

Методика сопоставления базовых продуктов МСС КА «Канопус-В» и Landsat ETM+

А. И. Васильев, А. С. Стрёмов, В. П. Коваленко, А. А. Михеев

*Научный центр оперативного мониторинга Земли
АО «Российские космические системы», Москва, 127490, Россия
E-mail: nova@ntsomz.ru*

В статье рассмотрена задача сопоставления базовых продуктов, формируемых по данным МСС «Канопус-В» и OLI/ETM+ Landsat. Для этого, во-первых, было проведено моделирование соответствия энергетической яркости, регистрируемой приборами OLI/ETM+ Landsat и МСС «Канопус-В», с использованием программного комплекса MODTRAN. По результатам моделирования получены оценки, в соответствии с которыми допустимо сопоставление базовых продуктов МСС «Канопус-В» и OLI/ETM+ Landsat. Во-вторых, предложена технология оценки поправочных коэффициентов перехода между величинами энергетической яркости данных МСС «Канопус-В» и ETM+ Landsat-7. Проведена серия экспериментов по оценке поправочных коэффициентов за период май 2016 – октябрь 2017 г. Полученные результаты позволяют судить о стабильности коэффициентов: СКО в пределах 0,035–0,07 и 2–3 Вт/(м²·ср·мкм) для мультипликативной и аддитивной поправки соответственно. В-третьих, приведены результаты сопоставления базовых продуктов (для NDVI рассогласование составляет около 0,075), сформированных по данным МСС «Канопус-В» № 1 и ETM+ Landsat-7, при этом применение поправочных коэффициентов позволяет сократить величину рассогласования в 1,5–2,5 раза.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат Канопус-В, банк базовых продуктов, MODTRAN, ETM+ Landsat-7, OLI Landsat-8

Одобрена к печати: 09.06.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48

Введение

Перспективная группировка космических аппаратов типа «Канопус-В» (из шести аппаратов) должна быть развёрнута до конца 2018 г., при этом получаемые от спутников данные дистанционного зондирования Земли будут использоваться для решения картографических задач по данным панхроматической камеры (ПСС) и задач природно-ресурсного мониторинга по данным мультиспектральной камеры (МСС). В настоящее время (2018) исследователями разработаны решения для геометрической калибровки сенсоров КА «Канопус-В» и обработки данных до уровня 1D CEOS, например (Васильев, 2015; Кузнецов и др., 2014), предложены методики кросс-калибровки данных МСС и различных авиационных и космических систем ДЗЗ (Куревлева и др., 2015; Силюк, Катковский, 2016), демонстрирующие достоверность этих данных. Вместе с тем остаётся проблема сопоставимости высокоуровневых информационных продуктов, формируемых по данным МСС и других зарубежных систем, в том числе ETM+/OLI Landsat (Enhanced Thematic Mapper Plus / Operational Land Imager), широко используемых для решения задач природно-ресурсного мониторинга. Это требование становится особенно важным при построении временных рядов наблюдений физических процессов и явлений или для создания сплошных покрытий на основе базовых продуктов (например, NDVI — Normalized Difference Vegetation Index, SR — Simple Ratio, ARVI — Atmospherically Resistant Vegetation Index и др.), формируемых с использованием технологий Оператора российских космических систем ДЗЗ (Васильев и др., 2016; Марков и др., 2016).

В рамках настоящей работы исследуется вопрос сопоставимости базовых продуктов, формируемых по данным МСС КА типа «Канопус-В» и данным ETM+/OLI Landsat. Для этого выполнено численное моделирование соответствия величин эффективной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), регистрируемой в каналах МСС «Канопус-В»,

ETM+ Landsat-7 и OLI Landsat-8, с целью оценки допустимости сопоставления. Предложена технология оценки поправочных коэффициентов перехода между величинами СПЭЯ МСС/ETM+. Исследован вопрос стабильности поправочных коэффициентов с течением времени. Приведены результаты сопоставления базовых продуктов, формируемых по данным МСС КА «Канопус-В» № 1 и данным ETM+ Landsat-7.

Оценка соответствия эффективной СПЭЯ, регистрируемой МСС «Канопус-В», ETM+ Landsat-7 и OLI Landsat-8

В качестве критерия оценки соответствия эффективной СПЭЯ, регистрируемой оптико-электронными приборами, рассматривалось их отношение (критерий традиционно используется при кросс-калибровке сенсоров):

$$KLK = \frac{\int f_{LS}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda \cdot \int f_{KV}(\lambda) d\lambda}{\int f_{KV}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda \cdot \int f_{LS}(\lambda) d\lambda},$$

где $f_{LS}(\lambda), f_{KV}(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности (ФСЧ) сенсора Landsat и «Канопус-В» соответственно (рис. 1–2); $L(\lambda)$ — функция спектральной плотности энергетической яркости (наблюдаемого объекта) на верхней границе атмосферы.

Для оценки соответствия эффективной СПЭЯ было проведено моделирование (с использованием программного комплекса (ПК) MODTRAN – PcModWin5), включающее две группы экспериментов. В ходе первой группы экспериментов моделировалось соответствие эффективных СПЭЯ на верхней границе атмосферы для различных типов поверхностей библиотечных спектров ПК MODTRAN и различных типов атмосферы (лето, средние широты; зима, средние широты; лето, субарктические широты; зима, субарктические широты; тропическая; US Standard 1976), при этом предполагалось, что съёмка проводилась в надир, а зенитный угол Солнца — 30°. В ходе второй группы экспериментов дополнительно учитывались влияние времени года, состояние атмосферы и углы Солнца для различных типов поверхностей (библиотечных спектров ПК MODTRAN): «песок», «трава» и «хвойная растительность» (эти поверхности рассматривались в качестве типовых объектов наблюдения для территории РФ при решении мониторинговых задач состояния растительности).

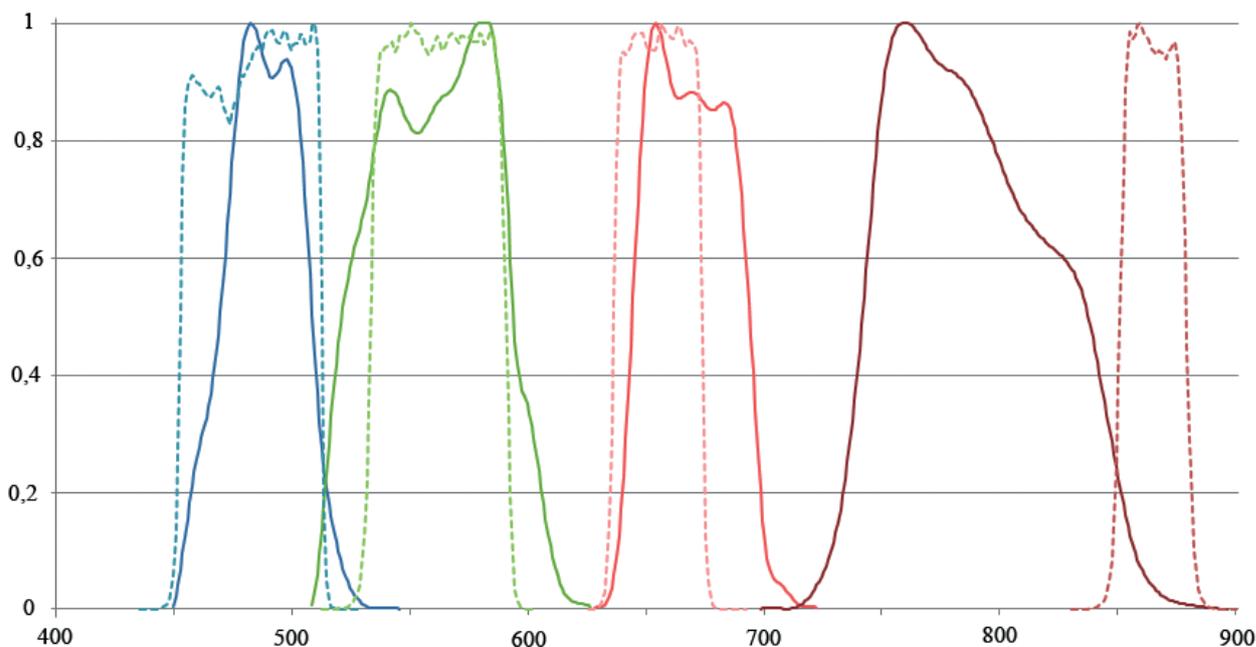


Рис. 1. ФСЧ спектральных каналов Blue, Green, Red, NIR (Near Infrared) МСС «Канопус-В» (сплошные линии) и OLI Landsat-8 (пунктирные линии)

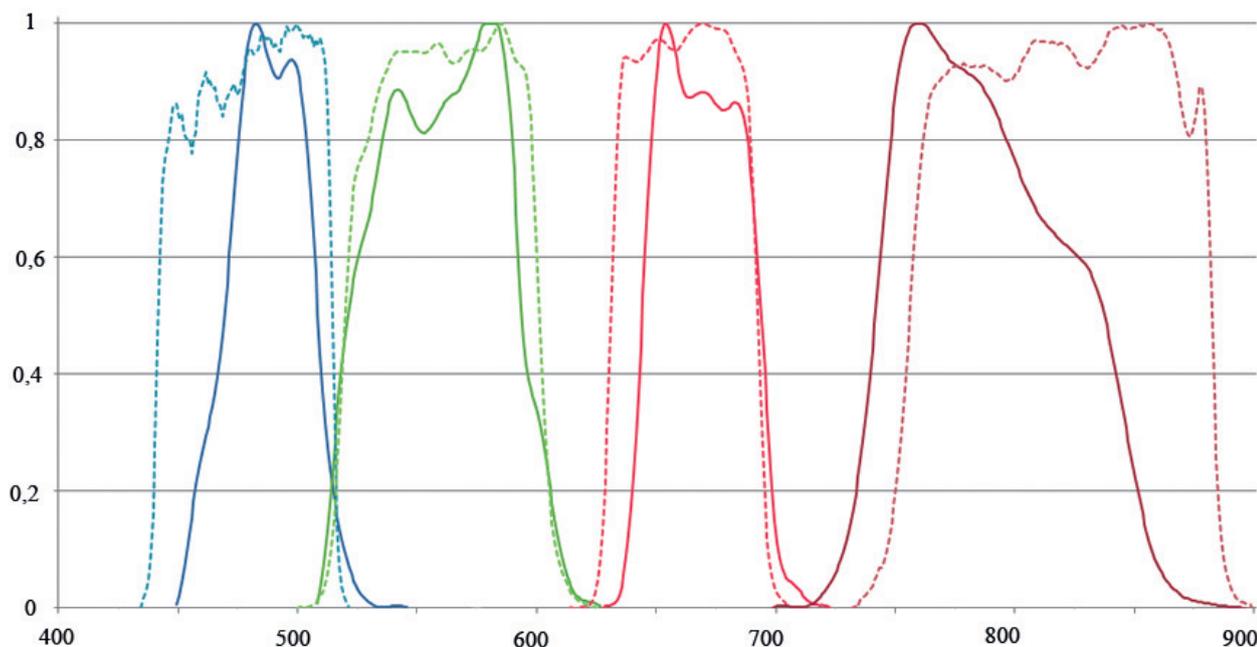


Рис. 2. ФСЧ спектральных каналов Blue, Green, Red, NIR МСС «Канопус-В» (сплошные линии) и ETM+ Landsat-7 (пунктирные линии)

Аэрозоли брались характерные для типов поверхностей. Общее содержание воды изменялось в диапазоне 0,2–2,5 г/см², параметры аэрозолей AOD — в промежутке 0,03–1,5, коэффициент Ангстрема — 0,5–2. Результаты моделирования приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3–5.

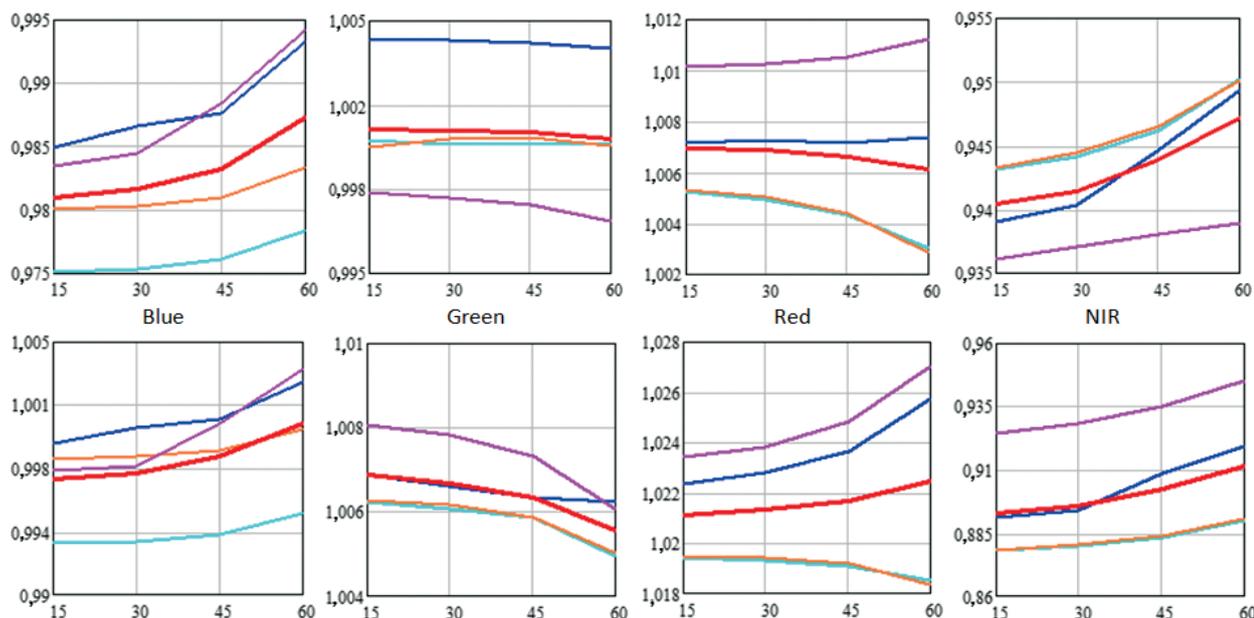


Рис. 3. Зависимость коэффициентов KLC (ось Y) от зенитного угла Солнца (ось X, град) и состояния атмосферы (зимой и летом) для поверхности типа «песок» библиотеки MODTRAN. Атмосферные условия и время года определяют цвет кривой: бирюзовый — «зима — ясно», синий — «зима — дымка», оранжевый — «лето — ясно», фиолетовый — «лето — дымка». Красный график — среднее значение, рассчитанное на основе результатов моделирования. Верхний ряд — МСС/ETM+; нижний ряд — МСС/OLI

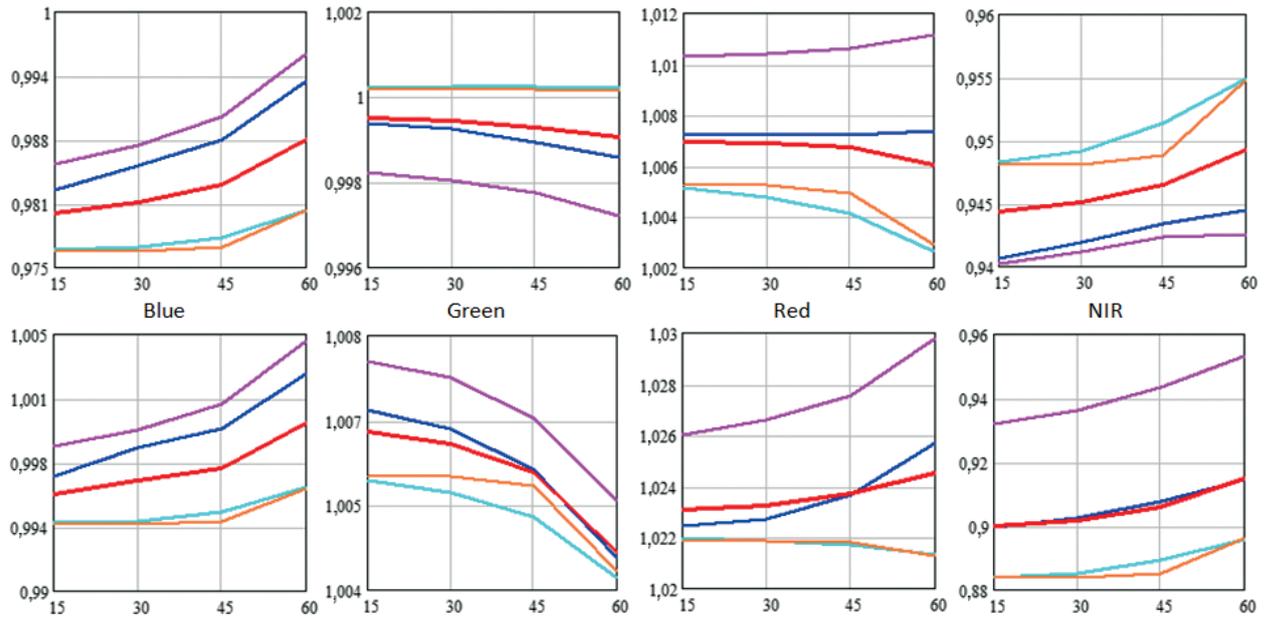


Рис. 4. Зависимость коэффициентов KLK (ось Y) от зенитного угла Солнца (ось X , град) и состояния атмосферы (зимой и летом) для поверхности типа «трава» библиотеки MODTRAN. Атмосферные условия и время года определяют цвет кривой: бирюзовый — «зима — ясно», синий — «зима — дымка», оранжевый — «лето — ясно», фиолетовый — «лето — дымка». Красный график — среднее значение, рассчитанное на основе результатов моделирования. Верхний ряд — МСС/ETM+; нижний ряд — МСС/OLI

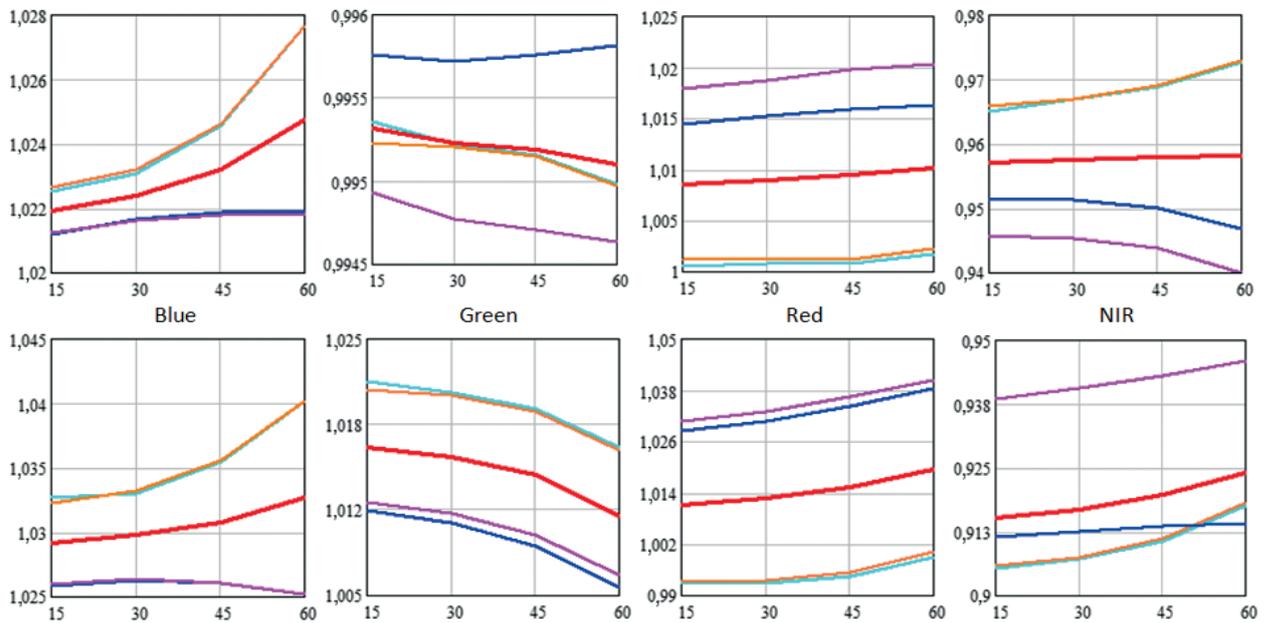


Рис. 5. Зависимость коэффициентов KLK (ось Y) от зенитного угла Солнца (ось X , град) и состояния атмосферы (зимой и летом) для поверхности типа «хвойная растительность» библиотеки MODTRAN. Атмосферные условия и время года определяют цвет кривой: бирюзовый — «зима — ясно», синий — «зима — дымка», оранжевый — «лето — ясно», фиолетовый — «лето — дымка». Красный график — среднее значение, рассчитанное на основе результатов моделирования. Верхний ряд — МСС/ETM+; нижний ряд — МСС/OLI

Таблица 1. Отношение эффективной СПЭЯ различных типов поверхностей для данных МСС/ETM+ и МСС/OLI (МО — среднее, СКО — среднеквадратическое отклонение)

Вид поверхности	ETM+				OLI			
	$\frac{MCC_B}{ETM_B}$	$\frac{MCC_G}{ETM_G}$	$\frac{MCC_R}{ETM_R}$	$\frac{MCC_N}{ETM_N}$	$\frac{MCC_B}{ETM_B}$	$\frac{MCC_G}{ETM_G}$	$\frac{MCC_R}{ETM_R}$	$\frac{MCC_N}{ETM_N}$
Лиственные	1,025	0,996	1,013	0,968	1,022	1,013	1,029	0,925
Хвойные	1,027	0,996	1,014	0,962	1,022	1,012	1,027	0,917
Луг	1,025	0,997	0,951	1,008	1,022	0,998	0,872	0,970
Снег (Антарктида)	0,999	0,998	1,017	0,860	1,009	1,002	1,042	0,756
Лёд	0,999	0,997	1,035	0,758	1,009	1,000	1,077	0,613
Океан	1,048	0,996	1,031	0,844	1,036	0,997	1,066	0,734
Гранит	1,012	0,997	1,019	0,912	1,015	1,001	1,045	0,843
Город	1,033	0,997	1,016	0,951	1,027	1,000	1,039	0,906
Супесь	0,994	1,131	1,004	0,942	1,003	0,824	1,017	0,889
Песок (Арабия)	0,993	1,003	1,003	0,959	1,003	1,002	1,014	0,921
МО	1,015	1,011	1,010	0,916	1,017	0,985	1,023	0,847
СКО	0,019	0,042	0,023	0,057	0,011	0,057	0,057	0,112

Анализ итогов моделирования позволяет заключить следующее:

- 1) по результатам первой группы экспериментов среднеквадратическое отклонение KLK не превышает 0,06 для каналов МСС/ETM+ против более 0,11 для каналов МСС/OLI;
- 2) по результатам второй группы экспериментов отклонение KLK (от среднего) не превышает 0,01 для каналов Blue, Green, Red вне зависимости от пары МСС/ETM+ или МСС/OLI, за исключением объекта типа «хвойная растительность», для которого в канале Red пара МСС/OLI демонстрирует отклонения KLK ~0,02;
- 3) по результатам второй группы экспериментов для канала NIR отклонение KLK МСС/OLI существенно выше и достигает 0,05–0,06 против 0,02–0,03 для пары МСС/ETM+.

Таким образом, полученные результаты моделирования демонстрируют соизмеримость величин эффективной СПЭЯ спектральных каналов видимого диапазона МСС и ETM+/OLI и значительные расхождения ближнего инфракрасного канала МСС и OLI. Поскольку NIR-канал является основным при формировании базовых продуктов в обеспечении мониторинга растительного покрова, в дальнейшем рассматривается сопоставление данных МСС и ETM+.

Технология оценки поправочных коэффициентов перехода между величинами эффективной СПЭЯ данных МСС/ETM+

Технология оценки поправочных коэффициентов перехода между величинами эффективной СПЭЯ, регистрируемой МСС «Канопус-В» и ETM+ Landsat-7, основывается на подходах к кросс-калибровке данных съёмочных систем ДЗЗ. В частности, на методике, приведённой в работе (Васильев и др., 2017а): выбор маршрутов съёмки (близких дат съёмки, углов визирования и Солнца); обработка данных МСС до уровня 1D CEOS; формирование выборки пикселей соответствующих регионов (предварительно нужно обеспечить приведение разрешения данных МСС к данным ETM+); оценка коэффициентов на основе уравнений линейной регрессии.

Примеры типовых маршрутов, используемых для оценки поправочных коэффициентов, приведены на *рис. 6* (см. с. 41).

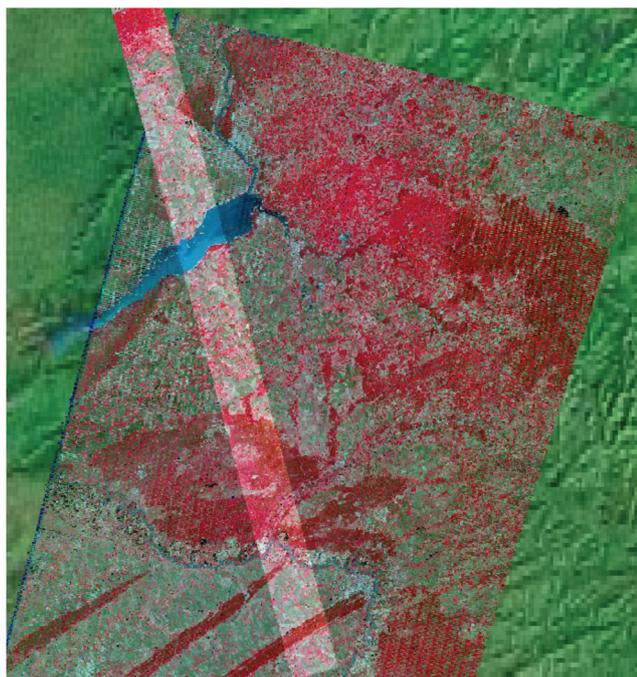


Рис. 6. Данные Landsat-7 (27.05.2016 UTC 02:29) и «Канопус-В» (27.05.2016 UTC 02:44), используемые для оценки поправочных коэффициентов; представление в псевдоцветах

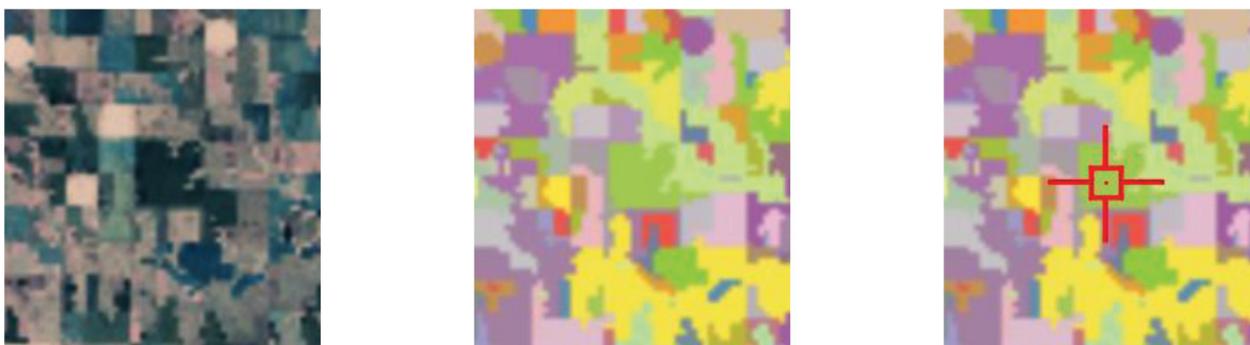


Рис. 7. Фрагмент изображения Landsat-7 (слева); фрагмент, сегментированный на основе метода иерархической кластеризации (минимизирующий внутриклассовую дисперсию) (в центре); скользящее окно, содержащееся внутри сегмента (справа)

Увеличение группировки КА типа «Канопус-В» обуславливает необходимость создания максимально автоматизированных (потенциально полностью автоматических) технологий оценки поправочных коэффициентов. Для этого требуется обеспечить построение выборки, равномерно распределённой в части величин отражательной способности наблюдаемых объектов (например, использование наблюдений для объектов типа «песок» при оценивании корректирующих коэффициентов для спектральных каналов видимого диапазона может приводить к смещённым оценкам при мониторинге объектов с более низким значением отражательной способности, в частности растительности). Кроме того, должна осуществляться фильтрация «выбросов» на данных МСС (в виду отсутствия маски качества), в том числе порождаемых наличием засветов, дымки и облачности.

Для построения выборки применялся следующий алгоритм (Васильев и др., 2017б): 1) фрагментация области перекрытия данных на блоки размером 100×100 пикселей; 2) сегментация фрагмента (рис. 7) на основе методов анализа данных (например, K-средних или иерархической кластеризации); 3) скользящим окном 9×9 пикселей обход сегментированного фрагмента и выбор значения (центральный пиксель окна) при условии, что сегмент

полностью включает окно и количество наблюдений одного сегмента меньше допустимого; 4) на основе параметров географической привязки выбор значения данных МСС. Этот приём позволяет автоматически сформировать выборку (по всей области перекрытия), условно равномерную в части величин отражательной способности наблюдаемых типов объектов сцены. В качестве опорного изображения предлагается использовать данные Landsat в виду маскированной дымки (для данных OLI) и облачности (для данных ETM+/OLI).

Для оценки параметров линейной регрессии применялся метод RANSAC (Fischler, Bolles, 1981), обеспечивающий в том числе фильтрацию «выбросов», лежащих вне допуска (был подобран экспериментально и составлял $\pm 3-6$ Вт/(м²·ср·мкм)), при этом объём отфильтрованных наблюдений не превышал 20 % (всего множества).

Результаты расчёта поправочных коэффициентов перехода между величинами эффективной СПЭЯ данных МСС КА «Канопус-В» № 1 (27.05.2016 UTC 02:44) и данных ETM+ Landsat-7 (27.05.2016 UTC 02:29) приведены в табл. 2 (см. с. 43). Примеры скаттерграмм, построенных по результатам расчёта, представлены на рис. 8. Синим, красным, зелёным и фиолетовым цветами отмечены наблюдения, используемые для оценки параметров; серым цветом — наблюдения, отфильтрованные по результатам оценки параметров.

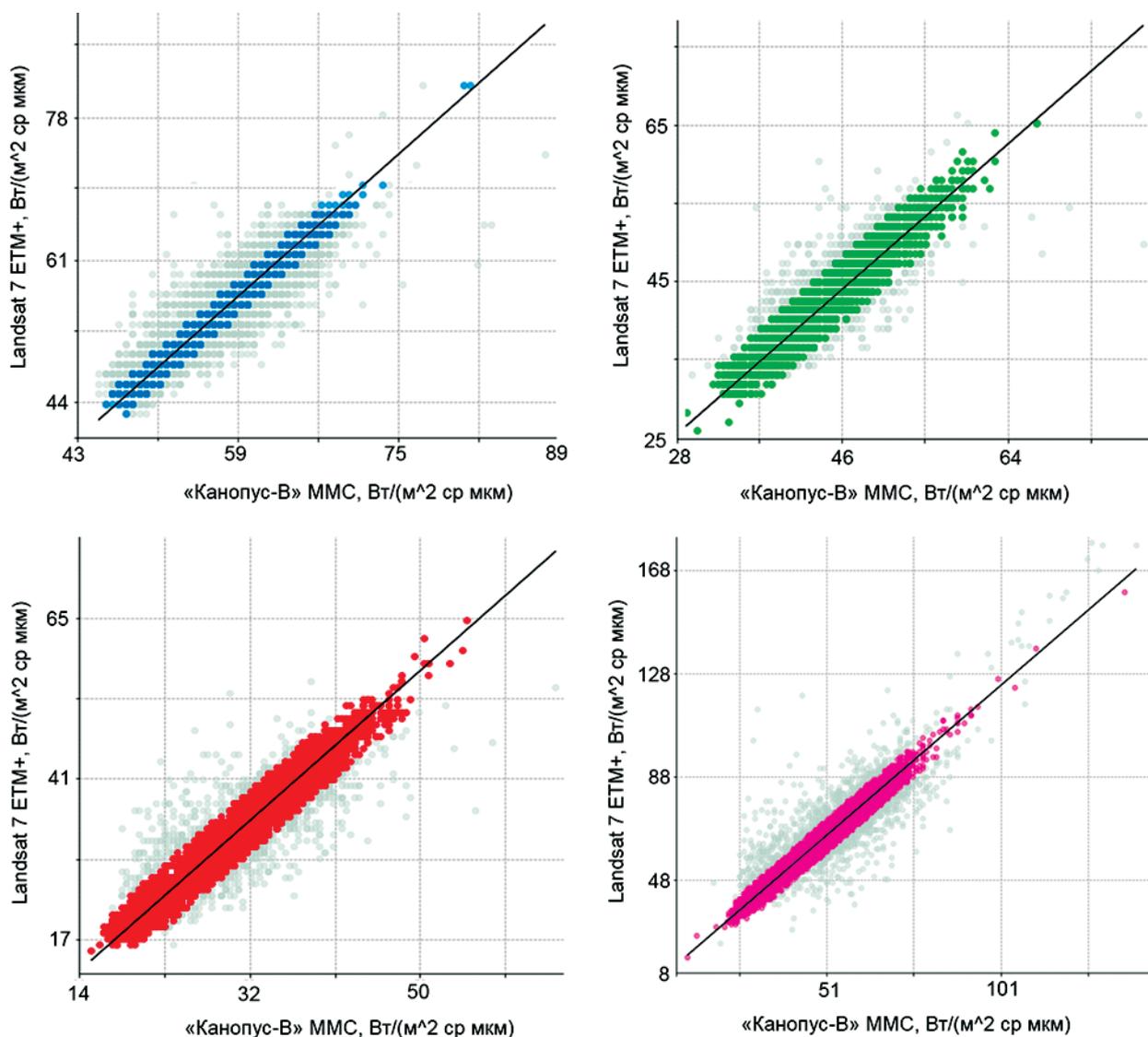


Рис. 8. Пример скаттерграммы параметров абсолютной калибровки спектральных каналов МСС (в порядке слева направо, сверху вниз): синий канал, зелёный канал, красный канал, ближний инфракрасный канал

Таблица 2. Поправочные коэффициенты перехода между величинами эффективной СПЭЯ, регистрируемой МСС «Канопус-В» и ETM+ Landsat-7

Спектральный канал	Мультипликативный параметр	Аддитивный параметр, Вт/(м ² ·ср·мкм)	СКО до/после оценки, Вт/(м ² ·ср·мкм)
Blue	0,98	-1,96	3,180/1,56
Green	1,04	-3,84	3,095/1,57
Red	1,20	-3,96	2,240/1,68
NIR	1,12	5,92	13,22/4,74

Динамика изменения поправочных коэффициентов между величинами эффективной СПЭЯ данных МСС/ETM+

С целью анализа стабильности поправочных коэффициентов (с течением времени) между величинами эффективной СПЭЯ данных МСС/ETM+ была проведена серия экспериментов по оценке этих коэффициентов за период май 2016 – октябрь 2017 г. На *рис. 9* (см. с. 44) приведены результаты экспериментов: рассчитанные поправочные коэффициенты (доверительный интервал не хуже $\pm 0,043$ для измерений множителя и $\pm 2,44$ Вт/(м²·ср·мкм) для сдвига; оценивался при уровне значимости 0,95), аппроксимированные линейные тренды и границы доверительных интервалов линейных трендов (уровень значимости 0,95). Полученные результаты демонстрируют стабильность поправочных коэффициентов (*табл. 3*): СКО мультипликативного параметра — в пределах 0,035–0,07, СКО аддитивного параметра — в пределах 2–3 Вт/(м²·ср·мкм). Вместе с тем ввиду слабой линейной зависимости (низкие значения R^2) величин поправочных коэффициентов от времени для сопоставления базовых продуктов МСС/ETM+ допустимо использовать их средние величины (см. *табл. 3*).

Таблица 3. Оценки измерений поправочных коэффициентов между величинами эффективной СПЭЯ данных МСС/ETM+ за период май 2016 – октябрь 2017 г.

	Мультипликативный параметр				Аддитивный параметр			
	Blue	Green	Red	NIR	Blue	Green	Red	NIR
СКО	0,062	0,037	0,065	0,056	2,890	2,340	2,690	2,950
Среднее	0,984	1,080	1,200	1,220	-2,240	-7,630	-7,040	1,180
СКО относительно линейных трендов	0,059	0,040	0,068	0,050	3,030	2,170	2,540	2,130
R^2	0,197	$2 \cdot 10^{-6}$	0,026	0,311	0,025	0,239	0,211	0,538

Сопоставление базовых продуктов МСС «Канопус-В» № 1 и ETM+ Landsat-7

На *рис. 10* (см. с. 45) приведены фрагменты сцен МСС и ETM+, используемых для формирования базовых продуктов. Эти данные не задействовались при исследовании динамики (см. *рис. 9*).

В *табл. 3* приведены результаты оценки рассогласования до и после применения поправочных коэффициентов. При этом критерий оценки рассогласования определяется следующим образом: $\varepsilon = \sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 / N}$, где x и \bar{x} — значения базового продукта, рассчитанные по данным МСС «Канопус-В» и ETM+ Landsat-7 соответственно, а N — размер выборки. Результаты применения одинаковой палитры к данным вычисления NDVI, построенного с использованием и без использования поправочных коэффициентов, представлены на *рис. 11* (см. с. 45).

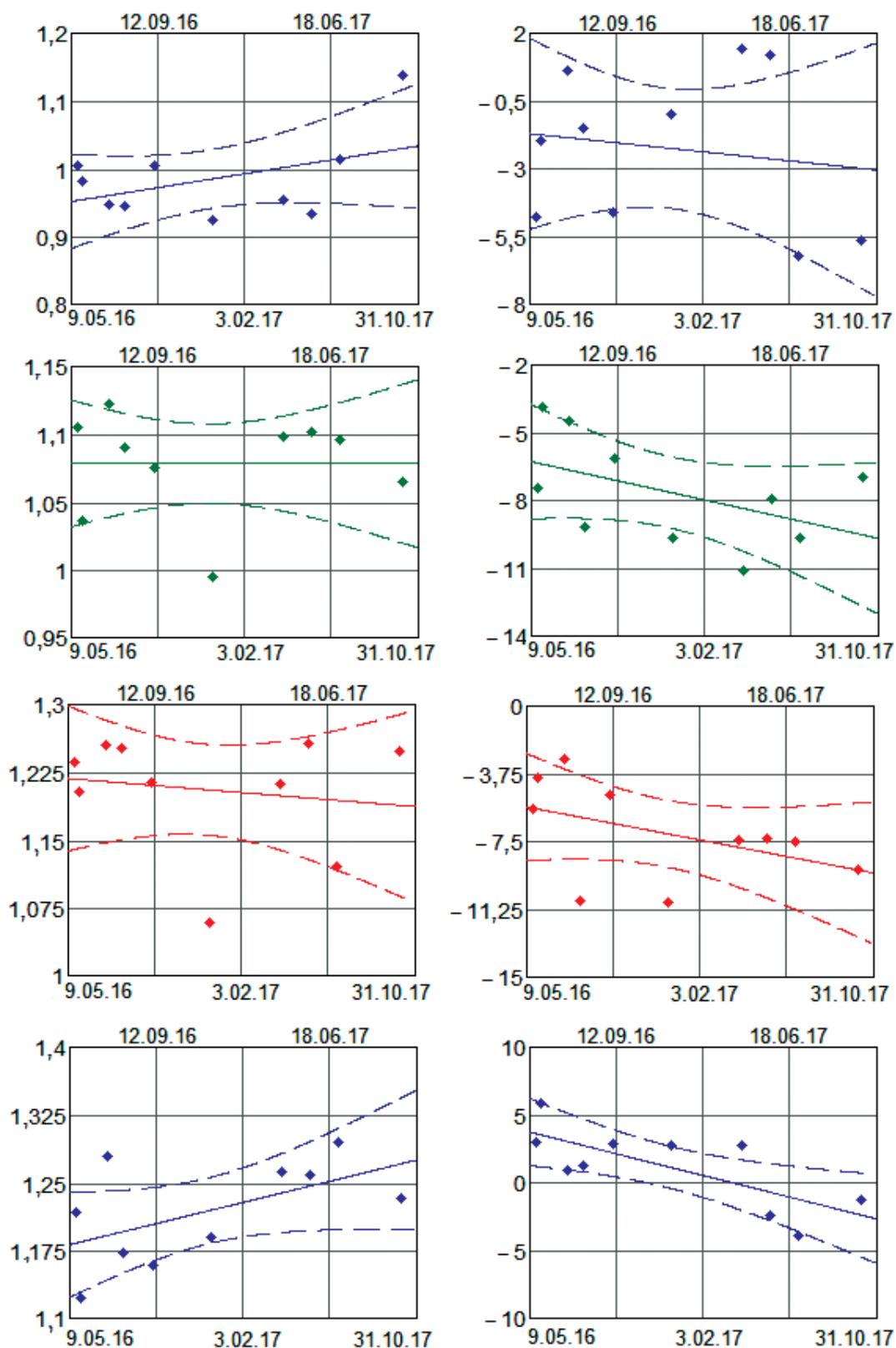


Рис. 9. Динамика изменения поправочных коэффициентов (левый столбец — мультипликативный, правый — аддитивный) за период май 2016 — октябрь 2017 г.: точки — рассчитанные поправочные коэффициенты; сплошные линии — линейные тренды; пунктирные линии — доверительный интервал (при уровне значимости 0,95). Спектральные каналы обозначены соответствующим цветом: Blue — синий, Green — зелёный, Red — красный, NIR — фиолетовый. Ось X — дата, ось Y — значение коэффициента (для мультипликативного — безразмерная величина, для аддитивного — размерность Вт/(м²·ср·мкм))

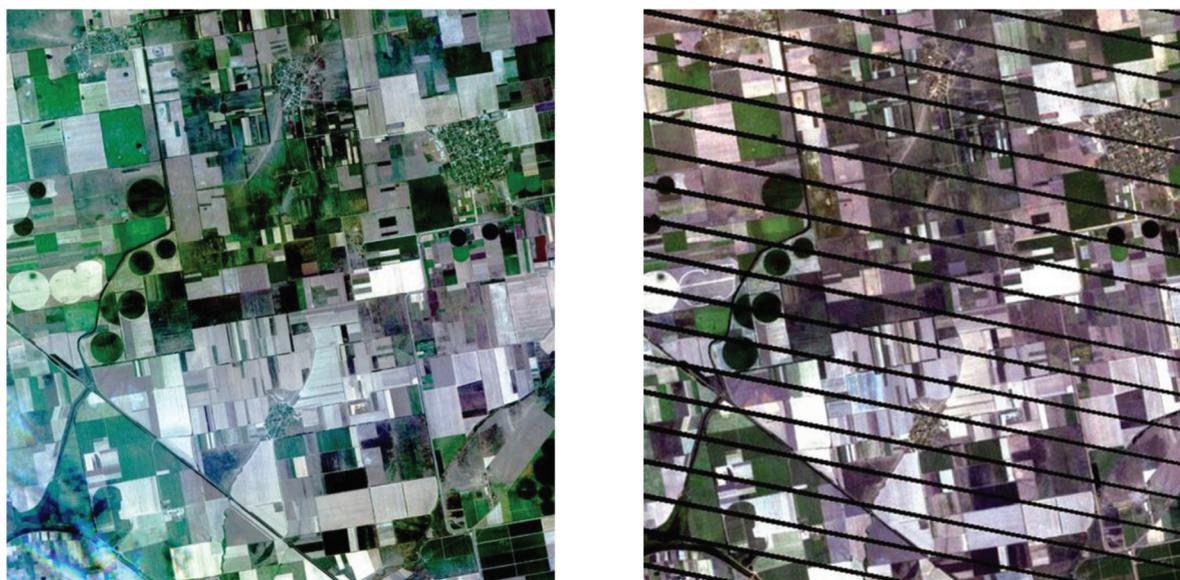


Рис. 10. Фрагменты сцен данных МСС «Канопус-В» № 1 (слева) от 18.07.2016 и данных ETM+ Landsat-7 (справа) от 16.07.2016, используемых для оценки точности формирования базовых продуктов

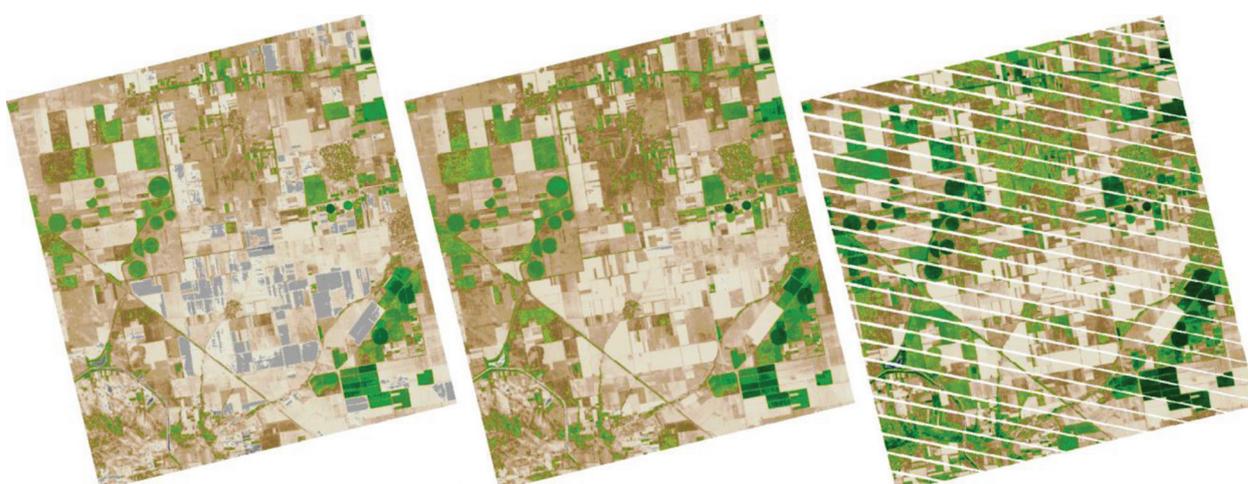


Рис. 11. Фрагменты сцен NDVI-данных МСС и ETM+, построенные с использованием одинаковой палитры: МСС без учёта поправочных коэффициентов (слева); МСС после учёта поправочных коэффициентов (в центре); ETM+ (справа)

Таблица 4. Оценка рассогласования базовых продуктов, рассчитанных с использованием и без использования поправочных коэффициентов МСС/ETM+

Вегетационный индекс	ε, поправочные коэффициенты не учитывались/учитывались
$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	0,114/0,075
$SR = \frac{NIR}{NIR}$	0,508/0,367
$EVI = 2,5 \frac{NIR - RED}{(NIR + 6RED - 7,5BLUE) + 1}$	0,065/0,039
$ARVI = \frac{NIR - 2RED - BLUE}{NIR + 2RED - BLUE}$	0,372/0,149

Заключение

На основе результатов моделирования соответствия эффективной СПЭЯ, фиксируемой МСС «Канопус-В» и Landsat OLI/ETM+ для различных типов поверхностей, состояния атмосферы, угла Солнца установлена соизмеримость величин эффективной СПЭЯ МСС «Канопус-В» и OLI/ETM+ Landsat (для OLI целесообразно использовать только данные видимого диапазона). Предложена методика оценки поправочных коэффициентов данных МСС и ETM+, обеспечивающая соизмеримость величин базовых продуктов. На основе этой методики проведена серия экспериментов за период май 2016 – октябрь 2017 г. по оценке стабильности коэффициентов с течением времени: СКО мультипликативного параметра в пределах 0,035–0,07, СКО аддитивного параметра в пределах 2–3 Вт/(м²·ср·мкм). Выполнен эксперимент сопоставления базовых продуктов МСС/ETM+, демонстрирующий уменьшение рассогласованности в 1,5–2,5 раза при учёте поправочных коэффициентов.

Литература

1. *Васильев А. И.* Калибровка съёмочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203–214.
2. *Васильев А. И., Ольшевский Н. А., Коршунов А. П.* Банк базовых продуктов межведомственного использования — геоинформационный сервис оператора КС ДЗЗ // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 2016. С. 419. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5633.
3. *Васильев А. И., Стремов А. С., Коваленко В. П.* (2017а) Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 36–51.
4. *Васильев А. И., Стремов А. С., Михеев А. А.* (2017б) Исследование динамики изменения параметров абсолютной калибровки КШМСА КА «Ресурс-П» // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 2017. С. 448. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6202.
5. *Кузнецов А. Е., Побаруев В. И., Пошехонов В. И., Пресняков О. А.* Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съёмочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287–300.
6. *Куревлева Т. Г., Рыбкин Е. С., Стремов А. С., Тихоньчев В. В.* Калибровка данных МСС/Канопус-В по данным Landsat-8 // 13-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 2015. С. 47 URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5469.
7. *Марков А. Н., Васильев А. И., Ольшевский Н. А., Коршунов А. П., Михаленков Р. А., Салимонов Б. Б., Стремов А. С.* Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 39–51.
8. *Силюк О. О., Катковский Л. В.* Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съёмочных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 261–270.
9. *Fischler M. A., Bolles R. C.* Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. V. 24. No. 6. P. 381–395.

Methodology of Kanopus-V MSS and Landsat ETM+ basic product comparison

A. I. Vasiliev, A. S. Stremov, V. P. Kovalenko, A. A. Mikheev

*Research Center for Earth Operative Monitoring
of Russian Space Systems JSC, Moscow 127490, Russia
E-mail: nova@ntsomz.ru*

The paper deals with the comparison of basic products derived from the Kanopus-V MSS and Landsat OLI/ETM+ data. To this end, first, the simulation of the Landsat OLI/ETM+ and Kanopus-V MSS radiance consistency was implemented using the MODTRAN software. The simulation results enabled the estimates to be obtained whereby the Kanopus-V MSS and Landsat-7 ETM+ data basic products may be compared. Secondly, the technology for estimating the correction transfer factors between the Kanopus-V MSS and Landsat-7 ETM+ data radiances was proposed. A series of experiments to estimate the correction factors was undertaken for the period May 2016 – October 2017. The results obtained allow us to evaluate the factor stability: the RMSE is within 0.035–0.07 and 2–3 W/(m²·sr·μm) for multiplicative and additive correction respectively. Thirdly, the results of the Kanopus-V MSS and Landsat-7 ETM+ data basic product comparison are given (for NDVI the discrepancy is about 0.075) and using the correction factors reduces the discrepancy by a factor of 1.5–2.5.

Keywords: Earth remote sensing, Kanopus-V spacecraft, basic product bank, MODTRAN, ETM+ Landsat-7, OLI Landsat-8

Accepted: 09.06.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48

References

1. Vasil'ev A. I., Kalibrovka s"emochnoi apparatury kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" v protsesse ego ekspluatatsii (Calibration of Kanopus-V satellite sensor during its operation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 203–214.
2. Vasil'ev A. I., Ol'shevskii N. A., Korshunov A. P., Bank bazovykh produktov mezhvedomstvennogo ispol'zovaniya — geoinformatsionnyi servis operatora KS DZZ (Basic product bank of interagency use — geoinformation service of remote sensing space systems operator), *XIV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XIV All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 419, URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5633.
3. Vasil'ev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Issledovanie dannykh kompleksa shirokozakhatnoi mul'ti-spektral'noi apparatury KA "Resurs-P" dlya resheniya spektrometricheskikh zadach (Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 36–51.
4. Vasil'ev A. I., Stremov A. S., Mikheev A. A., Issledovanie dinamiki izmeneniya parametrov absolyutnoi kalibrovki KShMSA KA "Resurs-P" (The study of dynamics change for absolute calibration parameters of KShMSA Resurs-P), *XV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XV All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 448, URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6202.
5. Kuznetsov A. E., Pobaruiev V. I., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., Programmnyi kompleks obrabotki informatsii ot skanerno-kadrovnykh s"emochnykh sistem KA "Kanopus-V" i "BKA" (A software system for information processing from scanner-frame imaging systems SC Kanopus-V and BKA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 287–300.
6. Kurevleva T. G., Rybkin E. S., Stremov A. S., Tikhonychev V. V., Kalibrovka dannykh MSS/Kanopus-V po dannym Landsat-8 (MSS/Kanopus-V data calibration on Landsat-8 data), *XIII Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XIII All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2015, p. 47, URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5469.

7. Markov A. N., Vasil'ev A. I., Ol'shevskii N. A., Korshunov A. P., Mikhailenkov R. A., Salimonov B. B., Stremov A. S., Arkhitektura geoinformatsionnogo servisa "Bank bazovykh produktov" (Architecture of the Basic Product Bank geoinformation service), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 39–51.
8. Silyuk O. O., Katkovskii L. V., Metodika i rezul'taty kross-kalibrovki izobrazhenii Belorusskogo kosmicheskogo apparata i drugikh s"emochnykh sistem (Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 261–270.
9. Fischler M. A., Bolles R. C., Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 1981, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395.