СЛг-1	137 ± 18	96 ± 15	35 ± 6
РСР-1	554 ± 33	250 ± 60	134 ± 15
РЗ-6	1631 ± 33	1310 ± 100	1080 ± 80
СЗК-3	1682 ± 23	1660 ± 80	1549 ± 22

такими ограничениями могут являться выгорание более мелких частиц до входа в зону регистрации прибора либо спектральные помехи при использовании проб с матрицей отличной от исследованных.

Сравнение разрешения спектрометров

Разрешение спектрометров оценивали шириной спектральных линий на полувысоте их контура. Подробно способ вычисления описан в работе [12]. На рис. 4 приведены зависимости ширины спектральной линии от длины волны спектрометров «Гранд» и «Гранд-1500». Из зависимостей видно, что разрешение спектрометра «Гранд» улучшается примерно в 2 раза с применением линеек фотодетекторов БЛПП-4000 вместо БЛПП-2000. При

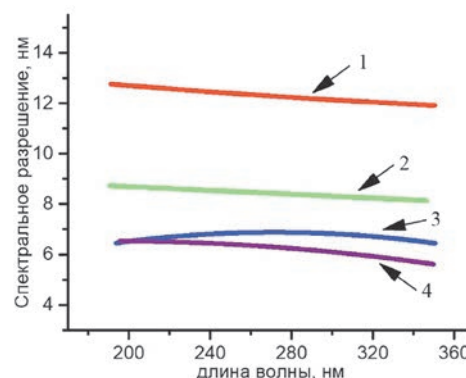


Рис. 4. Зависимость спектрального разрешения спектрометров от длины волны: 1) «Гранд» с линейками фотодетекторов БЛПП-2000; 2) «Гранд» – БЛПП-369М1; 3) «Гранд» – БЛПП-4000; 4) «Гранд-1500» – БЛПП-2000.

Fig. 4. Spectral resolution versus spectrometer wavelength: 1) «Grand» spectrometer with BLPP-2000 photodetector arrays; 2) «Grand» spectrometer with BLPP-369M1 arrays; 3) «Grand» spectrometer with BLPP-4000 arrays; 4) «Grand-1500» spectrometer with BLPP-2000 arrays.

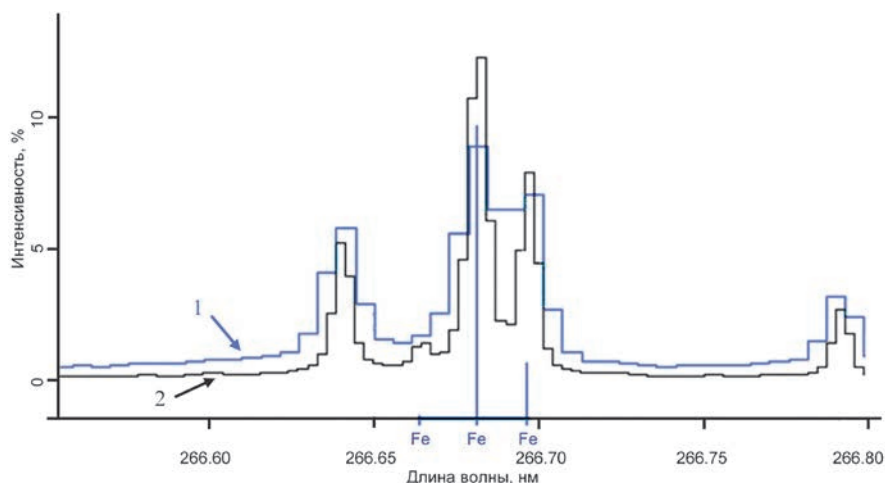


Рис. 5. Фрагмент спектра образца флотоконцентрата золотосодержащей руды СЗК-3 с триплетом железа, зарегистрированного линейками БЛПП-2000 (1) и БЛПП-4000 (2) на спектрометре «Гранд». При построении графика 2, исходные значения умножены на коэффициент.

Fig. 5. Fragment of the spectrum of a flotation concentrate of gold-bearing ore (SZK-3) with an iron triplet recorded by BLPP-2000 (1) and BLPP-4000 (2) arrays on the «Grand» spectrometer. When plotting graph 2, the original values were multiplied by a coefficient.

этом разрешения спектрометров «Гранд» с БЛПП-4000 и «Гранд-1500» с БЛПП-2000 становятся практически одинаковыми. Отличие в разрешении между линейками БЛПП-369М1 и БЛПП-4000 в составе спектрометра «Гранд» составляет около 30 %.

Для наглядного представления изменения в спектральном разрешении на рис. 5 показан фрагмент спектра государственного СО флотоконцентрата золотосодержащей руды СЗК-3 с плохо разрешённым триплетом железа, а также на рис. 6 фрагмент спектра алюмосиликатных рыхлых отложений СГХМ-4 с аналитической линией золота и мешающей линией вольфрама. Интенсивности спектра, зарегистрированного линейками БЛПП-4000 и БЛПП-369М1, были умножены на коэффициент для согласования масштаба.

На рис. 5 видно, что линии железа, которые сливаются между собой на регистрограмме линейки БЛПП-2000, хорошо разрешаются с применением линейки БЛПП-4000. На рис. 6, а видно спектральное наложение линии W I 267.5867 нм на линию Au I 267.595 нм из-за недостаточного разрешения спектрометра «Гранд» с линейками БЛПП-2000. В спектре, полученном с использованием линеек БЛПП-4000, спектрального наложения линии W на линию Au не наблюдается, так же как на спектрометре «Гранд-1500» с БЛПП-2000 (рис. 6, б). Помехи линии W в спектре, полученном при регистрации линейками БЛПП-369М1 (рис. 6, в), так же присутствуют, но в меньшей степени, чем с БЛПП-2000.

Заключение

Применение линеек фотодетекторов БЛПП-4000 в спектральном комплексе «Гранд-Поток» вместо БЛПП-2000 позволяет увеличить спектральную разрешающую способность прибора в два

раза, ОСШ при этом снижается в 4-6 раз, что ведёт к ухудшению пределов обнаружения в САЭС.

Тем не менее спектрометр «Гранд» с линейками БЛПП-4000 является альтернативой спектрометру «Гран-1500» с линейками фотодетекторов БЛПП-2000, который зарекомендовал себя при определении благородных металлов в геологических пробах со сложной матрицей, где благодаря высокому спектральному разрешению спектрометра удалось избавиться от спектральных помех, так как «Гранд» с линейками БЛПП-4000 обладает таким же спектральным разрешением и даже несколько большим отношением сигнал-шум в сравнении с «Гран-1500» с БЛПП-2000.

Кроме того, возможно увеличение ОСШ и разрешающей способности в существующих в аналитических лабораториях спектрометрах «Гранд» с линейками БЛПП-369М1, путём замены их на линейки БЛПП-4000.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабусов В.А., Гаранин В.Г., Зарубин И.А. Новые спектральные комплексы на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-II. С. 15-20.
2. Селюнин Д.О., Бабин С.А., Лабусов В.А. Высокоскоростные анализаторы МАЭС с интерфейсом Gigabit Ethernet // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78, № 1-II. С. 39-43.
3. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 / С.А. Бабин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 1-II. С. 108-113.
4. Анализаторы МАЭС для спектрометра «Гранд» с улучшенными характеристиками в области 258–269 нм / С.А. Бабин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-II. С. 105-107

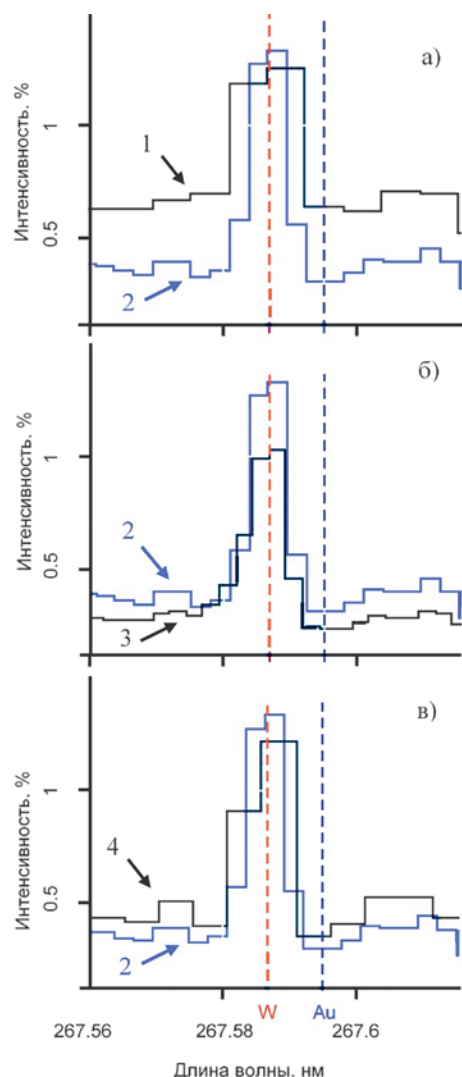


Рис. 6. Фрагмент спектра образца алюмосиликатных рыхлых отложений СГХМ-4, зарегистрированный: а – линейками БЛПП-2000 (1) и БЛПП-4000 (2) на спектрометре «Гранд»; б – линейками БЛПП-4000 (2) на спектрометре «Гранд» и БЛПП-2000 (3) на «Гранд-1500»; в – линейками БЛПП-4000 (2) и БЛПП-369М1 (4) на спектрометре «Гранд». При построении графиков 2, 3 и 4, исходные значения умножены на коэффициенты.

Fig. 6. Fragment of the spectrum of a sample of SGKhM-4 loose aluminosilicate deposits recorded by: а) BLPP-2000 (1) and BLPP-4000 (2) arrays on the «Grand» spectrometer; б) BLPP-4000 arrays (2) on the «Grand» spectrometer and BLPP-2000 arrays (3) on the «Grand-1500»; в) BLPP-4000 arrays (2) and BLPP-369M1 arrays (4) on the «Grand» spectrometer. When plotting graphs 2, 3, and 4, the original values were multiplied by coefficients.

5. Аналитические возможности спектрального комплекса «Гранд-Поток» при сцинтилляционном определении содержания золота и серебра в геологических пробах / А.А. Дзюба [и др.] // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21. № 1. С. 6-15.
6. Светосила и спектральное разрешение спектрометров «Гранд», «Гранд-1500» и СТЭ-1 / А.А. Дзюба [и др.] //

Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-II, С. 101-105.

7. Определение благородных металлов в геологических пробах четырех золоторудных месторождений северо-востока России / И.Е. Васильева [и др.] // Журнал аналитической химии. 2018. Т. 73, № 6. С. 433-445.
8. Благородные металлы в образцах черных сланцев золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) по данным метода сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии / И.Е. Васильева [и др.] // Геология и геофизика, 2018. Т. 59, № 8. С. 1238-1253.
9. Бабин С.А., Селюнин Д.О., Лабусов В.А. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 // Материалы XVI Межд. симп. «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 179-185.
10. Шабанова Е.В., Бусько А.Е., Васильева И.Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким временным разрешением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78, № 1-II. С. 24-33.
11. Оценка размера частиц золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением / Е.В. Шабанова [и др.] // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14, № 4. С. 186-200.
12. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС / В.А. Лабусов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78, № 1-II. С. 7-13.

REFERENCES

1. Labusov V.A., Garanin V.G., Zarubin I.A. [New Spectral Systems Based on MAES Analyzers]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials], 2017, vol. 83, no. 1-II, pp. 15-20 (in Russian).
2. Selyunin D. O., Babin S. A., Labusov V. A. [High-speed MAES analyzers with Gigabit Ethernet interface]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials], 2012, vol. 78, no. 1-II, pp. 39-43 (in Russian).
3. Babin S.A., Labusov V.A., Seljunin D.O., Dziuba A.A. [BLPP-2000 Array Based High-Speed Multichannel Analyzers of Atomic Emission Spectra]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials], 2015, vol. 81, no. 1-II, pp. 108-113 (in Russian).
4. Babin S.A., Labusov V.A., Selyunin D.O., Dziuba A.A. [MAES Analyzers for a Grand Spectrometer with Improved Performance in the Range of 258 - 269 nm]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials], 2017, vol. 83, no. 1-II, pp. 105-107 (in Russian).
5. Dziuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. E., Shabanova E. V., Babin S. A. [Analytical capabilities of "Grand-Potok" spectral system for the scintillation determination of gold and silver in geological samples]. *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2017, vol. 21, no. 1, pp. 6-15 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
6. Dziuba A.A., Labusov V.A., Vasil'eva I.E., Shabanova E.V. [Luminosity and Spectral Resolution of "Grand," "Grand-1500," and STE-1 Spectrometers]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials], 2017, vol. 83, no. 1-II, pp. 101-105 (in Russian).
7. Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., Goriacheva E.M., Sotskaia O.T., Labusov V.A., Nekliudov O.A., Dziuba A.A. Determination

of Precious Metals in Geological Samples from Four Gold Ore Deposits of the North-East of Russia. *Journal of Analytical Chemistry*, 2018, vol. 73, no. 6, pp. 539-550. doi: 10.1134/S1061934818040123

8. Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., Goriacheva E.M., Sotskaia O.T., Labusov V.A., Nekliudov O. A., Dziuba A. A. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 997-1009. doi: 10.1016/j.rgg.2018.07.019

9. Babin S.A., Selyunin D.O., Labusov V.A. [High-speed multichannel MAES analyzers based on BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector arrays]. *Materialy XVI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Primenenie analizatorov MAES v promyshlennosti» [Proceedings of the XVI International Symposium "Application of MAES analyzers in industry]*, Novosibirsk, 2018, pp. 179-185 (in Russian).

10. Shabanova E.V., Bus'ko A.E., Vasil'eva I.E. [Scintillation Arc Atomic Emission Analysis of Powder Samples Using MAES with High Temporal Resolution]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]*, 2012, vol. 78, no. 1-II, pp. 24-33 (in Russian).

11. Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., Bus'ko A.E., Kunaev A.B. [Estimation of Au- and Ag- particle sizes in geological samples using high time-resolved scintillation atomic emission analysis]. *Analitika i kontrol' [Analytics and Control]*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 186-200 (in Russian).

12. Labusov V.A., Put'makov A.N., Zarubin I.A., Garanin V.G. [New Multichannel Optical Spectrometers Based on MAES Analyzers]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]*, 2012, vol. 78, no. 1-II, pp. 7-13 (in Russian).