

Железова С.В.¹, Ананьев А.А.¹, Вьюнов М.В.², Березовский Е.В.¹

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева

²ООО НПК «Джи Пи Эс Ком»

e-mail: soferrum@mail.ru; ananeyv_987@mail.ru; pole-st@mail.ru; mvv@gpscom.ru

МОНИТОРИНГ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЁМКИ И ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА GREENSEEKER® RT200

Применение беспилотной аэрофотосъёмки перспективно для обследования посевов по индексу NDVI во время вегетации. Для аэрофотосъёмки используются пассивные сенсоры (фотокамеры), поэтому результаты зависят от условий освещенности в момент съёмки. Для калибровки и верификации дистанционных данных пассивного датчика необходимо проводить наземные обследования датчиком с активным источником излучения. В течение одного вегетационного сезона 4 раза были проведены обследования посевов озимой пшеницы по вегетационному индексу NDVI дистанционно с помощью беспилотного летательного аппарата SenseFly AG eBee с камерой Canon S110 NIR. Одновременно проводились наземные измерения NDVI оптическим датчиком GreenSeeker® RT200, имеющим активный источник излучения. Для ранних сроков развития посева (до завершения фазы кущения) корректировка результатов пассивного датчика по данным активного датчика проводится по уравнению линейной зависимости. Для более поздних сроков развития посева – по логарифмической. В целом, обследование посевов беспилотным летательным аппаратом дает воспроизводимую и достоверную картину распределения вегетационного индекса NDVI на поле в любые фазы развития посевов, что подтверждается по серии совместных обследований наземными и дистанционным методами в течение сезона.

Ключевые слова: NDVI, беспилотный летательный аппарат, озимая пшеница, мониторинг посевов

В настоящее время широко используются дистанционные и наземные методы для обследования посевов по их спектральной отражательной способности. Аэрофотосъёмка с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние 3–5 лет активно стала применяться в практике сельского хозяйства [1]–[5]. В использовании беспилотной аэрофотосъёмки для сельскохозяйственных целей наиболее перспективны следующие направления: построение цифровых моделей рельефа, анализ неоднородности плодородия земель по спектральным характеристикам, контроль работы дренажных систем, оценка вариабельности посевов по вегетационным индексам, выявление повреждений растительности от внешних воздействий [4]–[9].

Дистанционная оценка состояния растительности обычно проводится с применением вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который рассчитывается на основе сопоставления отражения растительности в диапазонах красного и инфракрасного излучения. Значение NDVI зависит от густоты растительности, фазы ее развития, площади листовой поверхности, обводнённости тканей во время съёмки и других факторов.

Для дистанционной оценки NDVI на сельскохозяйственных землях могут быть использованы спутниковые снимки и аэрофотоснимки

с беспилотного аппарата. Спутниковая съёмка посевов во время вегетации, применяемая в мире уже более 40 лет, по сравнению с аэрофотосъёмкой с БПЛА имеет ряд существенных недостатков: низкая разрешающая способность бесплатных снимков (30–250 м/пиксель), дороговизна снимков высокого разрешения, помехи от облачности, и не всегда удовлетворяющая потребителя оперативность съёмки. Беспилотная съёмка является более оперативной и может осуществляться даже в облачную погоду, разрешающая способность её гораздо выше (3–50 см/пиксель). Недостатком беспилотной съёмки является не очень высокая производительность, т.к. время и скорость одного полёта БПЛА ограничено техническими характеристиками летательного аппарата и погодными условиями (силой ветра).

Как спутниковая, так и аэрофотосъёмка является пассивной съёмкой отражений в заданных диапазонах световых волн, поэтому в условиях недостаточной или неравномерной освещённости результаты съёмки могут быть существенно искажены. Для наземной оценки состояния посевов используются активные оптические датчики, т.е. датчики с собственным источником излучения, такие, как GreenSeeker® RT200 или Yara N-Sensor® ALS. Обычно такие обследования биомассы посева проводятся одновременно с внесением азотных подкормок

[10] – [12] по технологии *on-line* (синоним *real-time*). По технологии *off-line* предварительно проводится обследование почвы/посевов наземными или дистанционными методами, и на основе результатов обследования затем создается файл-задание по внесению удобрений или пестицидов. В качестве основы для файла-задания можно использовать индексные карты со спутниковых снимков высокого разрешения, аэрофотосъемка, обследование оптическими датчиками. При этом следует понимать, что результаты, полученные с помощью пассивных датчиков, всегда будут отличаться от результатов при работе с активными датчиками, поэтому результаты беспилотной и спутниковой съемки должны быть верифицированы по стандартным показателям на земле. Стандартной оценкой NDVI, не зависящей от условий освещенности и атмосферных помех, являются результаты обследования оптическим датчиком с активным источником излучения [13] – [16].

Цель работы: оценить возможность использования спектрозональной аэрофотосъемки с применением БПЛА для мониторинга посевов озимой пшеницы по вегетационному индексу NDVI и сравнить результаты аэрофотосъемки с результатами наземного сканирования оптическим датчиком GreenSeeker® RT 200 в разные фазы развития посевов.

Материал и методы исследования

Исследования проводились в течение вегетационного сезона 2014–2015 гг. на посевах озимой пшеницы (отобранная форма Л-1 сорта Звезда) на поле №2 Центра точного земледелия РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева. Площадь поля 1,4 га (100×140 м). Посев проведен 5 сентября 2014 г. со стандартной нормой высева 5,5 млн. шт. зёрен/га.

На опыте Центра точного земледелия (ЦТЗ) при возделывании пшеницы сравниваются два способа обработки почвы: традиционная классическая обработка (вспашка с оборотом пласта) и ресурсосберегающая нулевая обработка (прямой посев). На данных вариантах опыта используются сеялки с разной шириной междурядий: на вспашке расстояние между рядками посева составляет 12 см (сеялка AMAZONE D9-30), на нулевой обработке – 18 см (сеялка для прямого посева AMAZONE DMC-Primera).

Разная ширина междурядий в начальные фазы развития посева оказывает существенное влияние на показатель NDVI всходов, несмотря на одинаковую норму высева семян. По мере роста пшеницы с применением двух азотных подкормок (N70+N70) в течение вегетации растения в соседних рядках посева смыкаются, и различия по NDVI на вариантах под разными технологиями обработки почвы становятся не столь существенными. Наличие полос опыта с подкормками и без подкормки на площадках с разными способами обработки почвы позволяет использовать опытное поле как модельный полигон для оценки индекса NDVI посевов пшеницы в разных условиях возделывания.

Измерение NDVI посевов проводили периодически от фазы всходов (второй лист) до фазы молочной спелости. Для сопоставления результатов наземной и дистанционной аэрофотосъемки проводились одновременные обследования в наиболее важные периоды развития посевов: в фазу кущения осенью (31 октября и 18 ноября 2014 г.), в фазу кущения весной (27–29 апреля 2015 г.), в фазу выхода в трубку (21–22 мая 2015 г.). Наземное сканирование посевов проводили на опыте с помощью оптического датчика GreenSeeker® RT200 (далее в тексте – GS), беспилотную съемку осуществляли с помощью БПЛА eBee AG SenseFly (далее – SF), с камерой Canon S110 NIR.

По результатам аэрофотосъемки и наземного сканирования опытного поля в каждый срок обследования построены карты распределения индекса NDVI. Первичная обработка спектральных данных БПЛА eBee AG SF проведена в программном обеспечении Pix4DMapper Ag, а первичная обработка данных GS – в программе SMS Advanced. Полученные результаты имеют разную детальность съемки: у SF размер пиксела 10–20 см, у GS диаметр точки опробования около 1 м, расстояние между точками 1,5–3 м. Для совместного анализа пространственных карт, полученных двумя методами, проведена процедура подготовки первичных данных: фильтрация методом главных компонент для отсека пикселей без растительности и сглаживание методом скользящего окна. Извлечение с карт пространственной информации в табличном виде проводили по регулярной сетке с шагом 1,5×3 м, что соответствует стандартной

для опыта частоте закладки точек при обследовании прибором GS. Математическая обработка табличных данных проведена в программе MS Office Excel. Стандартная процедура подготовки данных к анализу позволила сравнить сходимость показателей от двух приборов между собой в каждый срок обследования.

Результаты исследования

Совместные обследования дистанционным и наземным методами (4 раза за сезон) позволили сравнить оценку NDVI по результатам аэрофотосъёмки пассивным датчиком SF и активным датчиком GS в разные фазы развития.

Для графического представления результатов из пространственных карт NDVI были выбраны пробные линии поперек посева, «трансекты» (рис. 1). Расположение пробных линий в разные сроки выбрано на поле случайным способом, за исключением первых двух сроков (31 октября и 18 ноября), где линии совпадают (рис. 1, а). Результаты аэрофотосъёмки и наземного сканирования в любой срок обследования дают сходную картину пространственного распределения NDVI, однако показатели NDVI, полученные с помощью SF из-за высокой детальности съёмки варьируют на близких расстояниях сильнее, чем показатели, снятые прибором GS (рис. 1). Два

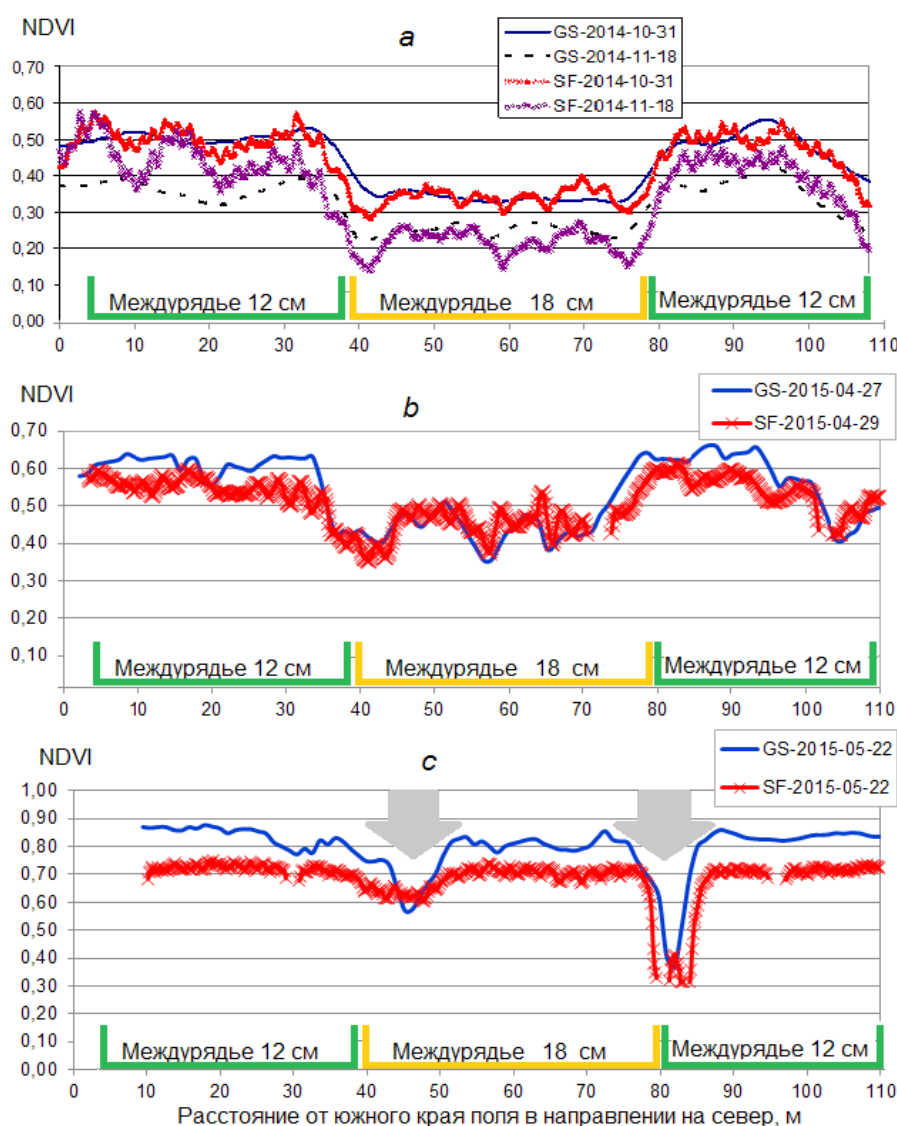


Рисунок 1. Показатели NDVI озимой пшеницы в разные сроки обследования, полученные датчиками GreenSeeker (GS) и SenseFly eBee AG Canon S110 NIR (SF). а – фаза кущения, осень (31 октября и 18 ноября 2014 г.); б – фаза кущения, весна (27–29 апреля 2015 г.); в – фаза выхода в трубку 22 мая 2015 г. Широкими стрелками на схеме в показаны зоны без внесения азотной подкормки (контроль).

первых срока обследования показывают хорошую сходимость результатов между собой, т.к. пшеница находилась в одной фазе развития в оба эти срока. Значения NDVI к 18 ноября 2014 г. снизились по сравнению с первым сроком на 0,10–0,15 ед. (рис. 1, *a*), что связано с морозной погодой в момент обследования.

Весной 2015 г. снег на поле ЦТЗ сходил неравномерно, начало активного снеготаяния пришлось на первую декаду марта, полностью снег сошёл 19 марта. 11 и 19 марта посе́вы были обследованы с помощью БПЛА, построена карта водотоков, но наземные съёмки NDVI в этот срок не проводились, т.к. из-за талой воды передвижение по полю было практически невозможно. Первая подкормка азотными удобрениями проведена 24 апреля (аммиачная селитра 70 кг/га по д.в.). Согласно схеме опыта ЦТЗ на поле озимой пшеницы есть варианты с подкормкой и без подкормки (контроль). Через 3–5 дней после NDVI на двух вариантах обработки почвы осталась прежней: на вариантах с широким междурядьем показатели NDVI ниже, чем на вариантах с узким междурядьем (рис. 1, *b*). Полосы с подкормкой и без подкормки на мо-

мент обследования 27–29 апреля по значению NDVI не различаются.

Благоприятные погодные условия весны 2015 г. способствовали отличному развитию биомассы посе́ва. В конце фазы выхода в трубку, через месяц после первой подкормки, высота растений пшеницы достигала 50–53 см, у растений было по 4–5 полноценных яруса зеленых листьев, вышел флаговый лист. К этому сроку обследования рядки посе́вов полностью сомкнулись, на фоне подкормки растения не испытывали недостатка легкодоступного азота, индекс NDVI достиг пикового значения 0,83–0,87 по всей площади поля независимо от ширины междурядьев, а контрольные полосы без азотной подкормки заметно выделялись более низкими значениями NDVI (рис. 1, *c*, зоны, отмеченные стрелками).

При сопоставлении результатов наземных и дистанционных измерений в разные сроки было выявлено, что абсолютные значения NDVI, измеренные пассивным датчиком ни в один из сроков полностью не совпадают со значениями, определёнными с помощью активного датчика GS (рис. 1). В осенние сроки обследования

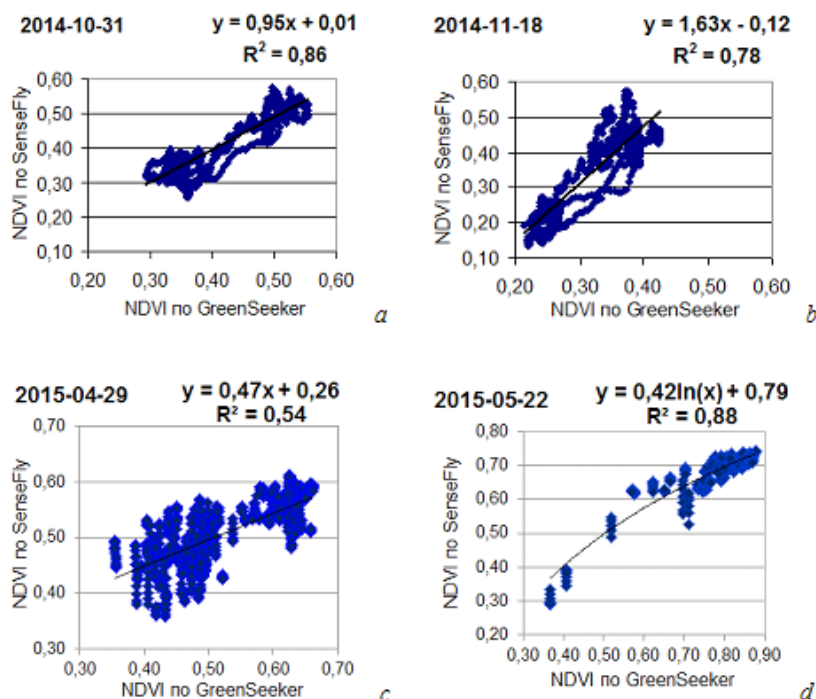


Рисунок 2. Теснота связи между показателями NDVI, измеренными при наземном сканировании прибором GreenSeeker® RT200 (показатель по оси OX) и при дистанционной аэрофотосъёмке SenseFly eBee AG Canon S110 NIR (показатель по оси OY) в разные сроки обследования: *a, b* – фаза кущения, осень (31 октября и 18 ноября 2014 г.); *c* – фаза кущения, весна (27–29 апреля 2015 г.); *d* – фаза выхода в трубку (22 мая 2015 г.). В уравнениях: X=NDVI по GreenSeeker® RT200, Y=NDVI по SenseFly eBee AG Canon S110 NIR

связь между показателями NDVI с двух приборов линейная, тесная, $R^2=0,78-0,86$ (рис. 2, *a, b*), однако коэффициенты пересчёта данных с активного датчика GS на данные камеры SF для этих сроков не совпадают. В условиях морозной погоды 18 ноября пассивный датчик SF показал завышенную оценку индекса NDVI по сравнению с GS (рис. 1, *a*; рис. 2, *b*). В целом, пересчёт показателей, полученных активным датчиком GS, в показатели пассивной камеры SF в фазу кущения осуществляется по формуле линейной связи (рис. 2 *a, b, c*), а в фазу выхода в трубку – по логарифмической (рис. 2 *d*). Хотя коэффициенты пересчёта для разных сроков не совпадают, для всех приведенных уравнений коэффициент детерминации $R^2=0,54-0,88$ (при $p<0,05$), что подтверждает тесную связь показателей NDVI, полученных пассивным и активным датчиком. Несовпадение формул пересчёта для разных сроков можно объяснить разными условиями освещённости во время съёмки.

Выводы

По результатам мониторинга посевов озимой пшеницы в разные фазы развития можно сделать вывод о том, что с применением аэрофотосъёмки аппаратом SenseFly eBee AG

Canon S110 NIR достигается воспроизводимая картина пространственного распределения индекса NDVI, в высокой степени совпадающая с результатами наземного сканирования оптическим датчиком GreenSeeker® RT200. Это позволяет использовать беспилотную съёмку в качестве альтернативы обследования оптическими наземными датчиками. Для уточнения и поправки абсолютных значений NDVI, полученных с помощью фотокамеры NIR-диапазона, рекомендуется закладывать в посеве калибровочные тестовые площадки, где одновременно с аэрофотосъёмкой следует проводить наземное измерение NDVI оптическим датчиком с активным источником излучения.

По результатам аэрофотосъёмки в диапазоне NIR за несколько минут может быть сформирован файл-предписание для внесения азотных подкормок по технологии *off-line* с учетом неоднородности посева. Преимуществами обследования посевов с помощью беспилотной аэрофотосъёмки являются высокие оперативность и производительность, достоверность получаемой информации и возможность проводить оценку даже в таких условиях, когда выезд на поле затруднён (например, во время весеннего снеготаяния).

03.03.2016

Список литературы:

1. Бужинский Е. Приоритеты развития беспилотников: от военного дела к экономике / Индекс безопасности № 3 (106), том 19, 2014. – С. 123–132.
2. Гришина Ю.С. Дроны на службе миру // Робототехника и системный анализ. 2015. Выпуск 1. С. 80–85.
3. Ларин Я.А., Усманова В.Р., Железняков Д.В. БПЛА гражданского назначения // В сборнике: Исследования молодых ученых – вклад в инновационное развитие России / Астрахань, 2014. С. 188–189.
4. Коротаев А.А., Новопашин Л.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга сельскохозяйственных угодий и посевных площадей в аграрном секторе // Аграрный вестник Урала. 2015. № 12. С. 38–42.
5. Сметнев А.С., Зимин В.К., Юдин Ю.Б., Скобеев И.Н. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2015. № 18 (23). С. 51–56.
6. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 95–105.
7. Шумилов Ю.В., Данилов Р.Ю., Костенко И.А., Данилова А.В., Семочкин К.В., Пачкин А.А. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в технологии точного земледелия / Молодой ученый. 2015. № 9-2 (89). С. 146–147.
8. Петрушин А.Ф., Митрофанов Е.П. Опыт использования БПЛА для мониторинга состояния сельскохозяйственных земель // Материалы Всеросс. научн. конф.: Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве. Санкт-Петербург: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 81–84.
9. Железова С.В., Вьюнов М.В., Березовский Е.В., Васин К.В. Применение беспилотной аэрофотосъёмки для оценки состояния почвы и посевов на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева // Материалы Всеросс. научн. конф.: Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве. Санкт-Петербург: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 76 – 80
10. Muñoz-Huerta Rafael F. et al. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances Rosalia V. Ocampo-Velazquez. / Rafael F. Muñoz-Huerta, Ramon G. Guevara-Gonzalez, Luis M. Contreras-Medina, Irineo Torres-Pacheco, Juan Prado-Olivarez // Sensors. 2013, 13, p. 10823–10843. DOI:10.3390/s130810823. Режим доступа URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/8/10823> (дата обращения 21.11.2015)
11. Березовский Е.В., Железова С.В., Гусев Д.В. Использование оптических сенсоров для управления производственным процессом озимой пшеницы // Материалы междунар. науч.-практ. конф.: Геоинформационные технологии в сельском хозяйстве. Оренбург, ОГАУ. 2013. С. 171–176
12. Walsh O. et al. Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) / Olga S. Walsh, A. R. Klatt, J. B. Solie, C. B. Godsey, W. R. Raun. // Precision Agriculture. 2013, 14, p. 343–356. DOI 10.1007/s11119-012-9299-9. Режим доступа URL: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11119-012-9299-9.pdf> (дата обращения 21.11.2015)

13. Jones C. L. et al. Remote sensing to estimate chlorophyll concentration in spinach using multi-spectral plant reflectance / C. L. Jones, P. R. Weckler, N. O. Maness, R. Jayasekara, M. L. Stone, D. Chrz // American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351. 2007. Vol. 50(6): p. 2267-2273. Режим доступа URL: http://nue.okstate.edu/Index_Publications/chl_conc_spinach.pdf (дата обращения 21.11.2015)
14. Erdle K., Mistele B. and Schmidhalter U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars // Stickstoff in Pflanze, Boden und Umwelt. 2011. p. 222. Режим доступа URL: http://www.stickstoff2011.uni-kiel.de/tagungsband/Tagungsband_2011.pdf (дата обращения 21.11.2015)
15. Kipp S., Mistele B. and Schmidhalter U. Influence of external effects on the accuracy of active canopy sensors // Stickstoff in Pflanze, Boden und Umwelt. 2011. p. 223. Режим доступа URL: http://www.stickstoff2011.uni-kiel.de/tagungsband/Tagungsband_2011.pdf (дата обращения 21.11.2015)
16. Zaman-Allah M. et al. Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize // M. Zaman-Allah, O. Vergara, J. L. Araus, A. Tarekne, C. Magorokosho, P. J. Zarco-Tejada, A. Hornero, A. Hernández Albà, B. Das, P. Craufurd, M. Olsen, B. M. Prasanna and J. Cairns / Plant Methods. 2015, 11:35. DOI 10.1186/s13007-015-0078-2 Режим доступа URL: http://digital.csic.es/bitstream/10261/125557/1/13007_2015_Article_78.pdf (дата обращения 21.11.2015)

Сведения об авторах:

Железова Софья Владиславовна, доцент кафедры земледелия и методики опытного дела ФБГОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, кандидат биологических наук, доцент
Россия, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, тел.: +7 (499) 976-1642
e-mail: soferrum@mail.ru

Ананьев Александр Андреевич, студент кафедры земледелия и методики опытного дела ФБГОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева
e-mail: ananev_987@mail.ru,

Вьюнов Михаил Владимирович, руководитель отдела обработки ООО НПК «Джи Пи Эс Ком»
Россия, 109387, г. Москва, Ул. Люблинская, 42, тел.: +7 (495) 232-2870
e-mail: mvv@gpscom.ru

Березовский Егор Валерьевич, заведующий Полевой опытной станцией ФБГОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, кандидат с-х наук,
Россия, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, тел.: +7 (499) 976-1182
e-mail: pole-st@mail.ru