

Получена: 22.12.2017 г.

Приета: 28.05.2018 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ НА БЛИЗКООБХВАТНАТА ФОТОГРАМЕТРИЯ В ПРЕЦИЗНОТО ЗЕМЕДЕЛИЕ

П. Раева¹

Ключови думи: блискообхватна фотограметрия, БЛС, прецизно земеделие

РЕЗЮМЕ

В настоящата статия ще бъдат представени приложения на безпилотните летателни системи (БЛС) в прецизното земеделие. През последното десетилетие БЛС бележат значително развитие не само в любителските, но и в професионалните сфери. В статията ще бъдат обяснени основните принципи при изследване на вегетация чрез мултиспектрални и термални изображения. Резултатите от тези изследвания най-често са карти с вегетационни показатели (индекси). Ще бъдат изтъкнати различни приложения на различни безпилотни летателни системи и сензори. Към работата ще бъдат приложени и реални заснемания на автора с БЛС, методи на обработка, резултати и анализи.

1. Въведение

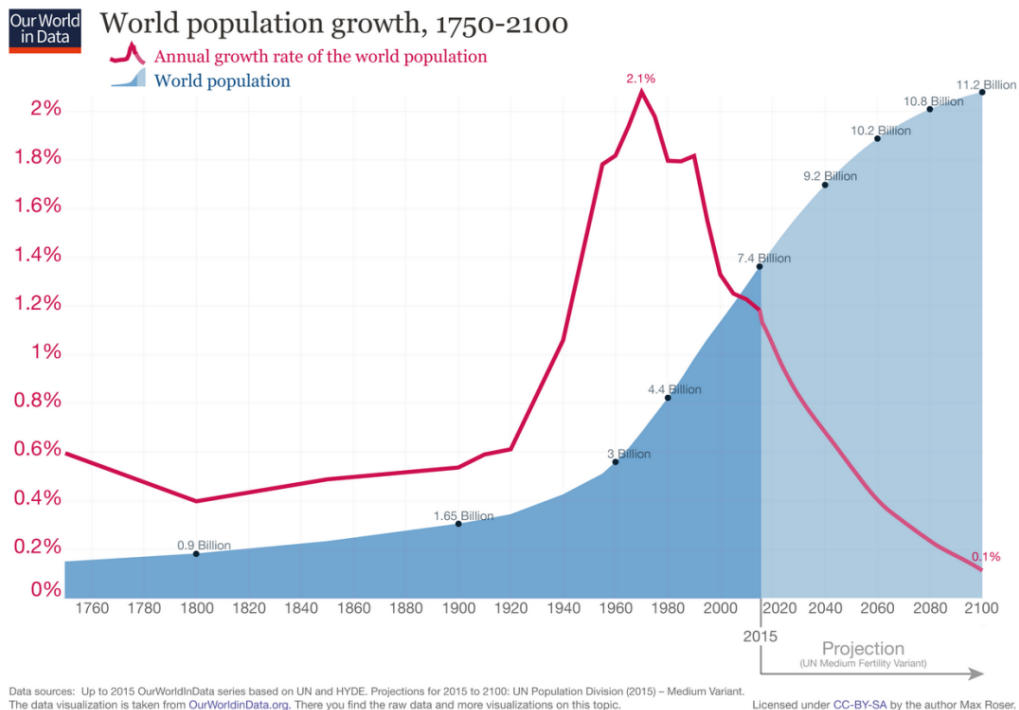
С развитието на технологиите, могат да се намалят значително и разходите за отглеждане на земеделски култури. Често земеделците прилагат пестициди, инсектициди и други химични вещества, без оглед на количеството, мястото и последствията при едно евентуално непреценено нанасяне. БЛС с подходящ сензор може да допринесе за адекватен мониторинг на земеделските култури и то в реално време.

Прецизното земеделие (ПЗ) е ключов компонент от третата вълна на развитие на модерното земеделие. Първата земеделска революция настъпва с развитието на механизацията от 1900 – 1930 г. По това време всеки земеделец е произвеждал достатъчно храна за приблизително 26 души. След 1930 г. Зелената революция настъпва с прилага-

¹ Паулина Раева, инж., кат. „Геоматика“, Факултет по строително инженерство, Чешки технически университет в Прага, Тхакурова 2077/7, 160 00 Прага 6, Чехия, e-mail: paulina.raeva@fsv.cvut.cz

нето на генетични модификации, което позволило за изхранването на 155 души с производството на един земеделец. След Втората световна война развитието на науката включва пестицидите, хербицидите и торовете като неизменими помощници на земеделците. Нещо повече, появата на нови видове напоителни системи е от изключително значение по време на Зелената революция [12].

Твърди се, че до 2050 г. населението на планетата ще се увеличи до 9 милиарда, което е с 30% повече от днешното. За последните 100 години населението на света се е увеличило от 1,5 на 6,1 милиарда (фиг. 1). За да се справим с нарастващите цифри, означава производството на храна да бъде увеличено с близо 70% [7]. Чрез преплитането на различни научни сфери и технологични иновации имаме възможност да изтъкнем критични точки, които биха имали огромен ефект върху много хора.



Фиг. 1. Граф, показващ темповете на увеличаване на населението

Има многобройни доказателства, че увеличението на земеделската продукция е довело до значителни вредни за околната среда последствия: замърсяване на водите, парникови ефекти и др. Следователно, най-голямото предизвикателство пред земеделския сектор е да се довери на науката и технологиите за съвместното взимане на решения.

Следователно, необходимостта от нови и модерни технологии за земеделие нараства. Заедно в търсенето на решения за устойчиво земеделие навлиза и терминът прецизно земеделие – ПЗ (*Precision Agriculture – PA*). Прецизното земеделие е подход, който включва информационни технологии, глобални навигационни системи (*GNSS*), Дистанционни методи и събиране на земеделска информация. Приложението на ПЗ става възможно благодарение на скоростното развитие на технологиите, в частност на сензорите за заснемане, в комбинация с картографиране на земеделските процеси като разо-

раване, засяване, торене и др. [3]. Основната цел на ПЗ е да осигури рентабилност, ефикасност и устойчивост на земеделските процеси и в същото време да не вреди на околната среда [8].

2. БЛС за прецизно земеделие

Предимствата на безпилотните летателни апарати пред сателитните системи за дистанционни методи са няколко:

- Генериране на изображения с геотагове в реално време;
- Използване на различни видове сензори;
- По-голяма резолюция от тази на сателитните снимки;
- Възможност за проверка на резултати от заснемането в същия ден.



Фиг. 2. Мониторингът на земеделски култури чрез БЛС има повече предимства пред конвенционалните сателитни изследвания

Според технологичен бюлетин на *Massachusetts Institute of Technology* [5] има 6 различни опции за използването на дронове в земеделието:

- Почвени анализи – предоставяне на информация за почвени анализи, модели на засаждане, данни за напояване и мониторинг на нивото на азот;
- Засаждане – използване на дронове за засаждане, което намалява разходите му до 85%;
- Пръскане на посевите – дроните могат едновременно да сканират почвите и да прилагат определено количество химичен разтвор;
- Мониторинг на посевите – наблюдение на развитието на посевите;
- Напояване – контролирано напояване на разсадите чрез дронове;
- Оценка на посевите – създаване на вегетационни карти, показващи състоянието на вегетацията.



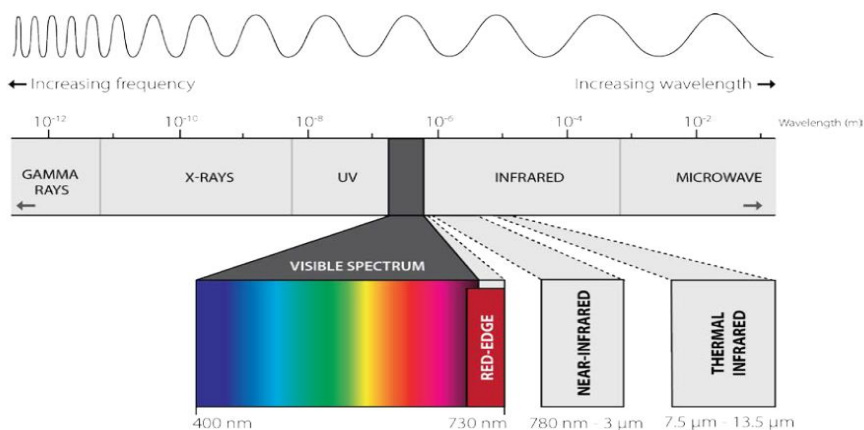
Фиг. 3. В близките години едно от най-големите приложения на БЛС ще бъде именно в земеделието

3. Вегетационни индекси

За правилното използване на БЛС с многоканален сензор, физикалните основи на камерата и спектралните характеристики на конкретното растение трябва да бъдат познати.

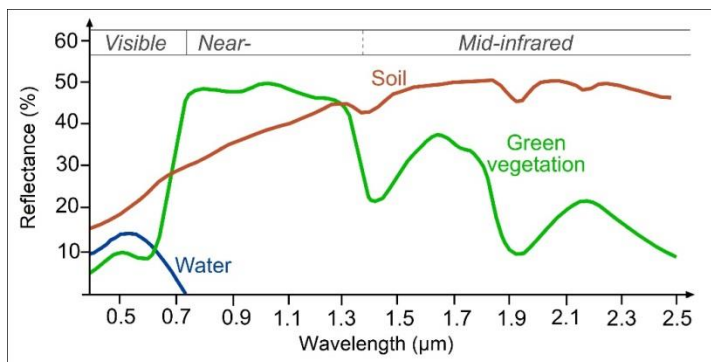
Вегетационните анализи за земеделие са типична задача от сферата на Дистанционните методи, но през последното десетилетие се имплементират успешно и в блискообхватната фотограметрия, в частност в безпилотната фотограметрия. Качеството на резултатите зависи от използваната камера, тъй като класическите RGB-фотоапарати почти не се използват, а по-скоро се прилагат модифицирани. За прецизни анализи се използват многоканални, хиперспектрални и термални камери [6].

Най-честият резултат при приложение на вегетационни индекси могат да бъдат вегетационни карти. Те представляват характеристики, засягащи вегетацията (зеленина, наличност на хлорофил) или почвата (влажност на почвата) на базата на пикселните стойности. Вегетационните индекси имат качествено и количествено значение за изследваните земни покривки при използването на спектрални изследвания.



Фиг. 4. Схема на електромагнитния спектър

Най-известният и използван вегетационен индекс е нормализираният вегетационен индекс (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*). Този индекс е предложен от Rouse в неговите трудове от 1973 г. и 1974 г. Изчисленията са направени на базата на използваните канали на спътниците *LANDSAT* [1]. *NDVI* се изчислява като разлика между абсорбираната и отразената светлина. Здравата вегетация абсорбира зелената светлина и отразява голяма част от инфрачервената светлина. На фиг. 5 ясно се вижда скоростното покачване на отражателната способност на здравата вегетация между видимата и инфрачервената част на спектъра (фиг. 4).



Фиг. 5. Спектрални характеристики на вегетацията, почвата и водата

Това покачване е в областта от 680 nm до 730 nm дължина на вълната и се нарича праг на червеното (*Red Edge*). С други думи, колкото по-здрavo е растението, толкова повече ще отразява инфрачервена светлина.

Разликата между отражателната способност в инфрачервения и червения канал ни показва колко здрава всъщност е вегетацията. Оттук се извежда и нормализираният вегетационен индекс *NDVI*, който се пресмята по формулата:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}, \quad (1)$$

където R_{NIR} и R_{RED} е нивото на електромагнитна енергия в червената и инфрачервената област на електромагнитния спектър.

NDVI-стойностите винаги варират между [-1;+1], като отрицателните стойности са показател за безжизнена вегетация или други невегетационни обекти.

Друг вегетационен индекс, който ще бъде използван за целите на настоящото изследване, е нормализираният вегетационен индекс на зеленината или *GNDVI* (*Green Normalized Difference Vegetation Index*). Той показва нивото на зеленина или фотосинтетичната активност на растенето. Използва се най-често за определяне на нивото на влажност и азот в структурата на растението. Индексът *GNDVI* се различава от *NDVI* по това, че първият се изчислява на базата на зеления, а не на червения канал.

4. Описание на изследвания обект и заснемането му

Изследвани са няколко земеделски полета в близост до с. Златники, южно от чешката столица Прага. Обектът се намира на малко повече от 5 km от най-близкото летище

„Точна“, което според чешкото законодателство позволява неконтролиран полет с безпилотен летателен апарат [11]. Районът е избран за изследване, тъй като попада в зоната със земеделски земи, страдащи от суша и недостиг на вода за мелиоративни мероприятия.



Фиг. 6. Местоположение на изследвания обект. Източник: www.mapy.cz

Заснемането на местността е извършено на 10-ти май 2016. Проведени са два самостоятелни полета с безпилотната система на *senseFly* и две различни камери: многоканална и термална.

5. Описание на използваната техника

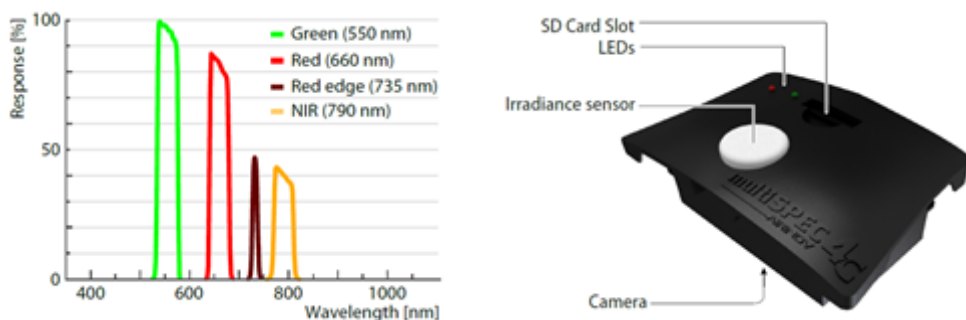
За заснемането на земеделските имоти е използван безпилотният самолет *eBee* с фиксирано крило на швейцарската фирма *senseFly*, собственост на катедра „Геоматика“ към Факултета по строително инженерство на ТУ Прага [2].

Безпилотният самолет е комплектуван с два софтуера – *eMotion* за планиране на полетите и *Postflight Terra 3D* за обработката на снимките. Пуска се от ръка, след което автоматично следва зададения в *eMotion* план на летене. *eBee* може да бъде контролиран във всеки един момент от полета или да бъде управляван в реално време. След извършване на мисията си, *eBee* каца самостоятелно на зададено предварително място – *Home waypoint*.

Извършени са два полета с две различни камери – мултиспектрална *multiSPEC 4C*, и термална *thermoMAP*.

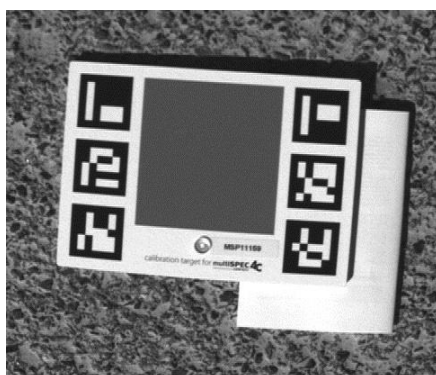
5.1. Многоканална камера *multiSPEC 4C*

Многоканалната камера включва четири сензора, които могат да заснемат в конкретна част от спектъра, специално създадена за земеделски изследвания. Заснетите изображения са в следните канали – зелен, червен, праг на червеното и блискообхватен.



Фиг. 7. Спектрална чувствителност на многоканалната камера *multiSPEc 4C* и нейния вид

Благодарение на сензора за лъчиста енергия и предварителното калибриране, камерата е способна да заснеме информация за абсолютното отразяване на светлината в широки по обхват нива на отражение. Калибрирането се извършва на терена преди или след полета, в среда на *eMotion* и при използване на калибрационна марка. Калибрационната марка се поставя на терена в отвесно положение и се заснема. Резултатът е няколко калибрационни изображения за всеки един от каналите [9].



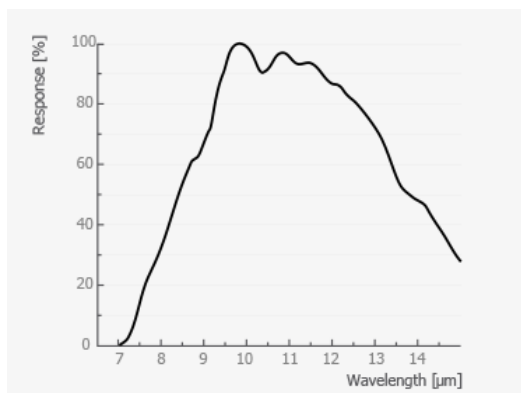
Фиг. 8. Калибрационна марка за многоканалната камера *multiSPEc 4C*.
Снимка: личен архив

Таблица 1. Характеристики на многоканалната камера *multiSPEc 4C*

Размер на сензора	4 × 1/3" CMOS
Размер на изображенията	4 × 1,2 MP
Фокусно разстояние	f/1,8
Изходни формати	TIFF

5.2. Термална камера *thermoMAP*

Камерата *thermoMAP* е също производство за фирмата *sensFly*, която позволява заснемане на снимките и видеа с информация относно температурата на заснетите обекти. Подходяща е за изследване в земеделието и мелиорациите [10].



Фиг. 9. Спектрална чувствителност на камерата *thermoMAP* и нейният вид

Характеристиките на тази камера са изложени в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики на термалната камера *thermoMAP*

Размер на снимките	640 × 512 pix
Разделителна способност	14 cm/pix
Обхват на температурата	-40 °C – 160 °C
Разделителна способност за температура	0,1 °C
Калибриране	Атоматично
Изходни формати	TIFF + MP4
Подходящ височинен диапазон за заснемане	75 –150 m

6. Обработка на фотограметричните данни

Обработката на многоканалните изображения е извършена в среда на *Pix4D*, конкретно в *Pix4Dmapper*. От полета с многоканалната камера са заснети 664 изображения от 166 позиции, т.е. по 166 снимки за всеки канал.

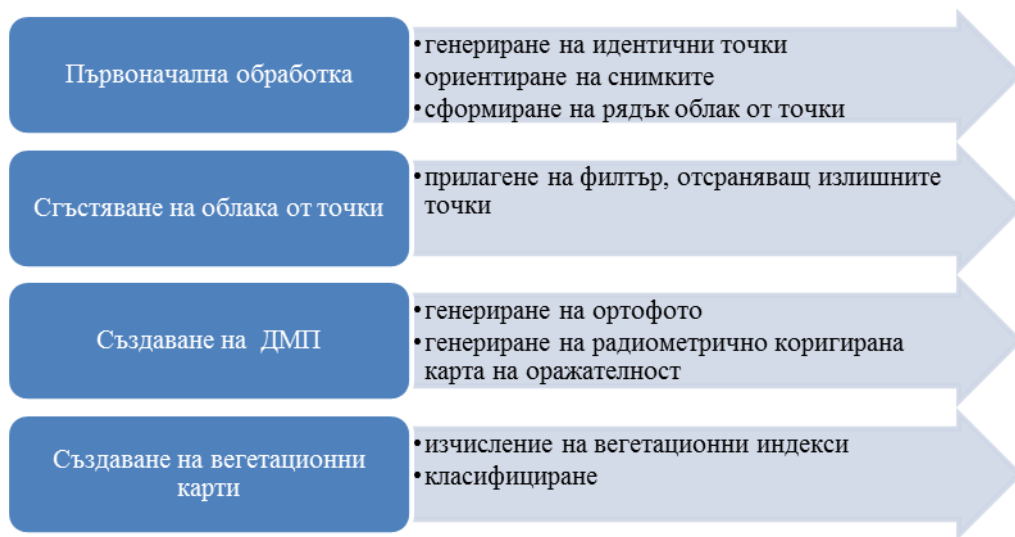
Таблица 3. Резултати от трите полета – теренен елемент (*GSD – ground sampling distance*), заснета площ и брой снимки

	Размер на теренния елемент [cm]	Заснета площ [km ²]	Брой снимки	Брой ориентирани снимки
Многоканална камера	11,2	0,286	664	632
Термална камера	15,7	0,207	816	769

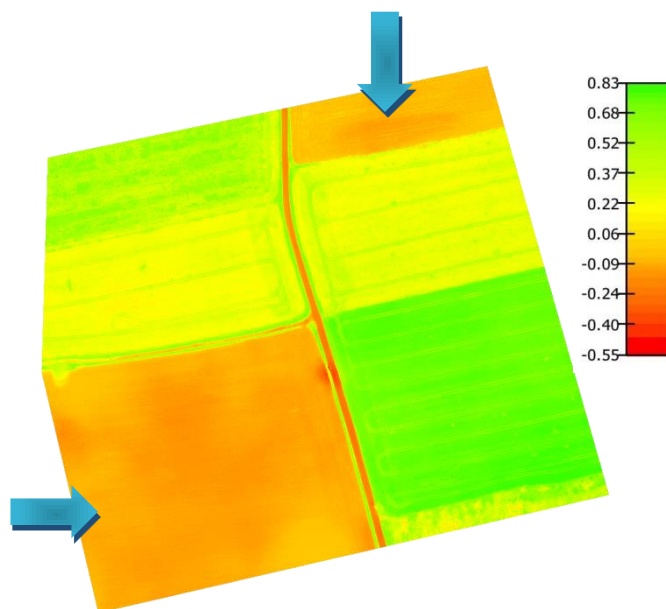
Всяко термално заснемане изисква минимално 90% напречно и 90% надлъжно застъпване между снимките. Затова от термалния полет са генерирани 816 снимки.

Обработката на снимките следва стъпките, показани в табл. 4.

Таблица 4. Последователност при обработката на снимките



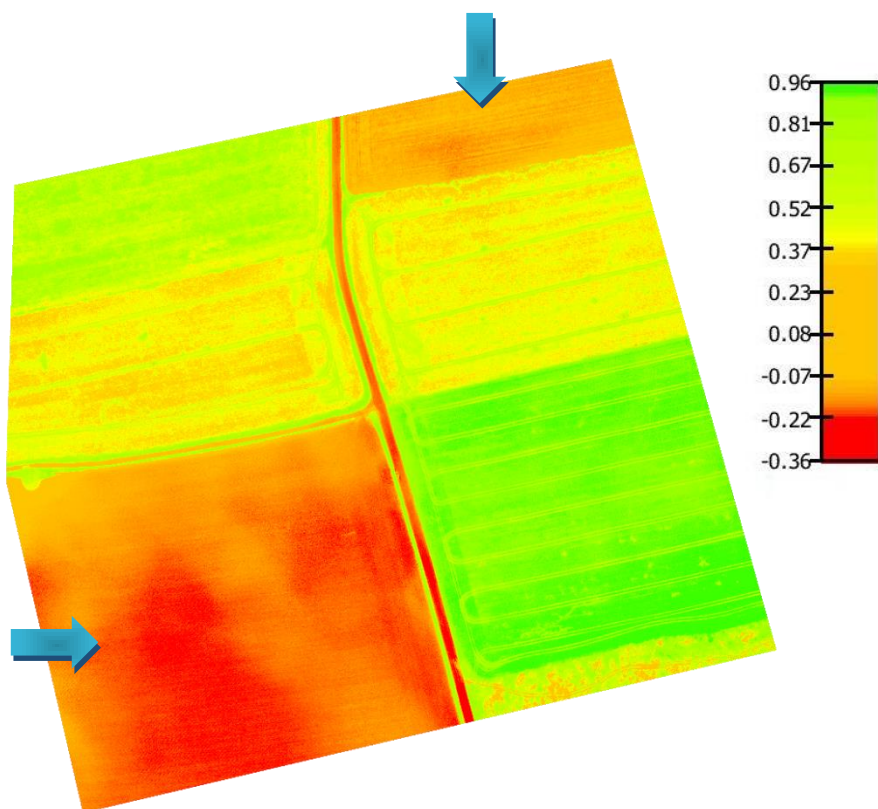
За всеки един от използваните канали на камерата *multiSPEC 4C* е създадена радиометрично коригирана карта, показваща нивото на отразяване на обектите. На базата на тези карти са изчислени два от вече споменатите вегетационни индекси – *GNDVI*, *NDVI*. Избран е работен полигон, който е един и същ както са данните от многоканалната камера, така и за данните от термалната.



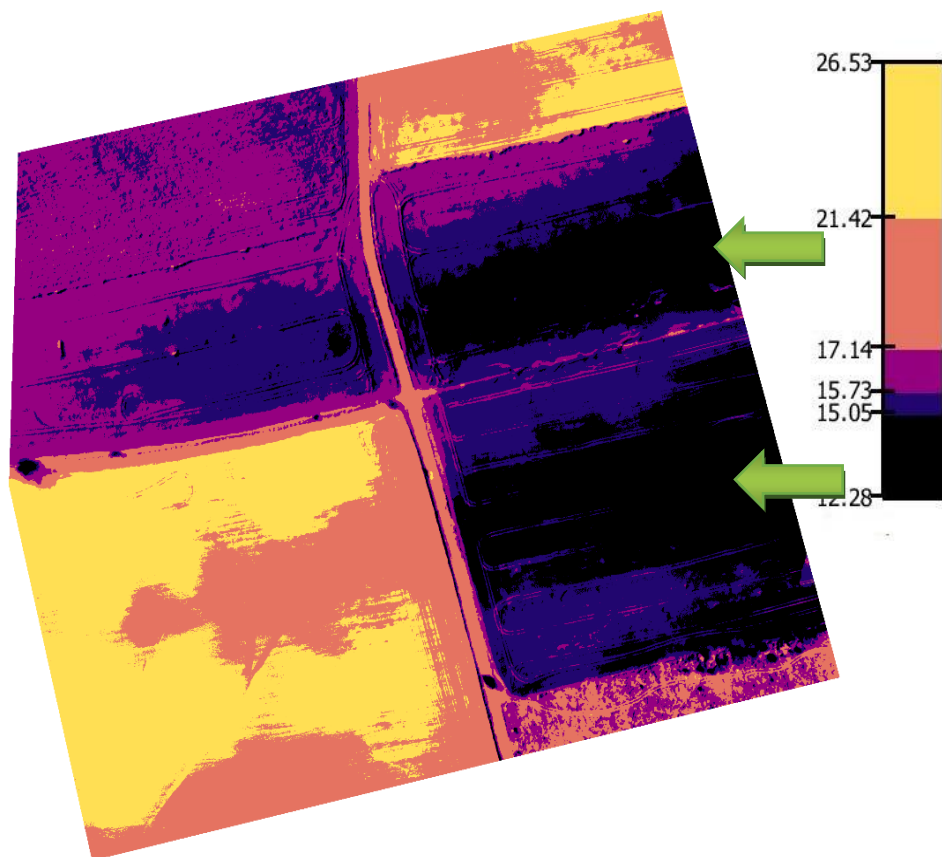
Фиг. 10. Карта, показваща GNDVI-стойностите на заснетите земеделски култури. Ясно се открояват пътните артерии, както и две от полетата, където стойностите на вегетационния индекс са отрицателни

Резултатите от многоканалните снимки са показани на фиг. 10 и фиг. 11. Приложена е класификация по метода на Дженкс. Методът се стреми да минимизира средната стандартна грешка на всичките класове в сравнение със средното на класа, а в същото време увеличава стандарта на всеки клас в сравнение със средното на другите класове [4]. Наблюдава се, че стойностите на индекса *NDVI* са в по-широк диапазон от -0,36 до 0,96. Това се дължи на факта, че много обекти, които не са част от растителната покрива отразяват част от инфрачервената светлина и попадат в отрицателния диапазон на *NDVI*.

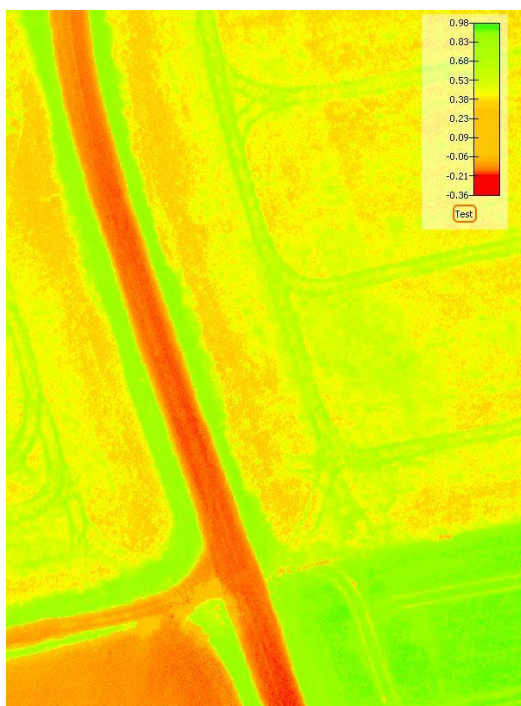
Резултатът от полета с термална камера е показан на фиг. 12. Тази карта е добър показател на влажността на почвата, което се наблюдава в някои от заснетите земеделски полета.



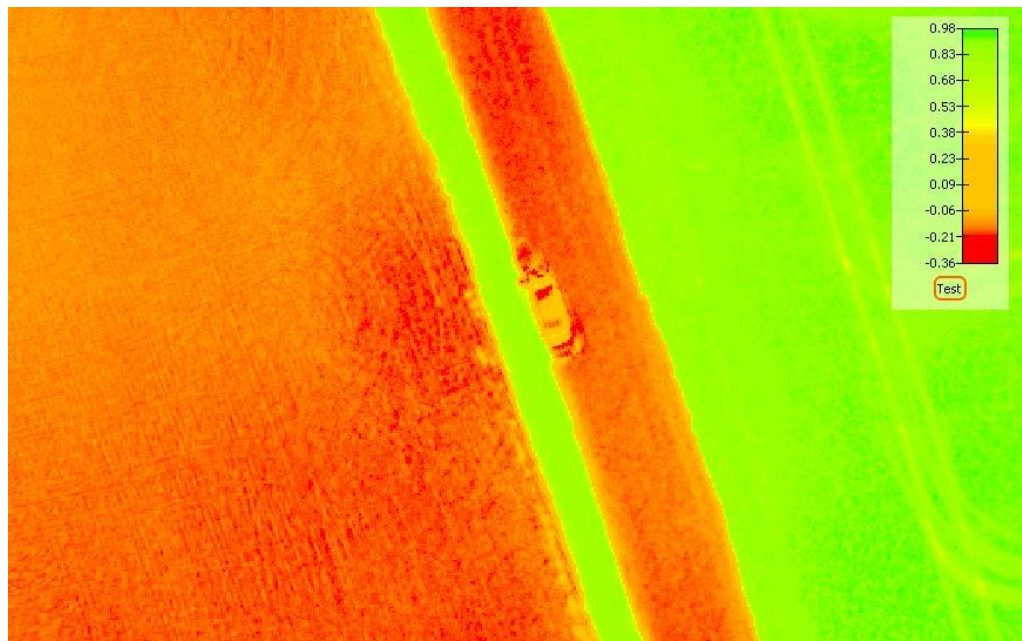
Фиг. 11. Карта, показваща *NDVI*-стойностите на заснетите земеделски полета. Ясно се отличават невегетационните обекти като пътните артерии, които имат отрицателен индекс. Освен това, две от полетата също показват отрицателни или близки до нулата стойности. Като се има предвид, че заснемането е извършено през май, може да се направи изводът, че полетата са засети с късни земеделски култури, напр. царевица



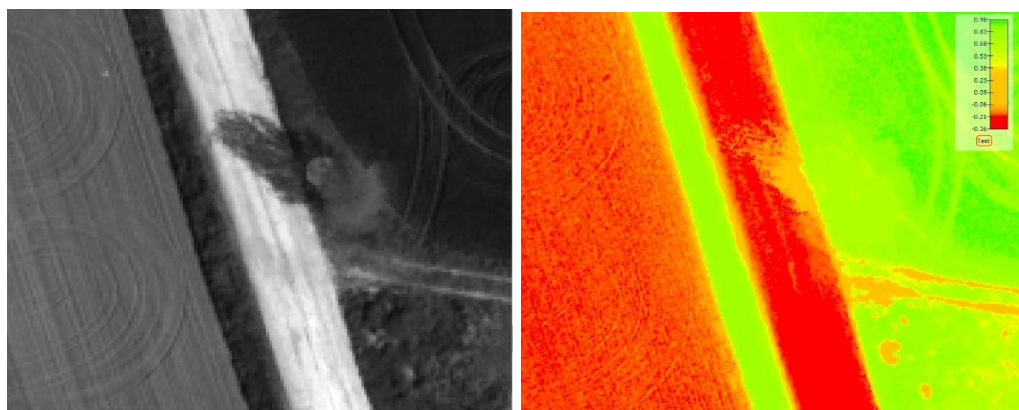
Фиг. 12. Карта, показваща стойността на температурата във всеки един пиксел от заснетата територия. Стойностите са трансформирани по скалата на Целзий. Най-високи температурни стойности имат две от земеделските полета, които са засети или с късни земеделски култури, или не се обработват към момента на заснемане. Останалите полета показват по-ниски температурни стойности, което е индикатор за обработване и напояване на почвите. Отбелязаните със зелени стрелки части имат най-ниска температура, което може да се дължи на промяната на релефа на полето от задържане на напоителна вода и/или ерозия



Фиг. 13. Ясно отличаване на пътни артерии, земеделски полета и охранни пояси чрез *NDVI*



Фиг. 14. Показан е един от случаите, в който невегетационни обекти могат да показват и положителни стойности, напр. автомобили, асфалт. Това се дължи на малките разлики между отразена и погълнатата електромагнитна енергия



Фиг. 15. Влияние на положението на слънцето по време на заснемане и създаващите сенки от обектите

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A. (1995). A review of vegetation indices.* Извлечено от <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>.
2. Department of Geomatics (2017). *Department of Geomatics.* Извлечено от: <http://geomatics.fsv.cvut.cz/vyzkum/laborator-fotogrammetrie/>.
3. European Parliament. (2014). Извлечено от www.europarl.europa.eu: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT%282014%29529049_EN.pdf.
4. Jenks natural breaks optimization. (2017). Извлечено от Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization *Jenks natural breaks optimization*. (2017). Извлечено от Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization.
5. MIT. (2017). *MIT Technology Review.* Извлечено от www.technologyreview.com: <https://www.technologyreview.com/s/526491/agricultural-drones/>.
6. *Pavelka, K., Šedina, J., Pacina, J., Pánka, J., Karas, J. & Šafář, V. (2016). Remotely Piloted Aerial System – RPAS.* Prague: Department of Geomatics, ČVUT. *Pavelka, K., Šedina, J., Pacina, J., Pánka, J., Karas, J., & Šafář, V. (2016). Remotely Piloted Aerial System – RPAS.* Prague: Department of Geomatics, ČVUT.
7. *Roser, M. Ortiz-Ospina, E. (April 2017). World Population Growth.* Извлечено от Our World in Data: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>.
8. *Schmaltz, R. (24 April 2017). AgFunder News.* Извлечено от <https://agfundernews.com>: <https://agfundernews.com/what-is-precision-agriculture.html>.
9. *SenseFly. (2010 – 2014). multiSPEC 4C User Manual.* Извлечено от: [http://95.110.228.56/documentUAV/camera%20manual/\[ENG\]_2014_user_manual_multiSPEC_4C.pdf](http://95.110.228.56/documentUAV/camera%20manual/[ENG]_2014_user_manual_multiSPEC_4C.pdf).
10. *SenseFly. (2017). www.sensefly.com.* Извлечено от [senseFly: http://www.sensefly.com/home.html](http://www.sensefly.com/home.html).
11. *Úřad pro civilní letectví. (2017) – DOPLŇEK X – BEZPILOTNÍ SYSTÉMY.* Извлечено от: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>.
12. *Wikipedia. (н.д.). Green Revolution.* Извлечено от Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Green_Revolution.

CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY APPLICATIONS IN PRECISION AGRICULTURE

P. Raeva¹

Keywords: close-range photogrammetry, UAS, precision agriculture

ABSTRACT

The present paper presents applications of Unmanned Aerial Systems (UAS) in precision agriculture. For the past decade UAS has indicated a remarkable development in many consumer-grade spheres but also in professional ones. The development of the precision agriculture for the last decade as far as close-range photogrammetry is concerned is presented in the paper. The basic principles of analyzing vegetation with multispectral and thermal imagery will be explained. The results of which are most often index maps. Moreover, different applications of different UAVs and sensors will be pointed out. In the study authentic UAV mapping by the author, processing methods, results and analysis are also presented.

¹ Paulina Raeva, Eng., Dept. "Geomatics", Czech Technical University in Prague, Thákurova 2077/7, 160 00 Praha 6, Czech Republic, e-mail: paulina.raeva@fsv.cvut.cz