

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АНАЛИЗАТОРЫ МАЭС НА ОСНОВЕ ЛИНЕЕК ФОТОДЕТЕКТОРОВ БЛПП-2000 И БЛПП-4000

© Сергей Александрович Бабин<sup>1,2</sup>, Денис Олегович Селюнин<sup>1,2</sup>,  
Владимир Александрович Лабусов<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия.

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия; e-mail: labusov@vmk.ru

*Статья поступила 31 октября 2018 г. Поступила после доработки 31 октября 2018 г.  
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Основные усовершенствования спектральных комплексов для сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа порошковых геологических проб направлены на повышение чувствительности, спектрального разрешения и быстродействия анализаторов спектра для снижения пределов обнаружения. Цель работы — разработка быстродействующих анализаторов МАЭС с гибридными сборками из 14 линеек фотодетекторов двух типов: высокочувствительных линеек БЛПП-2000 и линеек БЛПП-4000 с высокой пространственной разрешающей способностью, а также теоретическая оценка отношения сигнал/шум при регистрации сцинтилляционных и интегральных спектров этими линейками. Быстродействующие анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 созданы по схеме с параллельным чтением линеек в гибридных сборках. Они содержат по 14 линеек БЛПП-2000 или БЛПП-4000 и позволяют спектрометру «Гранд» регистрировать спектральный диапазон 190 – 350 нм. Минимальное время экспозиции составляет 0,9 и 1,7 мс соответственно. Оценено, что отношение сигнал/шум при измерении интенсивностей спектральных линий линейкой БЛПП-2000 в три раза выше в интегральном анализе и в пять раз — в сцинтилляционном, чем линейкой БЛПП-4000.

**Ключевые слова:** анализаторы спектров; линейки фотодетекторов; атомно-эмиссионная спектрометрия; атомно-абсорбционная спектрометрия; спектрометрия с временным разрешением; порошковые геологические пробы; сцинтилляция; снижение пределов обнаружения элементов.

## HIGH-SPEED MULTICHANNEL MAES ANALYZERS BASED ON BLPP-2000 AND BLPP-4000 PHOTODETECTOR ARRAYS

© Sergey A. Babin<sup>1,2</sup>, Denis O. Selyunin<sup>1,2</sup>, Vladimir A. Labusov<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.

<sup>2</sup> “VMK-Optoelektronika”, Novosibirsk, Russia.

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia; e-mail: labusov@vmk.ru

*Received October 31, 2018. Revised October 31, 2018. Accepted November 25, 2018.*

The main directions in the development of the spectral systems for scintillation atomic emission analysis of powdered geological samples are aimed at increase in the sensitivity, spectral resolution, and speed of the spectrum analyzers to reduce the detection limits. The goal of the study is developing of high-speed MAES analyzers with hybrid assemblies of the arrays of 14 multichannel photodetectors of two types: high-sensitivity BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector array with high spatial resolution and theoretical estimation of the signal-to-noise ratio when recording scintillation and integral spectra with aforementioned photodetectors. The high-speed MAES analyzers with BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector arrays are designed so as to provide parallel readout of photodetectors in hybrid assemblies. They consist of 14 BLPP 2000 or BLPP 4000 photodetectors and records the spectra in the 190 – 350 nm wavelength range on a “Grand” spectrometer. The minimum exposure time is 0.9 and 1.7 msec, respectively. It is shown that in measurements of spectral-line intensities using BLPP-2000, the signal-to-noise ratio is 3 times higher in integral analysis and 5 times higher in scintillation analysis compared to measurements with BLPP-4000 photodetector array.

**Keywords:** spectrum analyzers; photodetector arrays; atomic emission spectrometry; atomic absorption spectrometry; time-resolved spectrometry; powdered geological samples; scintillation, reduction of the detection limits.

В настоящее время для определения микропримесей в порошковых пробах методом сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектromетрии (САЭС) все шире используют спектральный комплекс «Гранд-Поток» [1] с регистрацией последовательностей спектров быстродействующими многоканальными анализаторами эмиссионных спектров (МАЭС) [2]. Вследствие неравномерности распределения определяемых элементов, например благородных металлов, в частицах пробы полученные зависимости интенсивности спектральных линий этих элементов от времени содержат всплески (сцинтилляции) интенсивности. Применение линеек фотодетекторов с низкими шумами чтения и работающих при малых временах экспозиции, соответствующих продолжительности самых коротких всплесков спектральных линий, позволяет повысить отношение сигнал/шум (ОСШ) при регистрации сцинтилляций и тем самым снизить пределы обнаружения [3].

В работах [4, 5] показано преимущество использования линеек БЛПП-2000 в САЭС в сравнении с линейками БЛПП-369М1, в частности применение этой линейки дает снижение пределов обнаружения на порядок величины [5]. Однако в данных работах использовали отдельные линейки БЛПП-2000: так, в работе [4] — это четыре линейки БЛПП-2000, установленные в спектрометр СТЭ-1, в [5] и [6] — гибридная сборка, состоящая из 12 линеек БЛПП-369М1 и одной БЛПП-2000. Поэтому целесообразной является разработка полноформатной сборки для спектрометра «Гранд», состоящей целиком из линеек фотодетекторов БЛПП-2000.

С другой стороны, САЭС используют для анализа порошковых геологических проб, для которых характерно наличие большого количества спектральных линий с их взаимным наложением. Поэтому при таком анализе актуальным является увеличение спектрального разрешения прибора для устранения таких наложений. Так, в работе [7] применение для анализа методом САЭС спектрометра «Гранд-1500», обладающего в два раза лучшим разрешением, чем спектрометр «Гранд», позволило добиться разделения линии золота Au I 267,595 нм и мешающей W I 267,5867 нм при возбуждении ГСО СГХМ-4 с помощью установки «Поток» [8]. Другой подход к разделению спектральных линий — использование линеек фотодетекторов с увеличенной пространственной разрешающей способностью. Так, например, ожидается, что использование линейки БЛПП-4000 (4096 фотоячеек высотой 0,2 мм и шириной 7 мкм) в спектрометре «Гранд» позво-

лит достичь того же спектрального разрешения, что и при использовании линейки БЛПП-2000 (2048 фотоячеек высотой 1 мм и шириной 14 мкм) в спектрометре «Гранд-1500». Актуальность двухкратного увеличения спектрального разрешения спектрометра «Гранд» связана с его широким использованием в аналитических лабораториях, в отличие от «Гранд-1500», который в настоящее время является уникальным.

Быстродействующие анализаторы МАЭС с гибридными сборками линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 будут востребованы не только в САЭС, но и в других методах анализа, использующих спектromетрию с высоким временным разрешением, например, в атомно-эмиссионной спектromетрии с регистрацией спектров единичных искр для определения неметаллических включений в металлических сплавах, в многоэлементной атомно-абсорбционной спектromетрии с электротермической атомизацией и источником непрерывного спектра и др. При регистрации стационарных спектров таких источников, как ИСП или СВЧ-плазма, применение этих анализаторов позволит расширить диапазон определяемых содержаний элементов на порядки величины за счет возможности изменения базовой экспозиции анализаторов в интервале от мс до нескольких с.

Цель настоящей работы — создание быстродействующих анализаторов МАЭС для спектрометра «Гранд» с гибридными сборками из 14 линеек фотодетекторов двух типов: высокочувствительных линеек БЛПП-2000 и линеек БЛПП-4000 с высокой пространственной разрешающей способностью, а также теоретическая оценка отношения сигнал/шум при регистрации сцинтилляционных и интегральных спектров этими линейками.

*Устройство анализаторов МАЭС.* Быстродействующие анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 созданы по схеме с параллельным чтением линеек в сборках. Длина фоточувствительной области линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 составляет 28,7 мм, а у линейки БЛПП-369М1 — 32,6 мм. Поэтому для регистрации спектрального диапазона 190 – 350 нм спектрометра «Гранд» требуется 14 линеек БЛПП-2000 или БЛПП-4000, а не 12 линеек БЛПП-369М1, сборки которых используются в составе спектрометров «Гранд» в настоящее время.

Структурная схема быстродействующих анализаторов МАЭС на основе линеек БЛПП-2000/БЛПП-4000 представлена на рис. 1. Анализатор состоит из гибридной сборки (ГС) линеек и

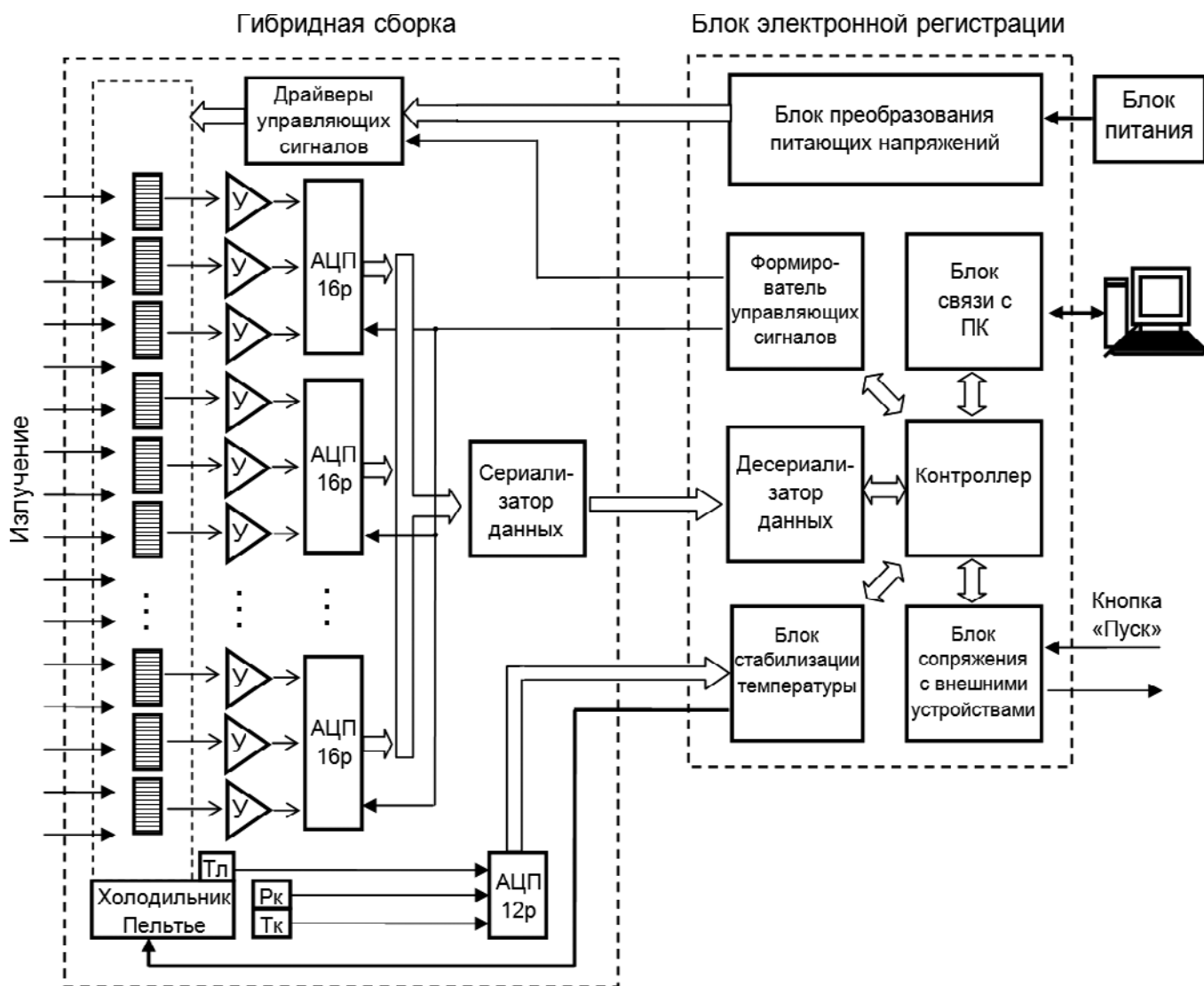


Рис. 1. Структурная схема быстродействующего анализатора МАЭС с линейками БЛПП-2000/БЛПП-4000

блока электронной регистрации (БЭР). ГС представляет собой массив бескорпусных линеек фотодетекторов (БЛПП-2000 или БЛПП-4000), расположенных на едином основании, охлаждаемом холодильниками Пельтье, и платы управления ГС, подключенной к линейкам посредством гибких полиамидных шлейфов. Излучение, падающее на фоточувствительную область ГС, преобразуется линейками в электрический сигнал. Выходной сигнал каждой линейки в плате управления ГС усиливается усилителем ( $У$ ) и оцифровывается посредством АЦП. Для снижения количества линий, передающих цифровые данные между платой управления ГС и БЭР, используются высокоскоростные сериализаторы и десериализаторы данных, физически передающие данные по дифференциальным линиям стандарта LVDS. Драйверы управляющих сигналов платы управления ГС преобразуют цифровой сигнал

с формирователей управляющих сигналов БЭР в аналоговый сигнал необходимой амплитуды.

Блок электронной регистрации состоит из блока преобразования питающих напряжений, где формируются уровни напряжений, необходимые для работы конкретного типа линеек фотодетекторов, и контроллера БЭР, осуществляющего координацию работы прибора в целом в зависимости от команд, поступающих от персонального компьютера (ПК) из программного обеспечения (ПО) для проведения спектрального анализа «Атом». Контроллер БЭР предоставляет данные для работы блоков стабилизации температуры и сопряжения с внешними устройствами, управляет временем экспозиции и режимами работы линеек посредством блока формирователя управляющих сигналов. Блок стабилизации температуры регулирует ток холодильника Пельтье в зависимости от требуемой и текущей температуры линеек. Блок сопряже-

ния с внешними устройствами предназначен для подключения кнопки «Пуск», управления источником возбуждения спектра, затвором входной щели спектрометра и другими устройствами.

Контроллер БЭР осуществляет преобразование получаемых с десериализатора данных, в частности перестановку данных в соответствии с физическим следованием фотоячеек в ГС, и передает обработанные данные в ПО «Атом» с помощью блока связи ПК.

Блок связи с ПК предназначен для обмена управляющими командами и данными между контроллером и ПО «Атом». В блоке связи для коммуникации используется сетевой интерфейс Gigabit Ethernet [2] с передачей данных посредством транспортного протокола TCP.

Для подключения нескольких высокоскоростных анализаторов МАЭС к компьютеру используются коммутаторы Gigabit Ethernet, при этом синхронность регистрации обеспечивает встроенный в командный протокол управления анализаторов МАЭС механизм, основанный на отправке широковещательных UDP-пакетов.

Схема, приведенная на рис. 1, позволяет создавать анализаторы, содержащие до 18 линеек с минимальным временем базовой экспозиции 0,9 мс для БЛПП-2000 и 1,7 мс для БЛПП-4000.

В настоящее время по приведенной схеме созданы быстродействующие анализаторы МАЭС с 14 линейками БЛПП-2000 и 14 линейками БЛПП-4000 для спектрометра «Гранд».

*Оценка пределов обнаружения.* Благодаря вдвое меньшему шагу фотоячеек анализаторы с линейками БЛПП-4000 обладают вдвое большей пространственной разрешающей способностью в сравнении с БЛПП-2000. Однако ответ на вопрос, с какой из линеек будут ниже пределы обнаружения элементов, не столь очевиден.

Пределы обнаружения в сцинтилляционном анализе в первую очередь определяются значениями ОСШ при регистрации отдельных вспышек спектральных линий. В работе [3] была предложена модель, позволяющая рассчитать значения ОСШ при регистрации сцинтилляций известных продолжительностей и интенсивностей с помощью твердотельных детекторов излучения (ТДИ) в зависимости от параметров ТДИ. В работе [9] показано, что модельные результаты работы [3] соответствуют эксперименту. Можно также оценить, как параметры ТДИ влияют на ОСШ в атомно-эмиссионном анализе при регистрации линии с постоянной во времени интенсивностью, считая, что такая оценка является предельным случаем для модели [3] при продол-

жительности вспышки, намного превышающей время экспозиции ТДИ.

Таким образом, чтобы оценить, использование какой из линеек (БЛПП-4000 или БЛПП-2000) обеспечит более низкие пределы обнаружения элементов в атомно-эмиссионном анализе (как в интегральном, так и в сцинтилляционном вариантах), необходимо рассмотреть основные характеристики линеек фотодетекторов: площадь фотоячейки ( $S$ ), шум чтения ( $\sigma_{rd}$ ), полную зарядовую емкость ( $N_{fw}$ ) и квантовую эффективность ( $k$ ). Квантовая эффективность определяется материалом полупроводника, конструкцией фотоячейки и свойствами ее защитного просветляющего покрытия. Для линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 квантовая эффективность зависит от длины волны и в диапазоне 190 – 350 нм изменяется от 0,4 до 0,7, при этом значения для конкретной длины волны примерно совпадают, поэтому при дальнейших оценочных расчетах считаем ее одинаковой.

Остальные параметры фотоячеек приведены в таблице. Отметим, что параметры линейки БЛПП-4000 отличаются от приведенных ранее в работе [3], поскольку в статье был рассмотрен опытный экземпляр линейки БЛПП-4000, конструкция фотоячейки которого в дальнейшем изменилась.

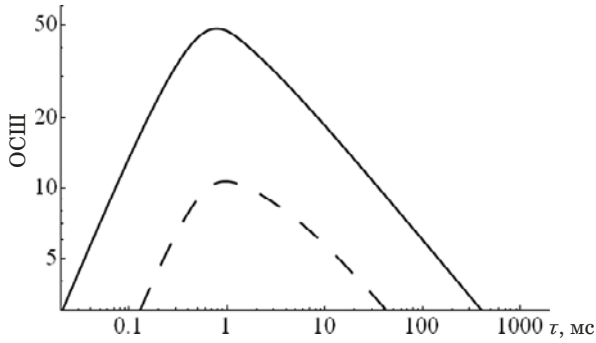
Для современных линеек фотодетекторов преобразование количества накопленных фотоэлектронов в выходной сигнал достаточно линейно (нелинейность менее 1%), поэтому для удобства этот сигнал можно представить в виде количества накопленных фотоэлектронов. Заметим, что значения выходного сигнала фотодетекторов в относительных единицах (отсчетах АЦП или процентах) всегда можно перевести в количество накопленных за время экспозиции фотоэлектронов. Коэффициент перевода равен полной зарядовой емкости фотоячейки в электронах, деленной на максимальный выходной сигнал в относительных единицах, например в отсчетах АЦП.

Рассмотрим, как влияют характеристики детектора на ОСШ при регистрации спектральных линий с постоянной во времени интенсивностью, которые характерны для интегрального спек-

Параметры линеек фотодетекторов

Параметр	БЛПП-2000	БЛПП-4000
$h$ , мкм	1000	200
$d$ , мкм	14	7
$\sigma_{rd}$ , $e^-$	25	16
$N_{fw}$ , $e^-$	200 000	80 000





**Рис. 2.** Зависимость ОСШ от времени экспозиции при регистрации одной и той же вспышки линейкой БЛПП-2000 (сплошная линия) и БЛПП-4000 (пунктирная линия)

трального анализа. Из работы [3] следует, что количество накопленных фотоэлектронов за время экспозиции  $\tau$  для спектральной линии, имеющей гауссово распределение интенсивности вдоль горизонтальной оси детектора с максимумом, приходящимся на середину фотоячейки, определяется как

$$n_{int, \max} = J_L h k \tau \operatorname{Erf}\left(\frac{d}{\lambda_{HM} \sqrt{Ln2}}\right), \quad (1)$$

где  $J_L$  — интенсивность потока фотонов для спектральной линии на единицу высоты фотоячейки [фотон/мкм/мс];  $h$  — высота фотоячейки;  $d$  — ширина фотоячейки;  $\lambda_{HM}$  — ширина спектральной линии на полувысоте;  $\operatorname{Erf}(x)$  — функция ошибок. При ширине фотоячейки, меньшей ширины изображения спектральной линии в фокальной плоскости, выражение (1) можно оценочно упростить до вида

$$n_{int, \max} \approx E_L S k \tau, \quad (2)$$

где  $E_L$  — освещенность фотоячейки [фотон/мкм<sup>2</sup>/мс]; центр которой совпадает с центром изображения спектральной линии в фокальной плоскости;  $S$  — площадь фотоячейки.

Тогда ОСШ для линий с постоянной во времени интенсивностью будет иметь вид

$$SNR_{int} \approx \frac{E_L S k \tau}{\sqrt{(E_{bk} S k + i_{dk}) \tau + \sigma_{rd}^2}}, \quad (3)$$

где  $E_{bk}$  — освещенность фотоячейки фоновым излучением;  $i_{dk}$  — темновой ток фотоячейки [электрон/мс].

Рассмотрим предельные случаи, которые следуют из уравнения (3). Для случая, когда дробо-

вой шум детектора много меньше шума чтения, ОСШ линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000 соотносятся как

$$\frac{SNR_{2000}}{SNR_{4000}} = \frac{S_{2000} \sigma_{rd,4000}}{S_{4000} \sigma_{rd,2000}} \approx 6,4. \quad (4)$$

Данное отношение является пределом при регистрации с минимальным временем экспозиции (например, в САЭС) или при регистрации спектральных линий в условиях крайне низкой интенсивности спектрального фона (например, при проведении анализа с использованием спектральных комплексов «Гранд-СВЧ» [10] и «Гранд-ИСП» [11]).

Другой предельный случай — дробовые шумы много больше шума чтения детектора, тогда выражение приобретает вид

$$\frac{SNR_{2000}}{SNR_{4000}} = \sqrt{\frac{S_{2000}}{S_{4000}}} \approx 3,1. \quad (5)$$

В частности, это имеет место в длинноволновой области дуговых атомно-эмиссионных спектров (интегральный анализ), а также при проведении атомно-абсорбционного спектрального анализа с источником непрерывного спектра (например, с помощью спектрального комплекса «Гранд-ААС»).

Рассмотрим, как влияют характеристики детектора на ОСШ регистрируемых вспышек в сцинтилляционном анализе. Исходя из работы [3] и считая, что распределение падающего излучения по длине волны имеет форму функции Гаусса с максимумом, приходящимся на центр фотоячейки, а максимум распределения по времени, имеющего также форму функции Гаусса, приходится на начало одного накопления и конец другого (наихудший случай), получаем

$$SNR_{sc} = \frac{J_{sc} h k}{2\sqrt{(E_{bk} S k + i_{dk}) \tau + \sigma_{rd}^2}} \times \operatorname{Erf}\left(\frac{d}{\lambda_{HM} \sqrt{Ln2}}\right) \operatorname{Erf}\left(\frac{\tau}{t_{HM} \sqrt{Ln2}}\right), \quad (6)$$

где  $J_{sc}$  — интенсивность потока фотонов от всей вспышки на единицу высоты фотоячейки;  $t_{HM}$  — продолжительность вспышки (ширина вспышки на полувысоте).

Полученные из уравнения (6) зависимости ОСШ от времени экспозиции для вспышки

продолжительностью 1 мс при освещенности, создаваемой фоновым излучением  $E_{bk} = 0,15$  фотон/мкм<sup>2</sup>/мс, приведены на рис. 2.

Видно, что при оптимальном времени экспозиции значение ОСШ детектора БЛПП-2000 превосходит значение БЛПП-4000 приблизительно в пять раз.

Стоит отметить, что значение освещенности фотоячейки фоновым излучением ( $E_{bk}$ ) вблизи спектральной линии золота Au I 267,595 нм при типовых условиях возбуждения с помощью установки «Поток» [7] зависит от типа анализируемой пробы и меняется в пределах от 0,08 до 0,5 фотон/мкм<sup>2</sup>/мс, при этом преимущество БЛПП-2000 перед БЛПП-4000 будет составлять 4 – 5,3 раза и в пределе будет стремиться к значению, определяемому выражением (4).

Таким образом, линейка БЛПП-4000, обладающая в два раза большей плотностью фотоячеек относительно БЛПП-2000, позволяет создавать спектральные приборы со вдвое большим спектральным разрешением, при этом пределы обнаружения теоретически должны снизиться приблизительно в три раза для интегрального анализа и в пять раз — для сцинтилляционного. Ожидается, что применение анализатора МАЭС на базе линейки БЛПП-4000 в составе спектрометра «Гранд» будет обеспечивать то же спектральное разрешение, что и оснащенный БЛПП-2000 спектрометр «Гранд-1500», при этом «Гранд» будет иметь более низкие пределы обнаружения, поскольку «Гранд-1500» уступает ему по светосиле в 5 – 20 раз [6].

Таким образом, созданы быстродействующие анализаторы МАЭС для спектрометров «Гранд» с 14 линейками фотодетекторов БЛПП-2000 с минимальным временем экспозиции 0,9 мс, а также с 14 линейками БЛПП-4000 и минимальным временем экспозиции 1,7 мс. Согласно теоретической оценке преимущество в пределах обнаружения БЛПП-2000 перед БЛПП-4000 должно составлять около трех раз в интегральном анализе и около пяти раз — в сцинтилляционном.

Разработанные анализаторы на базе БЛПП-2000 будут использоваться в спектральных комплексах «Гранд Поток» при проведении сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа природных порошковых проб; в спектральных комплексах «Гранд-СВЧ» и «Гранд-ИСП» — для решения задач, где необходимо добиться минимальных пределов обнаружения при регистрации линии с низким уровнем спектрального фона, а также в спектральных комплексах «Гранд-ААС» — при атомно-абсорбционном ана-

лизе с использованием источника непрерывного спектра.

Ожидается, что спектрометр «Гранд» с линейками БЛПП-4000 будет обладать спектральным разрешением спектрометра «Гранд-1500» с линейками БЛПП-2000 при более низких пределах обнаружения в САЭС.

## 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. Ч. 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. Ч. II. С. 39 – 43.
3. **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.
4. **Бабин С. А., Лабусов В. А., Селюнин Д. О., Дзюба А. А.** Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 108 – 113.
5. **Бабин С. А., Лабусов В. А., Селюнин Д. О., Дзюба А. А.** Анализаторы МАЭС для спектрометра «Гранд» с улучшенными характеристиками в области 258 – 269 нм / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 105 – 107.
6. **Дзюба А. А., Лабусов В. А., Васильева И. Е. и др.** Аналитические возможности спектрального комплекса «Гранд-Поток» при сцинтилляционном определении содержания золота и серебра в геологических пробах / Аналитика и контроль. 2017. Т. 21. № 1. С. 6 – 15.
7. **Дзюба А. А., Лабусов В. А., Васильева И. Е., Шабанова Е. В.** Светосила и спектральное разрешение спектрометров «Гранд», «Гранд-1500» и СТЭ-1 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 101 – 105.
8. **Гаранин В. Г., Ращенко В. В.** Программируемые генераторы для возбуждения атомно-эмиссионных спектров «Шаровая молния» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 54 – 58.
9. **Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А.** Оптимизация базовой экспозиции твердотельного детектора излучения в сцинтилляционном атомно-эмиссионном спектральном анализе / Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 1. С. 6 – 12.
10. **Пелипасов О. В., Лабусов В. А., Путьмаков А. Н. и др.** Комплекс «Гранд-СВЧ» для атомно-эмиссионного анализа растворов / Материалы XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 155 – 160.
11. **Пелипасов О. В., Лохтин Р. А., Лабусов В. А., Пелевина Н. Г.** Аналитические возможности спектрометра «Гранд» при анализе растворов с использованием индуктивно-связанной плазмы / Материалы XVI Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности», Новосибирск, 2018. С. 161 – 164.

## REFERENCES

1. **Labusov V. A., Garanin V. G., Zarubin I. A.** New Spectral Systems based on MAES Analyzers / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 15 – 20 [in Russian].
2. **Selyunin D. O., Babin S. A., Labusov V. A.** High-speed MAES analyzers with Gigabit Ethernet interface / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 39 – 43 [in Russian].
3. **Babin S. A., Labusov V. A.** Estimation of the optimal parameters of multi-element solid-state detectors for atomic emission spectral scintillation analysis / Analit. Kontrol'. 2014. Vol. 18. N 1. P. 40 – 49 [in Russian].

4. **Babin S. A., Labusov V. A., Selyunin D. O., Dzyuba A. A.** BLPP-2000 array based high-speed multichannel analyzers of atomic emission spectra / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 108 – 113 [in Russian].
5. **Babin S. A., Labusov V. A., Selyunin D. O., Dzyuba A. A.** MAES Analyzers for a Grand spectrometer with improved performance in the range 258 – 269 nm / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 105 – 107 [in Russian].
6. **Dzyuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. E.** Analytical capabilities of "Grand-Potok" spectral system for the scintillation determination of gold and silver in geological samples / *Analit. Kontrol'*. 2017. Vol. 21. N 1. P. 6 – 15 [in Russian].
7. **Dzyuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. E., Shabanova E. V.** Luminosity and spectral resolution of "Grand", "Grand-1500", and STE-1 spectrometers / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 101 – 105 [in Russian].
8. **Garanin V. G., Rashchenko V. V.** "Thunderball" programmable generators for atomic emission spectra excitation / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 54 – 58 [in Russian].
9. **Dzyuba A. A., Labusov V. A., Babin S. A.** Basic exposure time optimization of a solid-state radiation detector in scintillation atomic emission spectrometry / *Analit. Kontrol'*. 2015. Vol. 19. N 1. P. 6 – 12 [in Russian].
10. **Pelipasov O. V., Labusov V. A., Put'makov A. N., et al.** "Grand-UHF" complex for atomic emission analysis of solutions / *Proc. of XVI International symposium "The MAES analyzers application in industry"*, Novosibirsk, 2018. P. 155 – 160 [in Russian].
11. **Pelipasov O. V., Lokhtin R. A., Labusov V. A., Pelevina N. G.** Analytical capabilities of the "Grand" spectrometer in the solutions analysis using inductively coupled plasma / *Proc. of XVI International symposium "The MAES analyzers application in industry"*, Novosibirsk, 2018. P. 161 – 164 [in Russian].