

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА ПОДВЕРЖЕННЫХ АБЕРРАЦИЯМ СНИМКАХ ПРИ КАЛИБРОВКЕ СПЕКТРОМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ДЛИНАМ ВОЛН

А.О. Мартинов<sup>1</sup>

antonmartenov@gmail.com

Г.С. Литвинович<sup>1</sup>

litvinovichgs@yandex.by

Л.А. Смоленцева<sup>2</sup>

lilka26@yandex.ru

И.В. Рассказов<sup>2</sup>

igor.rasskazov1@rsce.ru

<sup>1</sup> НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»,

Королев, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Спектрометры изображения применяются в системах дистанционного зондирования Земли и требуют проведения калибровки по длинам волн. Для наиболее точной калибровки по длинам волн должны быть учтены различные оптические аберрации, такие как дисторсия, астигматизм и кривизна поля изображения. Предложен подход к калибровке по длинам волн каждой строки детектора. Разработан алгоритм учета оптических аберраций с помощью детектирования спектральных линий на изображениях, полученных спектрометром при регистрации эталонных источников линейчатого излучения. Сначала происходят объединение и предобработка снимков эталонных источников, затем независимый построчный анализ изображения на предмет определения центров спектральной линии. Далее полученные данные снова анализируются как одно целое и в результате выделяется спектральная линия. Применение разработанного алгоритма позволило откалибровать видеоспектральную систему, созданную и предназначенную для проведения работ по дистанционному зондированию Земли в рамках космического эксперимента «Ураган». В случае использования трех спектрометров в видеоспектральной системе процесс от обработки калибровочных снимков до калибровки по длинам волн длится 20...30 мин. Результа-

### Ключевые слова

*Спектр, спектральная линия, матричный детектор, линейный источник, калибровка по длинам волн, видеоспектральная система*

ты калибровки видеоспектральной системы пока- Поступила 23.05.2024  
зали возможность использования разработанного Принята 27.12.2024  
алгоритма для решения подобных задач © Автор(ы), 2025

---

**Введение.** Спектрометры изображения [1], применяемые в гиперспектральных системах дистанционного зондирования Земли [2, 3], позволяют получать изображение щели на двумерном детекторе, по одной оси которого осуществляется пространственная развертка, а по другой — развертка по длинам волн.

Научная аппаратура для видеоспектральной системы (ВСС) [4, 5] разработана и изготовлена в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ по заказу и техническому заданию ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» в рамках выполнения государственного контракта. Видеоспектральная система используется в космическом эксперименте «Ураган» [6–10], постановщиком которого является ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», для исследования поверхности Земли с борта российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Улучшенный образец ВСС отправлен на борт МКС в мае 2023 г. Специалистами ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» и НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ подготовлены и проведены тестовые включения ВСС, в том числе по международным полигонам сети RadCalNet.

Видеоспектральная система представляет собой комплексное устройство для дистанционного исследования поверхности Земли с борта космических аппаратов. В ВСС входят три идентичных спектрометра изображения, построенные по схеме Роуланда с использованием вогнутых дифракционных решеток. Основные технические характеристики спектрального блока ВСС приведены ниже:

Спектральный диапазон, нм .....	400–950
Спектральное разрешение, нм .....	4,4–5,0
Оптическая схема .....	Роуланда
Детектор .....	КМОП <i>Baumer MXUC40.2</i>
Размер детектора, пиксели .....	2044 × 2044
Размер пикселя, мкм .....	5,5 × 5,5
Разрешение АЦП, бит .....	8
Динамический диапазон, дБ .....	60
Время экспозиции, с .....	0,1–0,5

Для проведения калибровки по длинам волн спектрометров изображения (сопоставление каждого пикселя детектора с соответствующей длиной волны излучения) можно использовать те же методы, что и для

обычных спектрометров, а именно съемка линейчатых источников излучения с известными спектральными характеристиками [11, 12], нахождение опорных точек и построение на их основе градуировочной зависимости. В идеале такие снимки должны быть представлены вертикальными линиями одинаковой ширины и яркости, параллельными друг другу. Однако на практике вследствие оптических aberrаций (дисторсии, астигматизма и кривизны поля изображения) [13, 14] получаемые изображения могут быть искажены. Спектральные линии становятся изогнутыми и могут быть наклонены (smile- и tilt-эффекты). В некоторых работах [15, 16] с изображениями гиперспектрометров слабо выраженный smile-эффект игнорируется. В большинстве работ, связанных с гиперспектрометрами, авторы стараются учесть этот эффект.

Для калибровки по длинам волн существуют два подхода. Первый [17, 18] основан на программной коррекции всех aberrаций на изображении [19] и калибровке только по центральной строке детектора. Второй предполагает калибровку по длинам волн для каждой строки детектора [15, 16]. Однако это различие подходов может размываться, если второй подход предполагает не полностью независимую калибровку каждой строчки детектора, а учитывает и остальные строки матрицы детектора. Используемый в [17, 20] подход основан на создании и нахождении на получаемом спектрометром изображении контрольных точек (ground control points, GCP), а затем определении проявлений smile- и tilt-эффектов по этим точкам. Коррекция выполняется сопоставлением GCP на изображении с опорными точками. Для использования этого подхода необходима съемка линейных источников излучения через решетчатую структуру, которая располагается между объективом и источником излучения. Алгоритм поиска пиков для каждой строки изображения предложено запускать в [21]. Затем каждой спектральной линии ставится в соответствие дуга окружности, а ее радиус и центр используются для расчета матрицы сдвигов в целях дальнейшей коррекции изображения. Метод для полетных калибровок предложен в [18], где использованы снимки одной территории, полученные гиперспектрометром «Гиперион», проанализированы корреляционным методом изменения в изображениях за разные даты (ежегодные на протяжении 8 лет) и рассчитаны поправочные функции для каналов.

Наиболее полное описание, качественные результаты и проработанная методология представлены в [17, 20, 21]. Описанные в них подходы калибровки по длинам волн применялись для спектрометров изображения со спектральным разрешением порядка 1,5 нм на всех участках спектральной матрицы. Регистрируемые этими спектрометрами спектральные линии

линейчатых источников излучения четкие и постоянной ширины по всей высоте щели. В настоящей работе рассмотрен прибор ВСС, спектрометры которого имеют разрешение 4,4...5,0 нм и на которых присутствует эффект уширения и размытия линий от центра изображений к его краям. Исходя из особенностей ВСС использование решетчатой структуры, как в [17, 20], не позволит выделить контрольные точки (невозможно добиться маленьких контрастных ключевых участков на изображении). Аппроксимация спектральных линий дугами окружностей, как в [21], подходит для частных оптических конфигураций и не подходит в общем случае для решаемой задачи устранения smile-эффекта [18, 22]. Спектральные линии ВСС не аппроксимируются дугами окружности, их форма носит другой характер. Авторы [21] отмечают погрешности определения линий в некоторых случаях для гиперспектрометра, реализованного по схеме из [23].

С учетом изложенного разработан менее требовательный к качеству спектральных линий алгоритм, отличающийся созданием одного HDR-изображения для более качественного выделения на нем сильных и слабых (по интенсивности) спектральных линий без анализа набора изображений, полученных на разных экспозициях, и аппроксимацией сплайнами спектральных линий.

**Определение спектральных линий.** Для калибровки спектрометров ВСС по длинам волн применен метод калибровки каждой строки детектора, выбор метода обусловлен большими трудозатратами на определение математической модели искажений для каждого спектрометра. На калибровку каждой строки влияют соседние строки матрицы детектора.

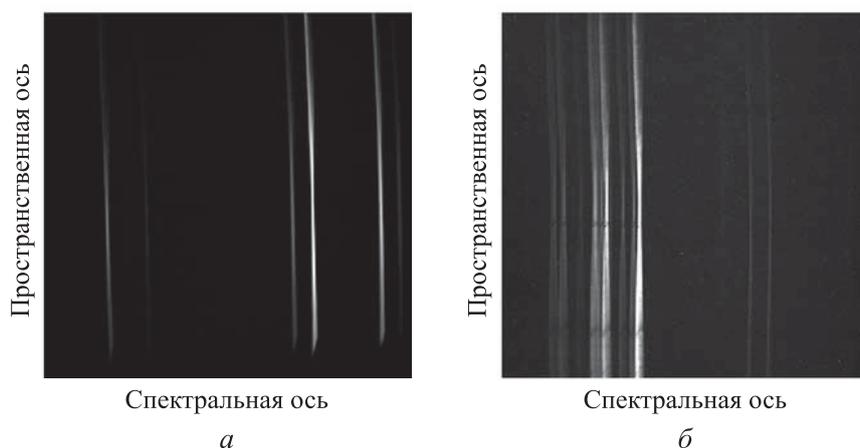
Для упрощения и ускорения процесса поиска спектральных линий на изображении на языке программирования MATLAB разработан и реализован специальный алгоритм, который позволяет собирать данные для калибровки — привязанные к абсолютным значениям длины волны положения максимумов спектральных линий — по данным съемки эталонных источников линейчатого излучения в полуавтоматическом режиме. Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.

*Этап 1. Создание HDR-изображения.* Качественные результаты калибровки (минимальное отклонение градуировочной зависимости от эталонных длин волн) возможны при использовании большого числа опорных точек. На практике вследствие ограничений разрядности и чувствительности детекторов приходится получать комбинированное HDR-изображение, где интенсивность всех спектральных линий с четко выраженным максимумом в несколько раз превосходит уровень шума. Поэтому на вход алгоритма подается набор изображений (от 3 до 10), которые получены



**Рис. 1.** Структурная схема алгоритма сбора данных для калибровки по длинам волн спектрометра изображения

спектрометром при съемке эталонного источника линейчатого излучения в одной геометрии при различном времени экспозиции. Изображения суммируются и формируются изображения (рис. 2) с высоким динамическим диапазоном (HDR) [24].



**Рис. 2.** Изображения спектрометров 1 и 2 при съемке ртутных линий (*a*) и линий криптона (*б*)

При формировании HDR-изображения эталонного источника линейчатого излучения, снятого спектрометром, пропущена стадия вычитания темнового сигнала [25, 26]. Проведенные эксперименты показали, что на работу алгоритма поиска спектральных линий указанная стадия не влияет (ввиду дальнейшего сглаживания). Это существенно ускоряет процесс сбора и обработки спектральных данных.

*Этап 2. Нормализация изображения.* Изображения, полученные при разном времени экспозиции, имеют различную интенсивность (в отсчетах АЦП) спектральных линий. Интенсивность линий зависит и от типа источника. Для исключения влияния абсолютных значений на последующие вычисления к изображению применяется операция нормализации:

$$norm_i = \frac{I_i - \min_{i=1,N} I_i}{\max_{i=1,N} I_i - \min_{i=1,N} I_i},$$

где  $I_i$  — значение  $i$ -го пикселя;  $N$  — число пикселей изображения.

*Этап 3. Фильтрация изображения.* Для устранения эффекта «горячих» пикселей, который возникает вследствие наличия дефектов матрицы или перегрева датчика, использован фильтр Гаусса, являющийся одним из наиболее распространенных методов сглаживания и уменьшения шума в цифровой обработке изображений [27, 28]. Каждый пиксель исходного изображения заменяется средним значением всех пикселей, взвешенным с функцией Гаусса с центром на текущем пикселе. Фильтрация применяется к нормализованному на этапе 2 изображению.

*Этап 4. Поиск спектральной линии.* На этом этапе необходимо выделить одну из протяженных спектральных линий (линия белого цвета, см. рис. 2), которая соответствует определенной спектральной линии источника излучения.

Для выделения линии необходимо автоматически находить пики, т. е. максимумы отклика прибора на монохроматическую линию источника излучения, в каждой строке изображения. Это позволит определить координаты центра линии в каждой строке и получить зависимость этих координат от номера строки. Для этого использован быстрый и точный алгоритм `peakFinder`<sup>1</sup>, который основан на методе скользящего среднего [29] и порогового значения для выделения пиков из шума. Этот алгоритм является

<sup>1</sup> URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25500-peakfinder-x0-sel-thresh-extrema-includeendpoints-interpolate>

высокопроизводительным при высокой точности нахождения пиков, что подтверждается экспериментальными данными.

Однако алгоритм поиска пиков может находить пики с ошибкой, не находить их вовсе в некоторых строках или находить пики, которые не соответствуют спектральным линиям. Поэтому вместо независимой калибровки каждой строки детектора анализировать требуется все изображение, а именно детектировать спектральные линии, аппроксимируя их гладкой кривой, например полиномом или сплайном. Это позволяет учитывать возможные искажения изображения и повысить точность калибровки.

Для того чтобы выбрать максимум в строке матрицы, соответствующий определенной спектральной линии, предложены два варианта поиска пиков (один из которых должен быть использован далее). Сначала предполагают выделение оператором спектрального диапазона, в котором будет происходить поиск центра спектральной линии (пика). Это происходит заданием двух вертикальных прямых слева и справа от спектральной линии на изображении детектора. Первый вариант поиска пика в каждой строке матрицы внутри этого диапазона предполагает выбор максимального по значению пика из найденных пиков. Второй вариант предполагает задание нескольких опорных точек, соответствующих центру линии. В каждой строке матрицы выбирается такой пик, который по спектральной координате ближе остальных к опорной точке. Тестирование двух вариантов показало, что они дают практически идентичный итоговый результат алгоритма. Средняя разность аппроксимаций найденных пиков с использованием двух вариантов составила примерно 0,1 пикселя. Разность около 1–3 пикселей наблюдалась только на краях детектора, где спектральная линия практически неразличима на уровне шумов.

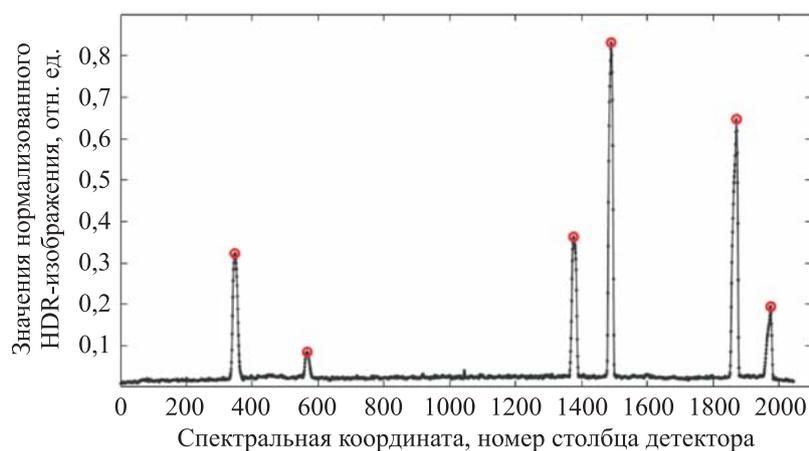
Из двух вариантов для итоговой версии алгоритма поиска спектральных линий выбран вариант с контрольными точками по следующей причине: ввиду smile- и tilt-эффектов в случае с близко расположенными линиями невозможно выделить прямоугольный участок на изображении, в который входила только одна линия. Поэтому в варианте определения пика по максимуму ошибочно может быть выбран пик другой линии. Вариант с контрольными точками такой проблемы не имеет. Потеря нескольких секунд на задание 2–3 опорных точек не усложняет процесс калибровки.

С учетом изложенного основные этапы алгоритма поиска спектральной линии представлены ниже.

*Этап 4.1. Задание опорных точек.* На первом шаге алгоритма поиска спектральной линии на изображении вручную задается произвольное число опорных точек, приблизительно соответствующих центрам спек-

тральной линии по всей ее высоте. Их число зависит от степени кривизны линии (достаточно 1–3 точек). Задаются две вертикальные прямые, ограничивающие область поиска линии.

*Этап 4.2. Поиск пиков для каждой строки изображения.* Для каждой строки детектора с помощью алгоритма peakFinder находят пики (рис. 3).

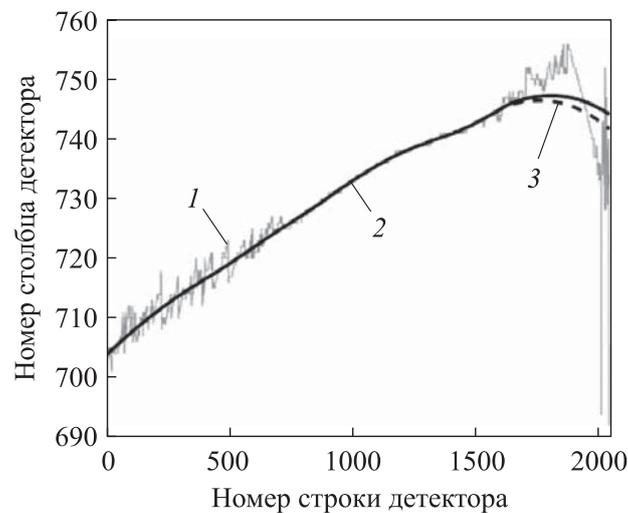


**Рис. 3.** Пики в центральной строке HDR-изображения спектрометра 1 при регистрации ртутных линий

*Этап 4.3. Фильтрация найденных пиков.* В каждой строке изображения, в которой есть пики, находится такой пик, который: расположен внутри выбранной пользователем области вокруг спектральной линии; по  $\lambda$ -координате ближе к  $\lambda$ -координате ближайшей опорной точки ( $\lambda$  — длина волны).

*Этап 4.4. Построение аппроксимирующей кривой.* Из найденных координат пиков (номер строки изображения и столбца) формируется массив точек, из которого построением локальной полиномиальной регрессии [30, 31] получают кривую, аппроксимирующую спектральную линию по пространственной координате (рис. 4). Для построения регрессии используется алгоритм rloess<sup>2</sup> [32] с параметром span = 0,3. Этот алгоритм и параметр экспериментально определены как наиболее оптимальные для решения указанной задачи. Так, на рис. 4 кривая 2 является результатом алгоритма поиска центра спектральной линии по контрольным точкам. Результат второго алгоритма (по максимальному пику в диапазоне) показан кривой 3, которая незначительно отличается от кривой 2 только в правой части зависимости.

<sup>2</sup> Устойчивая квадратичная регрессия.



**Рис. 4.** Аппроксимация пиков (1) гладкой кривой (2) и результат детектирования спектральной линии без использования опорных точек (3)

*Этап 4.5. Интерполяция кривой в каждой строке изображения.* После поиска и фильтрации пиков (этапы 4.2, 4.3) пики могут быть определены не для каждой строки изображения. Поэтому на этом этапе выполняется интерполяция значений полученной аппроксимации для каждого пространственного канала матричного детектора (для каждой строки изображения).

*Этап 5. Сохранение всех спектральных линий.* Результатом выполнения предыдущих этапов алгоритма являются найденные номера пикселей, соответствующих искомым спектральным линиям. Пример определенной ртутной линии с длиной волны 546,07 нм для одного из спектрометров ВСС показан на рис. 5. После определения одной линии этап 4 повторяется столько раз, сколько линий на изображении необходимо распознать. По окончании работы с изображением спектрометра одного источника можно загрузить изображения других эталонных источников линейчатого излучения, выполнять этапы 1–5 и накапливать данные для дальнейшей калибровки по стандартной для этого типа приборов методике.

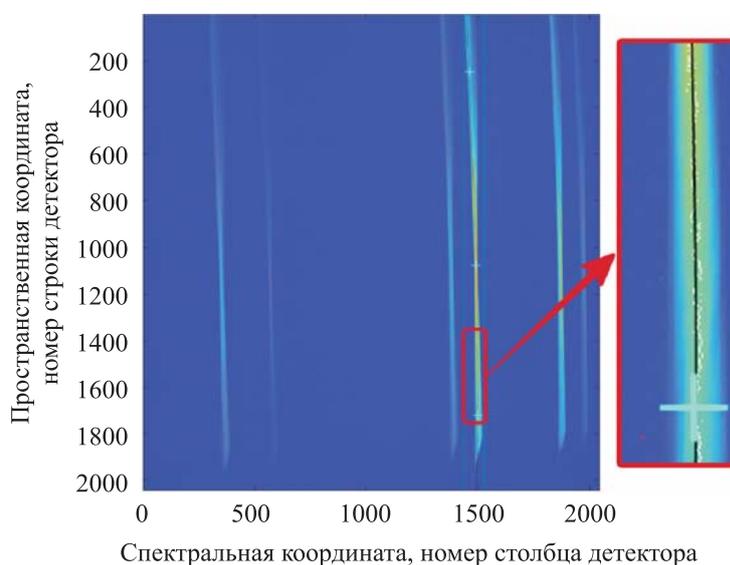
В результате обработки данных все найденные спектральные линии сохраняются в один текстовый файл. Файл представляет собой  $N$  столбцов по числу спектральных линий. В каждой из 2044 строчек (для матрицы *Baumer* ВСС) записаны  $x$ -координаты центра линий (номер пикселя по оси длин волн). Этап 4 представлен в виде псевдокода:

$I$  – изображение (матрица  $m \times n$ )  
 $I_i$  –  $i$ -я строка изображения  
 $bx_1, bx_2$  –  $x$ -координаты границ прямоугольной области на  $I$ , внутри которой находится спектральная линия  
 $kp$  – опорные точки, лежащие на центрах спектральной линии

$R$  – список корректных найденных пиков (центров линии)

```

Procedure FINDSPECLINE( $I$ )
 $bx_1 \leftarrow$  mouse click
 $bx_2 \leftarrow$  mouse click
 $kp\{kp_1\ kp_2, kp_3 \dots\} \leftarrow$  mouse click
 $R \leftarrow$  {empty}
 $i \leftarrow 1$ 
while  $i \leq m$  do
 $P \leftarrow$  FindPeaks ( $I_i$ )
 $P_{best} \leftarrow$  FindBestPeak ( $P, bx_1, bx_2, kp$ )
 $j \leftarrow 1$ 
if  $P_{best}$  is found
 $R_j \leftarrow P_{best}$ 
 $j \leftarrow j + 1$ 
end if
 $i \leftarrow i + 1$ 
end while
smooth( $R$ )
interpolate( $R$ )
return  $R$ 
end procedure
    
```



**Рис. 5.** Найденная спектральная линия (черного цвета) ртутной лампы с длиной волны 546,07 нм для спектрометра ВСС (две заданные пользователем штриховые вертикальные линии ограничивают область поиска максимумов в строке)

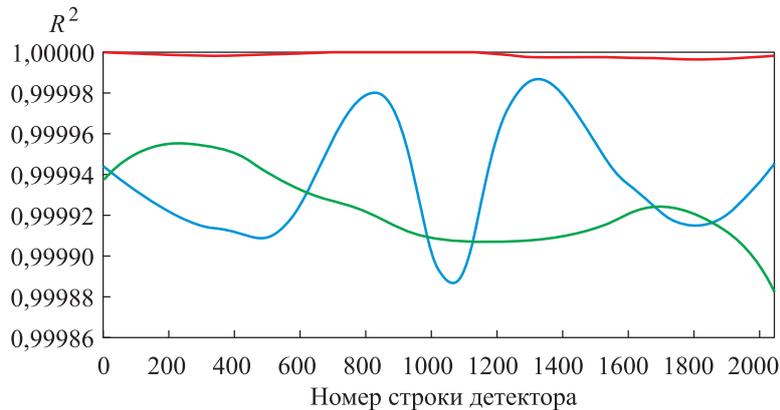
**Результаты.** Для калибровки по длинам волн спектрометров ВСС использовали яркие линии ртутной, криптоновой и ксеноновой ламп (404,65; 435,83; 546,07; 759,4; 810,4; 877,67; 828,01 нм).

Спектрометры ВСС могут быть откалиброваны по длинам волн сравнением  $n$  опорных значений длин волн  $\lambda_0(i)$ , имеющих пренебрежимо малую неопределенность, с номерами спектральных каналов  $N$ , соответствующими зарегистрированным линиям в заданном спектральном диапазоне, для получения градуировочной зависимости вида

$$\lambda(N) = a_N N^2 + b_N N + c_N,$$

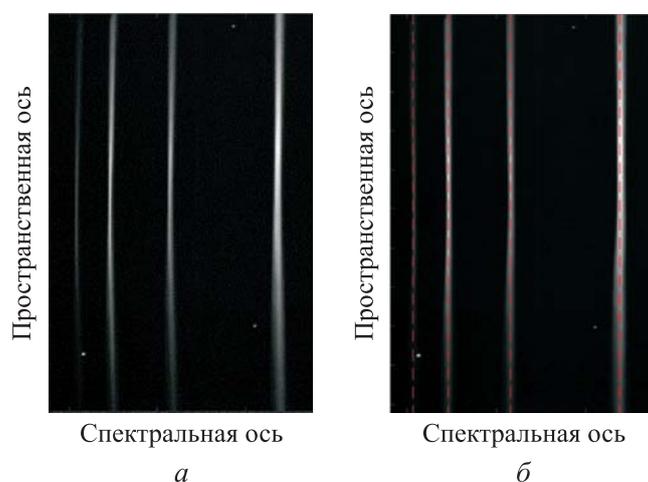
где  $N$  — номер спектрального канала (номер столбца) детектора;  $a_N, b_N, c_N$  — постоянные коэффициенты для каждой строки, определяемые методом наименьших квадратов.

По результатам калибровки коэффициент детерминации (степень близости экспериментальных точек к описываемой кривой) квадратичной аппроксимации зависимости длины волны от номера для всех строк матрицы составил более 0,999 (рис. 6).



**Рис. 6.** Коэффициент детерминации квадратичной аппроксимации зависимости длины волны от номера столбца детектора для всех строк детекторов спектрометров 0 (—), 1 (—) и 2 (—)

Результат применения калибровки к исходному пространственно-спектральному изображению одного из спектрометров ВСС показан на рис. 7. Деформированные спектральные линии в результате стали прямыми и перпендикулярными оси длин волн. Линии красного цвета на изображении: перпендикуляры к оси длин волн, которые совпадают с центрами спектральных линий. Строки детекторов трех спектрометров в среднем отличаются друг от друга на 0,29 нм на длине волны 759,4 нм после калибровки (при разрешении спектрометров ВСС 4,4...5,0 нм).



**Рис. 7.** Пространственно-спектральное изображение (а) одного из спектрометров ВСС и результат его калибровки (б)

**Обсуждение.** Для решения задачи калибровки по длинам волн ВСС использование существующих алгоритмов невозможно вследствие недостаточного для них качества регистрируемых спектральных линий. Поэтому оценка быстродействия в первую очередь должна быть проведена классическим методом калибровки по длинам волн, где предполагается ручная калибровка каждой строки матрицы приемника. Время калибровки одной строки детектора квалифицированным оператором составляет в среднем около 10 мин (без учета времени получения данных). Калибровка всего детектора с  $N$  строками займет  $10 \times N$  мин при построчной калибровке. Поскольку калибровка от строки к строке меняется незначительно, можно использовать различные варианты упрощения процесса: прореживание, интерполяция. Однако время такой калибровки численно оценить затруднительно, так как процесс сильно зависит от данных.

Результаты сравнения времени определения спектральных линий с хорошо показавшим себя алгоритмом, примененным в [17, 20], но более требовательным к качеству регистрируемого изображения, представлены ниже:

	Разработанный алгоритм	Алгоритм из [17]
Размер кадра	2048 × 2048	1088 × 2048
Процессор	Intel i7-8700K 3.70 GHz	Intel i7-4790S 3.20 GHz
Необходимое число вручную задаваемых опорных точек	6–18 (в зависимости от степени искажения линии)	48 (для используемой решетчатой структуры)

Время на определение всех спектральных линий без учета операций первоначальной предобработки изображения, с	0,8	30
---	-----	----

Производительность в используемом ПК процессора Intel i7-8700K на 29 % выше, чем у Intel i7-4790S [17] в однопоточном режиме. Размеры кадра у ВСС в 2 раза больше, чем у спектрометра изображения из [17]. Для сравнения возьмем кадр с числом спектральных линий шесть, что типично для подобных калибровок. Согласно временным затратам (в том числе по необходимому числу вручную задаваемых опорных точек), на определение всех спектральных линий без учета операций первоначальной предобработки изображений предложенный алгоритм более быстродействующий. Преимущество разработанного алгоритма — создание HDR-изображения, которое устраняет требование на постоянную смену времени экспозиции съемки линейных источников излучения для получения изображений, обеспечивающих требуемую яркость для каждой спектральной линии (для каждой линии в [17] подбирались экспозиция, если линия оказывалась плохо различимой, то операция повторялась).

**Заключение.** Калибровка по длинам волн спектрометров изображения, снимки которых подвержены комбинации различных аберраций — задача нетривиальная. Предложен алгоритм сбора данных для калибровки спектрометра изображения по данным съемки эталонных источников линейчатого излучения. В алгоритм входит разработанная методика выделения спектральной линии на изображении. Результаты обработки снимков ртутной, криптоновой и ксеноновой ламп использованы в дальнейшей калибровке спектрометров аэрокосмического прибора ВСС. Результаты калибровки ВСС по длинам волн показали возможность применения разработанного алгоритма для решения подобных задач. После калибровки строки детекторов трех спектрометров в среднем отличаются друг от друга на 0,29 нм на длине волны 759,4 нм при разрешении спектрометров ВСС 4,4...5,0 нм. Коэффициент детерминации квадратичной аппроксимации зависимости длины волны от номера для всех строк матрицы составил более 0,999. Следует отметить большое быстродействие алгоритма и автоматизацию всех этапов обработки калибровочных данных, которые позволяют за приемлемое время выполнить подготовку данных для дальнейшей калибровки. В случае трех спектрометров ВСС процесс от обработки калибровочных снимков до калибровки по длинам волн составляет 20...

30 мин. Разработанный алгоритм может быть использован для калибровки подверженных различным абберациям спектрометров изображения по длинам волн.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Raychaudhuri B. Imaging spectroscopy: origin and future trends. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2016, vol. 51, iss. 1, pp. 23–35.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928.2015.1087405>
- [2] Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А. и др. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования. *Исследование Земли из космоса*, 2013, № 6, с. 81–93.  
DOI: <https://doi.org/10.7868/s0205961413060080>
- [3] Шухостанов В.К., Ведешин Л.А., Цыбанов А.Г. Гиперспектральная диагностика современной техносферы. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2009, т. 6, № 1, с. 243–248. EDN: NDPXAP
- [4] Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Гусев В.Ф. и др. Видеоспектральная система для мониторинга земной поверхности с борта МКС. *Шестой Белорусский космический конгресс*. Т. 1. Минск, 2014, с. 211–214.
- [5] Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э. и др. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту Российского сегмента МКС. *Космическая техника и технологии*, 2016, № 2, с. 70–79. EDN: WCKDEN
- [6] Беляев М.Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2021, т. 18, № 3, с. 92–107. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107>
- [7] Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю. и др. Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС. *Космическая техника и технологии*, 2015, № 1, с. 17–30. EDN: TZWTNH
- [8] Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю. и др. Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса. *Известия РАН. Энергетика*, 2013, № 4, с. 75–90. EDN: REJWYN
- [9] Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю. и др. Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы. *Космонавтика и ракетостроение*, 2015, № 1, с. 71–79. EDN: UJTWFJ
- [10] Беляев М.Ю., Волков О.Н., Соломина О.Н. и др. Исследование миграций животных с помощью научной аппаратуры «Икарус» в космическом эксперименте «Ураган» в РС МКС. *Гироскопия и навигация*, 2022, т. 30, № 3, с. 3–19.  
EDN: UTJSZC

- [11] Hamaguchi H.O. Calibrating multichannel Raman spectrometers. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 1988, vol. 24, iss. 1-2, pp. 137–174.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928808060455>
- [12] Gaigalas A.K., Wang L., He H.J., et al. Procedures for wavelength calibration and spectral response correction of CCD array spectrometers. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2009, vol. 114, no. 4, p. 215–228.
- [13] Schroeder D. J. *Astronomical optics*. Academic Press, 1999.
- [14] Xue Q., Wang S., Lu F. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region. *Appl. Opt.*, 2009, vol. 48, iss. 1, pp. 11–16.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.48.000011>
- [15] Подлипов В.В., Скиданов Р.В. Калибровка изображающего гиперспектрометра. *Компьютерная оптика*, 2017, т. 41, № 6, с. 869–874.  
DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874>
- [16] Henriksen M.B., Sigernes F., Johansen T.A. A closer look at a spectrographic wavelength calibration. *12th WHISPERS*, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/WHISPERS56178.2022.9955104>
- [17] Henriksen M.B., Garrett J.L., Prentice E.F., et al. Real-time corrections for a low-cost hyperspectral instrument. *10th WHISPERS*, 2019,  
DOI: <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2019.8921350>
- [18] Yokoya N., Miyamura N., Iwasaki A. Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and keystone properties. *Proc. SPIE*, 2010, art. 7857.  
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.870437>
- [19] Иночкин Ф.М., Белашенков Н.Р. Метод программной коррекции абберационных искажений изображения в микроскопии структурированного освещения. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2019, № 6, с. 1004–1012.  
DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1004-1012>
- [20] Lawrence K.C., Park B., Windham W.R., et al. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection. *Trans. ASAE*, 2003, vol. 46, no. 2, pp. 513–521. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.12940>
- [21] Riihiaho K.A., Eskelinen M.A., Pölönen I.A. Do-it-yourself hyperspectral imager brought to practice with open-source Python. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 4, art. 1072. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041072>
- [22] Aktaruzzaman Md. Simulation and correction of spectral smile effect and its influence on hyperspectral mapping. Master's Thesis. University of Twente, 2008.
- [23] Sigernes F., Syrjäsuo M., Storvold R., et al. Do it yourself hyperspectral imager for handheld to airborne operations. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, iss. 5, pp. 6021–6035.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.26.006021>
- [24] Kristensson E., Ehn A. Improved spectral sensitivity by combining periodic shadowing and high dynamic range imaging. *Spectrosc. Lett.*, 2016, vol. 49, iss. 2, pp. 91–95.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00387010.2015.1086806>

- [25] Dunlap J.C., Bodegom E., Widenhorn R. Correction of dark current in consumer cameras. *J. Electron. Imaging*, 2010, vol. 19, iss. 1, art. 013010. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.3358365>
- [26] Widenhorn R., Rest A., Blouke M., et al. Computation of dark frames in digital imagers. *Proc. SPIE*, 2007, art. 6501. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.714784>
- [27] Kumain S.C., Singh M., Singh N., et al. An efficient Gaussian noise reduction technique for noisy images using optimized filter approach. *ICSCCC*, 2018, pp. 243–248, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCCC.2018.8703305>
- [28] Deng G., Cahill L.W. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection. *IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1993, vol. 3, pp. 1615–1619. DOI: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1993.373563>
- [29] Шилов А.В. Возможности и недостатки использования скользящей средней при выработке прогнозных решений. *Приоритетные научные направления: от теории к практике*, 2015, № 19, с. 88–94. EDN: UNFIAD
- [30] Шурыгин А.М. Регрессия: выбор вида зависимости, эффективность и устойчивость оценок. *Автоматика и телемеханика*, 1996, № 6, с. 90–101.
- [31] Уатт Дж., Борхани Р., Катсагелос А. Машинное обучение: основы, алгоритмы и практика применения. СПб., БХВ-Петербург, 2022.
- [32] Лутай В.Н., Хусаинов Н.Ш. Повышение устойчивости линейной регрессии. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2022, № 5, с. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-152-160>

**Мартинов Антон Олегович** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории оптико-физических измерений отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ (Республика Беларусь, 220045, Минск, ул. Курчатова, д. 7).

**Литвинович Глеб Святославович** — научный сотрудник лаборатории оптико-физических измерений отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ (Республика Беларусь, 220045, Минск, ул. Курчатова, д. 7).

**Смоленцева Лилия Алексеевна** — главный специалист ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» (Российская Федерация, Московская обл., Королев, ул. Ленина, д. 4а).

**Расказов Игорь Владимирович** — инженер ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» (Российская Федерация, Московская обл., 141070, Королев, ул. Ленина, д. 4а).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Мартинов А.О., Литвинович Г.С., Смоленцева Л.А. и др. Определение спектральных линий на подверженных абберациям снимках при калибровке спектрометров изображения по длинам волн. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 3 (120), с. 80–99. EDN: NOJWTK

## IDENTIFYING SPECTRAL LINES IN ABERRATION-PRONE IMAGES DURING WAVELENGTH CALIBRATING IMAGE SPECTROMETERS

A.O. Martinov<sup>1</sup>  
G.S. Litvinovich<sup>1</sup>  
L.A. Smolentseva<sup>2</sup>  
I.V. Rasskazov<sup>2</sup>

antonmartenov@gmail.com  
litvinovichgs@yandex.by  
lilka26@yandex.ru  
igor.rasskazov1@rsce.ru

<sup>1</sup> A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup> S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia PJSC, Korolev, Moscow Region, Russian Federation

---

### Abstract

Imaging spectrometers are used in Earth remote sensing systems and require wavelength calibration. For the most accurate wavelength calibration, various optical aberrations such as distortion, astigmatism, and image field curvature must be taken into account. An approach to wavelength calibration of each detector string is proposed. The article develops an algorithm for accounting for optical aberrations by detecting spectral lines in images obtained by a spectrometer when registering reference sources of linear radiation. First, the images of the reference sources are combined and pre-processed, followed by an independent line-by-line analysis of the image to determine the centers of the spectral lines. Next, the data obtained is analyzed again as a whole, and as a result, a spectral line is selected. The application of the developed algorithm made it possible to calibrate a visual spectral system designed and intended for remote sensing of the Earth as part of the *Uragan* space experiment. In the case of using three spectrometers in a video spectral system, the process from processing calibration images to wavelength calibration takes 20–30 min. The calibration results of the video spectral system showed the possibility of using the developed algorithm to solve such problems

### Keywords

*Spectrum, spectral line, matrix detector, line source, wavelength calibration, video spectral system*

Received 23.05.2024

Accepted 27.12.2024

© Author(s), 2025

---

### REFERENCES

- [1] Raychaudhuri B. Imaging spectroscopy: origin and future trends. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 2016, vol. 51, iss. 1, pp. 23–35.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928.2015.1087405>

- [2] Rodionov I.D., Rodionov A.I., Vedeshin L.A., et al. Aviation hyperspectral complexes for remote sensing problems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Research from Space], 2013, no. 6, pp. 81–93 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.7868/s0205961413060080>
- [3] Shukhostanov V.K., Vedeshin L.A., Tsybanov A.G. Hyperspectral diagnostics of modern technosphere. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space], 2009, vol. 6, no. 1, pp. 243–248 (in Russ.). EDN: NDPXAP
- [4] Belyaev B.I., Belyaev M.Yu., Gusev V.F., et al. [Video spectral system for monitoring the Earth's surface from the ISS]. *Shestoy Belorusskiy kosmicheskiy kongress*. T. 1 [Sixth Belarusian Space Congress. Vol. 1]. Minsk, 2014, pp. 211–214 (in Russ.).
- [5] Belyaev B.I., Belyaev M.Yu., Sarmin E.E., et al. Design and flight tests of science hardware video-spectral system on board the Russian segment of the ISS. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2016, no. 2, pp. 70–79 (in Russ.). EDN: WCKDEN
- [6] Belyaev M.Yu. Scientific equipment and Earth studies techniques in space experiment Uragan on board the international space station. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space], 2021, vol. 18, no. 3, pp. 92–107 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107>
- [7] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., et al. Features of imaging the Earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian segment crews. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Engineering and Technology], 2015, no. 1, pp. 17–30 (in Russ.). EDN: TZWTHH
- [8] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., et al. Use of ground surface survey from the ISS for the benefit of fuel & energy complex. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2013, no. 4, pp. 75–90 (in Russ.). EDN: REJWYN
- [9] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., et al. The study of catastrophic events that may lead to environmental challenges under the program “Hurricane” onboard the Russian segment of the International Space Station. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2015, no. 1, pp. 71–79 (in Russ.).  
EDN: UJTWFJ
- [10] Belyaev M.Yu., Volkov O.N., Solomina O.N., et al. Animal migration studies with the use of ICARUS scientific equipment in the URAGAN space experiment aboard the Russian segment of the ISS. *Gyroscopy Navig.*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 129–140.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075108722030026>
- [11] Hamaguchi H.O. Calibrating multichannel Raman spectrometers. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 1988, vol. 24, iss. 1-2, pp. 137–174.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928808060455>

- [12] Gaigalas A.K., Wang L., He H.J., et al. Procedures for wavelength calibration and spectral response correction of CCD array spectrometers. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2009, vol. 114, no. 4, pp. 215–228.
- [13] Schroeder D. J. *Astronomical optics*. Academic Press, 1999.
- [14] Xue Q., Wang S., Lu F. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region. *Appl. Opt.*, 2009, vol. 48, iss. 1, pp. 11–16.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.48.000011>
- [15] Podlipnov V.V., Skidanov R.V. Calibration of an imaging hyperspectrometer. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2017, vol. 41, no. 6, pp. 869–874 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874>
- [16] Henriksen M.B., Sigernes F., Johansen T.A. A closer look at a spectrographic wavelength calibration. *12th WHISPERS*, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/WHISPERS56178.2022.9955104>
- [17] Henriksen M.B., Garrett J.L., Prentice E.F., et al. Real-time corrections for a low-cost hyperspectral instrument. *10th WHISPERS*, 2019,  
DOI: <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2019.8921350>
- [18] Yokoya N., Miyamura N., Iwasaki A. Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and keystone properties. *Proc. SPIE*, 2010, art. 7857.  
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.870437>
- [19] Inochkin F.M., Belashenkov N.R. Digital image aberration correction technique for structured illumination microscopy. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, no. 6, pp. 1004–1012 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1004-1012>
- [20] Lawrence K.C., Park B., Windham W.R., et al. Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection. *Trans. ASAE*, 2003, vol. 46, no. 2, pp. 513–521. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.12940>
- [21] Riihiaho K.A., Eskelinen M.A., Pölönen I.A. Do-it-yourself hyperspectral imager brought to practice with open-source Python. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 4, art. 1072.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041072>
- [22] Aktaruzzaman Md. Simulation and correction of spectral smile effect and its influence on hyperspectral mapping. Master's Thesis. University of Twente, 2008.
- [23] Sigernes F., Syrjäsuo M., Storvold R., et al. Do it yourself hyperspectral imager for handheld to airborne operations. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, iss. 5, pp. 6021–6035.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.26.006021>
- [24] Kristensson E., Ehn A. Improved spectral sensitivity by combining periodic shadowing and high dynamic range imaging. *Spectrosc. Lett.*, 2016, vol. 49, iss. 2, pp. 91–95.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00387010.2015.1086806>
- [25] Dunlap J.C., Bodegom E., Widenhorn R. Correction of dark current in consumer cameras. *J. Electron. Imaging*, 2010, vol. 19, iss. 1, art. 013010.  
DOI: <https://doi.org/10.1117/1.3358365>

- [26] Widenhorn R., Rest A., Blouke M., et al. Computation of dark frames in digital imagers. *Proc. SPIE*, 2007, art. 6501. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.714784>
- [27] Kumain S.C., Singh M., Singh N., et al. An efficient Gaussian noise reduction technique for noisy images using optimized filter approach. *ICSCCC*, 2018, pp. 243–248. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCCC.2018.8703305>
- [28] Deng G., Cahill L.W. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection. *IEEE Conference Record Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1993, vol. 3, pp. 1615–1619. DOI: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1993.373563>
- [29] Shilov A.V. Opportunities and disadvantages of using moving average in developing forecasting decisions. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike*, 2015, no. 19, pp. 88–94 (in Russ.). EDN: UNFIAD
- [30] Shurygin A.M. Regression: choice of dependence type, efficacy, and estimator stability. *Autom. Remote Control*, 1996, vol. 57, no. 6, pp. 843–852.
- [31] Watt J., Borhani R., Katsaggelos A.K. Machine learning refined: foundations, algorithms, and applications. Cambridge Univ. Press, 2016.
- [32] Lutay V.N., Khusainov N.Sh. Increasing the stability of linear regression. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, no. 5, pp. 152–160 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-5-152-160>

**Martinov A.O.** — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (Kurchatova ul. 7, Minsk, 220045 Republic of Belarus).

**Litvinovich G.S.** — Research Scientist, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University (Kurchatova ul. 7, Minsk, 220045 Republic of Belarus).

**Smolentseva L.A.** — Head Specialist, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia PJSC (Lenina ul. 4a, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Rasskazov I.V.** — Engineer, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia PJSC (Lenina ul. 4a, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Martinov A.O., Litvinovich G.S., Smolentseva L.A., et al. Identifying spectral lines in aberration-prone images during wavelength calibrating image spectrometers. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 3 (120), pp. 80–99 (in Russ.). EDN: NOJWTK