

# Гармонизация данных гиперспектрального и мультиспектрального сенсоров, ориентированная на вычисление вегетационных индексов<sup>1</sup>

А.Л.Нурмухаметов\*, Д.С.Сидорчук\*, Р.В.Скиданов\*\*,\*\*\*

\* *Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия*

\*\* *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Самара, Россия*

\*\*\* *Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия*

Поступила в редколлегию 12.12.2023

**Аннотация**—Гиперспектральный анализ это мощный инструмент в арсенале точного сельского хозяйства, который становится все более доступным. Растет объем гиперспектральных изображений, снятых вблизи поверхности земли. Эти данные важно использовать согласованно с данными традиционного мультиспектрального мониторинга. В работе исследуется задача гармонизации данных гиперспектральной съемки, сделанной у поверхности земли, и данных спутникового мультиспектрального мониторинга. Задача гармонизации, сама по себе неразрешимая в общем случае, в данном случае дополнительно затруднена разнородностью рассматриваемых данных. В связи с этим рассматривается упрощенная постановка задачи гармонизации, ориентированная на вычисление вегетационных индексов. Разработан новый метод гармонизации, не требующий для настройки параметров ни попиксельного сопоставления, ни калибровочных мишеней. В экспериментальной части работы показано, что предложенный метод позволяет существенно компенсировать искажения индексов NDVI и WBI, наблюдаемые при отсутствии гармонизации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гиперспектральные изображения, вегетационный индекс, NDVI, точное земледелие, спектральная гармонизация, Sentinel-2A.

DOI: 10.53921/18195822\_2023\_23\_4\_589

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование гиперспектральных (ГС) данных позволяет расширить возможности точного сельского хозяйства. В ряде работ, посвященных определению стресса растений [1, 2] и измерению содержания хлорофилла в них [3], распознаванию типов земного покрова [4], а также извлечению биохимических переменных, таких как азот и лигнин [5, 6], использование гиперспектральных данных позволило повысить точность относительно показателей, полученных на основе мультиспектральных (МС) данных.

В данной работе мы ориентируемся на прикладную задачу расчета вегетационных индексов. Гиперспектральные данные могут использоваться как для расчета специальных ГС индексов, так и для расчета традиционных МС индексов, таких как Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). В строгой постановке расчет индексов требует предварительного решения задачи радиометрической калибровки, которая заключается в переводе зарегистрированного сенсором сигнала в спектральное распределение коэффициента отражения наблюдаемой поверхности.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда (проект № 20-61-47089).

Для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) характерно высокое качество сенсоров, небольшое их разнообразие, а также относительно стабильные условия освещения, что облегчает радиометрическую калибровку. Однако дистанционное зондирование имеет ряд ограничений. Так, при съемке с большой высоты требуется атмосферная коррекция [7]. Другой существенной проблемой является плотная облачность, ограничивающая регулярность дистанционного мониторинга, что особенно актуально для климата центральной России. Атмосферные эффекты и облачность не представляют проблем для наземных исследований либо мониторинга с использованием низколетящих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако БПЛА обычно снабжены сенсорами массового производства характеристики которых обладают меньшей стабильностью по сравнению с датчиками, используемыми для ДЗЗ. Кроме того, съемка с БПЛА производится в изменяющихся условиях (освещение, температура). Все это может требовать частой перекалибровки сенсора.

Традиционный подход к решению задачи радиометрической калибровки – это использование калибровочных панелей с известными спектральными характеристиками [8]. В этом случае калибровочное преобразование сводится к поканальному делению отклика гиперспектрального сенсора на значения отклика, соответствующие поверхности панели [9]. Бюджетный вариант исполнения таких панелей – это цветочные мишени [10], используемые для калибровки обычных RGB камер. Как будет показано далее на примере калибровочной панели X-Rite [11] калибровка с помощью цветочных мишеней может быть малоэффективной, что в свою очередь может приводить к ошибкам при вычислении вегетационных индексов.

В данной работе исследуется альтернативный подход к вычислению вегетационных индексов. Вместо осуществляемого в рамках радиометрической калибровки перехода к сенсор-независимым величинам (коэффициентам отражения) предлагается исследовать задачу перехода к откликам некоторого референсного сенсора. Эта задача известна как задача гармонизации [12]. Поскольку одному и тому же многоканальному отклику одного сенсора может соответствовать существенно различные отклики другого, задача гармонизации является неразрешимой в общем случае. Поэтому в точном земледелии целесообразно вместо задачи оценки по откликам исходного сенсора откликов целевого рассматривать задачу оценки значений того или иного вегетационного индекса, вычисляемого на основе откликов целевого сенсора по соответствующим данным исходного. Задача спектральной гармонизации с акцентом на вычислении вегетационных индексов уже исследовалась для мультиспектральных сенсоров [13, 14, 15]. В данной работе исследуется гармонизация данных наземного ГС мониторинга и данных дистанционного МС мониторинга, который обладает меньшей регулярностью, однако большей точностью и стабильностью измерений.

Для получения реальных согласованных данных двух сенсоров необходимо решать задачу совмещения двух изображений [16, 17, 18]. Ввиду разнородности гармонизируемых данных их попиксельное сопоставление крайне затруднено. Мы предлагаем метод расчета поправочных коэффициентов для каждого ГС канала, не требующий точного попиксельного выравнивания обучающих наборов данных, достаточно лишь разметить границы областей, соответствующих одному и тому же участку поверхности. Преобразование откликов исходного сенсора определяется так, чтобы выровнять средние значения распределений вегетационных индексов, рассчитанных по исходному и целевому сенсорам. Как будет показано, предложенный метод, настроенный на данных одной сельхоз культуры, позволяет существенно сократить смещение среднего значения NDVI на данных другой культуры. Также показано что улучшаются значения гиперспектрального индекса Water Band Index (WBI) [19].

## 2. ДАННЫЕ

В качестве ГС изображений использовались изображения, полученные целевым гиперспектрометром, построенным по схеме Оффнера [20,21] с сенсором CMV4000 в качестве светочувствительного элемента. Характеристики сенсора представлены в таблице 1. Съемка осуществлялась с использованием поворотного штатива методом сканирования. Съемка проводилась 8 июля 2021 года в Самарской области, Приволжский район, Приволжье, поля КФХ Цирулева Е.П. (широта 52.81, долгота 48.61). Главными объектами съемки являлись широко распространенные вегетационные культуры: овес и кукуруза. Описываемые данные были собраны в рамках исследования задачи классификации растительности [22]. Помимо самих ГС изображений авторы работы [22] также предоставили попиксельную разметку культур. На рис. 1 приведена RGB визуализация полученных ГС данных.

Сенсор	Спектральное разрешение, нм	Количество каналов	Диапазон, нм
Multispectral Instrument (Sentinel-2A)	15-175	13	443-2190
Гиперспектрометр (CMV4000, схема Оффнера)	до 5	250	420-1000

Таблица 1. Основные характеристики рассматриваемых сенсоров.

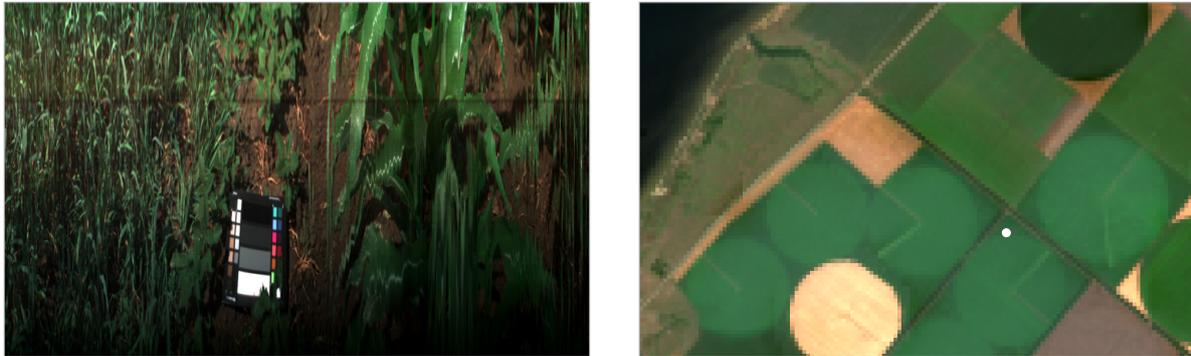
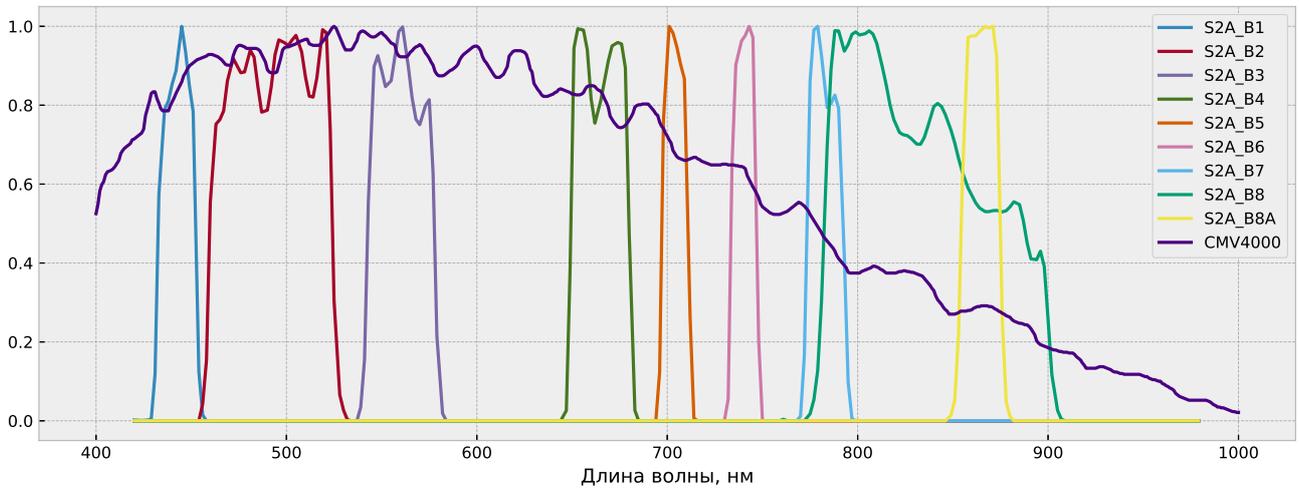


Рис. 1. Гармонизируемые данные. Слева приведена RGB визуализация использованных в данной работе гиперспектральных данных. Справа – RGB визуализация спутникового снимка Sentinel-2A, охватывающая место гиперспектральной съемки (отмечено белой точкой).

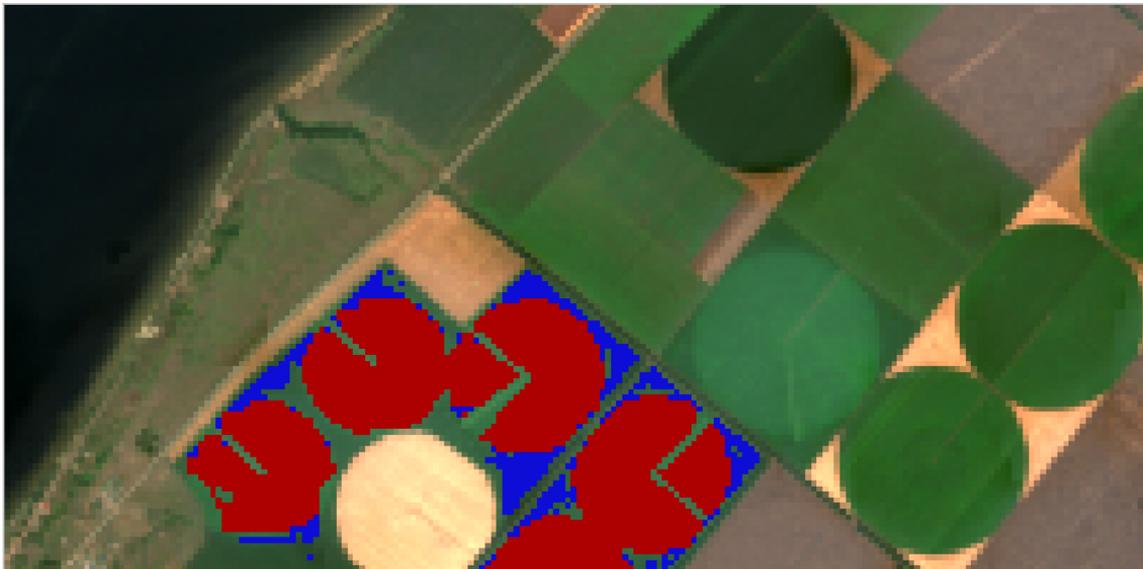
В качестве референсных МС данных были использованы снимки с известного спутника Sentinel2-A, сделанные 10 июля 2021 года (см. рис. 1). Белой точкой на снимке отмечено место ГС съемки. Характеристики установленного на этот спутник сенсора Multispectral Instrument представлены в таблице 1. На рис. 2 также представлены его спектральные функции чувствительности для каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, которые далее будут использованы в задаче гармонизации.

## 3. МЕТОД

В данном разделе описывается метод гармонизации гиперспектральных и мультиспектральных данных, ориентированный на вычисление вегетационного индекса NDVI. Предлагаемый метод не требует точного попиксельного выравнивания обучающих наборов данных. Метод состоит из двух этапов. На первом поправочные коэффициенты оцениваются на основе двух множеств: множества откликов ГС сенсора  $H$  и множества откликов референсного МС сенсора  $M$ , соответствующих одному и тому же участку поверхности. Мощность множеств  $H$  и  $M$



**Рис. 2.** Спектральная функция чувствительности сенсора гиперспектральной камеры на основе схемы Оффнера (CMV4000 [23]) и функции чувствительности каналов Sentinel-2A [24].



**Рис. 3.** Визуализация результатов кластеризации выделенной области на спутниковом снимке Sentinel-2A. Синий и красный цвета соответствуют овсу и кукурузе.

может различаться. На втором этапе поправочные коэффициенты применяются поканально к откликам гармонизируемого гиперспектрального сенсора.

Этап оценки поправочных коэффициентов состоит из следующих шагов:

1. Вычислить значения индекса NDVI для каждого МС отклика  $m \in M$ .

$$N_m = \frac{m_{NIR} - m_{RED}}{m_{NIR} + m_{RED}},$$

где  $m_{NIR}$  и  $m_{RED}$  значения отклика  $m$  в ближнем инфракрасном ( $NIR$ ) и красном ( $RED$ ) диапазонах соответственно.

2. Вычислить множество значений индекса NDVI для каждого ГС отклика  $h \in H$ . Чтобы вычислить мультиспектральный индекс NDVI по гиперспектральному отклику сгенерируем искусственный МС отклик  $s$  на основе  $h$  и функций чувствительности каналов целевого МС сенсора:

$$s_i = \frac{\int_{\lambda} F(\lambda) \rho_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \rho_i(\lambda) d\lambda},$$

где  $F(\lambda)$  – спектр освещенности сенсора, в качестве которого мы будем использовать ГС отклик  $h$ ,  $\rho_i$  – спектральные чувствительности МС сенсора,  $i \in [1, \dots, n]$ ,  $n$  – количество каналов спутникового сенсора. В случае Sentinel-2A мы использовали  $n = 9$  (см. рис.2). Вычислим множество значений NDVI по следующей формуле

$$N_h = \frac{s_{NIR} - s_{RED}}{s_{NIR} + s_{RED}},$$

где  $s_{NIR}$  и  $s_{RED}$  значения отклика  $s$  в ближнем инфракрасном ( $NIR$ ) и красном ( $RED$ ) диапазонах соответственно.

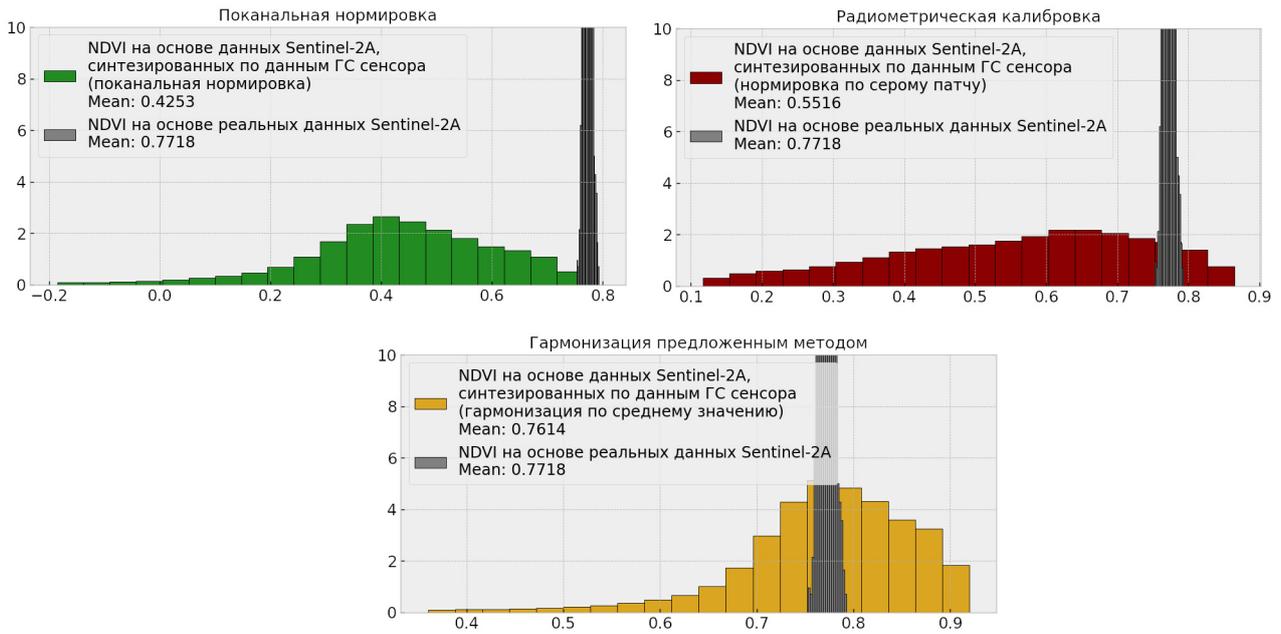
3. Вычислить отклик МС сенсора  $\bar{m}$ , соответствующий среднему значению индексов  $\bar{N}_m = \frac{1}{|M|} \sum_{m \in M} N_m$ . Для этого выделим подмножество откликов  $\hat{M}$ , значения индексов которых находится вблизи среднего:  $\hat{M} = \{\hat{m} : ||N_{\hat{m}} - \bar{N}_m|| < \varepsilon\}$ . Тогда  $\bar{m} = \frac{1}{|\hat{M}|} \sum_{m \in \hat{M}} N_m$ .
4. Вычислить отклик  $\bar{s}$ , соответствующий среднему значению  $N_h$  аналогично предыдущему пункту.
5. Произвести расчет опорных коэффициентов  $k_{\lambda_{c_i}} = \frac{\bar{m}_i}{\bar{s}_i}$ , где  $\lambda_{c_i}$  – центральная длина волны  $i$ -го канала МС сенсора.
6. Рассчитать коэффициенты  $k(\lambda_j)$  для остальных длин волн путем линейной интерполяции опорных коэффициентов  $k_{\lambda_{c_i}}$ .

Второй этап предлагаемого метода сводится к поканальному умножению ГС отклика  $h_j$  на набор поправочных коэффициентов:  $h_j^{form} = h_j k(\lambda_j)$ .

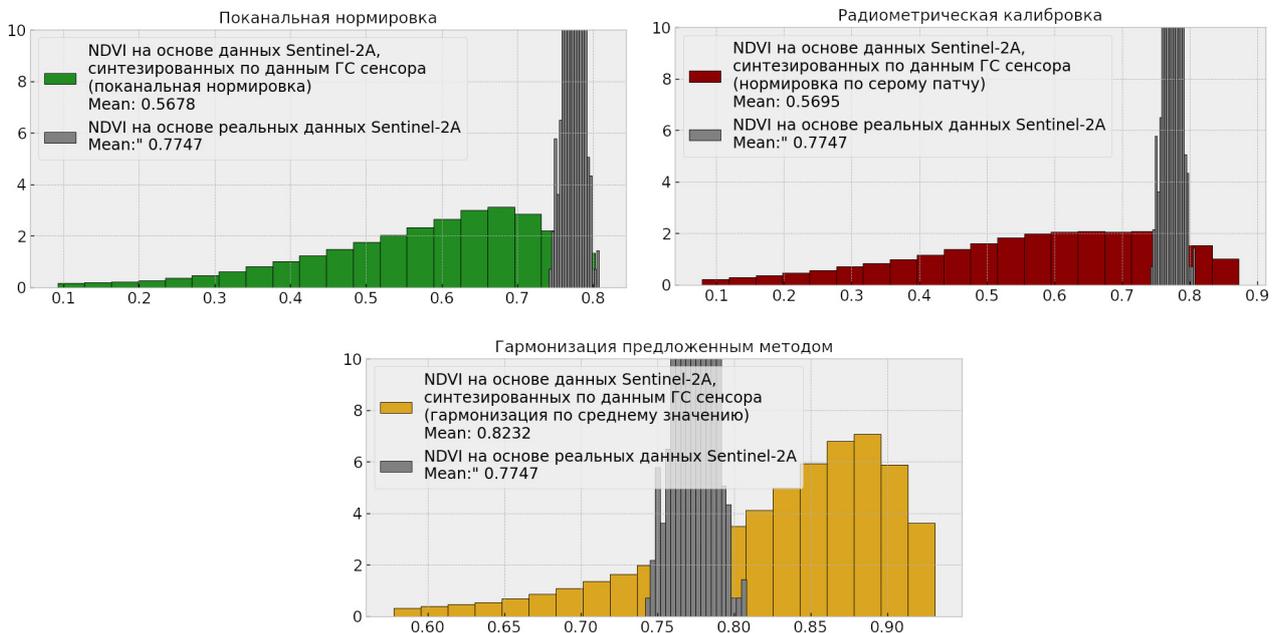
#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе описывается три эксперимента, целью которых является сравнение предложенного метода гармонизации, метода радиометрической калибровки на основе серого фрагмента цветовой мишени X-Rite, а также простой обработки с использованием поканальной нормировки на максимальное значение.

Для проведения этих экспериментов на основе данных, описанных в разделе 2, были подготовлены набор для настройки параметров, а также тестовый набор. Данные ГС съемки содержат разметку двух видов культур: овес и кукуруза. Для выделения соответствующих областей



**Рис. 4.** Распределения значений NDVI на размеченных данных кукурузы для трех методов: поканальная нормировка на максимум, радиометрическая калибровка и обработка предложенным методом.



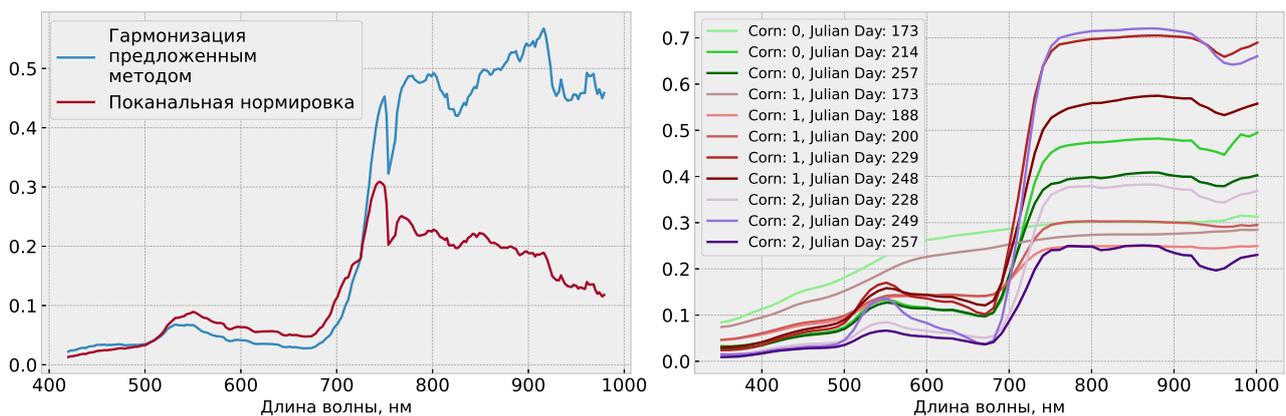
**Рис. 5.** Распределения значений NDVI на размеченных данных овса для трех методов: поканальная нормировка на максимум, радиометрическая калибровка и обработка предложенным методом.

на спутниковых данных был использован метод спектральной кластеризации [25]. Результаты кластеризации представлены на рис. 3. На основе дополнительной информации с места съемки ГС данных области, помеченные на рис. 3 красным цветом, были отнесены к кукурузе, а помеченные синим цветом – к овсу. Области, соответствующие кукурузе, использованы для получения поправочных коэффициентов. Области, соответствующие овсу, использованы в качестве тестового набора.

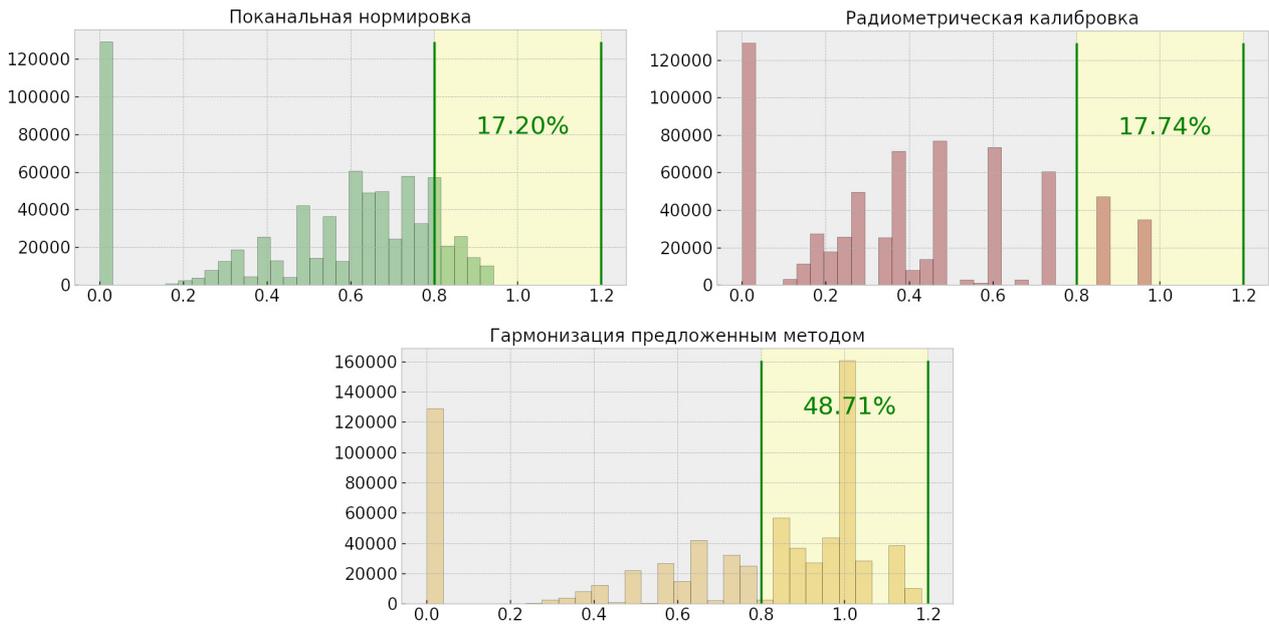
В рамках первого эксперимента проведено сравнение распределений индекса NDVI, рассчитанного с использованием исследуемых методов. Результаты представлены на рис. 4 и рис. 5. Большая разница в разбросе МС и ГС данных объясняется разницей в пространственном разрешении при дистанционной спутниковой съемке и при съемке вблизи поверхности. На тестовом наборе данных предложенный метод позволяет сократить смещение среднего значения NDVI на 76% (рис. 5) относительно нормировки на максимальное значение. Эффект от применения метода радиометрической калибровки значительно слабее.

В рамках второго эксперимента проведено качественное сравнение откликов ГС сенсора со спектральными распределениями коэффициента отражения кукурузы на различных вегетационных стадиях, полученными с использованием спектрорадиометра, в рамках проекта GHISA [26]. Как можно видеть на рис. 6 обработка с использованием поканального максимума дает сильный спад в диапазоне 800-1000нм относительно данных GHISA. ГС отклики после гармонизации с МС данными лучше соответствуют устойчивым особенностям референсных кривых: небольшой подъем на отрезке 500-600нм, резкий рост значений отражений после 700нм без последующего снижения, небольшой спад после 900нм.

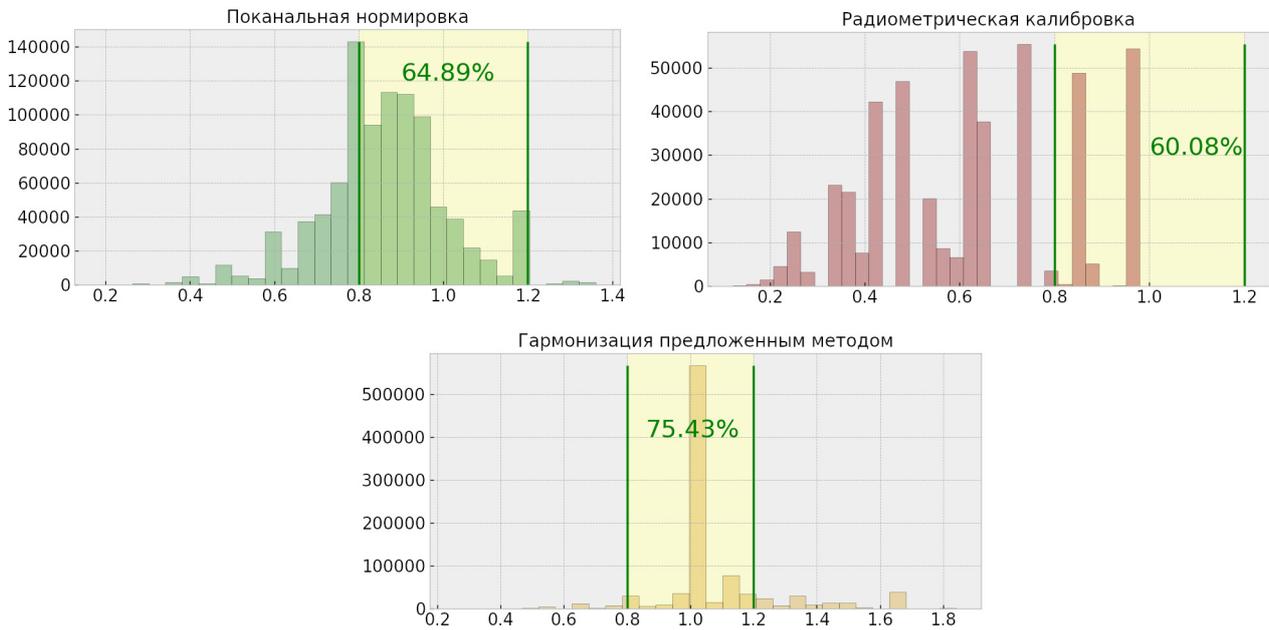
В рамках третьего эксперимента проведена оценка эффекта, который оказывает предложенный метод на распределение гиперспектрального индекса WBI ( $WBI = \frac{\rho_{970}}{\rho_{900}}$  [19]). Для этого индекса известен диапазон, в который должны попадать значения, соответствующие зеленой растительности: [0.8, 1.2] [27]. Следовательно в нашем случае значения как для кукурузы, так и для овса должны полностью попадать в указанный диапазон. Результаты представлены на рис. 7 и рис. 8. Для данных кукурузы распределение гиперспектрального индекса WBI, в отсутствие гармонизации находящееся на 82% вне допустимого диапазона значений, после гармонизации предложенным методом попадает в нужный диапазон уже на 48%. На данных овса 36% значений находились вне диапазона допустимых значений. Предложенный метод гармонизации позволяет улучшить этот показатель на 11% процентов (рис. 8).



**Рис. 6.** Сравнение ГС откликов с данными GHISA [26]. Слева изображены обработки ГС откликов, усредненных на размеченных данных кукурузы, двумя методами: поканальная нормировка и предложенный в данной работе метод. Справа – спектральное распределение коэффициента отражения кукурузы в различные вегетационные периоды (GHISA [26])



**Рис. 7.** Распределения значений WBI [19] на размеченных данных кукурузы для трех случаев: поканальная нормировка на максимум, радиометрическая калибровка и обработка предложенным методом. Желтым фоном отмечен диапазон допустимых значений ([0.8, 1.2]) [27].



**Рис. 8.** Распределения значений WBI [19] на размеченных данных овса для трех случаев: поканальная нормировка на максимум, радиометрическая калибровка и обработка предложенным методом. Желтым фоном отмечен диапазон допустимых значений ([0.8, 1.2]) [27].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена задача гармонизации данных гиперспектрального и мультиспектрального сенсоров, ориентированная на вычисление вегетационных индексов. Был предложен новый метод гармонизации, основанный на применении поправочных коэффициентов для каждого ГС канала. Достоинством предложенного метода является отсутствие требования попиксельного сопоставления гармонизируемых данных, что значительно облегчает его использование. Достаточно лишь примерно указать области, соответствующие одному и тому же участку поверхности на ГС и МС изображениях. Также для гармонизации предложенным методом не требуется калибровочная мишень.

Для оценки качества предложенного метода были проведены эксперименты с использованием спутниковых МС данных Sentinel-2A, а также данных съемки ГС сенсором, сделанной со штатива вблизи поверхности земли. Было показано, что предлагаемый метод превосходит результаты метода радиометрической калибровки по цветовой мишени X-Rite и позволяет сократить смещение среднего значения индекса NDVI на 76%. Помимо этого предложенный метод, будучи настроенным с использованием мультиспектрального индекса NDVI, позволяет улучшить результаты расчета гиперспектрального индекса WBI. Для кукурузы в отсутствие гармонизации распределение значений этого индекса находится на 82% вне допустимого диапазона, тогда как после гармонизации предложенным методом попадает в нужный диапазон уже на 48%. Для овса с помощью предложенного метода долю значений, попадающих в диапазон, удалось увеличить с 65% до 75%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carter G. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15, 1994, pp. 697-703.
2. Hamzeh S., Naseri A., AlaviPanah S., Mojaradi B., Bartholomeus H., Clevers J., Behzad M. Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, vol. 21, pp. 282-290.
3. Blackburn G., Steele C. Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies. *Remote Sensing of Environment*, 1999, vol. 70, pp. 278 – 292.
4. Janetos A., Justice C. Land cover and global productivity: A measurement strategy for the NASA programme. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, vol. 21, no. 6, pp. 1491 – 1512.
5. Curran P. Imaging spectrometry. *Progress in Physical Geography*, 1994, vol. 18, no. 2, pp. 247 – 266.
6. Hansen P., Schjoerring J. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 86, no. 4, 2003, pp. 542-553.
7. Belov A. M., Myasnikov V. V. Atmospheric correction of hyperspectral images based on approximate solution of transmittance equation. *Seventh international conference on machine vision (ICMV 2014)*, 2015, vol. 9445, pp. 150-154.
8. Peddle D.R., White H.P., Soffer R.J., Miller J.R., LeDrew E.F. Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. *Computers and Geosciences*, 2001, vol. 27, no. 2, 2001, pp. 203-213.
9. Miura T., Huete A. Performance of Three Reflectance Calibration Methods for Airborne Hyperspectral Spectrometer Data. *Sensors*, 2009, vol.9, no. 2, pp. 794-813.
10. Milton E.J. On the suitability of Kodak neutral test cards as reflectance standards. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, vol. 10, pp. 1041-1047
11. X-RiteColorChecker. Source: <<https://www.xrite.com/categories/calibration-profiling/colorchecker-video>>.

12. Нурмухаметов А.Л., Сидорчук Д.С., Коноваленко И.А., Никоноров А.В., Грачева М.А. Спектральная гармонизация данных БПЛА и данных спутниковой съемки для нужд точного земледелия. *Информационные процессы*, 2022, том. 22, №4, стр. 336-346.
13. Fan X., Liu Y. A comparison of NDVI intercalibration methods. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, no. 19, pp. 5273-5290.
14. D'Odorico P., Gonsamo A., Damm A., Schaepman M.E. Experimental evaluation of Sentinel-2 spectral response functions for NDVI time-series continuity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 1336-1348.
15. Taniguchi L., Obata K., Yoshioka H. Investigation of inter-sensor NDVI relationships based on analytical representation of soil isolines. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012, pp. 4891-4894.
16. Shabanov A, Gladilin S.A., Shvets E.A. Optical-to-SAR image registration using a combination of CNN descriptors and cross-correlation coefficient. *Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019)*. Amsterdam: SPIE, vol. 11433.
17. Тепляков Л.М., Кунина И.А., Гладков А.П. Визуальная локализация аэрофотоснимков на векторной карте с использованием цвето-текстурной сегментации. *Сенсорные системы*, 2018, том 32, №1, стр. 26-34.
18. Волков В.В., Швец Е.А. Набор данных и метод для оценки алгоритмов сопоставления оптических и радиолокационных изображений на основе устойчивых точек. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2021, № 2, стр. 44-57.
19. Penuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L., Savé R. The Reflectance at the 950-970 Nm Region as an Indicator of Plant Water Status. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, vol. 14, no. 14, pp. 1887-1905.
20. Podlipnov V., Shchedrin V., Babichev A., Vasilyev S., Blank V. Experimental determination of soil moisture on hyperspectral images. *Computer Optics*, 2018; vol. 42, no. 5, pp. 877-884.
21. Karpeev S, Khonina S, Murdagulov A, Petrov M. Alignment and study of prototypes of the Offner Hyperspectrometer. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 197-206.
22. Firsov N.A., Podlipnov V.V., Ivliev N.A., Nikolaev P.P., Mashkov S.V., Ishkin P.A., Skidanov R.V., Nikonorov A.V. Neural network-aided classification of hyperspectral vegetation images with a training sample generated using an adaptive vegetation index. *Computer Optics*, 2021, vol. 45., no. 6, pp. 887-896.
23. CMV4000-3E5M1PP. Source: <<https://www.npk-photonica.ru/product/7242/>>.
24. Sentinel2A. Source: <[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)>.
25. Yu and Shi. Multiclass spectral clustering. *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, 2003, vol. 1, pp. 313-319.
26. Global Hyperspectral Imaging Spectral-library of Agricultural-Crops and Vegetation (GHISA). Source: <<https://www.usgs.gov/media/files/ghisa-central-asia-eo-1-hyperion-dataset>>
27. Skye EGuides, Theory into practice №3. Vegetation Indices.

## Harmonization of hyperspectral and multispectral data for vegetation index calculation

A.L. Nurmukhametov, D.S. Sidorchuk, R.V. Skidanov

Hyperspectral analysis is a powerful tool in the precision agriculture arsenal that is becoming increasingly accessible. The volume of hyperspectral images acquired near the Earth's surface is growing every year. And it is important to consistently use this data among conventional multispectral monitoring data. In this

work problem of harmonization hyperspectral survey data obtained at the surface of the Earth and satellite multispectral monitoring data is investigated. The problem of spectral harmonization, which in itself generally is insoluble, is further complicated in this case by the heterogeneity of the considered data. In this regard, a simplified formulation of the harmonization problem is considered, aimed at calculating vegetation indices. Novel method has been developed that is does not require pixelwise matching or calibration panels. The experimental part of the work shows that the proposed method could significantly compensate for shifts of the NDVI and WBI indices, observed in the absence of harmonization.

**KEYWORDS:** hyperspectral images, vegetation index, NDVI, precision agriculture, spectral harmonization, Sentinel-2A.