

Рис. УДК 57.087

***Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. и *Armeniaca vulgaris* Lam. в пространстве вегетационных индексов CARI, CRI2 и CSI5**

Марковская В.О., Дмитриев П.А., Козловский Б.Л., Вардуни Т.В.,

Купрюшкин Д.П., Чохели В.А.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;

pdmitriev@sfedu.ru

Аннотация:

В статье описывается опыт использования данных гиперспектральной съемки малогабаритной кадровой гиперспектральной камерой Cubert UHD 185 Firefly для идентификации двух видов деревьев *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. и *Armeniaca vulgaris* Lam. Камера фиксирует отраженное электромагнитное излучение от объектов в диапазоне от видимого до ближнего инфракрасного спектра, записывая данные размером 1000×1000 пикс. в виде одного панхроматического и 125-и гиперспектральных изображений, размером 50×50 пикс. Вследствие своих компактных размеров и малого веса камера может быть установлена на беспилотный летательный аппарат (БПЛА) и использована для целей мониторинга и инвентаризации зеленых насаждений. Применение методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в мониторинге растительного покрова позволяет оперативно проводить исследование больших площадей, в том числе удаленных и труднодоступных за короткий срок, получая при этом больше информации и сводя к минимуму ошибки. Цель данной работы – сбор и анализ гиперспектральных данных для разработки технологии инвентаризации зеленых насаждений с использованием гиперспектрального комплекса на базе БПЛА. Всего для 7511 спектральных профилей двух исследуемых видов было рассчитано по три вегетационных индекса: Chlorophyll Absorption Ratio Index, Carotenoid Reflectance Index и Carter Stress Index. Показана возможность отличить два вида по спектральным характеристикам их листьев на примере *Catalpa speciosa* и *Armeniaca vulgaris*.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, БПЛА, спектральные характеристики, вегетационный индекс.

Eng. *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. и *Armeniaca vulgaris* Lam. in the space of vegetation indices CARI, CRI2 и CSI5

Markovskaya Valeria O., Dmitriev Pavel A., Kozlovsky Boris L., Varduni Tatyana V., Kupryushkin Denis P., Chokhely Vasily A.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; pdmitriev@sfedu.ru

Abstract:

The article describes the experience of using data of a hyperspectral survey with a Cubert UHD 185 Firefly hyperspectral camera for two tree species of *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. and *Armeniaca vulgaris* Lam. The camera captures the reflected electromagnetic radiation from objects in the range from the visible to the near-infrared range, recording data of 1000×1000 pixels in the form of one panchromatic and 125 hyperspectral images, 50×50 pixels in size. The camera can be installed on an unmanned aerial vehicle (UAV) and used for monitoring and inventory of green spaces. Remote sensing methods allows to quickly conduct research of large areas, including remote and difficult to access in a short time. The purpose of this work is to collect and analyze hyperspectral data for the development of technologies for inventorying green spaces using UAV-based hyperspectral complex. A total of 7511 spectral profiles of the two species studied were calculated using three vegetation indices: Chlorophyll Absorption Ratio Index, Carotenoid Reflectance Index and Carter Stress Index. The possibility to distinguish two species by the spectral characteristics of their leaves is shown by the example of *Catalpa speciosa* and *Armeniaca vulgaris*.

Keywords: hyperspectral survey, UAV, spectral characteristics, vegetation index.

Введение

Традиционно инвентаризация зеленых насаждений проводится в два этапа: полевая съемка и камеральная обработка полученного материала. В целом это довольно трудоемкий, дорогостоящий и длительный процесс, вследствие чего эту проблему стараются решить на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В последнее десятилетие, в связи с развитием беспилотной техники и появлением малогабаритных камер для ДЗЗ, наблюдается рост подобных разработок с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве платформы для ДЗЗ [1,2]. При этом, использование БПЛА дает ряд преимуществ в виде более оперативного получения информации, по сравнению со спутниками, а результаты съемки, как правило, характеризуются более высоким пространственным и, в случае использования гиперспектрального оборудования, спектральным разрешением. Выявленные, на основе полученных данных, спектральные особенности и рассчитанные вегетационные индексы растительности являются важными переменными, которые можно использовать для характеристики и оценки состояния видов и культур растений [3–9]. Известно, что спектральные характеристики растений имеют общую закономерность, выраженную в снижении отражательной способности в диапазонах 0,45–0,47 мкм и 0,68–0,69 мкм, что соответствует полосам поглощения хлорофилла а и b, при этом максимумы отражения соответствуют зеленой части видимого и ближней части инфракрасного

спектра и определяются характером проходящих физиологических процессов (рисунок 1).

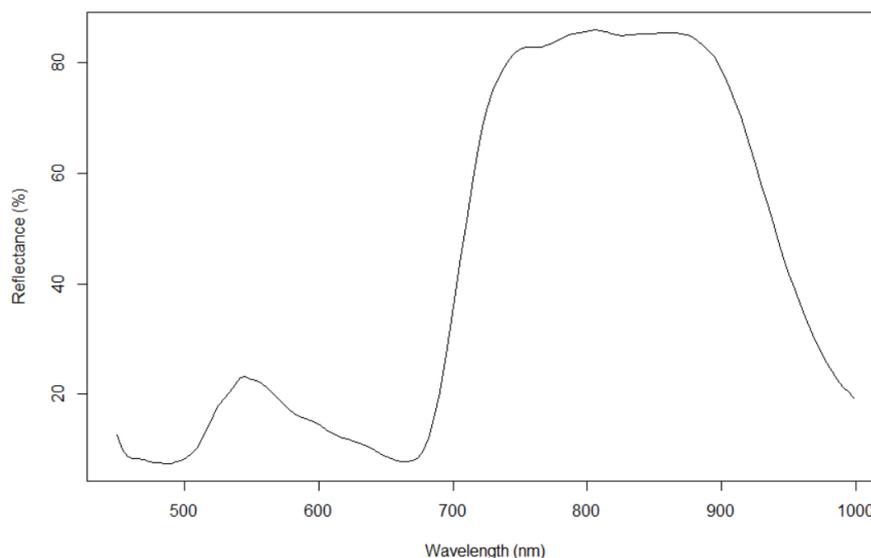


Рисунок 1 – Спектральный профиль *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm.

Материалы и методы исследований

Объектами исследования являются листья двух видов: *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm и *Armeniaca vulgaris* Lam. (рисунок 2). Образцы для анализа отбирали случайным образом, по 10 экземпляров каждого вида на территории интродукционного питомника Ботанического сада ЮФУ.



Рисунок 2 – Лист *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. (справа) и *Armeniaca vulgaris* Lam. (слева).

Исследования спектральных характеристик проведены в лабораторных условиях с использованием кадровой гиперспектральной камеры (рисунок 3) Cubert UHD185 [10,11]. Фиксировалось электромагнитное отраженное излучение на расстоянии 50 см от объектов в диапазоне 450–950 нм. Полученные данные представлены в виде одного панхроматического, размером 1000×1000 пикс., и 125-и гиперспектральных изображений, размером 50×50 пикс. Пространственное разрешение полученных гиперспектральных данных – приблизительно 35 мм^2 .



Рисунок 3 – Cubert UHD185

Гиперспектральную съемку производили 1 раз в неделю в течение одного месяца с 04.10.2018 по 29.10.2018. Всего для 80 образцов двух исследуемых видов было построено 7511 спектральных профиля и рассчитаны по 3-и вегетационных индекса CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index), CRI2 (Carotenoid Reflectance Index) и CSI5(Carter5, Carter Stress Index):

$$\text{CSI5(Carter5)} = \frac{R_{695}}{R_{670}} \quad [12]$$

$$\text{CRI2} = \frac{1}{R_{515}} - \frac{1}{R_{770}} \quad [13]$$

$$\text{CARI} = R_{700} \times \frac{\text{abs}(a \times 670 + R_{670} + b)}{R_{670}} \times (a^2 + 1)^{0.5}, \text{ где}$$
$$a = \frac{(R_{700} - R_{550})}{150}, b = R_{550} - (a \times 550) \quad [14]$$

Обработка результатов гиперспектральной съемки проводилась в программе CubePilot с последующим анализом в среде для статистических расчетов R.

Результаты исследования

Проведенное исследование показало, что *Catalpa speciosa* характеризуется большими значениями CSI5 и CARI, а также меньшим разбросом CRI2 (таблица 1). Различия хорошо видны на диаграммах размаха (рисунок 4-6).

Таблица 1 – Распределение минимальных и максимальных значений, медианы, 1-го и 3-го квартиля вегетационных индексов CSI5, CRI2 и CARI для *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm (CS) и *Armeniaca vulgaris* Lam. (AV)

Вид	CS	AV	CS	AV	CS	AV	CS	AV	CS	AV
Дата съемки	04.10.2018		11.10.2018		18.10.2018		29.10.2018		Весь период	
CSI5										
<i>Min.</i>	2.38	1.01	1.15	1.05	2.31	1.07	1.91	1.01	1.17	1.01
<i>1st Qu.</i>	3.37	1.49	2.23	1.59	3.39	1.58	2.70	1.56	2.66	1.65
<i>Median</i>	3.81	2.00	2.97	2.02	3.88	2.14	3.04	2.00	3.18	2.16
<i>3rd Qu.</i>	4.09	2.37	3.37	2.31	4.13	2.51	3.23	2.24	3.67	2.54
<i>Max.</i>	4.84	3.25	4.71	3.11	4.89	3.40	3.81	3.10	4.89	3.82
CRI2										
<i>Min.</i>	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
<i>1st Qu.</i>	0.05	0.03	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03
<i>Median</i>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
<i>3rd Qu.</i>	0.07	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.08
<i>Max.</i>	0.09	0.10	0.11	0.15	0.07	0.10	0.06	0.11	0.08	0.15
CARI										
<i>Min.</i>	95.47	63.20	69.25	32.40	89.74	46.68	91.37	49.57	69.25	32.40
<i>1st Qu.</i>	154.63	75.40	110.67	46.02	160.42	63.13	172.70	72.45	136.71	59.40
<i>Median</i>	191.85	83.17	131.58	51.31	188.26	70.37	206.27	81.06	161.63	72.76
<i>3rd Qu.</i>	217.39	90.11	149.15	57.59	208.14	79.65	227.05	89.06	196.81	86.37
<i>Max.</i>	293.49	110.76	194.25	74.79	265.53	103.68	259.35	107.16	285.77	125.27

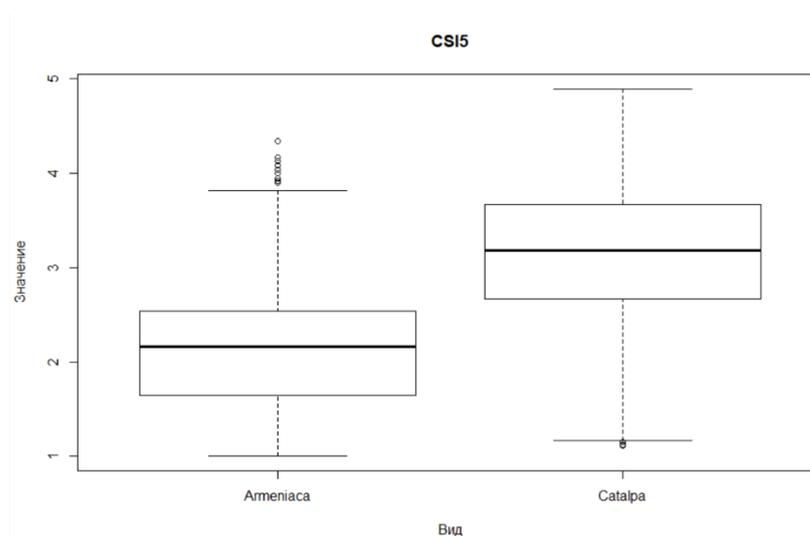


Рисунок 4 – Диаграмма размаха значений вегетационного индекса CSI5

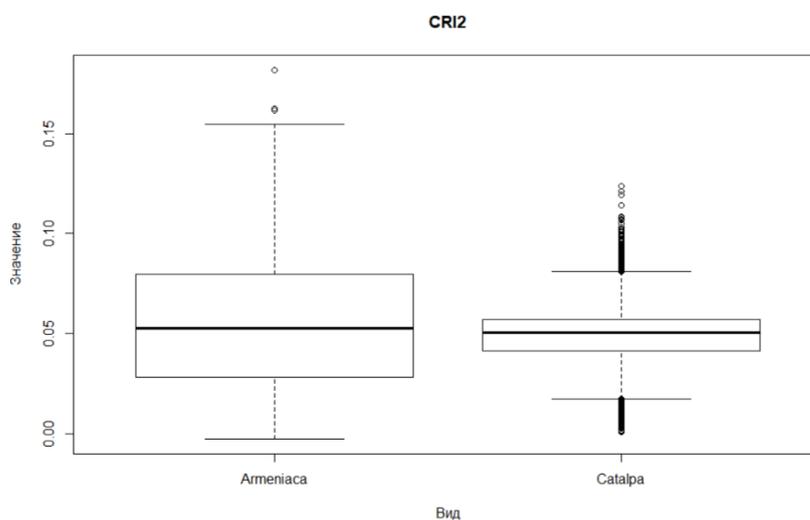


Рисунок 5 – Диаграмма размаха значений вегетационного индекса CRI2

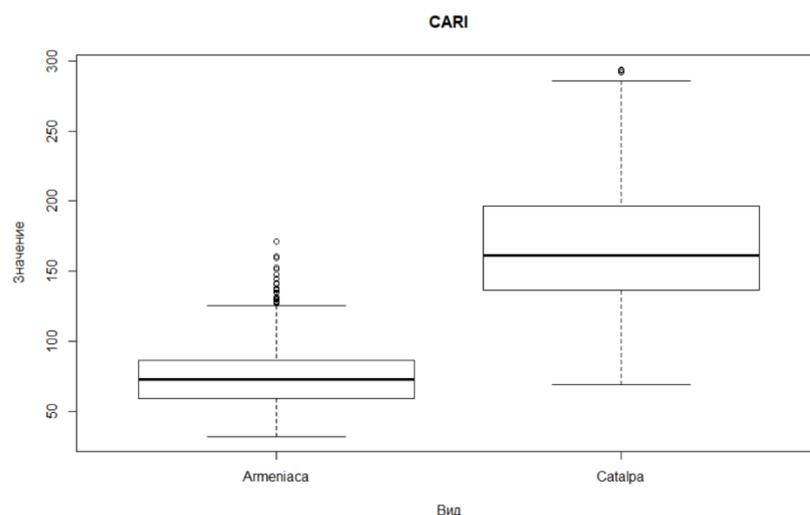


Рисунок 6 – Диаграмма размаха значений вегетационного индекса CARI

В трехмерном пространстве CRI2, CSI5 и CARI, в виде точек были размещены значения вегетационных индексов всех 7511 спектральных профилей двух исследуемых видов, при этом точки, характеризующие *Catalpa speciosa* – окрасили в красный цвет, а *Armeniaca vulgaris* – в черный. Как видно на рисунке 7, в результате все значения оказались разбиты на два облака, относящиеся к двум исследуемым видам.

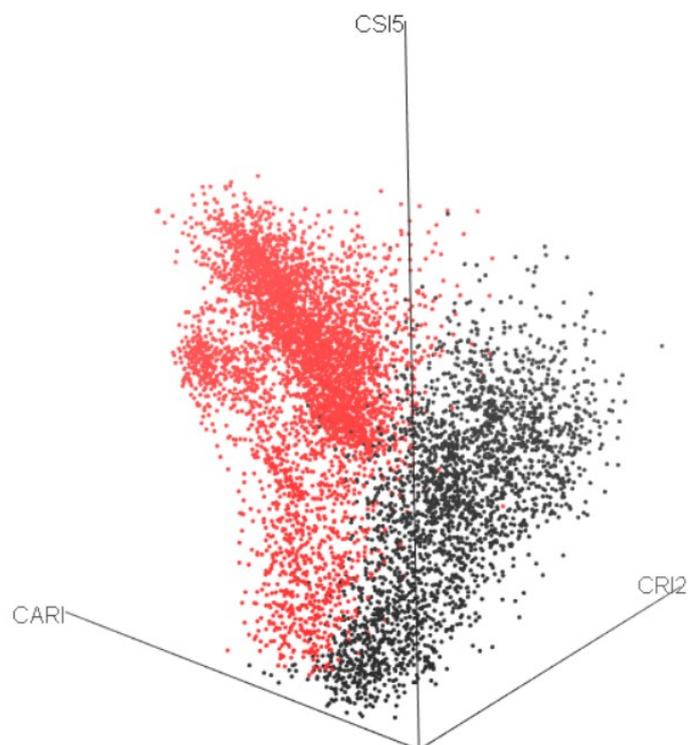


Рисунок 7 – *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. (красный цвет точек) и *Armeniaca vulgaris* Lam. (черный цвет точек) в пространстве вегетационных индексов CRI2, CSI5 и CARI.

Заключение

В результате проведенного исследования выявлен характер взаимного распределения значений вегетационных индексов двух видов в осях CRI2, CSI5 и CARI.

Результат исследования показал высокую эффективность использования вегетационных индексов CRI2, CSI5 и CARI при обработке гиперспектральных данных для целей идентификации видов *Catalpa speciosa* (Warder ex Barney) Warder ex Engelm. и *Armeniaca vulgaris* Lam. при съёмке с малого расстояния.

Учитывая малые размеры Cubert UHD 185 Firefly (195 × 67 × 60 мм) и небольшой вес (всего 0,47 кг), а также тот факт, что она отличается короткой выдержкой и малым временем интеграции – камера может быть установлена

на БПЛА и использована для проведения мониторинга и инвентаризации зеленых насаждений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (программа «УМНИК» договор № 11683ГУ/2017 от 03.07.2017)

Литература

1. Sankaran, S.; Khot, R.; Espinoza, Z.; Jarolmasjed, S.; Sathuvalli, R.; Vandemark, J.; Miklas, N.; Carter, H.; Pumphrey, O.; Knowles, R. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *Eur. J. Agron.* 2015, 70, 112–123.
2. Zarcotejada, J.; Guilléncliment, L.; Hernándezclemente, R.; Catalina, A.; González, R.; Martín, P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agric. For. Meteorol.* 2013, 171–172, 281–294.
3. Huete, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 1988, 25, 295–309.
4. Jordan, F. Derivation of Leaf Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology* 1969, 50, 663–666.
5. Elmore, J.; Mustard, F.; Manning, J. Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 2000, 73, 87–102.
6. Jin, L.; Diao, Y.; Xiao, H.; Wang, Y.; Chen, B.; Wang, R. Estimation of wheat agronomic parameters using new spectral indices. *PLoS ONE* 2013, 8, e72736.
7. Gitelson, A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *J. Plant Physiol.* 2004, 161, 165–173.
8. Delegido, J.; Fernandez, G.; Gandia, S.; Moreno, J. Retrieval of chlorophyll content and lai of crops using hyperspectral techniques: Application to proba/chris data. *Int. J. Remote Sens.* 2008, 29, 7107–7127.
9. Meroni, M.; Colombo, R.; Panigada, C. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for lai mapping in poplar plantations. *Remote Sens. Environ.* 2004, 92, 195–206.
10. Bareth, G., Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M.L., Bolten, A., Jung, A., Michels, R., Soukkamäki, J., 2015. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: spectral comparison with portable spectroradiometer measurements. *Photogr. – Fernerkundung – Geoinf.* 1, 69–79.
11. Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., Bareth, G., 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 108 (5), 245–259.

12. Carter, G. A., 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15 (3), 697–703.
13. Gitelson, A., Y, G., MN., M., 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160 (3), 271–282.
14. Kim, M., Daughtry, C., Chappelle, E., McMurtrey, J., Walthall, C., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). In: *Proceedings of the Sixth Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Val D'Isere, France, pp. 299–306.

Literature

1. Sankaran, S.; Khot, R.; Espinoza, Z.; Jarolmasjed, S.; Sathuvalli, R.; Vandemark, J.; Miklas, N.; Carter, H.; Pumphrey, O.; Knowles, R. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *Eur. J. Agron.* 2015, 70, 112–123.
2. Zarcotejada, J.; Guilléncliment, L.; Hernándezclemente, R.; Catalina, A.; González, R.; Martín, P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agric. For. Meteorol.* 2013, 171–172, 281–294.
3. Huete, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 1988, 25, 295–309.
4. Jordan, F. Derivation of Leaf Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology* 1969, 50, 663–666.
5. Elmore, J.; Mustard, F.; Manning, J. Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 2000, 73, 87–102.
6. Jin, L.; Diao, Y.; Xiao, H.; Wang, Y.; Chen, B.; Wang, R. Estimation of wheat agronomic parameters using new spectral indices. *PLoS ONE* 2013, 8, e72736.
7. Gitelson, A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *J. Plant Physiol.* 2004, 161, 165–173.
8. Delegido, J.; Fernandez, G.; Gandia, S.; Moreno, J. Retrieval of chlorophyll content and lai of crops using hyperspectral techniques: Application to proba/chris data. *Int. J. Remote Sens.* 2008, 29, 7107–7127.
9. Meroni, M.; Colombo, R.; Panigada, C. Inversion of a radiative transfer model with hyperspectral observations for lai mapping in poplar plantations. *Remote Sens. Environ.* 2004, 92, 195–206.
10. Bareth, G., Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M.L., Bolten, A., Jung, A., Michels, R., Soukkamäki, J., 2015. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: spectral comparison with portable spectroradiometer measurements. *Photogr. – Fernerkundung – Geoinf.* 1, 69–79.

11. Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., Bareth, G., 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 108 (5), 245–259.
12. Carter, G. A., 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15 (3), 697–703.
13. Gitelson, A., Y, G., MN., M., 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160 (3), 271–282.
14. Kim, M., Daughtry, C., Chappelle, E., McMurtrey, J., Walthall, C., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). In: *Proceedings of the Sixth Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Val D'Isere, France, pp. 299–306.