

Спектрально-энергетическое разрешение спутниковых спектральных систем при съёмке малоконтрастных объектов

Л. В. Катковский

*Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, 220045, Республика Беларусь
E-mail: katkovskyl@bsu.by*

Оценка спектрально-энергетического разрешения спектральной системы или системы изображения важна с точки зрения возможности идентификации (различения) объектов на земной поверхности с очень близкими спектральными характеристиками отражения. В статье представлены методика расчёта и результаты оценки возможностей регистрации объектов с близкими коэффициентами спектральной яркости, таких, например, как хвойные деревья в различных стадиях усыхания, на примере видеоспектральной системы (ВСС), работающей на борту Международной космической станции, и сенсора OLI спутника Landsat-8. Спектрально-энергетическое разрешение определяется атмосферными помехами и собственными шумами съёмочной системы. Пороговые значения спектральных контрастов по входному излучению рассчитаны для модуля видеоспектрометра и модуля изображений ВСС на основе энергетических расчётов их оптических схем и параметров оптоэлектронных компонентов. Предложенная схема расчёта применима для всех спектрометров и систем изображения с аналогичными оптическими схемами. Пороговые значения для каналов сенсора OLI в единицах спектральной яркости на входе прибора хорошо известны и используются напрямую для оценок регистрации пар объектов с близкими спектрами отражения. Результаты подтверждают высокую чувствительность каналов OLI видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и хорошую чувствительность спектрометра и камеры ВСС, что позволяет говорить о возможности регистрации этими сенсорами спектрально малоконтрастных объектов.

Ключевые слова: спектрально-энергетическое разрешение, малоконтрастные объекты, пороговое значение, отношение сигнал/шум

Одобрена к печати: 28.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-63-75

Введение

Под спектрально-энергетическим разрешением спутниковых спектрометров или систем изображений в данной работе будем понимать пороговый контраст спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы либо пороговый контраст коэффициента спектральной яркости (КСЯ) у поверхности Земли. Этот вопрос важен с точки зрения оценки возможности дискриминации (различения) различных объектов на земной поверхности с очень близкими спектральными характеристиками отражения. Например, в задаче космического лесопатологического мониторинга особый интерес представляет картирование лесных экосистем по категориям состояния (дискриминация здорового древостоя от деревьев на начальных стадиях поражения, например стволовыми вредителями) (Харук и др., 2016; Abdullah et al., 2019), спектральные различия между которыми будут незначительными.

Спектрально-энергетическое разрешение будет определяться как степенью влияния атмосферы, так и параметрами сенсора, такими как спектральное и пространственное разрешение, спектральная чувствительность и отношение сигнал/шум.

Прямой подход к оценке предельного спектрально-энергетического разрешения состоит в расчёте контраста СПЭЯ на верхней границе атмосферы (ВГА) для двух объектов (поверхностей) с близкими спектрами отражения и сравнении этого контраста с пороговым на входе космической системы. Это возможно, когда для спутникового сенсора известны пороговые значения СПЭЯ в его каналах. Такая ситуация имеет место для каналов сенсора OLI

Landsat-8 (Barsi et al., 2014; Morfitt et al., 2015). Если же пороговые значения СПЭЯ сенсора не измерялись во время предполётных спектрально-энергетических калибровок, необходимо выполнить соответствующие расчёты.

В следующем разделе описана методика и проведён расчёт пороговых СПЭЯ по входному излучению для двух модулей видеоспектральной системы (ВСС): видеоспектрального и модуля изображений. Затем выполнен расчёт спектров на верхней границе безоблачной атмосферы на основе модели атмосферы и аналитических формул, предложенных и применённых в работе (Katkovsky et al., 2018), для нескольких пар объектов с близкими спектрами отражения. Полученные спектральные контрасты использованы далее для оценки возможности дискриминации этих объектов сенсорами OLI и ВСС.

Пороговое спектрально-энергетическое разрешение видеоспектральной системы

В космическом эксперименте «Ураган» для проведения мониторинга поверхности Земли с борта Российского сегмента Международной космической станции и прогнозирования развития природных и техногенных катастроф используется научная аппаратура — видеоспектральная система (НА ВСС). НА ВСС обеспечивает регистрацию не менее 256 спектров высокого разрешения в диапазоне длин волн 400–950 нм различных точек подстилающей поверхности на каждый кадр цифрового цветного фотоизображения (Беляев и др., 2016). ВСС конструктивно выполнена в виде компактного моноблока, основными частями в его составе выступают модуль видеоспектрометра (МВ) и модуль изображений (МИ).

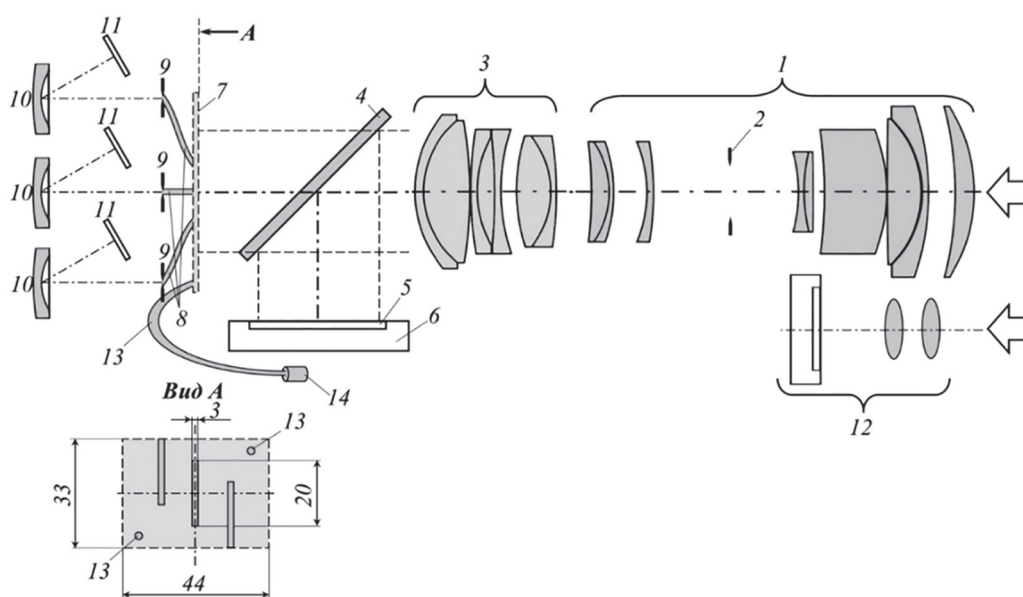


Рис. 1. Оптическая схема ВСС: 1 — входной объектив; 2 — электромеханический затвор; 3 — конвертер; 4 — плоская полупрозрачная пластина узла светоделителя; 5 — цветная фотоприёмная матрица (39 Мпкс, 5412×7212 элементов, 16 бит); 6 — цифровой адаптер (задник); 7 — вторая плоскость изображения; 8 — световоды; 9 — входные щели полихроматоров; 10 — диспергирующие элементы (вогнутые голограммные решётки); 11 — приёмные матрицы полихроматоров DALSA IA-DJ-01044 (1044×1044 элементов); 12 — камера видеосопровождения (электронный видеоискатель); 13 — волоконно-оптический световод; 14 — фотодиод электронного экспонометра

Для обоих модулей системы ВСС необходимо провести расчёты порогового контраста на входе (входном объективе) исходя из параметров её оптических и электронных компонентов. На рис. 1 приведена оптическая схема ВСС, в которой использован полный комплект камеры Hasselblad (<https://www.hasselblad.com/h-system>): входной объектив Hasselblad HC 4,5/300 (1)

с конвертером Hasselblad H 1.7x Converter ($F = 510$ мм) (3), корпус камеры с модулем управления Hasselblad H4D (body), цифровой адаптер Hasselblad H4D-40 (задник (6)) и электронный экспонометр Hasselblad HVD-90x, которые конструктивно разнесены и связаны между собой интерфейсными кабелями (шлейфами). Это позволяет управлять диафрагмой и затвором объектива, а также применять программные средства разработчика.

Изображение, сформированное входным объективом, после отражения светового пучка от полупрозрачной пластины фокусируется на первой плоскости изображения — цветной фотоприёмной матрице цифрового адаптера Hasselblad H4D-40 (задника). Три световода (8) представляют собой волоконно-оптические жгуты, которые передают изображения объекта съёмки с масштабом 1:1 со второй плоскости изображения (в проходящем через светодели-тель свете) на входные щели матричных полихроматоров (9, 10, 11). Спектральный коэффициент пропускания жгутов длиной ~ 250 мм в области 400–1200 нм равен $\sim 50\%$ с максимумом пропускания ($\sim 60\%$) в области 500–700 нм. Волоконно-оптический световод (13) передаёт освещённость сцены второй плоскости изображения на фотодиод электронного экспонометра (14). В ВСС используется также камера видеосопровождения (электронный видеоискатель) (12) для контроля оператором объектов съёмки на мониторе одноплатного компьютера.

Линейная дисперсия и спектральное разрешение полихроматоров модуля видеоспектрометра ВСС

Диспергирующая система МВ должна обеспечивать высокую линейную дисперсию, слабо зависящую от длины волны λ в рабочем спектральном диапазоне ($\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$). Этому условию удовлетворяют дифракционные решётки при условии $\lambda_{\max}/d < 1$, где d — период решётки. Решётка должна использоваться в первом порядке, так как только в этом случае возможна работа в наиболее широком спектральном диапазоне, равном ($\lambda_{\min}, 2\lambda_{\max}$), и наименьшие световые потери. Для полихроматора с вогнутой дифракционной решёткой важным параметром, определяющим как спектральное разрешение, так и энергетику спектрометра, становится обратная линейная дисперсия, для которой справедливо выражение (<https://www.horiba.com/us/en/scientific/products/optics-tutorial/monochromators-spectrographs/>):

$$D^{-1} \equiv \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{mnr_b} \cdot \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2},$$

где n — плотность штрихов решётки; m — порядок дифракции; r_b — расстояние от решётки до приёмника; β_1, β_2 — углы дифракции для длин волн начала и конца рабочего спектрального диапазона. Для указанных ниже параметров системы $D^{-1} = 31,7$ нм/мм.

Ширина спектрального интервала, соответствующая размеру пикселя Δa приёмной матрицы (играет роль выходной щели), составляет $\Delta\lambda_1 = \Delta a \cdot D^{-1} = 0,76$ нм. Соответствующая величина может быть вычислена и для входной щели: $\Delta\lambda_2 = b_{\text{ш}} D^{-1} = 3,1$ нм. Спектральное разрешение МВ (спектральное пропускание для сплошного спектра) определяется максимальным значением из этих двух $\Delta\lambda = \max(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = 3,1$ нм.

Угловое поле зрения спектрометра в направлении, перпендикулярном входной щели, определяется шириной щели (100 мкм), или приёмного пикселя, а в направлении вдоль щели — высотой пикселя приёмника, а также в обеих плоскостях уширяется за счёт астигматизма дифракционной решётки. Указанные поля зрения составляют 2,5 и 5 угл. мин и соответствуют размеру проекции элемента разрешения на Землю (спектрометрируемая площадка) 300×600 м.

Спектрально-энергетические расчёты модуля видеоспектрометра ВСС

Запишем выражение для отношения сигнал/шум $S/R \equiv \text{SNR}$ (signal-to-noise ratio) приёмной матрицы полихроматора в виде (Беляев и др., 2008) (<http://www.microscopyu.com/tutorials/java/digitalimaging/signaltonoise/>):

$$\text{SNR} = \frac{I_c \tau}{[I_c \tau + I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2]^{1/2}}, \quad (1)$$

где τ — время экспозиции; $I_{\text{темн}}$ — темновой сигнал (ток) в электронах на пиксель в секунду ($e^-/(\text{пиксель} \cdot \text{с})$); $N_{\text{сч}}$ — шум чтения матрицы в электронах, и для единообразия введена величина тока полезного сигнала, соответствующего регистрируемому излучению (полезный сигнал в $e^-/(\text{пиксель} \cdot \text{с})$):

$$I_c = F_{\lambda}^{\text{пикс}} Q_{\lambda}, \quad (2)$$

где $F_{\lambda}^{\text{пикс}}$ — падающий поток фотонов на приёмнике (фотон/ $(\text{пиксель} \cdot \text{с})$); Q_{λ} — квантовая эффективность фотоприёмника.

Из уравнения (1) получим выражение для порогового значения тока полезного сигнала $I_c^{\text{пор}}$, соответствующего отношению сигнал/шум, равному 1:

$$I_c^{\text{пор}} = \frac{1}{2\tau} \left[1 + \sqrt{1 + 4(I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2)} \right]. \quad (3)$$

Далее вычисляем спектральный поток на пикселе $F_{\lambda}^{\text{пикс}}$ в выражении (2). При спектрометрировании протяжённого объекта, если входная щель полихроматора полностью заполнена его изображением, спектральную фотонную яркость входной щели $B_{\lambda}^{\text{ш}}$ (находящуюся в фокальной плоскости входного объектива) можно выразить через фотонную спектральную яркость источника излучения B_{λ} (на входе прибора) следующим образом:

$$B_{\lambda}^{\text{ш}} = \frac{B_{\lambda} T_{\lambda} \varepsilon_{\text{вх}}^2}{4}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{вх}} = D_{\text{вх}}/f_{\text{вх}}$, $D_{\text{вх}}$ — диаметр входного зрачка объектива, $f_{\text{вх}}$ — его фокусное расстояние; T_{λ} — полное пропускание всех оптических элементов спектрометра МВ, $T_{\lambda} = T_{\text{вх}} T_{\text{пп}} T_{\text{ов}} T_{\text{м}}$, где $T_{\text{вх}}$ — пропускание входного объектива; $T_{\text{пп}}$ — пропускание полупрозрачной пластинки; $T_{\text{ов}}$ — пропускание оптоволокну; $T_{\text{м}}$ — пропускание входного окна ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — charge-coupled device).

Фотонный поток излучения $F_{\lambda}^{\text{реш}}$, падающий на дифракционную решётку площадью $A_{\text{реш}}$ в спектральном интервале $\Delta\lambda$ (спектральное разрешение спектрометра), равен:

$$F_{\lambda}^{\text{реш}} = B_{\lambda}^{\text{ш}} \Delta\lambda \cdot b_{\text{ш}} h_{\text{ш}} \frac{A_{\text{реш}}}{r_a^2},$$

где r_a — расстояние от входной щели до решётки; $b_{\text{ш}}$, $h_{\text{ш}}$ — ширина и высота входной щели соответственно. Здесь индекс λ у параметра $F_{\lambda}^{\text{реш}}$ обозначает центральную длину волны канала спектрометра (не спектральную величину, поскольку умножено на ширину канала $\Delta\lambda$).

После решётки поток будет ослаблен потерями при отражении и дифракции, что учтём фактором эффективности решётки η_{λ} . Вогнутая отражательная решётка фокусирует изображение щели на приёмник. Выходная щель, роль которой играет пиксель приёмной матрицы, «вырезает» из спектра, соответствующего изображению щели, часть, пропорциональную площади пикселя ($\Delta a \cdot \Delta b$). Таким образом, поток излучения сплошного спектра на пикселе приёмника будет равен:

$$F_{\lambda}^{\text{пикс}} = B_{\lambda}^{\text{ш}} \eta_{\lambda} \Delta\lambda \frac{A_{\text{реш}}}{r_a^2} b_{\text{ш}} h_{\text{ш}} \frac{\Delta a}{b'_{\text{ш}}} \frac{\Delta b}{h'_{\text{ш}}},$$

где $b'_{\text{ш}}$, $h'_{\text{ш}}$ — ширина и высота изображения щели в плоскости приёмника.

При этом предполагается, что абберационными и дифракционными расширениями изображения щели можно пренебречь, а ширина щели и пикселя таковы, что в пределах пропускаемого ими спектрального интервала спектральными изменениями величин $B_{\lambda}^{\text{ш}}$, η_{λ} , D^{-1} , а также чувствительности приёмника можно пренебречь.

Подставляя выражения для размеров изображения щели $b'_{щ} = b_{щ}r_b \cdot \cos\alpha / r_a \cdot \cos\beta$, $h'_{щ} = h_{щ}r_b / r_a$ (α, β — углы падения и дифракции на решётке), полосы пропускания $\Delta\lambda$ и яркости щели B_{λ}^{III} (4), получаем:

$$F_{\lambda}^{пикс} = \frac{B_{\lambda} T_{\lambda} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{щ} (\Delta a \cdot \Delta b) \cdot \cos\beta}{4r_b^2 r_a m n} \quad (5)$$

После деления уравнения (5) на величину энергии фотона hc/λ , подстановки T_{λ} и $F_{\lambda}^{пикс}$ в выражение (2) для величины тока полезного сигнала в $e^-/(\text{пиксель} \cdot \text{с})$ получаем:

$$I_c = \frac{B_{\lambda} \lambda T_{вх} T_{пп} T_{ов} T_{м} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{щ} (\Delta a \cdot \Delta b) Q_{\lambda} \cdot \cos\beta}{4r_b^2 r_a m n \cdot hc} \quad (6)$$

Если ток полезного сигнала (6) приравнять к пороговому значению (3), $I_c = I_c^{пор}$, то B_{λ} в выражении (6) будет соответствовать пороговому значению контраста спектральной яркости ΔB_{λ} :

$$\frac{1}{2\tau} \left[1 + \sqrt{1 + 4(I_{темн} \tau + N_{сч}^2)} \right] = \frac{\Delta B_{\lambda} \lambda T_{вх} T_{пп} T_{ов} T_{м} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{щ} (\Delta a \cdot \Delta b) Q_{\lambda} \cdot \cos\beta}{4r_b^2 r_a n \cdot hc} \quad (7)$$

Отсюда получаем формулу для порогового контраста СПЭЯ на входном зрачке ВСС:

$$\Delta B_{\lambda} = \frac{1}{2\tau} \left[1 + \sqrt{1 + 4(I_{темн} \tau + N_{сч}^2)} \right] \frac{4r_b^2 r_a n \cdot hc}{\lambda T_{вх} T_{пп} T_{ов} T_{м} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{щ} (\Delta a \cdot \Delta b) Q_{\lambda} \cdot \cos\beta} \quad (8)$$

Необходимые для расчётов МВ ВСС параметры приведены в *табл. 1*, а результаты расчёта спектральных пороговых контрастов яркости МВ по формуле (8) изображены графически на *рис. 2* для трёх значений времени экспозиции: 0,01; 0,03 и 0,1 с.

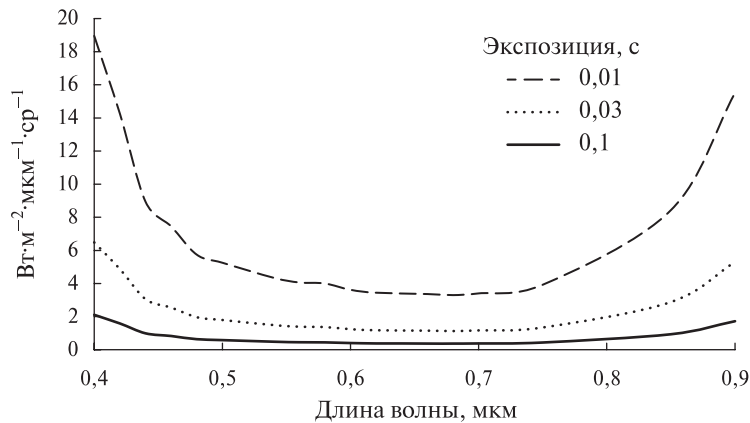


Рис. 2. Спектральные пороговые контрасты яркости МВ ВСС для трёх различных значений времени экспозиции

Таблица 1. Исходные параметры для расчёта МВ ВСС

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр входного объектива	$D_{вх}$	85 мм
Фокусное расстояние входного объектива с конвертером	$f_{вх}$	496 мм
Относительное отверстие входного объектива с конвертером	$\varepsilon_{вх}$	0,17
Среднее пропускание объектива	$T_{\lambda}^{вх}$	0,8
Отражение полупрозрачной пластинки	$R_{пп}$	0,5

Параметр	Обозначение	Значение
Пропускание оптоволоконна	$T_{\text{ов}}$	0,5
Спектральный диапазон	$\lambda_{\text{min}} - \lambda_{\text{max}}$	400–950 нм
Спектральное разрешение	$\Delta\lambda$	3,3 нм
Размер пикселя	$\Delta a \times \Delta b$	24×24 мкм
Количество пикселей	N	1044×1044
Ширина входной щели (на выходе оптоволоконна)	$b_{\text{щ}}$	50–100 мкм
Площадь дифракционной решётки	$A_{\text{реш}}$	531 мм ²
Плотность штрихов решётки	n	315 1/мм
Радиус кривизны решётки	$R_{\text{реш}}$	100 мм
Расстояние от щели до решётки	r_a	100 мм
Расстояние от решётки до приёмника	r_b	99,5 мм
Обратная линейная дисперсия полихроматора	D_{λ}^{-1}	31,7 нм/мм
Эффективность дифракционной решётки	η_{λ}	0,30–0,60
Максимальная интегральная чувствительность приёмника DALSA IA-DJ-01044	S_{max}	290 В·мкДж·см ⁻²
Квантовая эффективность	Q_{λ}	0,4–0,7
Средний темновой ток (при 25 °С)	$I_{\text{темн}}$	470 e ⁻ /(пиксель·с)
Средний шум считывания (среднеквадратичное значение)	$N_{\text{сч}}$	13 e ⁻ /(пиксель·с)

Спектрально-энергетические расчёты модуля изображений ВСС

Съёмочная камера МИ построена на основе цифрового адаптера Hasselblad CFV-39 (задника), в котором используется цветная фотоприёмная матрица Kodak KAF-40000, её основные параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики цифровой матрицы Kodak KAF-40000

Параметр	Значение
Архитектура ПЗС	С полнокадровым переносом заряда (Full Frame CCD)
Разрешение (количество пикселей)	7304(Н)×5478(В)
Размер пикселя Δa	6,8(Н)×6,8(В) мкм
Проекция пикселя на Землю	4,2–4,8 м
Оптический размер матрицы	44,2(Н)×33,1(В) мм
Сигнал насыщения	42 К e ⁻
Чувствительность по выходному сигналу	31 мкВ/e ⁻
Эффективная ширина канала $\Delta\lambda$ (R, G, B)	170, 120, 120 нм
Квантовый выход (макс.) (Peak R, G, B)	42, 44, 38 %
Шум считывания ($f = 18$ МГц)	13 e ⁻ /(пиксель·с)
Темновой ток ($T = 60$ °С)	42 пА/см ²

Примечание: Н — горизонтальные пиксели, В — вертикальные пиксели. Каналы: R — Red, G — Green, B — Blue.

Ток полезного сигнала для матрицы МИ (e⁻/(пиксель·с)) через яркость на верхней границе атмосферы B_{λ} запишется так:

$$I_c = \frac{\pi B_\lambda \varepsilon_{\text{вх}}^2 T_\lambda^{\text{вх}} R_{\text{пп}} (\Delta a)^2 Q_\lambda \lambda \Delta \lambda}{4hc}$$

Для порогового контраста спектральной яркости ΔB_λ аналогично выражениям (7), (8) получаем:

$$\Delta B_\lambda = \left[1 + \sqrt{1 + 4 \left(I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2 \right)} \right] \frac{2hc}{\pi \tau \varepsilon_{\text{вх}}^2 T_\lambda^{\text{вх}} R_{\text{пп}} (\Delta a)^2 \lambda \Delta \lambda \cdot Q_\lambda} \quad (9)$$

В табл. 3 приведены рассчитанные по формуле (9) пороговые контрасты.

Таблица 3. Пороговый контраст яркости ΔB_λ в каналах МИ для времени экспозиции 0,01 с

Каналы	Длина волны центра канала, мкм	Ширина канала, мкм	ΔB_λ , Вт·м ⁻² ·мкм ⁻¹ ·ср ⁻¹
R	0,65	0,17	0,013792
G	0,53	0,12	0,022873
B	0,47	0,12	0,029865

Возможности регистрации слабоконтрастных объектов сенсором OLI Landsat-8 и ВСС

В данном разделе исследуются возможности дискриминации в каналах сенсоров OLI Landsat-8, МВ и МИ ВСС нескольких вариантов пар слабоконтрастных объектов. Для ответа на вопрос, будут ли рассматриваемые объекты различимы соответствующими сенсорами, вначале рассчитываются контрасты СПЭЯ уходящего излучения на ВГА, $\Delta B_\lambda = B_\lambda(\rho_1) - B_\lambda(\rho_2)$, для пары объектов с альбедо ρ_1 и ρ_2 , которые сравниваются затем с пороговыми контрастами рассматриваемых сенсоров.

Сравнение контрастов объектов в каналах OLI Landsat-8

Для OLI Landsat-8 с использованием рассчитанных $B_\lambda(\rho_1)$ и $B_\lambda(\rho_2)$ вычисляются эффективные значения СПЭЯ, $B_i(\rho_i)$ (i — номер канала), в каждом канале с учётом относительной спектральной чувствительности каналов OLI и сравниваются с имеющимися пороговыми значениями СПЭЯ для каналов OLI (Morfit et al., 2015):

$$B_i(\rho) = \frac{\int_0^\infty S_i(\lambda) B_\lambda(\rho) d\lambda}{\int_0^\infty S_i(\lambda) d\lambda},$$

где $S_i(\lambda)$ — функция относительной спектральной чувствительности i -го канала сенсора OLI.

Объект № 1: две подстилающие поверхности с постоянными по спектру, но близкими по значениям альбедо: $\rho_1 = 0,300$ и $\rho_2 = 0,305$. На рис. 3 (см. с. 70) приведены спектры яркости $B_\lambda(\rho_1)$ и $B_\lambda(\rho_2)$ уходящего излучения на ВГА (рассчитаны с шагом по спектру 2 нм) для указанных поверхностей для летней среднеширотной безоблачной атмосферы с оптической толщиной по аэрозольному рассеянию на длине волны 550 нм — $\tau_{\text{sca0}} = 0,25$. Как видим, кривые в приведённом масштабе практически сливаются. На рис. 4 (см. с. 70) показано отношение спектральных контрастов этих поверхностей на ВГА и на Земле, $K_{\text{ВГА}}/K_0$, вычисляемых по формулам $K_{\text{ВГА}} = [B_\lambda(\rho_2) - B_\lambda(\rho_1)] / [B_\lambda(\rho_2) + B_\lambda(\rho_1)]$, $K_0 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$. Видно, по крайней мере для поверхностей с постоянным по спектру альбедо, что чистая атмосфера уменьшает контраст объектов незначительно, в основном в области коротких длин волн.

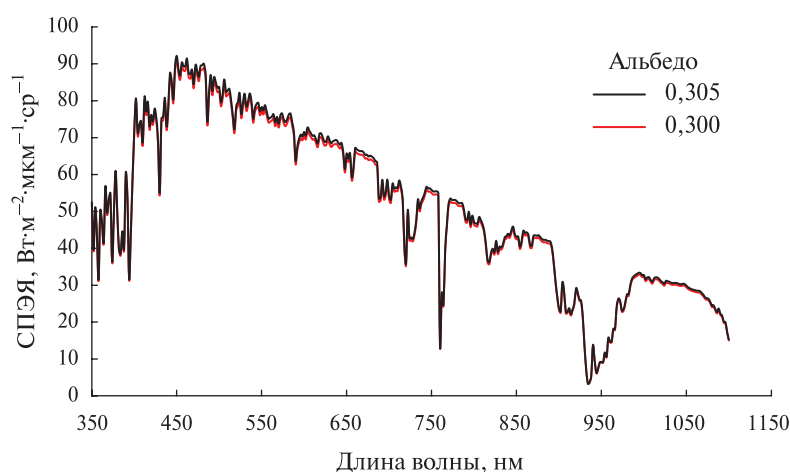


Рис. 3. СПЭЯ на ВГА для двух поверхностей с постоянными альbedo $\rho_1 = 0,300$ и $\rho_2 = 0,305$

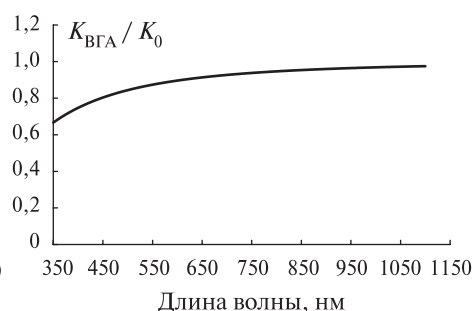


Рис. 4. Отношение спектральных контрастов на ВГА и на Земле

Результаты вычислений для четырёх каналов OLI видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов (Blue, Green, Red, NIR — *англ.* Near-Infrared) приведены в *табл. 4*. Сравнение соответственных значений в строках таблицы для ΔB_i и пороговых контрастов OLI (последняя строка) показывает, что полученные контрасты в 3–5 раз превышают пороговые, так что рассматриваемые поверхности должны быть надёжно различимы в этих каналах OLI.

Таблица 4. Контрасты объекта № 1 и пороговые контрасты в каналах OLI

Каналы OLI	Blue	Green	Red	NIR
$B_i(\rho_2)$, Вт·м ⁻² ·мкм ⁻¹ ·ср ⁻¹	85,86	76,29	65,85	42,93
$B_i(\rho_1)$, Вт·м ⁻² ·мкм ⁻¹ ·ср ⁻¹	84,69	75,19	64,87	42,26
$\Delta B_i = B_i(\rho_2) - B_i(\rho_1)$	1,17	1,10	0,99	0,67
SNR OLI, отношение сигнал/шум	367	304	227	201
Пороговый контраст OLI, Вт·м ⁻² ·мкм ⁻¹ ·ср ⁻¹	0,23	0,25	0,29	0,21

Объект № 2: Поскольку большой практический интерес представляет собой задача обнаружения из космоса усыханий хвойных насаждений на ранних стадиях, а явным признаком усыхания оказывается уменьшение содержания хлорофилла в иглах (Abdullah et al., 2019) и увеличение отражения в полосах поглощения хлорофилла, следующей парой объектов для исследования контраста были зелёная хвоя сосны (*рис. 5а*, см. с. 71), реальный спектр (КСЯ) которой ($\rho_1(\lambda)$) измерен нами в лабораторных условиях спектрометром в диапазоне 400–900 нм, и гипотетически «усыхающая» сосна, модельный спектр отражения которой получен «возмущением» реального спектра зелёной сосны (искусственным искажением кривой) путём увеличения КСЯ в двух спектральных полосах хлорофилла с центрами 490 и 680 нм и шириной «возмущения» в 80 и 100 нм соответственно, в виде треугольного профиля с высотой 10 % от КСЯ «зелёного» спектра в центрах полос (*рис. 5б*). На *рис. 5в* показаны контрасты на ВГА и на Земле.

Далее полученные с использованием рассчитанных спектров уходящего излучения на ВГА, $B_\lambda(\rho_1)$ и $B_\lambda(\rho_2)$ (*рис. 6*, см. с. 71), эффективные СПЭЯ в каналах OLI и их контрасты сравнивались, как и выше, с порогами OLI (*табл. 5*). Из таблицы видно, что в каналах Green и NIR рассматриваемые объекты не будут различимы, что и понятно, поскольку «возмущения» КСЯ в полосах хлорофилла (см. *рис. 5в*) находятся вне этих каналов. В то же время контрасты в полосах Blue и Red практически на порядок превосходят пороговые OLI (последние получены делением величины сигнала СПЭЯ на SNR).

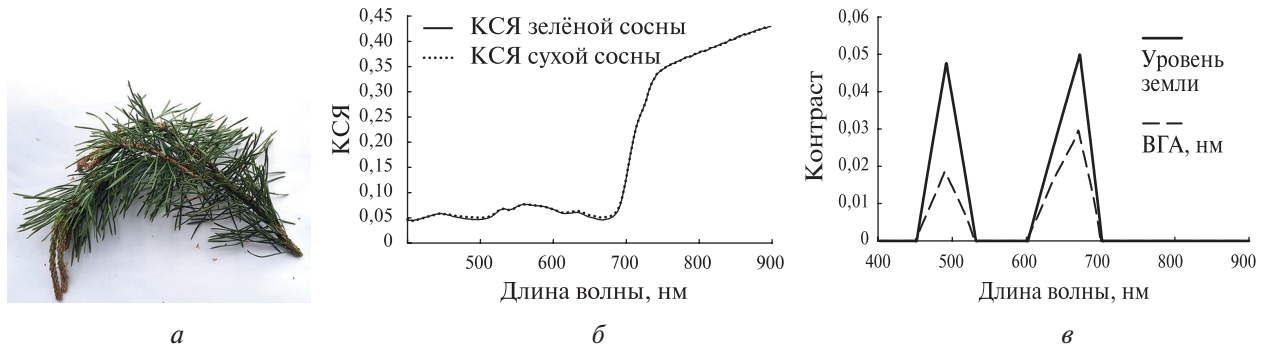


Рис. 5. Хвоя сосны (а); КСЯ зелёной и «усыхающей» хвои сосны (б); контрасты на ВГА и на Земле (в)



Рис. 6. Спектры СПЭЯ на ВГА для альbedo «зелёной» сосны и модельного спектра «усыхающей» сосны

Таблица 5. Контрасты объекта № 2 и пороговые контрасты в каналах OLI

Каналы OLI	Blue	Green	Red	NIR
$B_i(\rho_2), \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$	28,85	26,30766	17,28	57,71233
$B_i(\rho_1), \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$	28,21	26,30736	16,51	57,71233
$\Delta B_i = B_i(\rho_2) - B_i(\rho_1)$	0,63	0,00030	0,77	0
SNR OLI, отношение сигнал/шум	367	304	227	201
Пороговый контраст OLI, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$	0,08	0,09	0,07	0,29

Следует заметить, что полученные результаты соответствуют сравнению значений двух отдельных пикселей (либо одного пикселя в различные моменты времени), т. е. тому идеальному случаю, когда пиксель покрывает однородную поверхность («чистый спектр»). Поэтому для следующего модельного эксперимента выбран объект № 3.

Объект № 3: Контраст «смешанного» пикселя и пикселя «здоровой» ели, где в качестве смеси взят состав из 90 % «здоровой» ели (2-я стадия усыхания) и 10 % «усыхающей» (4-я стадия). КСЯ «здоровой» и «усыхающей» хвои ели представляют собой реальные лабораторные спектры «здоровой» и «больной» ветвей ели (рис. 7, см. с. 72). Тот факт, что отличие КСЯ наблюдается не только в полосах поглощения хлорофилла, объясняется тем, что в поле зрения спектрометра попадают не только иглы хвои, содержащие хлорофилл, но и ветки.

Заметим, что контрасты в каналах OLI для этих двух спектров КСЯ ели были также рассчитаны и оказались, как и в предыдущем случае, выше пороговых в среднем на порядок.

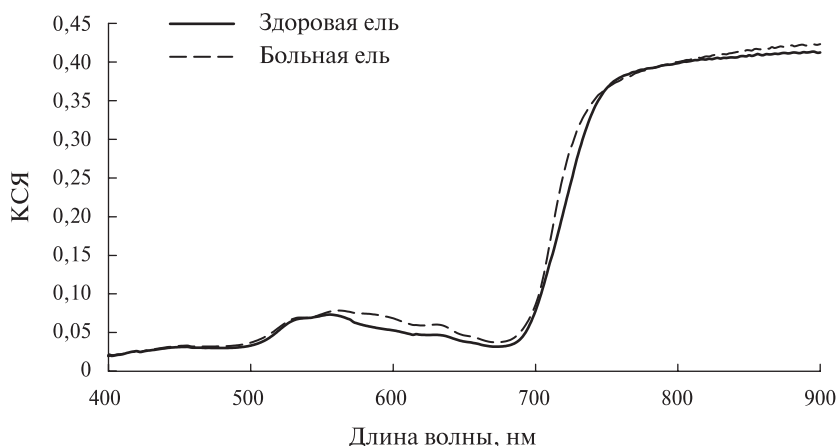


Рис. 7. КСЯ «здоровой» и «больной» хвои ели

Далее показаны разность КСЯ смеси и здоровой ели (рис. 8) и рассчитанная разность СПЭЯ на верхней границе атмосферы для этих объектов (рис. 9) (поскольку абсолютные значения указанных величин КСЯ и СПЭЯ неразличимы в их масштабах).

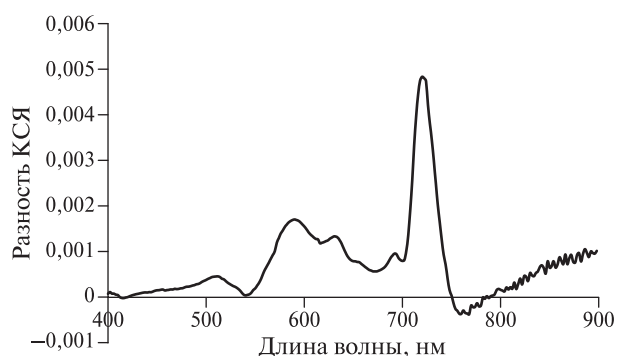


Рис. 8. Разность КСЯ смеси из 90 % «здоровой» (2-я стадия) и 10 % «усыхающей» (4-я стадия) ели и «здоровой» ели

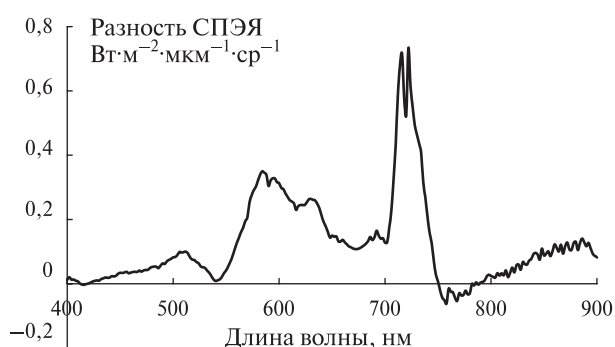


Рис. 9. Разность СПЭЯ на ВГА смеси из 90 % «здоровой» (2-я стадия) и 10 % «усыхающей» (4-я стадия) ели и «здоровой» ели

Эффективные величины СПЭЯ и их разности в каналах OLI представлены в табл. 6. Как видим, разностные сигналы в каналах Blue и NIR для этого случая меньше пороговых, тогда как в каналах Green и Red примерно вдвое выше. Таким образом, можно говорить, что контраст «смешанного» пикселя (10 % «больной» ели плюс 90 % «здоровой») различим рядом с однородным пикселем «здоровой» ели в зелёном и красном каналах OLI.

Таблица 6. Контрасты объекта № 3 и пороговые контрасты в каналах OLI

Каналы OLI	Blue	Green	Red	NIR
$B_i(\rho_2)$, $Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1} \cdot ср^{-1}$	24,46	25,25	14,11	57,23
$B_i(\rho_1)$, $Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1} \cdot ср^{-1}$	24,40	25,10	13,96	57,12
$\Delta B_i = B_i(\rho_2) - B_i(\rho_1)$	0,06	0,15	0,15	0,11
SNR OLI, отношение сигнал/шум	367	304	227	201
Пороговый контраст OLI, $Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1} \cdot ср^{-1}$	0,08	0,09	0,07	0,29

Сравнение контрастов объектов в каналах ВСС

Для спектрометра ВСС производится непосредственное сравнение спектральных контрастов на ВГА двух объектов пары с рассчитанными пороговыми спектральными контрастами МВ (см. рис. 2), поскольку обе величины рассчитаны с одинаковым шагом по спектру в 2 нм. На рис. 10 на кривые пороговой чувствительности спектрометра ВСС для трёх различных значений времени экспозиции (см. рис. 2) наложены кривые контрастов СПЭЯ на ВГА для трёх рассмотренных выше объектов в спектральном диапазоне 400–900 нм. Рисунок 10 позволяет установить, в каких каналах спектрометра и какие объекты будут различимы, следующим образом: спектральная область (и, соответственно, каналы спектрометра, находящиеся в ней), для которой кривая пороговой чувствительности спектрометра лежит ниже кривой контрастов СПЭЯ рассматриваемой пары объектов, будет соответствовать диапазону спектра, в котором эта пара объектов различима.

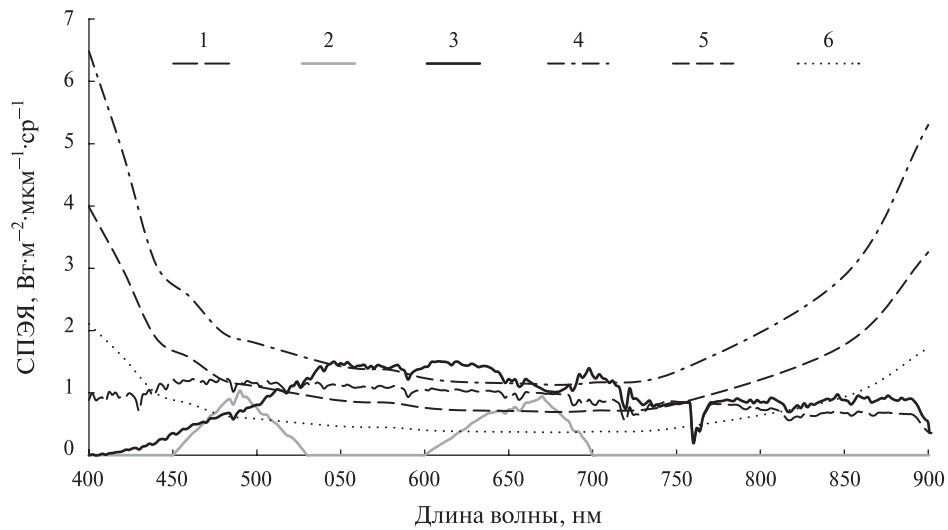


Рис. 10. Пороговые контрасты СПЭЯ спектрометра ВСС для трёх значений времени экспозиции и разности СПЭЯ на ВГА трёх пар малоконтрастных объектов: 1 — разности СПЭЯ для объекта 1 (см. в тексте); 2 — разности СПЭЯ для объекта 2; 3 — разности СПЭЯ для объекта 3. Порог МВ ВСС для времени экспозиции: 4 — 30 мс; 5 — 50 мс; 6 — 100 мс

Сравнение контрастов объектов с порогами в модуле изображения ВСС (см. табл. 3) также можно выполнить непосредственно, поскольку эффективные значения в каналах R, G, B камеры МИ уменьшаются не более чем в два раза в сравнении со средними в пределах каналов (для квазипостоянных по λ входных спектров), так что для медленно меняющихся кривых 1 и 3 на рис. 10 разности СПЭЯ (для объектов 1 и 3) значительно превосходят пороги трёх каналов камеры МИ (см. табл. 3). Для объекта 2 (возмущения в полосах хлорофилла, кривая 2 на рис. 10) эффективные значения разностей СПЭЯ составляют примерно $0,25 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ в каналах G и B и $0,35 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ — в канале R, что также значительно больше соответствующих порогов, приведённых в табл. 3. Таким образом, МИ ВСС выступает достаточно чувствительной камерой для дискриминации рассмотренных малоконтрастных объектов.

Заключение

Описана методика расчёта спектрально-энергетического разрешения в каналах спектрометра и камеры изображения видеоспектральной системы, работающей на борту МКС по программе космического эксперимента «Ураган». Подобные расчёты применимы и для других

спектрометров и систем изображения, поскольку оптические схемы спектрометра на основе полихроматора с дифракционной решёткой и камеры изображения смотрящего типа достаточно универсальны. Результатом расчётов становятся значения пороговой спектральной яркости сенсоров, которые определяют минимальный разрешаемый контраст на входе оптической системы от двух малококонтрастных объектов. Возможность дискриминации таких объектов оценена для ВСС и сенсора OLI Landsat-8 на примере, в частности, очень близких коэффициентов спектральной яркости фитоэлементов «здоровой» и «усыхающей» хвои. Показано, что сенсор OLI (в четырёх каналах видимого и ближнего ИК-диапазона) может регистрировать различия по входным значениям эффективной спектральной плотности энергетической яркости менее чем $0,1-0,2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$, а спектрометры ВСС — менее $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$, что соответствует разности спектрального альбеда объектов на поверхности Земли порядка 0,005 и менее. При практическом применении этих выводов следует учитывать присутствие «смеси», как правило, более двух спектров (объектов) в пределах элемента разрешения, что может приводить к трудностям выделения «чистых» спектров.

Литература

1. *Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалец С. В.* Расчет параметров спектрофотометрического комплекса для измерения яркости свечений верхней атмосферы из космоса // Журн. прикладной спектроскопии. 2008. Т. 75. № 1. С. 125–133.
2. *Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Гусев В. Ф., Десинов Л. В., Иванов В. А., Крот Ю. А., Мартинюк А. О., Рязанцев В. В., Сосенко В. А.* Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видео-спектральная система» на борту российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2016. № 2. С. 12–20.
3. *Харук В. И., Им С. Т., Двинская М. Л.* Усыхание ели (*Pinus abies*) в лесах Беларуси // Экология. 2016. № 3. С. 189–196.
4. *Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A. K., Heurich M.* Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 4. Art. No. 398. 23 p.
5. *Barsi J. A., Lee K., Kvaran G., Markham B. L., Pedelty J. A.* The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 10232–10251.
6. *Katkovsky L. V., Martinov A. O., Siliuk V. A., Ivanov D. A., Kokhanovsky A. A.* Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 11. Art. No. 1698. 18 p.
7. *Morfit R., Barsi J., Levy R., Markham B., Micijevic E., Ong L., Scaramuzza P., Vanderwerff K.* Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Radiometric Performance On-Orbit // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 2208–2237.

Spectral-energy resolution of satellite spectral systems when surveying low-contrast objects

L. V. Katkovsky

*Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk 220045, Republic of Belarus
E-mail: katkovskyl@bsu.by*

Evaluation of the spectral-energy resolution of a spectral or imaging system is important from the point of view of the possibility of identifying (distinguishing) objects on the Earth's surface with very similar spectral reflection characteristics. The paper presents the calculation methodology and the results of assessing the possibilities of registering objects with similar spectral brightness coefficients, such as, for example, conifers in different stages of drying out, using the example of the Video Spectral System (VSS) operating on board the International Space Station (ISS) and the OLI sensor of the Landsat-8

satellite. Spectral-energy resolution is determined by atmospheric interference and inherent noise of the imaging system. The threshold values of spectral contrasts for the input radiation were calculated for the video spectrometer module and the image module of VSS based on the energy calculations of their optical schemes and the parameters of optoelectronic components. The proposed calculation scheme is applicable to all spectrometers and imaging systems with similar optical designs. The threshold values for the channels of the OLI sensor in units of spectral brightness at the input of the device are well known and are used directly to estimate the registration of pairs of objects with close reflection spectra. The results confirm high sensitivity of the OLI channels of the visible — NIR ranges and good sensitivity of the spectrometer and the BCC camera, which allows the possibility of distinguishing spectrally low-contrast objects with these sensors.

Keywords: spectral-energy resolution, low-contrast objects, threshold value, signal-to-noise ratio

Accepted: 28.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-63-75

References

1. Belyaev B. I., Katkovsky L. V., Khvalev S. V., Raschet parametrov spektrofotometricheskogo kompleksa dlya izmereniya yarkosti svechenii verkhnei atmosfery iz kosmosa (Calculation of the parameters of a spectrophotometric complex for measuring the brightness of the glow of the upper atmosphere from space), *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, 2008, Vol. 75, No. 1, pp. 125–133.
2. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Gusev V. F., Desinov L. V., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Martinov A. O., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Ustroistvo i letnye ispytaniya nauchnoi apparatury “Videospektrol’naya sistema” na bortu rossiiskogo segmenta MKS (Design and flight tests of science hardware “Video-spectral system” on board the Russian segment of the ISS), *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, No. 2, pp. 12–20.
3. Kharuk V. I., Im S. T., Dvinskaya M. L., Usykhaniye eli (picea abies) v lesakh Belarusi (Drying of spruce (picea abies) in the forests of Belarus), *Ekologiya*, 2016, No. 3, pp. 189–196.
4. Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A. K., Heurich M., Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 4, Art. No. 398, 23 p.
5. Barsi J. A., Lee K., Kvaran G., Markham B. L., Pedelty J. A., The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 10232–10251.
6. Katkovsky L. V., Martinov A. O., Siliuk V. A., Ivanov D. A., Kokhanovsky A. A., Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 11, Art. No. 1698, 13 p.
7. Morfitt R., Barsi J., Levy R., Markham B., Micijevic E., Ong L., Scaramuzza P., Vanderwerff K., Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Radiometric Performance On-Orbit, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 2208–2237.