

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

А.В. Введенская¹

anastasiya.vvedenskaya@gmail.com

В.В. Введенский²

vaval-ved@yandex.ru

М.С. Гинс³

anirr@bk.ru

А.М. Хорохов¹

a.horohorov@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Аграрно-технологический институт Российского университета дружбы народов, Москва, Российская Федерация

³ Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур, пос. ВНИИССОК, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Разработана оптико-электронная автоматизированная система контроля азотообеспеченности сельскохозяйственных растений. Обоснован спектральный фотометрический способ мониторинга состояния зеленой фитомассы по обеспечению растений минеральными и органическими веществами. Приведены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать основные параметры оптико-электронной аппаратуры с требуемым быстродействием, пространственным и спектральным разрешением. Приведены основные характеристики разработанного гиперспектрометра

Ключевые слова

Оптоэлектроника, гиперспектрометр, мониторинг, азотообеспеченность, вегетативные индексы

Поступила в редакцию 15.12.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Современные оптические и оптико-физические методы измерения и приборы применяются во многих областях науки и производства, в том числе и в системе современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Одним из актуальных вопросов, которые можно решить методами оптической диагностики, является определение количества общего азота в растениях на основе спектрометрии их зеленой массы параметров растений в видимом и ИК-диапазонах в режиме реального времени [1, 2]. Недеструктивные методы анализа листовой пластины на основе обработки спектров отражения ткани не нашли широкого практического применения в РФ. Это можно объяснить тем, что уникальность спектров отражения для каждого отдельного сорта растения исключает возможность успешных измерений параметров растений отечественной селекции дорогостоящими устройствами иностранного производства, спроектированными с учетом особенностей зарубежных сортов. Кроме того, закрытые алгоритмы обработки зарубежных приборов не позволяют проводить их калибровку под сорта и гибриды растений отечественной селекции и под азотные удобрения отечественного производства.

Практическая ценность технологии бесконтактной диагностики азотообеспеченности заключается в повышении эффективности внесения азотных удобрений и снижении экологической нагрузки на окружающую среду. Отсутствие отечественного аппаратного обеспечения для ее реализации позволяет сделать вывод о необходимости создания соответствующего прибора. Настоящая статья посвящена разработке оптико-электронной системы мониторинга состояния сельскохозяйственных растений на основе спектрального анализа пигментного состава растений сортов отечественной селекции в режиме реального времени.

Обоснование метода спектрального анализа пигментного состава растений. Характерным признаком состояния растений является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растений с их спектрально отражательными способностями позволяют использовать полученную оптическую информацию для идентификации типов и состояний.

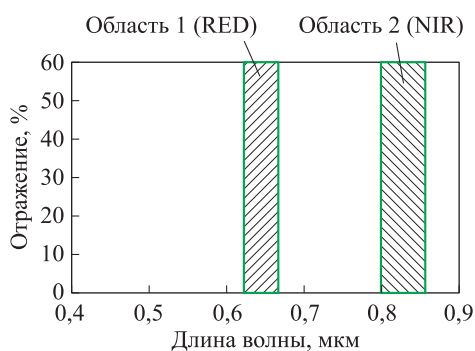


Рис. 1. Участки характеристической кривой отражения растений (усредненной), используемые для расчета NDVI

Одним из важнейших параметров, характеризующих состояние растений в период вегетации, является спектральный коэффициент отражения [3], обобщенный график которого показан на рис. 1.

Практически для всех видов растений в красной области спектра (0,6... 0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,8...1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточными структурами листа [4].

При обработке спектральной информации часто используют обобщенные числовые параметры. Таким параметром, учитывающим особенность коэффициента отражения на разных длинах волн, является спектральный индекс объекта [5]. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растений, получили общепринятое название вегетативных индексов [6]. Наибольшее распространение в качестве показателя количества фотосинтетически активной биомассы получил нормальный дифференцированный вегетативный индекс — NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Индекс NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений и вычисляется по следующей формуле:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}},$$

где NIR — средняя интенсивность отраженного света в ближней инфракрасной области спектра; RED — средняя интенсивность отраженного света в красной области спектра.

Вегетативные индексы широко используются в целях мониторинга состояния посевов, в том числе для определения химического состава ткани растения. Зависимость спектрального коэффициента отражения от концентраций азота индивидуальна для каждого вида растения. Кроме того, границы областей RED и NIR для разных видов растений различны, что следует учитывать при разработке и калибровке конкретной спектральной аппаратуры. Для зеленой растительности индекс обычно принимает значения 0,2–0,8 и чем больше содержание азота в почве, тем выше его значение [7].

Создание оптико-электронной системы, позволяющей получать спектральные данные отдельных участков характеристической кривой отражательной способности растений с возможностью последующего расчета вегетативного индекса NDVI в режиме реального времени для сортов отечественной селекции, позволит проводить исследования для создания базы данных нормальной азотообеспеченности растений, а впоследствии проводить измерения в полевых условиях с определением концентраций азота в почве по зарегистрированным спектральным данным и, кроме того, сформировать базы данных качества полей и рисков неурожая для применения в сфере агрострахования и мониторинга чрезвычайных ситуаций. Таким образом, разработка аппаратуры для исследования спектральных характеристик отражения растения в целях последующего мониторинга содержания азота в почве является актуальной научно-технической и хозяйственной задачей.

Разработка и анализ оптической системы. В МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Аграрно-технологическим институтом РУДН разработан оптико-электронный прибор для исследования спектральной отражательной способности растений. Прибор устанавливается на подвижном сельскохозяйственном транспортном средстве (ТС) так, что его оптическая ось составляет с вертикалью угол φ (рис. 2).

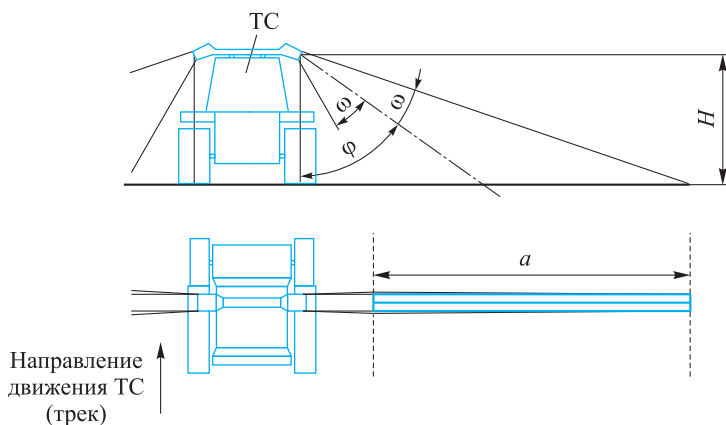


Рис. 2. Схема работы оптико-электронной системы мониторинга

Мгновенное поле зрения прибора представляет собой прямоугольник $a \times b$, ширина которого сравнительно мала $b = 0,3$ м, а длина определяется высотой установки H и угловым полем зрения 2ω прибора:

$$a = H [\operatorname{tg}(\omega + \varphi) + \operatorname{tg}(\omega - \varphi)],$$

при $H = 2$ м, $2\omega = 50^\circ$ и угле $\varphi = 25^\circ$ $a = 8$ м.

При считывании информации с мгновенного поля зрения со стандартной частотой кадров $\nu = 25$ Гц максимально допустимая скорость ТС $v_{\max} = b\nu = 7,5$ м/с = 27 км/ч.

Если принять скорость ТС $v = 20$ км/ч, то площадь контролируемого в течение одного часа участка составит более одного гектара. При установке двух приборов по разным сторонам ТС указанная площадь увеличивается вдвое, т. е. производительность прибора достаточно высока. Оптическая схема прибора выполнена в виде гиперспектрометра (рис. 3).

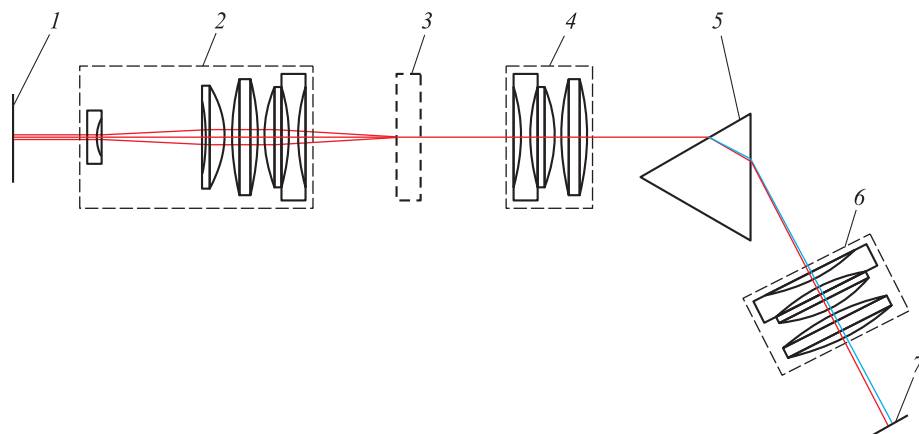


Рис. 3. Схема призмного гиперспектрометра

Исследуемая поверхность 1 (см. рис. 3) освещается естественным светом или отдельным источником излучения. Отраженное от нее излучение попадает во входной объектив 2 и фокусируется в плоскости изображения, где расположена спектральная щель 3. Щель определяет мгновенное поле зрения 2ω в пространстве предметов. Коллимирующим объективом 4 прошедшее излучение преобразуется в пучки параллельных лучей. Разложение излучения в спектр осуществляется призмой 5, после чего изображение щели переносится проекционным объективом 6 на фотоприемную матрицу 7, расположенную в его фокальной плоскости. В целях унификации объективы 4 и 6 выбраны одинаковыми. Они же входят в состав более сложного объектива 2.

Основные параметры системы:

- рабочий диапазон длин волн $\lambda = 600 \dots 850$ нм;
- фокусное расстояние $f' = 7,8$ мм;

- относительное отверстие $\frac{D}{f'} = 1 : 2,5$;
- угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 50^\circ$.

Глубина резко изображаемого пространства. Требуемая схема расположения проектируемого прибора на ТС не предусматривает возможности расположить оптическую ось прибора перпендикулярно поверхности предметов, поэтому для использования всего поля зрения необходимо, чтобы все пространство предметов, захватываемое полем зрения, изображалось резко.

Ближняя R_1 и дальняя R_2 границы резко изображаемого пространства (рис. 4) определяются выражениями [8]:

$$R_1 = \frac{Rf'^2}{f'^2 + K(R - f')z}, \quad R_2 = \frac{Rf'^2}{f'^2 - K(R - f')z},$$

где R — дистанция фокусировки; f' — фокусное расстояние объектива 2 (см. рис. 3); $K = \frac{f'}{D}$ — диафрагменное число; z — допустимый диаметр кружка нерезкости в пространстве изображений.

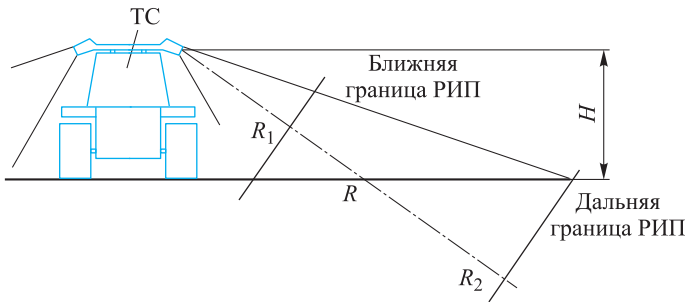


Рис. 4. К расчету глубины резко изображаемого пространства (РИП)

В представленных соотношениях допустимый кружок нерезкости определяется выражением

$$z = b\beta,$$

где β — увеличение объектива 2, определяемое соотношением $z = f'/R$.

Пространственное разрешение. Оценка пространственного разрешения гиперспектрометра строится с использованием модуляционной передаточной функции (МПФ). В силу особенностей оптической системы, МПФ в направлении по треку (см. рис. 2) и поперек трека определяются разными соотношениями.

Поперек трека МПФ определяется качеством изображения, получаемого оптической системой (рис. 5).

В направлении по треку МПФ (рис. 5, б) определяется шириной мгновенного поля зрения b , скоростью сканирования v , т. е. скоростью ТС, и частотой кадров фотоприемной матрицы ν [9]:

$$\tilde{f}(u) = \left| \frac{\sin(\pi ub) \sin(\pi uv / v)}{\pi^2 u^2 b v / v} \right| = \sin c(\pi ub) \sin c(\pi uv / v).$$

Как видно на рис. 5 и 6, требование разрешения объекта размером $0,2 \times 0,2$ м, т. е. с пространственной частотой не меньше 5 м^{-1} выполняется в направлении по треку и поперек.

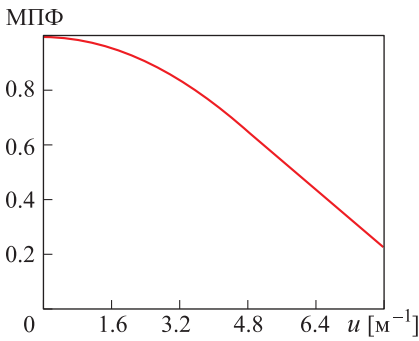
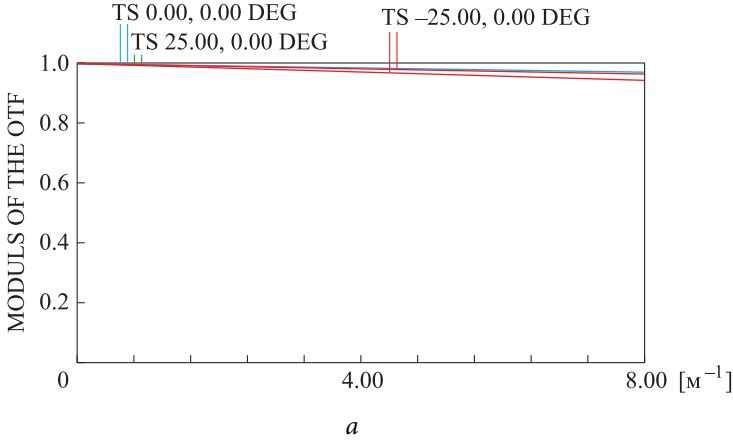


Рис. 5. Модуляционная передаточная функция оптической системы в направлениях, перпендикулярном треку (а) и по треку (б)

Спектральное разрешение и ширина спектральных каналов. Оценим спектральное разрешение и ширину спектральных каналов. Спектральное разрешение определяется размером щели p , углом призмы A , фокусным расстоянием коллимирующего объектива f_k , показателем преломления $n(\lambda)$ и дисперсией призмы $\frac{dn(\lambda)}{d\lambda}$ [9]:

$$\Delta\lambda = \frac{p}{2f_k} \sqrt{\left[\sin\left(\frac{A}{2}\right) \right]^{-2} - n(\lambda)^2} \left| \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \right|^{-1}.$$

При использовании в качестве регистрирующего элемента фотоприемной матрицы следует учитывать ширину спектрального канала, т. е. ширину спек-

трального диапазона, приходящегося на один пиксель матрицы. Если m — линейный размер матрицы, с учетом биннинга равный размеру пятна рассеяния в сагиттальной плоскости, и f_n — фокусное расстояние проекционного объектива, то

$$\Delta\lambda_k = \frac{m}{2f_n} \sqrt{\left[\sin\left(\frac{A}{2}\right) \right]^{-2} - n(\lambda)^2 \left| \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \right|^{-1}}.$$

Отношение $\Delta\lambda$ и $\Delta\lambda_k$, равное $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_k} = \frac{pf_n}{mf_k}$, должно удовлетворять неравенству $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_k} < 1$ [10]. В этом случае спектральные каналы будут регистрироваться раздельно, т. е. каналы не будут накладываться друг на друга.

Основные параметры гиперспектрометра

Угол зрения поперек трека	50°
Число пикселей поперек трека	161
Пространственное разрешение поперек и по треку, м	0,2
Спектральный диапазон, мкм	0,60–0,85
Число спектрально независимых каналов	30
Отношение сигнал/шум при дневном и искусственном освещении	более 50
Скорость движения ТС, км/ч	20
Высота установки прибора, м	2
Глубина резко изображаемого пространства, м	1–11

Эти характеристики позволяют сделать вывод о применимости системы для работы на существующих сельскохозяйственных машинах. Пространственное разрешение по треку рассчитано с учетом скорости движения реальных машин и вместе с пространственным разрешением поперек трека удовлетворяет требованиям, основанным на предельной точности внесения в почву азотного удобрения разбрасывателями. Поле зрения и глубина резко изображаемого пространства обеспечивают захват достаточной для мониторинга части зоны, участвующей в процессе внесения удобрений разбрасывателем. Пространственное и спектральное разрешения позволяют обеспечить наличие предполагаемого числа каналов, необходимых для определения вегетативных индексов и расчета концентраций вносимых веществ с точностью, превышающей нынешний уровень развития технологий.

Заключение. Спектр отражения фотосинтезирующей ткани зависит от содержания в ней различных пигментов и откликается на изменение ее пигментного состава. Определение зависимостей между пигментным составом ткани и спектрами отражения позволяют выработать метод неdestructивного анализа пигментного состава растительных тканей, основанный на измерении коэффи-

циентов отражения в области определенных длин волн и рассчитать индексы, отражающие содержание пигментов в ткани.

Разработана гиперспектральная оптико-электронная система с призмным диспергирующим элементом и со сканированием по пространственной координате при движении машины-носителя по полю. Моделирование и анализ полученной системы показал возможность и целесообразность ее использования в условиях современного уровня развития сельскохозяйственных технологий.

Проведенные исследования — это первый этап формирования многоцелевого комплекса для постоянного мониторинга состояния полей РФ и создания соответствующих баз данных. Дальнейшие разработки будут применимы в задачах определения азотообеспеченности, имеющих как экономическую, так и экологическую ценность, в системе отслеживания качества полей и рисков неурожаев, представляющей интерес не только непосредственно в сельскохозяйственной деятельности, но и в агростраховании и мониторинге чрезвычайных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений* / М.Н. Мерзляк, А.А. Гительсон, О.Б. Чивкунова, А.Е. Соловченко, С.И. Погосян // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 785–792.
2. *Афанасьев Р.А., Сопов И.В., Галицкий В.В.* Принципы и методы дифференцированного применения удобрений с использованием фотометрии // Плодородие. 2008. № 6. С. 14–17.
3. *Белоусова К.В.* Фотометрическая диагностика азотного питания растений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИАгрохимии, 2009. С. 9–11.
4. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетативные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
5. *Сопов И.В.* Влияние азотных удобрений на показатели растительной диагностики и продуктивность зерновых культур и горчицы белой в условиях центрального района нечерноземной зоны: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИАгрохимии, 2009. С. 15–17.
6. *Фотометрическая диагностика азотного питания зерновых культур* / Р.А. Афанасьев, И.В. Сопов, Е.В. Березовский, А.В. Мельников, А.В. Сорокин // Материалы Всероссийского совещания «Экологические функции агрохимии в современном земледелии». М.: ВНИИАгрохимии, 2008. С. 32–35.
7. *Будаговский А.В., Будаговская О.Н., Ленц Ф.* Новый подход к проблеме функциональной диагностики растений // Аграрная наука. 2009. № 9. С. 19–21.
8. *Якшенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. С. 201–203.
9. *Орлов А.Г.* Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов: Дис. ... канд. техн. наук. М.: ИХФ РАН им. Н.Н. Семенова, 2008. С. 120–135.
10. *Заглубский А.А., Цыганенко Н.М., Чернова А.П.* Основы оптических измерений. СПб.: Соло, 2007. С. 56–57.

Введенская Анастасия Валентиновна — магистр МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Введенский Валентин Валентинович — канд. с.-х. наук, доцент, заместитель руководителя департамента по научной работе Аграрно-технологического института Российского университета дружбы народов (Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, корп. 2).

Гинс Мурат Сабирович — д-р биол. наук, чл.-корр. РАН, заведующий лабораторией Всероссийского НИИ селекции и семеноводства овощных культур (Российская Федерация, 143080, Московская обл., пос. ВНИИССОК, Селекционная ул., д. 14).

Хорохоров Алексей Михайлович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Введенская А.В., Введенский В.В., Гинс М.С., Хорохоров А.М. Оптико-электронная система мониторинга состояния сельскохозяйственных растений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 43–53.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-43-53

OPTO-ELECTRONIC SYSTEM FOR AGRICULTURAL PLANTS CONDITION MONITORING

A.V. Vvedenskaya¹

anastasiya.vvedenskaya@gmail.com

V.V. Vvedenskiy²

vaval-ved@yandex.ru

M.S. Gins³

anirr@bk.ru

A.M. Khorokhorov¹

a.horokhorov@yandex.ru

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Agrarian Technological University of RUDN University, Moscow, Russian Federation**

³ **All-Russian Research Institute of Selection and Vegetable-Seed Industry, VNISSOK settlement, Moscow Region, Russian Federation**

Abstract

The work deals with development of the opto-electronic automated control system for N-procuring of agricultural plants. The study substantiated the spectral photometric method for monitoring the state of green phytomass in providing plants with mineral and organic substances. Moreover, the research focuses on the analytical relationships that make it possible to calculate the basic parameters of opto-electronic equipment with the required speed, spatial and spectral resolution. Finally, the work gives the main characteristics of the developed hyperspectrometer

Keywords

Opto-electronics, hyperspectrometr, monitoring, N-procuring, vegetation indicies

REFERENCES

- [1] Merzlyak M.N., Gitel'son A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Pogosyan S.I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 50, no. 5, pp. 704–710.
DOI: 10.1023/A:1025608728405
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1025608728405>
- [2] Afanas'ev R.A., Sopov I.V., Galitskiy V.V. Approaches and experience of the differentiated application of fertilizers using photometry. *Plodородie*, 2008, no. 6, pp. 14–17 (in Russ.).
- [3] Belousova K.V. Fotometricheskaya diagnostika azotnogo pitaniya rasteniy: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Photometric diagnostics of plants nitrogenous nutrition]. Moscow, VNIИ agrokhimii Publ., 2009. Pp. 9–11.
- [4] Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral characteristics of vegetation and vegetation indexes. *Geomatika*, 2009, no. 3, pp. 28–32 (in Russ.).
- [5] Sopov I.V. Vliyanie azotnykh udobreniy na pokazateli rastitel'noy diagnostiki i produktivnost' zernovykh kul'tur i gorchtsy beloy v usloviyakh tsentral'nogo rayona nechernozemnoy zony: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Effect of nitrogen fertilizers on plant diagnostics indexes and productivity of crops and runchweed in conditions of nonchernozem belt central region]. Moscow, VNIИ agrokhimii Publ., 2009. Pp. 15–17.
- [6] Afanas'ev R.A., Sopov I.V., Berezovskiy E.V., Mel'nikov A.V., Sorokin A.V. [Fotometrical diagnostics of cropsnitrogenous nutrition]. *Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya "Ekologicheskie funktsii agrokhimii v sovremennom zemledelii"* [Proc. Russ. conf. "Ecological functions of agrochemistry in modern farming"]. Moscow, VNIИagrokhimii Publ., 2008. Pp. 32–35.
- [7] Budagovskiy A.V., Budagovskaya O.N., Lents F. New approach to the problem of functional diagnosis of plants. *Agrarnaya nauka* [Agrarian science], 2009, no. 9, pp. 19–21 (in Russ.).
- [8] Yakshenkov Yu.G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Optoelectronic devices theory and calculation]. Moscow, Logos Publ., 2004. Pp. 201–203.
- [9] Orlov A.G. Razrabotka i issledovanie aviatsionnogo giperspektrometra vidimogo i blizhnego IK diapazonov: Dis. kand. tekhn. nauk [Development and research on airbornehyperspectrometer of visible and near infrared region. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Semenov IKhF RAN, 2008. Pp. 120–135.
- [10] Zagrubskiy A.A., Tsyganenko N.M., Chernova A.P. Osnovy opticheskikh izmereniy [Fundamentals of optical measurements]. Sankt-Petersburg, Solo Publ., 2007. Pp. 56–57.

Vvedenskaya A.V. — Master's degree student, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Vvedenskiy V.V. — Cand. Sc. (Agricult.), Assoc. Professor, Deputy Head of the Department for Scientific Work, Agrarian Technological University of RUDN University (Miklukho-Maklaya ul. 8, korp. 2, Moscow, 117198 Russian Federation).

Gins M.S. — Dr. Sc. (Biol.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory, All-Russian Research Institute of Selection and Vegetable-Seed Industry (Seleksionnaya ul. 5, str. 1, VNIИSSOK settlement, Moscow Region, 143080 Russian Federation).

Khorokhorov A.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Senior Researcher, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Vvedenskaya A.V., Vvedenskiy V.V., Gins M.S., Khorokhorov A.M. Opto-Electronic System for Agricultural Plants Condition Monitoring. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauma-na, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 43–53. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-43-53



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
**Л.И. Пономарева, В.А. Вечтомова,
А.С. Милосердова**

**«Бортовые цифровые
многолучевые антенные решетки
для систем спутниковой связи»**

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приведены результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru