

УДК 528.85

Оценка спектрального разрешения видеоспектрометра по данным регистрации фраунгоферовых линий с использованием атмосферной модели MODTRAN

В.Н. Остриков, О.В. Плахотников, А.В. Кириенко*

СПб филиал АО «КБ “Луч”»
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 14а

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

Предложен метод оценки спектрального разрешения видеоспектрометров на отдельных участках шкалы чувствительности путем сравнения результатов экспериментальной съемки с модельными (рассчитанными для тех же условий наблюдения) кривыми фраунгоферовых линий из набора заранее заданных значений. Максимальные ошибки оценок предложенным методом на рассмотренных участках тестирования 700 и 587 нм не превышают 0,5 нм как для серийно выпускаемых спектрорадиометрических приборов, так и для оригинальных видеоспектральных приборов.

Ключевые слова: спектральное разрешение, спектрорадиометр, гиперспектрометр, видеоспектрометр, атмосферная модель MODTRAN; spectral resolution, spectroradiometer, hyperspectral, an imaging spectrometer, an atmospheric model MODTRAN.

Введение

Современные видеоспектральные системы наблюдения строятся, как правило, на основе прибора гиперспектральной съемки (ГСС), сканирующего пространство предметов по схеме push-broom. Каждый регистрируемый пиксель матрицы снимка раскладывается в дискретный спектр в зоне видимого и ближнего ИК-диапазонов (в общем случае от 350 до 2500 нм). Для этого в качестве диспергатора используются призмы или дифракционные решетки. Один из важнейших параметров видеоспектрометра — спектральное разрешение, которое, в зависимости от его типа, может варьировать от долей нанометра в начале шкалы чувствительности до десятков — в ее конце.

После изготовления прибора его спектральное разрешение (СР) контролируется в заводских условиях с помощью достаточно сложной стационарной установки [1], в состав которой обычно входят приборы тестового монохромного излучения, коллиматор, оптические и регистрирующие элементы. Величина СР определяется спектральной шириной аппаратной функции в направлении дисперсии. Однако вместо уместного в этом случае монохроматического излучения чаще приходится регистрировать поток достаточно широкого спектра. Так, для источника типа натриевой лампы это 1 нм (на отдельных линиях в начале интервала чувствительности), а для

используемого в ЗАО НТЦ «Реагент» монохроматора — 2,5 нм (на половинном уровне сигнала) [1]. Отсюда значительные ошибки в получении конечных оценок СР прибора. Следует также иметь в виду, что в ходе эксплуатации прибора в полевых условиях при длительном воздействии механических вибраций, ударных нагрузок и других факторов возможны частичные изменения оптической системы, в том числе ухудшение СР. Отсюда следует необходимость метода, который с достаточно высокой точностью без применения сложной лабораторной установки, в том числе в полевых условиях, обеспечивал бы возможность оценки СР прибора.

Нам не удалось найти в литературе описание метода, который удовлетворяет вышеперечисленным требованиям. С другой стороны, экспериментально-модельный анализ прохождения излучения через атмосферную среду является весьма актуальным в своих прикладных применениях и в настоящее время достаточно представлен как в отечественной [2, 3], так и в зарубежной [4, 5] литературе.

Так, в [4] описана обработка спектральных векторов в ходе анализа содержания фитопланктона при зондировании водных ресурсов из космоса. Показано, что точки пересечения оси абсцисс 4-й производной от спектральной кривой, полученной прибором в ходе зондирования водной поверхности, позволяют выявлять положения спектральных линий, характерных для коэффициентов спектральной яркости некоторых элементов сцен. Там же рассматривается влияние изменчивости спектрального разрешения используемого измерительного прибора на положение исследуемых точек пересечения на спек-

* Вадим Николаевич Остриков (ostrvad@mail.ru); Олег Владимирович Плахотников (oleg-vl@yandex.ru); Андрей Васильевич Кириенко (kirienko13@mail.ru).

тральной оси. В статье [5], посвященной спектрорадиометрической калибровке аппаратуры видеоспектральной съемки на лабораторной установке, рассматривается способ спектральной калибровки прибора-регистратора по регистрируемому эталонному излучению, проходящему через искусственно созданную атмосферную среду. Исходное непрерывное излучение лампы освещения проходит через водяные пары (на трассе не менее 1 м), и по линиям поглощения этих паров в ближней ИК-области (вблизи линий 940, 1140, 1400, 1800 нм) происходит калибровка. Особо отметим, что в [5] указывается на возможность использования модели MODTRAN для расчета кривой поглощения водяных паров на означенных линиях (горизонтальная трасса прохождения сигнала).

Учитывая отмеченные свойства проходящих через атмосферу оптических сигналов, предлагается оперативная оценка спектрального разрешения приборов на основе проведения экспериментальной тестовой съемки непосредственно в полевых условиях эксплуатации. По штатной инструкции, каждые полгода необходимо проведение спектральной поверки аппаратуры с ее отправкой на специальный стенд. Такая процедура весьма дорога, сложна и требует значительного времени. В связи с этим предлагаемый метод представляется особо актуальным.

Экспериментальные данные и метод оценивания

Исходя из свойств селективного поглощения воздушных масс, а также благодаря наличию достаточно точной атмосферной модели MODTRAN [6] с высоким спектральным разрешением, представляется целесообразным использовать для калибровки приборов фраунгоферовы линии на пути прохождения излучения от Солнца к поверхности Земли. Для этого оптические яркости регистрируются в натуральных условиях путем углового сканирования (например с помощью астроблики) видеоспектрометром участка безоблачного неба с последующим сравнением спектральных свойств полученных сигналов с модельными данными. Очевидно, что если прибор позволяет получать набор изображений по заданному числу каналов (т.е. не подвержен очевидному выходу из строя), то речь идет об оценке или уточнении спектрального разрешения образца на основе специальной обработки с применением в качестве опоры заведомо известных (расчетных) данных используемой аппаратуры. Такие данные предоставляются изготовителем. Сопутствующая задача обработки – установление соответствия между рассчитанными проектировщиком значениями и измеренными разработчиком величинами.

Предлагаемый метод оценки СР реализуется посредством сравнения результатов регистрации формы спектра солнечного излучения ГСС на отдельных участках фраунгоферовых линий (при зафиксированных условиях наблюдения) с рядом модельных реализаций этой формы, полученных на основе мо-

дели MODTRAN. То есть результат свертки дисперсионной аппаратной функции прибора с образом фраунгоферовой картины селективных поглощений атмосферы должен быть аналогичным модельному результату этой свертки для заданного СР. Таким образом, модельные результаты расчетов для каждого возможного уровня разрешения сравниваются с текущей приборной реализацией спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на некотором характерном участке спектра. Близость кривых может оцениваться либо на основе рассчитанных коэффициентов корреляции (по их максимуму), либо по критерию их разностно-векторного минимума на этих участках.

Возможность применения метода рассмотрена на примере обработки тестовых данных, полученных видеоспектрометром ЗАО НТЦ «Реагент» в 2013 г. Для проверки применимости предлагаемого подхода параллельно путем сравнения рассматриваются также оценки спектрального разрешения серийно выпускаемого прибора – ручного спектрорадиометра FieldSpec (образец № 1007964, изготовлен фирмой ASD в США в 2010 г., диапазон 0,375–1,075 мкм) – применительно к данным точечной съемки того же тестового участка. Спектрорадиометр FieldSpec, по паспортным данным, обеспечивает спектральное разрешение в 3,5 нм (определено только на линии 700 нм). При этом учтем, что точность центров регистрируемых линий выдержана с допустимой погрешностью ± 1 нм. Измерительная дискретность отсчетов – 1,6 нм, что вносит некоторые ошибки при пересчете на шаг в 1 нм (формат выдачи данных прибора).

По данным изготовителя, сравниваемый прибор ГСС обеспечивает плавающее СР в диапазоне 420–1000 нм, от 0,4 нм (на линии 435 нм в начале шкалы) до 5 нм (на линии 900 нм в конце), всего регистрируется 1002 канала. Для определения СР рассматриваемых приборов в соответствии с предлагаемым подходом были проведены параллельные натурные измерения спектра подсвета атмосферы солнечными лучами (азимут Солнца 208°) 21 марта в 11:47 по Гринвичу в Санкт-Петербурге на одном и том же участке неба. Отметим, что выбор условий наблюдения не очень критичен, – достаточно, чтобы на наблюдаемом участке неба отсутствовала облачность, сигналы яркостей находились в пределах линейной шкалы регистрации (без насыщения), отношение сигнала к шуму было не ниже 100 (на всей спектральной шкале). Азимут Солнца относительно наблюдателя может быть любым удобным при обеспечении качества регистрируемого сигнала.

На основе модели атмосферы MODTRAN 5.2 [6] были рассчитаны кривые СПЭЯ, соответствующие широте и долготе места в Санкт-Петербурге, дате и времени наблюдения. Принятая модель атмосферы – арктическая зимняя, аэрозоль – городской, метеодальность видимости (МДВ) – 5 км, зенитный угол наблюдателя – 62°. Азимут наблюдателя соответствовал 273°, высота Солнца – около 40°. Рассчитанная на основе модели оптическая толщина атмосферы на линии 550 нм составила 2,4.

Модельные расчеты были проведены для СР от 0,5 до 10 нм. Результаты совместных измерений аппаратурой FieldSpec и прибором ГСС в сравнении с данными модели MODTRAN применительно к СР последних в 0,5 нм приведены на рис. 1.

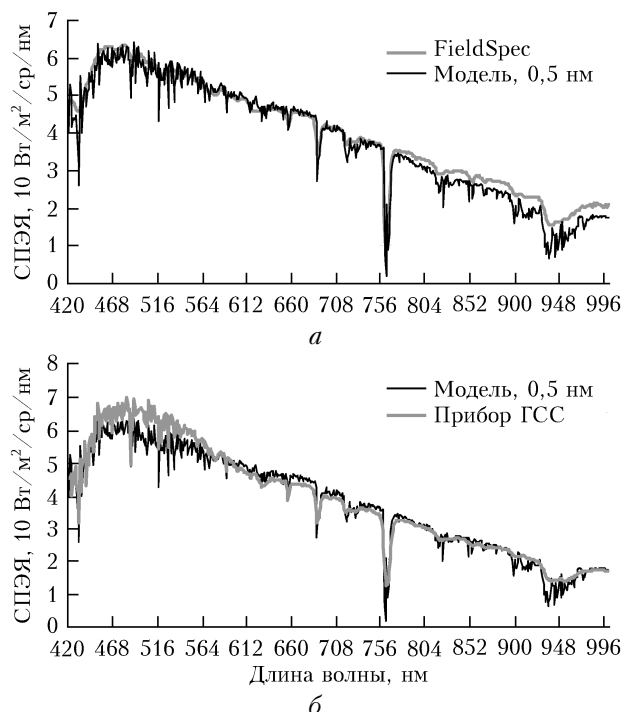


Рис. 1. СПЭЯ участка неба, измеренная спектрометрией (а) и видеоспектрометром (б), с наложенной модельной кривой

Для сопоставления данных результаты ГСС на основе кубического сплайна были интерполированы на целые значения длин волн в нанометрах (т.е. приведены к равномерным узлам шкалы данных спектрометра). Кроме того, как выяснил анализ, центры спектральных линий ГСС были сдвинуты на 1 нм в сторону меньших значений длин волн модели, в то время как центры данных спектрометра сдвинуты примерно на 2 нм в сторону больших значений (по паспорту допустимый сдвиг 1,6 нм). В связи с этим предварительно была проведена коррекция, в результате которой фраунгоферовы линии поглощения обоих приборов на анализируемых в дальнейшем участках практически совпали с модельными значениями (при идентичном СР).

При сравнении графиков на рис. 1, а видно, что до линии в 650 нм данные прибора FieldSpec радиометрически почти совпадают (с точностью до СР) с моделью, в то время как далее они проходят несколько выше нее. На рис. 1, б результаты измерения прибором ГСС несколько завышены до этой линии и близки к модели после нее. То есть полного совпадения модели с данными приборов достичь не удается даже после приведения модельных расчетов к идентичному СР. Анализ графиков показал, что, наиболее вероятно, причина расхождения – погрешности радиометрической калибровки как видео-

спектрометра, так и спектрометрического прибора. Этот факт подтверждается, например, сопоставлением параллельных измерений тестовой миры, ранее специально проведенных двумя серийными приборами FieldSpec и FieldSpec4 для контроля их радиометрических калибровок в ходе сравнения с моделью [7].

Подчеркнем, что только в редких случаях удается получить хорошее совпадение используемой атмосферной модели с данными реальных измерений спектрометрическим или видеоспектрометром [8]. Однако, как это показано в [4, 5], следует учесть, что при близости СР сравниваемых кривых их высокочастотные составляющие практически совпадают. То есть если одновременно вычестить из сравниваемых кривых низкочастотный тренд, обусловленный радиометрической разностью, близость высокочастотных составляющих можно оценить количественно. Как это было установлено, для получения низкочастотной (сглаженной) составляющей каждой кривой достаточно вычестить из нее значение (на участке анализа), аппроксимированное полиномом второй степени. Для корректной реализации метода максимально допустимое радиометрическое расхождение между данными на всей спектральной шкале не должно превышать 30%.

Таким образом, из каждой кривой – приборной и модельной (последней – применительно к каждому заданному СР), предварительно выделяется высокочастотный тренд на тестируемом участке. Высокочастотный тренд \tilde{x}_i определяется как разность между исходной кривой, обозначим ее x_i ($i = 1, \dots, M$, M – общее число спектральных точек на тестируемом участке), и ее сглаженным значением:

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i. \quad (1)$$

Низкочастотная составляющая \bar{x}_i при аппроксимации данных полиномом второго порядка рассчитывалась методом наименьших квадратов [9]:

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^M a_{ij} X_j, \quad (2)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ – текущая вектор-выборка из M значений сглаживаемой кривой в окрестности центральной точки интервала тестирования; a_{ij} – постоянные весовые коэффициенты, соответствующие элементам матрицы A (индекс Т обозначает знак транспонирования):

$$A = \mathbf{B}(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2M} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M1} & a_{M2} & \dots & a_{MM} \end{Bmatrix},$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \tau_1 & \tau_2 & \dots & \tau_M \\ \frac{\tau_1^2}{2} & \frac{\tau_2^2}{2} & \dots & \frac{\tau_M^2}{2} \end{Bmatrix}.$$

Здесь на основе кубического сплайна приборная кривая предварительно была приведена к сетке спектральных линий с постоянным шагом в 1 нм, которой соответствует исходная кривая измерений спектро радиометра. Интервалы между положениями отсчетов взяты равномерные, т.е. $\tau_i = (i - 1)$, $i = 1, \dots, M$. Модельные расчеты строятся для единичного шага путем задания соответствующего параметра в модели MODTRAN.

Как показала практика применения рассматриваемого подхода к данным реальной аппаратуры, для его успешной реализации целесообразно принимать размер интервала в $M = 60$ точек спектральных линий. Выборка для заранее заданной опорной спектральной точки формируется с центром на этом интервале (2) из 30 отсчетов вправо и влево от центра.

Результаты

После выделения высокочастотных трендов каждой кривой в соответствии с (1) они сравниваются на участке оценки разрешения, как это показано на рис. 2, в окрестности центральной точки 700 нм. При этом модельные данные для спектро радиометра FieldSpec представлены значениями СП, ближайшими к паспортному значению в 3,5 нм (ряд в 2, 3, 4 нм).

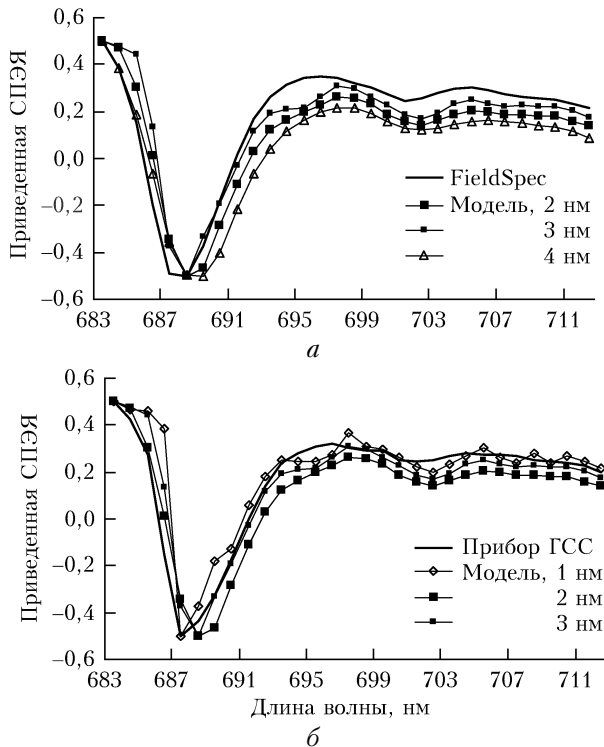


Рис. 2. Приведенная СПЭЯ FieldSpec (а), прибора ГСС (б) и модельные разрешения на опорной линии 700 нм

В ходе сравнения приборных измерений с модельными данными используется критерий корреляционной близости. Вычисленные значения коэффициентов корреляции между измерениями и кривыми из модельного набора приведены на рис. 3.

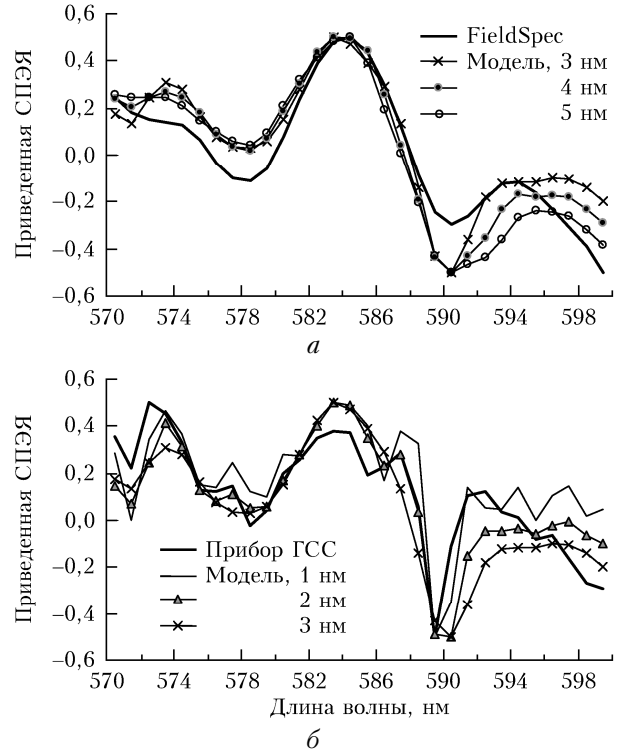


Рис. 3. Приведенная СПЭЯ FieldSpec (а), прибора ГСС (б) и модельные разрешения на опорной линии 587 нм

Расчет проводится на основе выражения

$$КОР_j = \frac{\sum_{i=1}^M (\tilde{x}_i^p - E^p)(\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)}{\sigma_p \sigma_{mj}}, \quad (3)$$

где $E^p = 1/M \sum_{i=1}^M \tilde{x}_i^p$ – среднее на интервале анализа значение высокочастотной составляющей измерений прибора (верхний индекс « p » соответствует прибору FS или ГСС); $E_j^m = 1/M \sum_{i=1}^M \tilde{x}_{ij}^m$ – среднее значение высокочастотной составляющей на интервале анализа j -й модели и средние квадратические отклонения (СКО) высокочастотных выборок по каждой j -й модели:

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^M (\tilde{x}_i^p - E^p)^2 \right]^{1/2},$$

$$\sigma_{mj} = \left[\frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^M (\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)^2 \right]^{1/2}.$$

Еще для одного критерия – минимума СКО невязок между измеренными и модельными данными – оценка рассчитывалась по выражению

$$СКО_j = 1/M \sqrt{\sum_{i=1}^M [(\tilde{x}_i^p - E^p) - (\tilde{x}_{ij}^m - E_j^m)]^2}. \quad (4)$$

Зависимости от СР коэффициентов корреляции и СКО невязок, вычисленных по (3) и (4), между приборными и модельными высокочастотными составляющими на центральной линии 700 нм приведены на рис. 4, а.

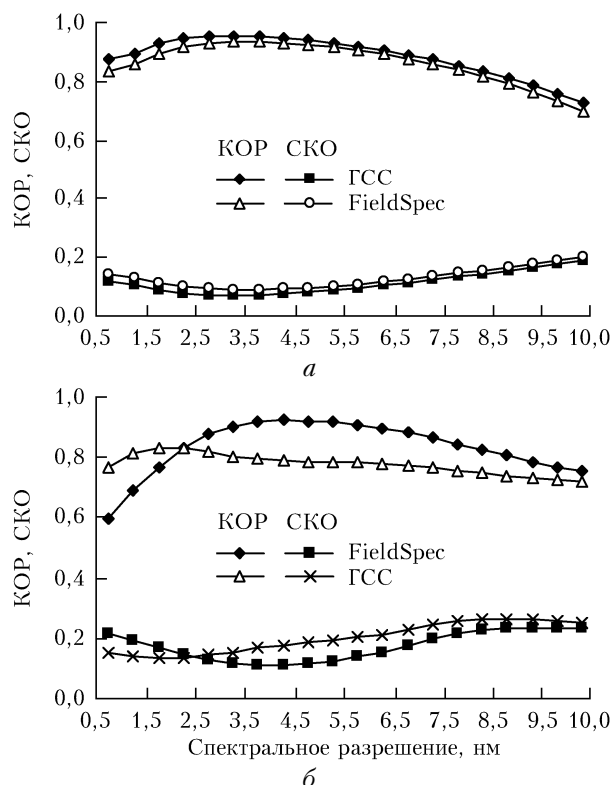


Рис. 4. Критериальные показатели схожести данных в зависимости от СР модельных кривых на центральных линиях 700 (а) и 583 нм (б)

Максимум коэффициента корреляции для прибора FieldSpec соответствует величине СР, близкой к 3 нм, в то время как минимум СКО невязок лежит в промежутке между 3 и 3,5 нм. То есть можно утверждать, что используемый подход позволяет определить величину СР спектро радиометра как совпадающую с паспортным значением СР 3,5 нм на линии 700 нм с максимальной ошибкой в 0,5 нм [8]. Для прибора ГСС критериальные показатели почти такие же, и это позволяет утверждать, что приборное СР видеоспектрометра почти совпадает на этой центральной линии со СР используемого спектро радиометра.

Рассмотрим оценки СР этих приборов для другой спектральной линии – 587 нм (см. рис. 3).

Для данных ГСС (рис. 3, б) характерна существенно большая изрезанность на линиях поглощения, чем для результатов измерений спектро радиометром, что свидетельствует о более высоком СР этой аппаратуры. Расчеты, представленные на рис. 4, б, подтверждают результаты визуального анализа.

Максимум коэффициента корреляции для аппаратуры FieldSpec лежит между модельными значениями СР 3,5 и 4 нм, а минимум СКО невязок – ближе к 3,5 нм. Максимум показателя корреляции

для видеоспектрометра соответствует СР около 2 нм, а минимум СКО невязок – СР около 1,5 нм. Отсюда на основании полученных расчетов можно утверждать, что оценка СР видеоспектрометра на линии 587 нм соответствует среднему значению 1,75 нм с ошибкой не более 0,5 нм.

С точностью до 0,5 нм результат на этой спектральной линии совпадает с паспортным СР прибора FieldSpec (~3,5 нм). Отсюда следует приближенная оценка точности используемого метода $\pm 0,5$ нм (сравнение оценок на основе двух критериев).

Номинальная величина СР видеоспектрометра, измеренная в лабораторных условиях, составляет 2 нм, т.е. с невязкой в 0,25 нм оценка предложенным методом совпадает со значением, указанным изготовителем.

Принятая методика модельной оценки использовалась и для оценки СР видеоспектрометра, разработанного ЗАО НТЦ «Реагент» (образец разработки 2002 г. на призмном диспергаторе). Его расчетное СР варьировалось от 1,6 нм (на линии около 400 нм) до 16 нм (на линии около 900 нм). В силу вышеозначенных проблем с эталонным монохроматором, как это было выяснено изготовителем, измеряемые величины СР на отдельных линиях шкалы сопровождались существенными ошибками смещения относительно рассчитанных при проектировании значений. В 2004 г. с применением этого видеоспектрометра под Москвой был получен снимок участка безоблачного неба вблизи солнечного диска при высоте Солнца около 60°. Подобранная на основе данных об условиях наблюдения модель расчета на MODTRAN 5.2 позволила получить результаты, близкие к наблюдаемым (максимальное различие между кривыми составило ~20%). МДВ на линии 550 нм принята равной 23 км, рассчитанная на основе модели оптическая толщина атмосферы – 0,92. На основе этих данных с помощью приведенной методики были получены оценочные значения СР прибора ГСС. Результаты расчетов представлены в таблице.

Сравнительные данные по оценке спектрального разрешения прибора

Спектральная линия, нм	СР, нм		Оценка предложенным методом, нм	Невязка, %	
	расчетное	измеренное		измеренный	оценки
505	2,0	2,2	2,0	20	0
665	4,4	5,4	4,5	23	2,3
820	8,2	9,3	8,5	13	3,7
855	10,0	10,6	10,5	6	5

Из анализа представленных результатов следует, что невязки измерений относительно расчетных значений при проектировании аппаратуры достигают 20% и все величины смещены в одну сторону по отношению к расчетным данным. Невязки оценок, полученные при расчетах предложенным методом (в сравнении с модельными кривыми, рассчитанными с шагом 0,5 нм), оказались намного меньше невязок измерений. При этом следует заметить, что на одной спектральной линии – около 515 нм –

изготовитель в качестве дополнительного источника излучения использовал натриевую лампу со спектральным дублетом шириной не более 1 нм, данные на этой длине волны соответствовали невязке ~10% относительно расчетной величины. Это свидетельствует о смещении оценок полученных значений из-за спектральной ширины тестового луча монохроматора.

В ходе измерений на основе принятой методики было получено, что невязка измерений уменьшилась до 2% относительно расчетного значения. Этот факт свидетельствует о том, что результаты, полученные с помощью предложенного метода модельной оценки на основе тестовой съемки, существенно ближе к реальным значениям, что в конечном итоге позволяет повысить точность оценок СР видеоспектрометра.

Дополнительно заметим, что оценки СР прибора, полученные в ходе применения предложенной методики, позволили изготовителям утверждать, что оцененные таким образом значения параметров совпадают, с невязкой, по крайней мере, в 0,5 нм, с расчетными величинами, полученными при проектировании. Применение предложенной методики к данным синхронной съемки аттестованным спектрорадиометром FieldSpec и практически полное совпадение оценок с паспортными данными прибора подтверждают практическую обоснованность метода и возможность его применения к аппаратуре ГСС.

Заключение

Предложенный метод с максимальной ошибкой 0,5 нм может использоваться для оценки спектральных разрешений изготовленных приборов, а также оценки качества аппаратуры в полевых условиях. Кроме этого его можно применять для контроля возможного временного ухудшения СР серийно выпускаемых спектрорадиометров и уточнения положения спектральных линий приборов.

1. Балтер Д.Б., Белов А.А., Воронцов Д.Б., Ведешин Л.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Родионова И.П., Федунин Е.Ю. Проект спутникового гиперспектрометра, предназначенного для малого кос-

мического аппарата // Исслед. Земли из Космоса. 2007. № 2. С. 43–55.

2. Лысенко С.А. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 775–788; Lisenko S.A. Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the solar radiation transfer approximation model // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 72–85.
3. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403; Belov V.V., Tarasenkov M.V. Three algorithms of statistical modeling in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 533–540.
4. Liao L.B., Jarecke P.J., Gleichauf D.A., Hedman T.R. Performance Characterization of the Hyperion Imaging Spectrometer Instrument // Proc. SPIE. 2000. V. 4135. P. 254–263.
5. Szekiolda L.H., Bowles J.H., Gili D.B., Miller W.D. Interpretation of Absorption Bands in Airborne Hyperspectral Radiance Data // Sensors. 2009. V. 9. P. 2907–2925.
6. Berk A., Anderson G.P., Acharya P.K., Shettle E.P. MODTRAN 5.2.0.0 USER's MANUEL. Spectral Sciences, INC. July 2008. 100 p.
7. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Кириенко А.В. Оценка возможностей модельно-экспериментального контроля радиометрической калибровки авиационного гиперспектрометра в области 450–1000 нм // Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии: Материалы VI Междун. конф. 8–13 сентября 2013 г., Ростов-на-Дону. Т. 2. С. 332–333.
8. Остриков В.Н., Плахотников О.В., Чапурский Л.И. Оценка возможностей космического гиперспектрометра «Ресурс-П» на основе модельной имитации «кубов» с применением баз данных высокого пространственного разрешения // Тр. II Всерос. науч. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / под общей ред. С.С. Суворова. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. Т. II. С. 278–283.
9. Остриков В.Н., Плахотников О.В. Влияние предварительной обработки данных гиперспектральной съемки на качество их тематического анализа // Исслед. Земли из Космоса. 2014. № 1. С. 1–6.

V.N. Ostrikov, O.V. Plakhotnikov, A.V. Kirienko. Estimation of the spectral resolution of an imaging spectrometer from Fraunhofer's lines with the MODTRAN atmospheric model.

The method for estimation of spectral resolution of video spectrometers on separate sections of the sensitivity scale by comparison of experimental survey results with model (calculated for the same observation conditions) Fraunhofer's lines from a set of preset values is suggested. It is shown that both for mass-produced spectroradiometric devices and for original video spectral devices, the maximum errors of estimation by the method suggested are within 0.5 nm at the considered test lines 700 and 587 nm.