РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СПЕКТРОМЕТРИРОВАНИЮ ОБРАЗЦОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОТОКАМЕР

Л.Д. Немцева¹, В.Ю. Шматко¹, П.С. Пляка¹, Н.В. Решетняк²

¹Южный научный центр Российской академии наук

²Гидрохимический институт

l.nemseva@gmail.com, antijus@gmail.com, pavstef@mail.ru,

nvr-phys@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментов по спектрометрированию образцов растительности и почв с помощью спектрометров Avantes S41 (LaserLS), Hamamatsu C10083CAN и цифровых фотокамер Sony NEX и Canon A495, модифицированных в мультиспектральные двухканальные камеры. Цель данного исследования состоит в разработке алгоритма, позволяющего получать достоверные спектральные характеристики (на примере индексных изображений NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) с помощью мультиспектральных камер. Рассмотрено два метода получения спектральных данных для последующего расчета по ним значений вегетационного индекса NDVI: двухкадровый и однокадровый метод съемки. Двухкадровый метод предполагает съемку одной мультиспектральной камерой в двух каналах отдельными кадрами в монохромном режиме, первый кадр снимается в ближнем инфракрасном диапазоне, а второй в диапазоне видимого света. В результате съемок мы получали две фотографии, одна снятая в инфракрасном спектре (NIR), другая в красном (RED). Однокадровый метод предполагает съемку с одним фильтром (красным или оранжевым) одной мультиспектральной камерой одним кадром. Т.е. данные инфракрасного и видимого спектра находятся в разных цветовых каналах одного и того же изображения, синий цветовой канал фотоаппарата принимает излучение NIR, а красный цветовой канал – RED. Съемка производится с одним фильтром (красным и оранжевым). По полученным данным рассчитываются индексные изображения NDVI. Проведена кросс-калибровка данных, измеренных мультиспектральными камерами и спектрометрами Avantes S41 (LaserLS) и Hamamatsu C10083CAN. Анализ полученных результатов позволяет говорить о перспективности методов полевого спектрометрирования растительности и почв с помощью модернизированных камер.

Ключевые слова: мультиспектральная камера, спектрометрирование растительности и почв, вегетационный индекс.

В апреле 2019 года на территории парковой зоны Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН) начали проводиться эксперименты по разработке алгоритма полевого спектрометрирования растительности и почв с помощью цифровых фотокамер, модифицированных в мультиспектральные камеры.

Полевое спектрометрирование является одним из наиболее востребованных методов в дистанционном зондировании и имеет широкое практическое применение, особенно в сфере точного земледелия. Измерения осуществляются с помощью портативного спектрометра. В нашем случае применение цифровых мультиспектральных фотокамер для целей полевого спектрометрирования было вызвано отсутствием профессиональной дорогостоящей полевой аппаратуры, а также необходимостью разработки дешевых приборов для получения спектральных характеристик объектов исследования. В связи с этим, сотрудниками ЮНЦ РАН было модифицировано несколько моделей цифровых камер в мультиспектральные аппараты, измеряющие в различных диапазонах видимого и инфракрасного

спектра в зависимости от применяемых при съемке спектральных фильтров [1].

Цель данного исследования состоит в разработке алгоритма, позволяющего получать достоверные спектральные характеристики (на примере индексных изображений NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) с помощью мультиспектральных фотокамер. Точный расчет вегетационных индексов очень важен, т.к. знания о влиянии биофизических характеристик растительности на ее спектрально-отражательные свойства позволяют использовать индексные изображения для картографирования участков сельскохозяйственных полей, находящихся в угнетенном состоянии, и мониторинга роста растительности на протяжении вегетационного периода.

В связи с тем, что разработка данного метода полевого спектрометрирования находится на начальном этапе исследований, нами были поставлены следующие задачи:

1. Провести кросс-калибровку между данными, полученными с модифицированных фотокамер и специализированными спектрометрами.

2. Разработать алгоритм полевой съемки модифицированными цифровыми фотокамерами.
3. Доказать целесообразность и практичность применения модифицированных цифровых фотокамер камер для изучения спектральных характеристик растительности.

Материалы и методы. В ходе работы было использовано оборудование: спектрометры Hamamatsu C10083CAN (спектральный диапазон 280–1100 нм) и Avantes S41 (LaserLS) (спектральный диапазон 388,59–808,91 нм) [2], мультиспектральные модифицированные фотокамеры Canon PowerShot A495, Sony Alpha NEX-C3 с объективом Sony 18–55 mm f/3.5–5.6 E OSS (SEL-1855). Модификация цифровых фотокамер заключалась в удалении установленных в них фильтров «Hot Mirror», пропускающих только видимый свет. В фотокамерах A495 установили красный пленочный фильтр Rosco #19 и оранжевый стеклянный фильтр OC-12. Из фотокамеры Sony NEX-C3 также извлекли «Hot Mirror», фильтры устанавливались на объектив.

Съемка мультиспектральными камерами проводилась через фильтры: стеклянный инфракрасный фильтр (760 нм), полосовой фильтр IR CUT (пропускает только видимый свет 460–680 нм), пленочный красный фильтр Rosco «Fire» # 19 (630 нм), оранжевый стеклянный фильтр OC-12 (550 нм), акриловый красный фильтр (620 нм). Цифровые фотографии на модифицированные камеры были получены в виде изображения с расширением JPG в 24-битном формате с цветовым пространством sRGB.

Обработка данных с цифровых фотокамер осуществлялась с помощью программного обеспечения ENVI и Adobe Photoshop. Образцами для измерений послужили листья липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos*), почва и декоративная травянистая растительность в парковой зоне ЮНЦ РАН.

При разработке алгоритмов полевой съемки мультиспектральными цифровыми фотокамерами применялся метод вегетационного индекса NDVI. В ходе работы было протестировано 2 алгоритма получения спектральных данных для последующего расчета по ним значений вегетационного индекса NDVI:

1. Двухкадровый метод предполагает съемку одной мультиспектральной камерой в двух цветовых каналах отдельными кадрами. Первый кадр снимается в ближнем инфракрасном диапазоне (с использованием инфракрасного фильтра 760 нм), а второй – в диапазоне видимого света (с использованием фильтров: полосовой IR CUT и красный фильтр). Положительная сторона двухкадрового метода состоит в том, что данные в каждом спектральном канале измеряются отдельно, таким обра-

зом – инфракрасное излучение не «загрязняет» канал с красным и наоборот. Измерения объекта должны быть сделаны синхронно, под одним и тем же углом, а также изображения должны быть точно совмещены перед расчетом NDVI. Чтобы свести к минимуму погрешности при проведении экспериментов мы использовали штатив с камерой, на которую поочередно устанавливались необходимые фильтры и проводились съемки. Отрицательная сторона данного метода в том, что, несмотря на короткий промежуток времени между съемками образца изменяется освещение, под действием ветра сдвигаются растения, из-за чего изображения на снимках не совпадают относительно друг друга.

Мультиспектральное фотографирование велось в монохромном режиме. В результате съемок мы получали две фотографии, одна снятая в инфракрасном спектре (NIR), другая в красном (RED). Указанные изображения содержат достаточно информации для расчета NDVI, для получения значений которого необходимо два канала: NIR и RED.

2. Однокадровый метод предполагает съемку одной мультиспектральной камерой в двух каналах одним кадром. Метод основан на том, что данные инфракрасного и видимого спектра могут быть получены в разных цветовых каналах одного и того же изображения. Съемка производилась с одним фильтром (красным или оранжевым). Таким образом, синий цветовой канал фотоаппарата принимал инфракрасное излучение (NIR), а красный канал – красное (RED). Главным недостатком данного метода является то, что излучение, поступающее в фотоаппарат, не разделяется по спектральным каналам. Иначе говоря, канал принимающий излучение RED, смешивается с NIR, т.к. в него поступает свет в диапазоне от 630 нм до предела возможности матрицы фотоаппарата (примерно до 1100 нм). Преимущество данного метода заключается в том, что при нем не требуется синхронизация съемки и несовпадения изображений в разных каналах невозможно.

Результаты и обсуждения. На первом этапе работы с помощью спектрометра Hamamatsu C10083CAN были измерены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) света, проходящего через фильтры, используемых в полевых экспериментах в модернизированных фотокамерах. Однако нижний диапазон длины волны был обрезан до 400 нм т.к. лабораторный источник света (галогеновая лампа) не дает возможности измерить излучение на меньших длинах волн.

В результате модернизации фотокамер нам удалось получать снимки со спектральными диапазонами каналов, указанными в таблице 1.

Таблица 1. Ширина каналов с разными фильтрами

Камера, фильтры	Красный канал, нм	Ближний ИК, нм
Canon A495 / Sony NEX, красный фильтр	620/630–1100	700–1100
Canon A495 / Sony NEX, оранжевый фильтр OC-12	550–1100	700–1100
Sony NEX, ИК фильтр	–	760–1100
Sony NEX, красный фильтр+IR CUT	620–700	–
Sony NEX, оранжевый фильтр OC-12+IR CUT	550–700	–

С помощью мультиспектральных камер были проведены эксперименты по спектрометрированию двумя методами съемки. В ходе которых нами были получены данные в виде цифровых фотографий. При создании цветных композитов из монохромных фотографий, снятых в инфракрасном и красном (и оранжевом) каналах зеленая растительность отображалась в бирюзовых оттенках.

Чтобы доказать достоверность данных, полученных с мультиспектральных камер, проводилась их кросс-калибровка с результатами измерений спектрометрами Avantes S41 (LaserLS) и Hamamatsu C10083CAN, которые были приняты нами как эталонные. Цель кросс-калибровка состояла в сравнении значений регистрируемых спектральных яркостей и NDVI одного и того же образца (растительности, почвы и т.д.) мультиспектральными фотокамерами и профессиональными лабораторными спектрометрами. Измерение одних и тех же образцов велось поочередно, двухканальными камерами и спектрометрами.

Спектрометром Avantes S41 (LaserLS) и мультиспектральными камерами Canon A495 и Sony NEX нами были произведены измерения спектральных характеристик объектов растительности в парковой зоне ЮНЦ РАН 6 мая 2019 года. Объектами измерений в данном случае послужили: лист липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos*), листья петунии (*Petunia hybrida*), ландыша (*Convallaria majalis*). По данным измеренным в спектральных диапазонах 600–700 нм (канал RED) и 700–800 нм (канал NIR) спектрометром Avantes S41 (LaserLS) были рассчитаны значения КСЯ. Далее по ним были получены NDVI спектрометрированных растений.

Экспериментальная съемка двухканальными камерами была выполнена во всех режимах экспозиции кадра технически доступных для данного оборудования. В результате эксперимента нами было установлено, что чем ярче снимок (выше значение экспозиции), тем ниже значения индекса NDVI. Данную зависимость можно продемонстрировать с помощью графика изменения NDVI при смене экспозиции кадра от -2 до +2 на рисунке 1. Значения NDVI рассчитанные по данным с экспозицией 0 были признаны как наиболее достоверные.

Съемка мультиспектральными камерами Canon A495 и Sony NEX проводилась однокадровым методом с применением красного фильтра (620 нм/630 нм). В ходе работы было выявлено несоответствие цветовой гаммы фотографий, снятых в каналах RED и NIR мультиспектральными камерами Sony NEX и Canon 495A, что в свою очередь влияло на различия рассчитываемых по ним значениям NDVI. Для серии снимков, полученных с помощью мультиспектральной фотокамеры Sony NEX, была сделана цветовая калибровка (или баланс белого через программу Adobe Photoshop) по примеру данных, снятых камерой Canon A495. Так как Canon A495 имеет возможность автоматически правильно калибровать баланс белого, то для нее коррекция не проводилась. Индексные изображения NDVI рассчитывались нами по фотографиям с Sony NEX без коррекции баланса белого и с коррекцией баланса белого.

Рис. 1. Изменения NDVI в зависимости от экспозиции кадра (А) лист липы, (Б) почва. (С коррекцией баланса белого*, без коррекции баланса белого**)

Следующий эксперимент с кросс-калибровкой был проведен 21 мая 2019 года. Съемку спектрометром Avantes S41 (LaserLS) и мультиспектральными

фотокамерами провели при разных условиях освещенности (в тени и на солнце) при режимах экспозиции от -2 до 0. Результаты кросс-калибровки можно проиллюстрировать с помощью графиков, представленных на рисунке 2.

Рис. 2. Изменения NDVI в зависимости от экспозиции кадра (А) лист ландыша, (Б) лист липы, (В) почва. (Без коррекции баланса белого*, с коррекцией баланса белого**)

В ходе экспериментов со съемкой мультиспектральными камерами было выявлено, что значения NDVI колеблются в зависимости от условий освещения (солнце или тень) объектов еще в большей степени, чем от режима экспозиции кадра, установленного на камере. В первую очередь это относится к NDVI растительности, в меньшей степени оказывает влияние на значения NDVI почвы. Как видно на рисунке 2, на NDVI почвы экспозиция кадра практически не влияет, в отличие от солнечной освещенности на местности. Значения NDVI полученные по данным мультиспектральной камеры Canon A495 в тени очень близки к NDVI спектрометра Avantes S41 (LaserLS).

В целом, наилучшие результаты, наиболее близкие к данным спектрометра Avantes S41 (LaserLS), были получены с мультиспектральной камеры Canon A495 с красным фильтром Rosco #19, снятые в тени. Тем не менее, даже при этой методике съемки мультиспектральной камерой, значения NDVI занижены, по сравнению с NDVI, рассчитанного по данным спектрометра Avantes S41 (LaserLS). Это связано с недостатками однокадровой методики, описанной выше.

26 июня 2019 года в парковой зоне ЮНЦ РАН были проведены эксперименты по получению спектральных характеристик объектов с помощью модифицированных фотокамер с применением имеющихся фильтров и спектрометра Hamamatsu C10083CAN, ширина спектрального диапазона которого больше соответствует диапазону фотокамер, чем у спектрометра Avantes S41 (LaserLS). Объектами измерений послужили: лист липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos*), листья петунии (*Petunia hybrida*), хризантемы (*Chrysanthemum*) и белый лист бумаги. По данным, измеренным в спектральных диапазонах 600–700 нм (канал RED) и 700–800 нм (канал NIR) спектрометром Hamamatsu C10083CAN, были рассчитаны значения NDVI. Ниже представлены результаты расчета NDVI по данным спектрометра Hamamatsu C10083CAN, мультиспектральных камер Canon A495 и Sony NEX (табл. 2). При сравнении NDVI, полученных с помощью мультиспектральных камер, с NDVI спектрометра Hamamatsu C10083CAN мы получили неоднозначные результаты. Двухкадровым методом с помощью камер Canon A495 и Sony NEX (пункты 2 и 4 в таблице 2, соответственно) были получены наиболее близкие индексные значения к NDVI листа липы по данным спектрометра Hamamatsu C10083CAN. Однако, при использовании того же оборудования и метода съемки значения NDVI листьев хризантемы и петунии получились сильно заниженные по сравнению с данными Hamamatsu C10083CAN. При съемке мультиспектральной камерой Sony NEX, значения NDVI, указанные в 3 пункте таблицы 2, напротив завышены, однако прослеживается тенденция по увеличению и уменьшению NDVI листьев растений в соответствии с NDVI тех же листьев по данным Hamamatsu C10083CAN.

Однокадровым методом съемки мультиспектральными камерами Canon A495 и Sony NEX нами были получены значения NDVI наименее похожие на данные спектрометра Hamamatsu C10083CAN. Значения NDVI по данным мультиспектральных камер значительно занижены по сравнению с данными спектрометра, кроме того, в большинстве случаев между ними и данными Hamamatsu C10083CAN не прослеживается никакой взаимосвязи.

Исключениями могут считаться результаты, представленные в пунктах 5 и 7 таблицы 2, полученные с помощью мультиспектральных камер Canon A495 и Sony NEX с оранжевым фильтром OC-12 (550

нм), где, несмотря на сильно заниженные значения по сравнению с NDVI спектрометра Hamamatsu, прослеживаются общие тенденции увеличения и уменьшения значений NDVI.

Таблица 2. Сравнение значений NDVI полученных мультиспектральными камерами и спектрометром Hamamatsu C10083CAN

№	Оборудование	Лист липы NDVI	Лист хризантемы NDVI	Лист петунии NDVI
1.	Hamamatsu C10083CAN	0,56	0,52	0,29
Двухкадровый метод съемки				
2.	Canon A495 с фильтрами: красным Rosco #19 (630 нм), IR CUT, NIR (760 нм)	0,52	0,20	0,16
3.	Sony NEX с фильтрами: красный (620 нм), IR CUT, NIR (760 нм)	0,79	0,60	0,47
4.	Sony NEX с фильтрами: IR CUT, NIR (760 нм)	0,58	0,24	0,06
Метод однокадровый				
5.	Canon A495 с оранжевым OC-12 фильтром (550 нм)	0,33	0,31	0,21
6.	Canon A495 с красным фильтром Rosco #19 (630 нм)	0,22	0,22	0,22
7.	Sony NEX с оранжевым фильтром OC-12 (550 нм).*	0,42	0,4	0,38
8.	Sony NEX с красным фильтром: (620 нм).*	0,25	0,25	0,23
9.	Sony NEX с оранжевым фильтром OC-12 (550нм).**	0,29	0,37	0,37
10.	Sony NEX с красным фильтром (620 нм).**	0,16	0,24	0,18

Выводы. В ходе проведенных экспериментов по полевому спектрометрированию растительности и почв с помощью модернизированных мультиспектральных камер Canon A495 и Sony NEX апробированы 2 метода съемки: двухкадровый и однокадровый. Проведена кросс-калибровка данных (на примере индекс NDVI), полученных мультиспектральными камерами и спектрометрами Hamamatsu C10083CAN и Avantes S41 (LaserLS). Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- результаты съемки наиболее близкие к данным спектрометра можно получить, используя однокадровый метод с помощью мультиспектральной камеры Canon A495 с красным фильтром Rosco «Fire» # 19 (630 нм)/оранжевым (550 нм), но только в условиях тени;
- двухкадровый метод с применением мультиспектральных камер Sony NEX и Canon A495 с фильтром IR CUT, инфракрасным (760 нм) и красными (620 нм/630 нм) фильтрами показал наилучшие результаты при кросс-калибровке с данными Hamamatsu C10083CAN.

Сопоставление данных измерений профессиональными спектрометрами и модернизированными

мультиспектральными фотокамерами образцов растительности и почв позволяет говорить о перспективности исследования состояния растительного покрова с использованием методов полевого спектрометрирования с помощью модернизированных камер.

Методика съемки мультиспектральными фотокамерами требует усовершенствования, будут продолжены исследования, в ходе которых планируется проводить повторные эксперименты на различных объектах растительности и почв. В перспективе, после усовершенствования методики мультиспектрального фотографирования с помощью модифицированных фотокамер, возможно, их применение для съемки сельскохозяйственных угодий с беспилотного летательного аппарата.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188, ПФИ Президиума РАН №20 «Новые вызовы климатической системы Земли» Подпрограмма «Обеспечение устойчивого развития Юга России в условиях климатических, экологических и техногенных вызовов, № госрегистрации АААА-А18-118011990300-9.

Литература

1. Немцева Л.Д., Голубева Е.И. Данные дистанционного зондирования и наземного спектрометрирования в исследовании состояния растительности степей в условиях выпаса // Проблемы региональной экологии. 2018. №4. С. 123–127.
2. Сухоруков Б.Л., Решетняк Н.В., Сапрыгин В.В., Бердников С.В. Состояние экосистемы Таганрогского залива и устьевой области Дона по данным дистанционной спектрометрической съемки 2017 г // НАУКА ЮГА РОССИИ. -2017 -Т. 13. № 4. С. 71–82.

RESULTS OF THE EXPERIMENT ON SPECTROMETRY OF VEGETATION AND SOILS BY USING MODIFIED CAMERAS

L.D. Nemtseva¹, V.Yu. Shmatko¹, P.S. Plyaka¹, N.V. Reshetnyak²

¹Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences

²Hydrochemical Institute

l.nemtseva@gmail.com, antijus@gmail.com, pavstef@mail.ru,
nvr-phys@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of experiments on spectrometry of vegetation and soil samples using Avantes S41 (LaserLS), Hamamatsu C10083CAH spectrometers and Sony NEX and Canon A495 digital cameras modified into multispectral two-channel cameras. The purpose of this study is to develop a method that allows you to obtain objective spectral data (for example, NDVI index images – Normalized Difference Vegetation Index) using multispectral cameras. We have developed two methods for obtaining spectral data for the subsequent calculation of the values of the vegetation index NDVI from them: the two-frame and single-frame survey methods. The two-frame method involves shooting one multispectral camera in two channels in separate frames in monochrome mode, the first frame is shot in the near infrared range, and the second in the visible light range. As a result of filming, we received two photos, one shot in the infrared spectrum, and the other in red. The single-frame method involves shooting with one multispectral camera in two channels in one frame. That is, the infrared and visible spectrum data are in different color channels of the same image, the blue channel of the camera receives NIR radiation, and the red channel receives RED. Shooting is done with one filter (red or orange). Based on the data obtained, NDVI index images are calculated. Cross-calibration of the data measured by multispectral cameras and spectrometers Hamamatsu C10083CAH and Avantes S41 (LaserLS) was carried out. An analysis of the results allows us to talk about the promise of field spectrometry methods of vegetation and soils using modernized cameras.

Keywords: multispectral camera, spectrometry of vegetation and soil, vegetation index.

References

1. Nemtseva L.D., Golubeva E.I. Remote sensing and field spectrometry data in the study of the state of the vegetation cover in the steppes under grazing conditions // REGIONAL ENVIRONMENTAL ISSUES 2018 № 4 P. 123–127 (In Russian).
2. Sukhorukov B.L., Saprygin V.V., Reshetnyak N.V., Berdnikov S.V. Assessing the state of Taganrog bay and Don estuary ecosystem using remote sensing data // SCIENCE IN THE SOUTH OF RUSSIA 2017 Vol. 13 № 4 P. 71–82 (In Russian).