

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-27-33>

## НОВЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР «ГРАНД-2000»

© **Анатолий Александрович Дзюба<sup>1,2</sup>, Владимир Александрович Лабусов<sup>1,2,3\*</sup>, Игорь Александрович Зарубин<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

<sup>2</sup> ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1, к. 100;

\*e-mail: labusov@vmk.ru

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, д. 20.

*Статья поступила 23 сентября 2021 г. Поступила после доработки 7 ноября 2021 г.  
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Для снижения вероятности спектральных наложений при прямом анализе порошков геологических проб методом дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии создан спектрометр «Гранд-2000» с рабочим диапазоном 190 – 780 нм с двумя параллельно работающими полихроматорами на основе схемы Пашена-Рунге и анализаторами МАЭС. Первый полихроматор, выполненный на основе вогнутой дифракционной решетки 2400 штр/мм с радиусом кривизны поверхности подложки два метра, регистрирует интенсивность излучения в области 190 – 350 нм с повышенным разрешением. Цель работы — экспериментальное определение светосилы и спектрального разрешения спектрометра «Гранд-2000» с анализаторами МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000. Светосилу определяли путем сравнения значений интенсивности спектральных линий, зарегистрированных с использованием спектрометров «Гранд-2000» и «Гранд». Разрешение спектрометра (ширину спектральной линии на полувысоте) определяли для различных конфигураций прибора, которые отличались типами линеек фотодетекторов. Установлено, что новый спектрометр «Гранд-2000» с линейками БЛПП-4000 имеет вдвое лучшее разрешение (4 пм) по сравнению со спектрометром «Гранд». При этом светосила спектрометра «Гранд-2000» ниже в 3 – 8 раз в зависимости от длины волны. Показано, что спектрометр «Гранд-2000» с линейками БЛПП-2000 имеет пятикратное преимущество в отношении сигнал-шум в коротковолновой области спектра по сравнению со спектрометром «Гранд» с БЛПП-4000, при этом их спектральные разрешения равны.

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионный спектрометр; спектральное разрешение; светосила; «Гранд»; анализатор спектров МАЭС; линейка фотодетекторов.

## A NEW ATOMIC-EMISSION SPECTROMETER GRAND-2000

© **Anatoly A. Dzyuba<sup>1,2</sup>, Vladimir A. Labusov<sup>1,2,3\*</sup>, Igor A. Zarubin<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1, prospekt Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> VMK-Optoelektronika, 1-100, prospekt Akademika Koptyuga, Novosibirsk, 630090, Russia; \*e-mail: labusov@vmk.ru

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, prospekt K. Markska, Novosibirsk, 630073, Russia.

*Received September 23, 2021. Revised November 7, 2021. Accepted November 24, 2021.*

The design of a Grand-2000 atomic emission spectrometer is considered. The optical efficiency and spectral resolution of a Grand-2000 spectrometer are compared with the corresponding characteristics of a Grand spectrometer with multi-element emission spectrum analyzers based on BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector arrays. The optical efficiencies are compared using the ratio of spectral line intensities recorded on the two spectrometers using the same types of photodetectors. The resolution of the spectrometers (FWHM of the spectral line) is measured using different types of photodetectors. It is shown that, when using BLPP-4000 photodetectors, the resolution of a Grand-2000 spectrometer is twice as large (4 pm), compared to a Grand spectrometer. The optical efficiency of a Grand-2000 spectrometer is 3 – 8 times lower, depending on the wavelength. It is also shown that a Grand-2000 spectrometer with BLPP-2000 photodetector arrays has better optical efficiency in the short-wavelength region compared to a Grand spectrometer with BLPP-4000 photodetector arrays at the same values of the spectral resolution.

**Keywords:** atomic emission; spectrometer; spectral resolution; optical efficiency; Grand; spectrum analyzer; MAES; photodetector arrays.

## Введение

В настоящее время при проведении поиска полезных ископаемых широко применяют метод атомно-эмиссионной спектрометрии (АЭС) с введением пробы способом просыпки-вдувания в дуговой разряд переменного тока [1 – 3]. Дуговая АЭС зарекомендовала себя как чувствительный и экспрессный метод многоэлементного анализа, характеризующийся низкой себестоимостью, поскольку метод не требует переведения проб в раствор и отделения анализаторов от матрицы. Одной из разновидностей АЭС является метод сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии (САЭС) [4, 5], суть которого заключается в регистрации вспышек интенсивности на длине волн аналитической линии элемента отдельных частиц вещества, непрерывно поступающих в плазму. Способ эффективен для определения элементов, которые находятся в пробе в виде отдельных включений, например, благородных металлов, при попадании которых в плазму разряда в спектре наблюдаются вспышки интенсивности на длинах волн линий этих элементов. В настоящее время пределы обнаружения для САЭС составляют (г/т): Au — 0,004; Ag — 0,05; Pd — 0,0013; Pt — 0,03 [6]. Метод получил широкое распространение при поиске благородных металлов [7 – 11] также и благодаря наличию современных спектрометров, производимых предпри-

ятием «ВМК-Оптоэлектроника», в частности, спектрометра «Гранд», современные версии которого основаны на высокочувствительных линейках фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 [12]. Пространственная разрешающая способность линеек БЛПП-4000 в два раза выше, чем БЛПП-2000, поэтому представляется более целесообразным использовать БЛПП-4000 при анализе геологических образцов, сложные атомно-эмиссионные спектры которых характеризуются многочисленными взаимными наложениями. В целях дальнейшего развития метода САЭС был разработан спектрометр высокого разрешения с диаметром круга Роуланда 2 м — «Гранд-2000».

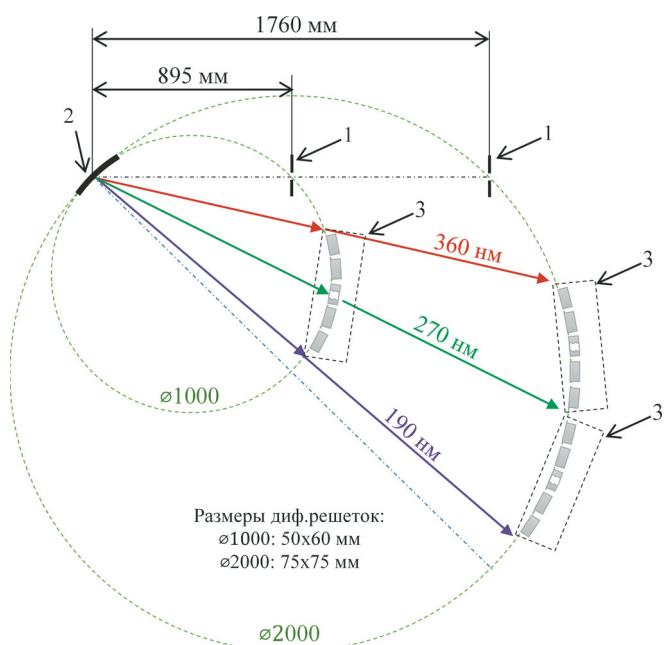
Цель настоящей работы — экспериментальное определение светосилы и спектрального разрешения спектрометра «Гранд-2000» с анализаторами МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000, а также сравнение этих характеристик с характеристиками спектрометра «Гранд» [9].

## Экспериментальная часть

Конструктивно спектрометр «Гранд-2000» состоит из двух параллельно работающих полихроматоров на основе схемы Пашена – Рунге. Первый полихроматор выполнен на основе вогнутой дифракционной решетки 2400 штр/мм с радиусом кривизны поверхности подложки два метра. Спектр на выходе первого полихроматора в диапазоне 190 – 350 нм регистрируют две сборки линеек фотодетекторов БЛПП-2000 или БЛПП-4000 по 14 линеек каждая. Второй полихроматор выполнен на основе вогнутой дифракционной решетки 900 штр/мм с радиусом кривизны поверхности подложки один метр. Спектр на выходе второго полихроматора в диапазоне 350 – 780 нм регистрирует одна сборка из 14 линеек фотодетекторов БЛПП-2000 или БЛПП-4000. В данной работе для исследований использовали первый полихроматор в спектральном диапазоне 190 – 350 нм.

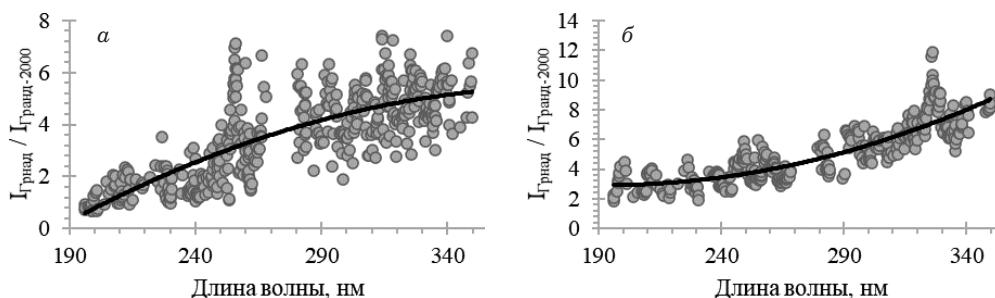
Как упоминалось ранее, отличие нового спектрометра «Гранд-2000» от «Гранд» заключается в увеличенном до двух метров диаметре круга Роуланда, при этом в обоих спектрометрах используются дифракционные решетки 2400 штр/мм, что приводит к двухкратному увеличению линейной дисперсии нового спектрометра относительно спектрометра «Гранд». Таким образом, при применении одинаковых линеек фотодетекторов ожидается двухкратное увеличение спектрального разрешения. Различие полихроматоров иллюстрирует рис. 1.

Как известно, светосила спектрометров, построенных по схеме Пашена – Рунге, обратно



**Рис. 1.** Схематическое изображение полихроматоров коротковолнового диапазона «Гранд» и «Гранд-2000»: 1 — входная щель; 2 — дифракционная решетка; 3 — сборка из 14 линеек фотодетекторов БЛПП-4000

**Fig. 1.** Schematic representation of the short-wavelength polychromators (Grand and Grand-2000): 1 — entrance slit; 2 — diffraction grating; 3 — assembly of 14 BLPP-4000 linear photodetectors



**Рис. 2.** Зависимость соотношения интенсивностей спектральных линий для спектрометров «Гранд» и «Гранд-2000» от длины волны при регистрации линейкой фотодетекторов БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б)

**Fig. 2.** Wavelength dependence of the ratio of spectral line intensities recorded by Grand and Grand-2000 spectrometers using BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) photodetector arrays

пропорциональна квадрату радиуса круга и описывается формулой [13]:

$$E = \rho B a_0 H / r^2, \quad (1)$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения решетки;  $B$  — яркость источника излучения;  $a_0$  и  $H$  — ширина и высота заштрихованной области решетки;  $r$  — радиус круга Роуланда.

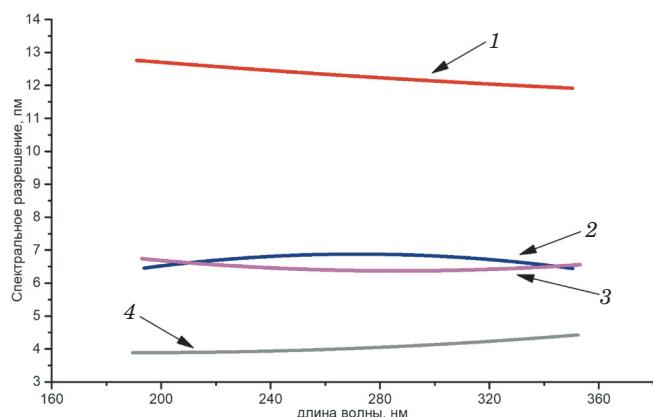
Следовательно, увеличение диаметра круга Роуланда при прочих равных условиях несомненно приведет к уменьшению светосилы прибора, поэтому для компенсации данного изменения были увеличены размеры дифракционной решетки. Решетка спектрометра «Гранд» имеет размеры  $50 \times 60$  мм, «Гранд-2000» —  $75 \times 75$  мм. Таким образом, в соответствии с приведенной формулой расчетное различие в светосиле приборов (без учета коэффициента отражения)  $E_{\text{Гранд}}/E_{\text{Гранд-2000}} \approx 2,1$ .

Однако существует ряд факторов, способных повлиять на значения светосилы и спектрального разрешения прибора, поэтому была создана экспериментальная установка для сравнения спектрометров «Гранд» и «Гранд-2000» по данным показателям. Она состояла из электродуговой установки «Поток» для анализа порошковых проб способом просыпки-вдувания и исследуемого спектрометра. В качестве детекторов применяли сборки линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000. Установка «Поток» работала в условиях, оптимизированных для САЭС [14]. Режим работы установки: дуга переменного непрерывного тока  $\pm 22$  А с частотой 100 Гц; обжиг электродов — 30 А в течение 2 с. Сигнал регистрировали в течение 16,5 с при времени базовой экспозиции 3 мс. Ширина и высота щели спектрометра «Гранд» составляли 15 мкм и 5 мм соответственно, «Гранд-2000» — 15 мкм и 10 мм. При анализе геологических и технологических проб различного состава навеску массой 150 мг равномерно рассыпали на транспортере и подавали в дуговой разряд со скоростью 13 мм/с.

Для корректного сравнения светосилы в обоих спектрометрах использовали анализаторы МАЭС с одинаковыми типами линеек фотодетекторов при идентичных условиях регистрации спектров. Спектральное разрешение спектрометров оценивали с применением линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 также при идентичных условиях.

## Обсуждение результатов

**Сравнение светосилы.** Интенсивность спектральных линий ( $I$ ) определяли по двум фотоячейкам в окрестности максимума линий в зарегистрированных МАЭС с линееками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 интегральных спектрах. На рис. 2 представлены полученные в ходе эксперимента зависимости отношения интенсивности спектральных линий, зарегистрированных спектрометрами «Гранд» и «Гранд-2000» с применением линеек БЛПП-2000 и БЛПП-4000, от длины волны. Значения интенсивности, зарегистрированные спектрометром «Гранд-2000» с линееками фотодетекторов БЛПП-2000 при экспозиции 1,5 мс, были умножены на 2, поскольку в остальных случаях экспозиция составляла 3 мс. Экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второго порядка. Видно, что интенсивности спектральных линий для спектрометра «Гранд» при использовании линеек БЛПП-2000 в 1–5 раз больше, чем для спектрометра «Гранд-2000», а в случае линеек БЛПП-4000 — в 3–8 раз. Такое различие имеет две причины: во-первых, в сборке линеек БЛПП-2000 анализатора МАЭС для спектрометра «Гранд» в конструкции на нечетных линееках используются зеркала, коэффициент отражения которых значительно падает в области длин волн меньше 230 нм; во-вторых, количество фотоячеек, на которые падает излучение, для спектрометра «Гранд» практически не меняется при смене линеек фотодетекторов, в то время как для спектрометра «Гранд-2000» это количество возрастает при смене линеек БЛПП-2000 на



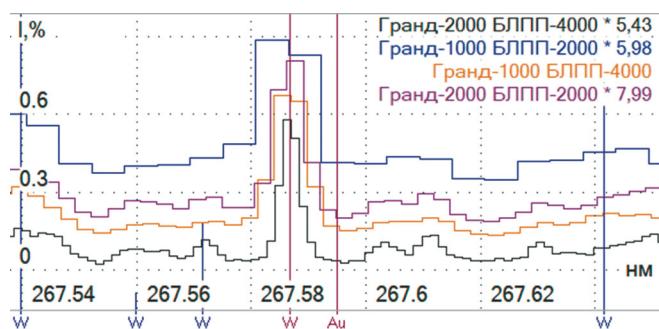
**Рис. 3.** Зависимость спектрального разрешения спектрометров от длины волн: 1 — «Гранд» с линейками фотодетекторов БЛПП-2000; 2 — «Гранд» — БЛПП-4000; 3 — «Гранд-2000» — БЛПП-2000; 4 — «Гранд-2000» — БЛПП-4000

**Fig. 3.** Dependence of the spectral resolution of spectrometers on the wavelength: 1 — Grand with BLPP-2000 photodetector arrays; 2 — Grand — BLPP-4000; 3 — Grand 2000 with BLPP-2000; 4 — Grand 2000 with BLPP-4000

БЛПП-4000, и, кроме того, при использовании последних возрастает с увеличением длины волны. Это приводит к распределению излучения на большее количество фотоячеек и падению его измеряемой интенсивности, которую вычисляли по интегралу сигналов с двух соседних фотоячеек.

Ранее в работе [15] было показано, что отношение сигнал-шум (ОСШ) линеек БЛПП-2000 выше, чем у БЛПП-4000 примерно в 5 раз. Отсюда следует, что график соотношения ОСШ спектрометра «Гранд» с анализаторами МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-4000 и ОСШ спектрометра «Гранд-2000» с БЛПП-2000 будет иметь вид, аналогичный графику на рис. 2, но значения соотношения уменьшаются в 5 раз и составят от 0,2 до 1, при этом спектральные разрешения приборов будут равны. Это говорит о пятикратном преимуществе в ОСШ спектрометра «Гранд-2000» с линейками БЛПП-2000 в сравнении со спектрометром «Гранд» с БЛПП-4000 в коротковолновой области спектра.

**Сравнение разрешения.** Разрешение спектрометров оценивали по ширине спектральных линий на их полувысоте. Подробно способ вычисления описан в работе [16]. На рис. 3 приведены зависимости ширины спектральных линий от длины волны для спектрометров «Гранд» и «Гранд-2000». Из зависимостей видно, что разрешение спектрометра «Гранд» улучшается примерно в два раза с применением линеек фотодетекторов БЛПП-4000 вместо БЛПП-2000. При этом разрешение спектрометров «Гранд» с БЛПП-4000 и «Гранд-2000» с БЛПП-2000 становится практически одинаковым. Наилучшим разрешением обладает конфигурация 4 (спектро-



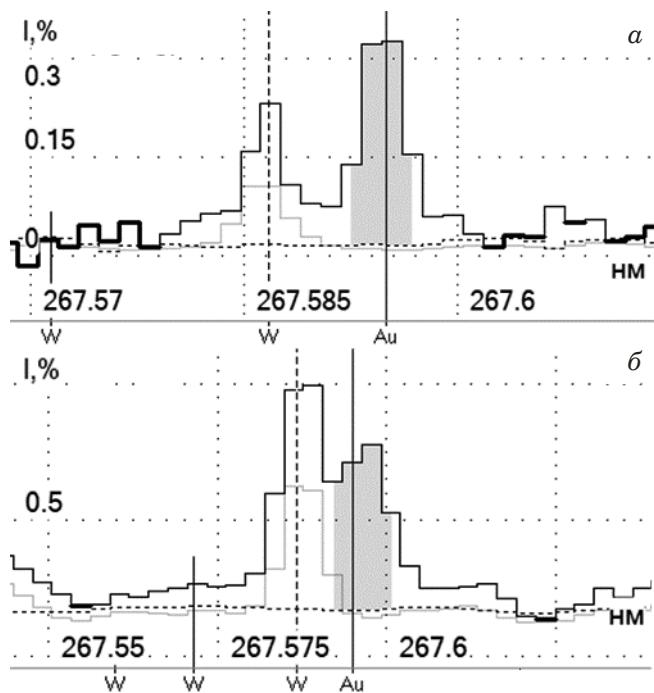
**Рис. 4.** Фрагмент спектра ГСО состава алюмосиликатных рыхлых отложений СГХМ-4 с линией WI 267,5867 нм, расположенной рядом с линией Au I 267,595 нм, зарегистрированный линейками БЛПП-2000 и БЛПП-4000 спектрометров «Гранд» и «Гранд-2000» (исходные значения были умножены на коэффициент для согласования масштаба)

**Fig. 4.** Fragment of the spectrum of a reference material of loose aluminosilicate deposits (SGKhM-4) with W I 267,5867 nm spectral line located near the Au I 267,595 nm line recorded by BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector arrays on Grand and Grand-2000 spectrometers (the intensity values are multiplied by a factor to match the scale)

метр «Гранд-2000» с БЛПП-4000): его значение уменьшается примерно в два раза по сравнению с конфигурациями 2 и 3 на рис. 3.

Для наглядного представления изменения спектрального разрешения на рис. 4 показан фрагмент спектра ГСО состава алюмосиликатных рыхлых отложений СГХМ-4 с линией вольфрама 267,5867 нм, расположенной рядом с линией золота 267,595 нм. Видно спектральное наложение линии WI 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 в спектрометре «Гранд» и БЛПП-2000 в «Гранд-2000», спектральное наложение линии W на линию Au становится значительно меньше, а для спектрометра «Гранд-2000» с БЛПП-4000 такого наложения не наблюдается, что иллюстрируют фрагменты спектров, представленные на рис. 5.

**Сравнение результатов анализа.** Комплексное влияние разных конфигураций приборов на результаты сцинтилляционного анализа исследовали при определении золота в геологических образцах: анализировали СО, паспортные данные которых представлены в табл. 1. Способ вычисления аналитического сигнала для определения валового содержания золота и количества вспышек его частиц-носителей подробно описан в работе [6]. Полученные градуировочные зависимости представлены на рис. 6 и 7. Угол наклона всех полученных графиков близок к  $45^\circ$ , что свидетельствует о близости выбранных условий получения, регистрации и обработки аналитических сигналов к оптимальным. Среднеквадрати-

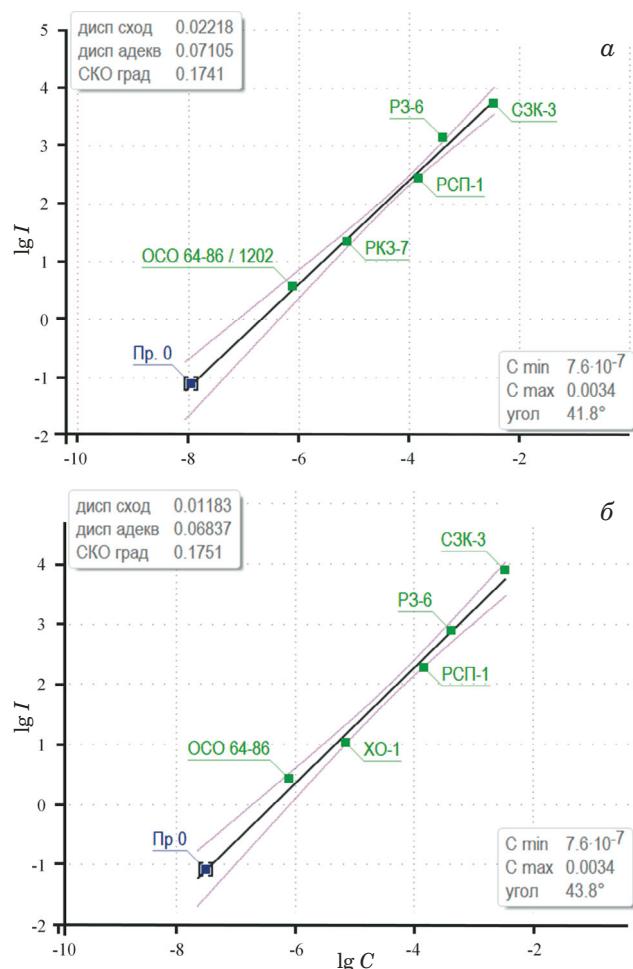


**Рис. 5.** Фрагменты спектра ГСО СГХМ-4 со вспышкой интенсивности линии Au I 267,595 нм вблизи линии W I 267,5867 нм, зарегистрированного линейками БЛПП-4000 на спектрометре «Гранд-2000» (а) и «Гранд» (б)

**Fig. 5.** Fragments of the spectrum of the SSS of alumino-silicate loose deposits (SGKhM-4) that contain a flash of the Au I 267.595 nm spectral line located near W I 267.5867 nm line recorded by BLPP-4000 photodetector arrays on a Grand-2000 (a) and Grand (b) spectrometers

ческие отклонения (СКО) градуировочных графиков для всех конфигураций за исключением «Гранд-2000» — БЛПП-4000 различались незначительно, следовательно, конфигурация оборудования практически не влияет на повторяемость результатов анализа. Повышение СКО для конфигурации «Гранд-2000» с БЛПП-4000, возможно, связано с меньшей чувствительностью этой линейки фотодетекторов и, как следствие, обнаружением меньшего количества вспышек частиц золота, что приводит к повышению СКО.

Важным показателем прибора является предел обнаружения, оценить его можно по значению нулевого порога (Пр0). Его значение — ми-



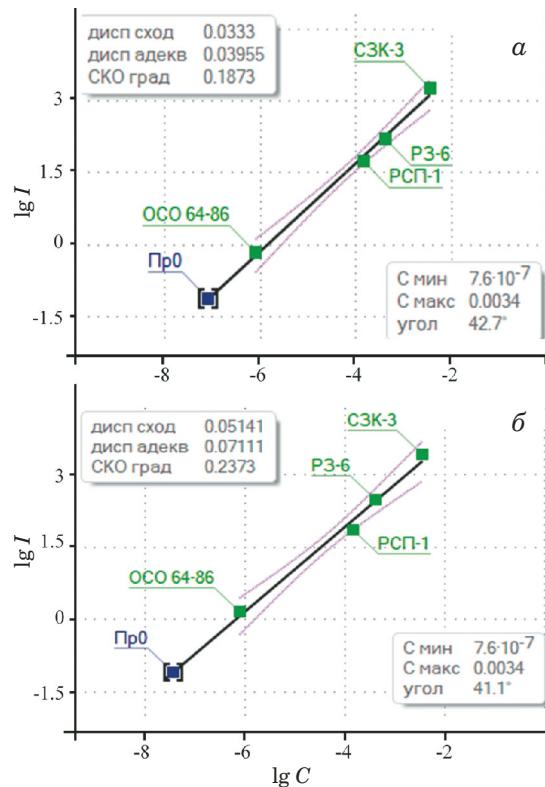
**Рис. 6.** Градуировочные зависимости для определения золота по линии Au I 267,595 нм методом САЭС, полученные с использованием линеек БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б) спектрометра «Гранд» (время базовой экспозиции — 3 мс)

**Fig. 6.** Calibration dependences of the intensity  $I$  (%) of Au I 267.595 nm spectral line on the Au content  $C$  (ppm) in the standard sample obtained using BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) photodetector arrayss on a Grand spectrometer (base exposure time 3 msec)

нимальная интенсивность одиночной вспышки, которую способен зарегистрировать спектральный прибор, следовательно, увеличение Пр0 приводит к тому, что для вычисления аналитического сигнала используются только интенсив-

**Таблица 1.** Анализируемые стандартные образцы  
**Table 1.** The reference samples used for analysis

Индекс СО	Номер по реестру страны-производителя	Тип СО	Аттестованное содержание Au, г/т
OCO 64-86	KZ.03/01.00208-2010, Казахстан	Почва	0,0076 ± 0,0008
RCP-1	OCO 202-90, РФ	Руда сульфидно-полиметаллическая	1,44 ± 0,05
P3-6	OCO 283-96, РФ	Руда золотосульфидная	4,1 ± 0,1
C3K-3	GSO 2739-83, РФ	Флотоконцентрат золотосодержащей руды	34 ± 1
XO-1	GSO 1703-86, РФ	Хвосты обогащения	0,07 ± 0,01
PK3-7	OCO 494-11, РФ	Руда кварцевая золотосодержащая	0,076 ± 0,006



**Рис. 7.** Градуировочные зависимости для определения золота по линии Au I 267,595 нм методом САЭС, полученные с использованием линеек БЛПП-2000 (а) и БЛПП-4000 (б) спектрометра «Гранд-2000» (время базовой экспозиции — 1,5 (а) и 3 мс (б))

**Fig. 7.** Calibration dependences of the intensity  $I$  (%) of Au I 267.595 nm spectral line on the Au content  $C$  (ppm) in the standard sample obtained using BLPP-2000 (a) and BLPP-4000 (b) photodetector arrays on a Grand-2000 spectrometer with a base exposure time of 1.5 msec (a) and 3 msec (b)

ности от более крупных частиц аналита. Подробное описание способа расчета нулевого порога представлено в работе [17]. Определив по градуировочным зависимостям (см. рис. 6, 7) содержание Au, соответствующее интенсивности Пр0, получили значения чувствительности прибора, соответствующие минимальному содержанию аналита в одной единственной частице-носителе

**Таблица 2.** Пределы обнаружения золота методом САЭС

**Table 2.** The detection limits of gold determined by scintillation AES

Спектрометр	Детектор (время базовой экспозиции)	Предел обнаружения, мг/т
Гранд	БЛПП-2000 (3 мс)	$0,103 \pm 0,020$
	БЛПП-4000 (3 мс)	$0,7 \pm 0,6$
Гранд-2000	БЛПП-2000 (1,5 мс)	$0,8^*$
	БЛПП-4000 (3 мс)	$3,6 \pm 0,3$

\* Результат однократного измерения.

золота, от которой зарегистрирована вспышка. Полученные данные представлены в табл. 2. Стоит отметить, что содержание золота, вычисленное по значению Пр0, не соответствует реальным пределам обнаружения спектрометров, а показывает, какие самые слабые вспышки аналита могут быть зарегистрированы прибором. На практике значение предела обнаружения может оказаться выше из-за влияния внешних факторов, которые не учитывали в ходе эксперимента, в частности, выгорания более мелких частиц до входа в зону регистрации прибора или спектрального влияния при анализе проб с другой матрицей.

## Заключение

Таким образом, оценка характеристик спектрометра «Гранд-2000» с анализаторами МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 показала, что разрешение нового спектрометра «Гранд-2000» примерно в два раза лучше, чем спектрометра «Гранд», и замена линеек БЛПП-2000 на БЛПП-4000 в любом из спектрометров приводит к улучшению спектрального разрешения примерно в два раза. При этом с линейками БЛПП-2000 светосила спектрометра «Гранд» равна светосиле «Гранд-2000» в области длины волны 190 нм и превышает ее в 5 раз в области 350 нм, а при замене линеек на БЛПП-4000 преимущество спектрометра «Гранд-2000» в светосиле возрастает до 3 – 8 раз.

С учетом лучшего соотношения сигнал-шум линеек фотодетекторов БЛПП-2000 по сравнению с БЛПП-4000 спектрометр «Гранд-2000» с анализаторами МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 в сравнении со спектрометром «Гранд» с БЛПП-4000 имеет пятикратное преимущество по соотношению сигнал-шум в коротковолновой области спектра. При этом их спектральные разрешения равны.

Использование в спектрометре «Гранд-2000» линеек БЛПП-4000 позволяет добиться разрешения в 4 пм, что при анализе геологических проб, спектры которых часто содержат множество линий, может существенно улучшить результаты определения элементов за счет снижения спектральных наложений на линию аналита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баландина Н. П., Захарова М. Л. Новые возможности применения трехфазной дуги и анализатора МАЭС для спектрального анализа горных пород / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 31 – 34. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-31-34
2. Мирошникова Л. К., Семенякина Н. В., Филиппова Н. Е., Шаров С. А. Распределение иттрия и иттербия в породах Норильского региона / Научн. вест. Арктики. 2020. № 9. С. 44 – 49.

3. Аполицкий В. Н. Прямой интегрально-сцинтилляционный атомный эмиссионный спектральный метод анализа порошковых проб / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 2. С. 3 – 9.
4. Райхбаум Я. Д., Малых В. Д., Лужкова М. А. Сцинтилляционный метод спектрального анализа tantalа и ниобия в рудах / Заводская лаборатория. 1963. Т. 6. С. 677 – 680.
5. Прокопчук С. И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии. — Иркутск: Институт геохимии СО РАН, 1994. — 64 с.
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. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
7. Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Горячева Е. М. и др. Определение благородных металлов в геологических пробах четырех золоторудных месторождений северо-востока России / Журн. аналит. химии. 2018. Т. 73. № 6. С. 433 – 445. DOI: 10.7868/S004445021806004X
8. Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Горячева Е. М. и др. Благородные металлы в образцах черных сланцев золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) по данным метода сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии / Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1238 – 1253. DOI: 10.15372/GiG20180808
9. Заякина С. Б., Леснов Ф. П., Аношин Г. Н., Балухтин А. В. Атомно-эмиссионное определение благородных металлов в пробах из гидротерм вблизи вулканов Курильских островов с использованием комплекса «Гранд-Поток» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 38 – 41.
10. Шавекин А. С., Купцов А. В., Заякина С. Б., Аношин Г. Н. Сравнение результатов сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа, полученных с использованием установки «Поток» и дугового двухструйного плазмотрона «Факел» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 97 – 100. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-97-100
11. Шевелев Г. А., Василенко Л. И., Каменская Э. Н. и др. Благородные и редкие металлы в некоторых месторождениях угля Казахстана / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 38 – 44. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
12. Бабин С. А., Селюнин Д. О., Лабусов В. А. Быстро действующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 96 – 102. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102
13. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. — Л.: Машиностроение, 1975. — 312 с.
14. Шабанова Е. В., Бусько А. Е., Васильева И. Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким времененным разрешением / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 24 – 33.
15. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А. Анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии / Аналитика и контроль. 2019. Т. 23. № 1. С. 35 – 42. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.005
16. Лабусов В. А., Пут'яков А. Н., Зарубин И. А., Гаранин В. Г. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 7 – 13.
17. Шабанова Е. В., Васильева И. Е., Бусько А. Е., Кунавин А. Б. Оценка размера частиц золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением / Аналитика и контроль. 2010. № 4. 2010. С. 186 – 200.

## REFERENCES

1. Balandina N. P., Zakharova M. L. New Applications of a Three-Phase Arc and a MAES Analyzerfor Spectral Analysis of Rocks / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 31 – 34 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-31-34
2. Miroshnikova L. K., Semenyakina N. V., Fillipova N. E., Sharov S. A. Distribution of yttrium and ytterbium in the rocks of the Norilsk region / Nauch. Vestn. Arktiki. 2020. N 9. P. 44 – 49 [in Russian].
3. Apolitsky V. N. Direct integral-scintillation atomic emission spectral analysis of powder samples / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 2. P. 3 – 9 [in Russian].
4. Raikhbaum Ya. D., Malykh V. D., Luzhкова M. A. Scintillation method for spectral analysis of tantalum and niobium in ores / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1963. Vol. 6. P. 677 – 680 [in Russian].
5. Prokopchuk S. I. Scintillation spectral analysis in geology. — Irkutsk: Izd. Inst. Geokhimii SO RAN, 1994. — 64 p. [in Russian].
6. Dzyuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. A., et al. 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]. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
7. Vasil'eva I. E., Shabanova E. V., Goryacheva E. M., et al. Determination of Precious Metals in Geological Samples from Four Gold Ore Deposits of the North-East of Russia / J. Anal. Chem. 2018. Vol. 73. N 6. P. 539 – 550. DOI: 10.1134/S1061934818040123
8. Vasil'eva I. E., Shabanova E. V., Goryacheva E. M., et al. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry / Rus. Geol. Geophys. 2018. Vol. 59. N 8. P. 997 – 1009. DOI: 10.1016/j.rgg.2018.07.019
9. Zayakina S. B., Lesnov F. P., Anoshin G. N., Balukhin A. V. Capabilities of a «Grand-Potok» System for Atomic-Emission Determination of Noble Metals in the Samples from Hydrotherms near the Volcanoes of the Kuril Islands / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 38 – 41 [in Russian].
10. Shavekin A. S., Kuptsov A. V., Zayakina S. B., Anoshin G. N. Comparison of the Results of Scintillation Atomic Emission Analysis Obtained on Spectral System “Potok” and a Two-Jet Arc Plasmatron “Fakel” / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 97 – 100 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-97-100
11. Shevelev G. A., Vasilenko L. I., Kamenskaya E. N., et al. Noble and Rare Metals in Some Coal Deposits of Kazakhstan / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 38 – 44 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
12. Babin S. A., Selyunin D. O., Labusov V. A. High-Speed Multichannel MAES Analyzers Based on BLPP-2000 and BLPP-4000 Photodetector Arrays / Inorg. Mater. 2020. Vol. 56. N 14. P. 1431 – 1435. DOI: 10.1134/S0020168520140022
13. Peisakhson I. V. Optics of spectral instruments. — Leningrad: Mashinostroenie, 1975 — 312 p. [in Russian].
14. 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 / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 24 – 33 [in Russian].
15. Dzyuba A. A., Labusov V. A., Babin S. A. Testing of MAES analyzers with BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector linear arrays in a “GRAND-POTOK” spectral system / Analit. Kontrol'. 2019. Vol. 23. N 1. P. 35 – 42 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.005
16. Labusov V. A., Put'makov A. N., Zarubin I. A., Garanin V. G. New multichannel optical spectrometers based on MAES analyzers / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 7 – 13 [in Russian].
17. Shabanova E. V., Vasilyeva I. E., Busko A. E., Kunaviv A. B. Estimation of Au- and Ag- particle sizes in geological samples using high time-resolved scintillation atomic emission analysis / Analit. Kontrol'. 2010. Vol. 14. N 4. P. 186 – 200 [in Russian].