

DOI: 10.22363/2312-797X-2017-12-1-7-16

НЕДЕСТРУКТИВНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ АЗОТООБЕСПЕЧЕННОСТИ РАСТЕНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ

А.В. Введенская¹, В.В. Введенский²,
М.С. Гинс², А.М. Хорохоров¹

¹Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Россия, 105005

²Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 8/2, Москва, Россия, 117198

Статья посвящена решению актуальной научно-технической и хозяйственной задачи — разработке неdestructивного метода диагностики отечественных сортов растений, реализуемого посредством соответствующей оптико-электронной системы. Обоснован общий метод [1] спектрального анализа пигментного состава фотосинтезирующего аппарата растительности. Установлено соответствие концентрации минерального вещества в растении пигментному составу фотосинтезирующего аппарата растительности. Выявлен характер связи между состоянием азотообеспеченности растения, видом спектральных кривых отражения и значением основного вегетативного индекса обосновываемого метода — NDVI. Экспериментально получена зависимость спектральных показателей отражения фотосинтезирующего аппарата растительности от концентраций азотных удобрений в почве для выбранного вида растений. В ходе экспериментальных исследований подтверждены теоретические положения о возможности применения оптических неdestructивных методов для определения азотообеспеченности растения. Для реализации предложенного метода выбрана оптико-электронная система мониторинга, соответствующая уровню развития сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: точное земледелие, неdestructивные методы, спектральный состав, азотообеспеченность, вегетативные индексы, NDVI, мониторинг, гиперспектрометр

Введение. Современное сельское хозяйство движется по пути автоматизации и роботизации производства, и значительную роль в этом процессе играют приборы, несущие информацию об окружающей растению среде и о состоянии самого растения в режиме реального времени. Особый интерес для точного земледелия представляют бесконтактные устройства на основе физических методов диагностики, которые, в отличие от ранее применяемых химических методов стеблевой и листовой диагностики, не требуют использования сильных кислот и щелочей, значительных затрат времени на отбор проб и их анализ и лабораторных условий для аналитических работ.

Один из актуальных вопросов, который может быть решен методами оптической диагностики, состоит в определении количества общего азота в растениях на основе спектрометрии зеленой массы растительности в видимом и инфракрасном диапазонах в режиме реального времени [1; 2].

В нашей стране до сих пор неdestructивные методы анализа листовой пластины на основе обработки спектров отражения ткани не нашли широкого практического применения. Это объясняется, во-первых, тем, что уникальность спек-

ров отражения для каждого отдельного сорта растения исключает возможность успешных измерений сортов 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, позволяющей экономить дорогостоящие действующие вещества, повышать эффективность внесения азотных удобрений и снижать экологическую нагрузку на окружающую среду, и отсутствие отечественного аппаратного обеспечения для ее реализации позволяет сделать заключение о необходимости разработки неdestructивного метода диагностики отечественных сортов растений, реализуемого посредством соответствующей оптико-электронной системы.

Цель работы: обоснование спектрального метода анализа азотообеспеченности растений с применением теории вегетативных индексов, проведение экспериментальных исследований с получением спектральных кривых отражения растений отечественной селекции в зависимости от концентраций азотных удобрений в почве, разработка оптико-электронной системы мониторинга состояния азотообеспеченности сельскохозяйственных растений, работающей на основе спектрального анализа пигментного состава растительности в режиме реального времени.

Материалы и методы. В работах по созданию неdestructивных методов анализа пигментного состава [3] наибольшее внимание уделяется анализу спектров отражения ткани. Поскольку пигменты вносят существенный вклад в поглощение света в видимой области, изменение их содержания (вследствие старения или стрессового воздействия) и, как следствие, изменение окраски (пожелтение, побурение, хлороз) вызывает изменение спектров отражения ткани. Наличие связи между концентрацией азотных удобрений в почве и концентрацией хлорофилла в листьях позволяет перейти к подробному рассмотрению физических свойств зеленого пигмента, которые могут дать информацию об обеспеченности растений азотом. Учитывая бесконтактный характер контроля этого параметра, следует обратить внимание на оптические свойства фотосинтезирующей ткани растения.

Фотосинтезирующая ткань растения — оптическая система, которая сложным образом взаимодействует с падающим на нее светом. Помимо пигментов, поглощающих значительную часть квантов в видимой области спектра (380—780 нм), в ней находятся внутриклеточные структуры, способные рассеивать попавший в ткань свет, тем самым позволяя поглотить еще больше квантов света. Благодаря этому зеленая ткань растения способна поглощать до 90% падающего на нее света. Остальная часть света либо проходит сквозь орган, либо рассеивается, отражаясь от его поверхности.

Органы растений, содержащие большое количество хлорофилла, обладают низким отражением во всей видимой области. При этом снижение содержания хлорофилла до некоторого предела, около 5—10 нмоль/см², вызывает практически пропорциональное возрастание отражения в зеленой и ближней ИК-области спек-

тра, где коэффициенты экстинкции хлорофилла невелики, в то время как в синей, где отражение ниже еще и за счет поглощения света каротиноидами, и красной области отражение остается низким или увеличивается очень незначительно. При дальнейшем снижении содержания хлорофилла отражение в красной области начинает увеличиваться [4].

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектрально отражательными способностями позволяют использовать оптическую информацию о растительности для идентификации типов растительности и их состояния.

Одним из важнейших параметров, характеризующих состояние растений в период вегетации, является спектральный коэффициент отражения [5], обобщенный график которого показан на рис. 1.

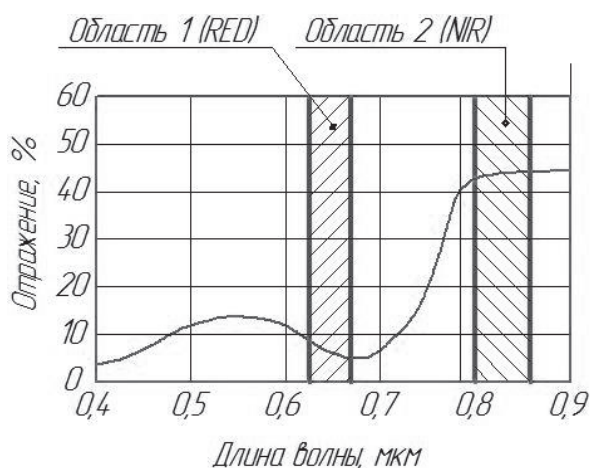


Рис. 1. Участки характеристической кривой отражения фотосинтезирующего аппарата растительности (усредненной), используемые для расчета *NDVI*

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 растительности, 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).

NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений.

Он вычисляется по следующей формуле:

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

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, и 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 от 0,2 до 0,8, и чем больше содержание азота в почве, тем выше его значения [7].

Выявление характера связи между состоянием азотообеспеченности растения и видом спектральных кривых отражения или значением вегетативного индекса NDVI позволит, во-первых, сделать заключение о применимости неdestructивного оптического метода для диагностики азотообеспеченности на основе спектрометрии зеленой массы растительности, во-вторых, сформировать требования, исходя из которых будет разрабатываться и подбираться аппаратное обеспечение метода, и в-третьих, создать базу данных для программного обеспечения.

В соответствии с вышеизложенным в Аграрно-технологическом институте РУДН совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана проведено исследование зависимости вегетативного индекса NDVI от обеспеченности почвы растений азотным удобрением. Объектами исследования послужили листья фасоли, выращенные в Аграрно-технологическом институте РУДН на различных фонах внесения удобрений в диапазоне от 0,00% от нормы до 125% от нормы с шагом в 25%, всего 6 образцов (рис. 2).



Рис. 2. Растение фасоли сорта Протва на различных фонах минерального азота

В работе использовали спектрофотометр LAMBDA 950 PERKIN ELMER (США) — прецизионный УФ/Вид/БЛИК спектрометр с двумя детекторами: фотомножителем и стабилизированным по температуре PbS-детектором. Сканирующий двухлучевой спектрофотометр с двойным монохроматором включает два источника излучения: УФ — дейтериевая лампа, Вид/БЛИК — галогенная лампа накаливания. Программное обеспечение UV WinLab. Для каждого из образцов записывали спектр отражения в видимой области (400—900 нм).

Для полевых работ применение лабораторного оборудования нецелесообразно, и для дальнейшей возможности использования данного метода в решении задач мониторинга состояния растений в поле была выбрана гиперспектральная оптическая система, которая удовлетворяет требованиям современных технологий, как по точности получения данных, так и по условиям работы в режиме реального времени.

Результаты и обсуждение. В результате проведенной работы были получены данные, содержащие информацию о коэффициентах отражения в видимой области спектра и о пигментном составе листьев растений (рис. 3).

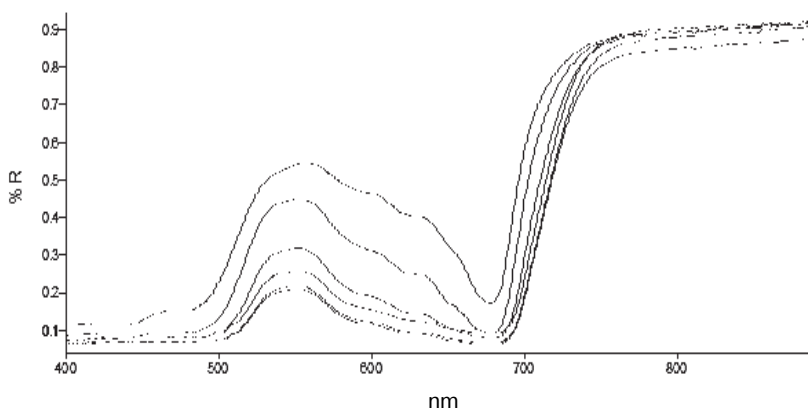


Рис. 3. Спектры отражения листьев фасоли

Максимальные значения отражения были характерны для ближней ИК-области, в которой отсутствует поглощение пигментов. Минимальные коэффициенты отражения наблюдали в полосах сильного поглощения хлорофиллов (в синей и красной областях спектра) и каротиноидов (в синей области).

По результатам съемок LAMBDA 950 на длинах волн $\lambda_1 = 630$ и $\lambda_2 = 830$ определим нормализованный вегетационный индекс, отнесенный к наиболее часто используемым в литературе [4] каналам по соотношению:

$$NDVI = \frac{\rho_{830} - \rho_{630}}{\rho_{830} + \rho_{630}}$$

Проведем расчет последовательно для первого образца, насыщенность азотным удобрением которого составляет 0% от нормы, а спектральная кривая отражения приведена на рис. 4.

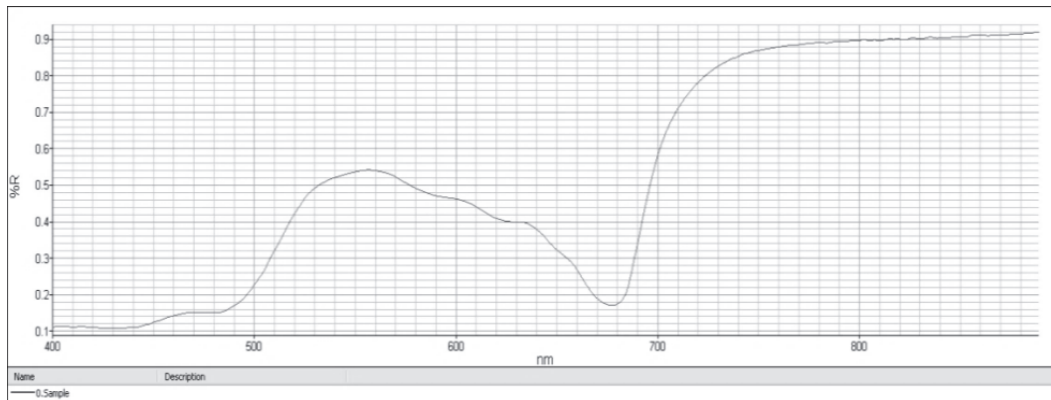


Рис. 4. Спектр отражения образца 1

Коэффициенты отражения образца один на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно равны:

$$\rho_{11} = 0,255675;$$

$$\rho_{21} = 0,819151.$$

Тогда основной вегетативный индекс:

$$NDVI = \frac{0,819151 - 0,255675}{0,819151 + 0,255675} = 0,400.$$

Аналогично был осуществлен расчет значений вегетативного индекса для остальных образцов. На основании полученных результатов можно построить зависимость вегетативного индекса от концентрации азотного удобрения в почве (рис. 5).

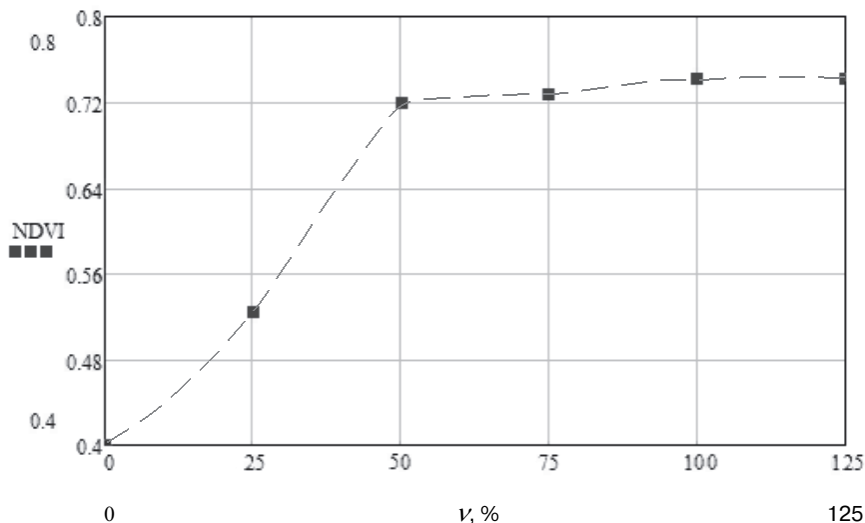


Рис. 5. Зависимость вегетативного индекса $NDVI$ от концентрации минеральных удобрений v , % в почве образцов 1—6

Данные экспериментальных исследований полностью соответствуют теории вегетативных индексов, описанной в соответствующей литературе [5—7]. Полученные значения NDVI лежат в пределах от 0,2 до 0,8 и увеличиваются с повышением концентрации азотного удобрения в почве, что подтверждает предположение о возможности использования оптических спектральных методов контроля состояния растительности по ее пигментному составу и по индексу NDVI как его количественному выражению.

На основании приведенного графика уже можно проводить предварительное определение неизвестных концентраций азотного удобрения в растении по измеренным спектральным данным. Также проведенные в ходе работы экспериментальные исследования подтвердили, что концентрация зеленого пигмента — хлорофилла в условиях лабораторных опытов находится в непосредственной зависимости от уровня азотного питания растения, что позволяет использовать показатели указанной концентрации для определения обеспеченности растений азотом.

Осуществление неdestructивной диагностики отечественных сортов растений становится возможным с применением оптико-электронной системы мониторинга, разработанной МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Аграрно-технологическим институтом РУДН.

Оптическая схема прибора выполнена в виде гиперспектрометра (рис. 6).

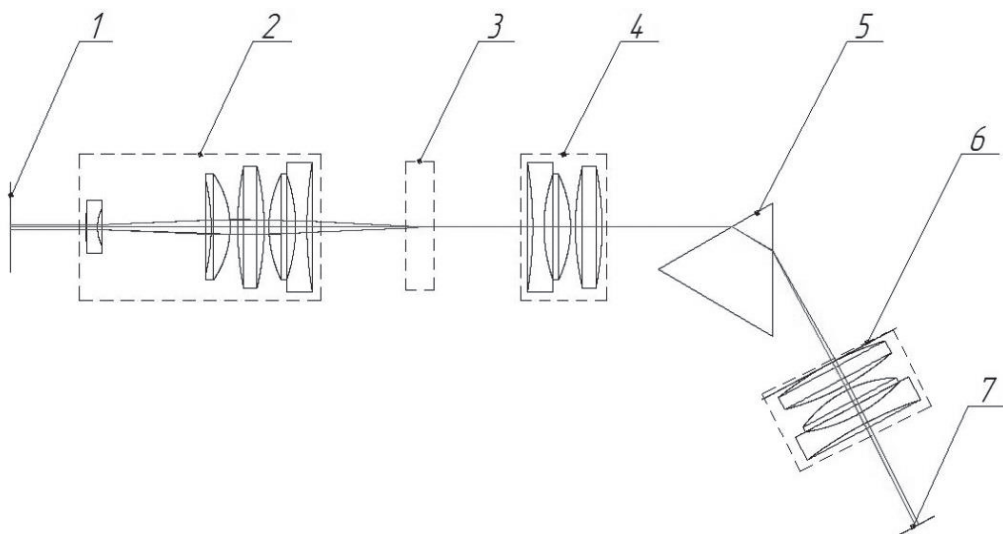


Рис. 6. Схема призмного гиперспектрометра

Исследуемая поверхность 1 (рис. 6) 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 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.

Основные параметры системы:

— рабочий диапазон длин волн: $\lambda = 600 \div 850$ нм;

— фокусное расстояние: $f' = 7,8$ мм;

— относительное отверстие: $\frac{D}{f'} = 1: 2,5$;

— угловое поле в пространстве предметов: $2\omega = 50^\circ$.

Вышеуказанный гиперспектрометр имеет характеристики, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных характеристик гиперспектрометра

Угол зрения поперек трека, °	50
Число пикселей поперек трека	161
Пространственное разрешение поперек трека, м	0,2
Пространственное разрешение по треку, м	0,2
Спектральный диапазон, мкм	0,600—0,850
Число спектрально независимых каналов	30
Отношение сигнал/шум при дневном и искусственном освещении	> 500
Скорость движения ТС, км/ч	20
Высота установки прибора, м	2
ГРИП, м	1—11

Анализ характеристик позволяет 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 азотного удобрения разбрасывателями. Поле зрения и глубина резко изображаемого пространства обеспечивают захват в область мониторинга достаточной части зоны, участвующей в процессе внесения разбрасывателем [11]. Пространственное и спектральное разрешение позволяет обеспечить наличие предполагаемого необходимого количества каналов для определения вегетативных индексов и расчета необходимых для внесения концентраций с точностью, превышающей нынешний уровень развития технологий.

Заключение. Обоснован метод неdestructивного анализа пигментного состава фотосинтезирующего аппарата растительности, основанный на измерении коэффициентов отражения в области определенных длин волн и последующем расчете вегетативных индексов.

В ходе эксперимента получены спектральные кривые отражения фотосинтезирующего аппарата растительности в зависимости от концентраций общего азота в почве. На основании этого были рассчитаны значения вегетативных индексов, последующая обработка значений которых позволила сделать заключение о состоянии азотообеспеченности изучаемого растения и о целесообразности применения неdestructивного оптического метода для диагностики азотообеспеченности на основе спектрометрии зеленой массы растительности. Предложенная оптико-элект-

ронная система позволяет осуществить реализацию предложенного метода в технологиях точного земледелия.

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

© А.В. Введенская, В.В. Введенский,
М.С. Гинс, А.М. Хорохоров, 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мерзляк М.Н. Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений / Гительсон А.А., Чивкунова О.Б., Соловченко А.Е., Погосян С.И. // Физиол. раст. 2003. Т. 50. № 5. С. 785—792.
2. Афанасьев Р.А. Принципы и методы дифференцированного применения удобрений с использованием фотометрии / Р.А. Афанасьев, И.В. Сопов, В.В. Галицкий // Плодородие. 2008. № 6. С. 14—17.
3. Белоусова К.В. Фотометрическая диагностика азотного питания растений // Автореф. дисс. ... канд-та тех. наук. ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСН. Москва, 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. дисс. ... канд-та тех. наук. ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСН. Москва, 2009. С. 15—17.
6. Афанасьев Р.А. 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.: ВНИИА, 2008. С. 32—35.
7. Будаговский А.В. Новый подход к проблеме функциональной диагностики растений / А.В. Будаговский, О.Н. Будаговская, Ф. Ленц // Аграрная наука. 2009. № 9. С. 19—21.
8. Якушенков 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 // Дисс. канд-та тех. наук. ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН, 2008. С. 120—135.
10. Заглубский А.А. Основы оптических измерений: Пособие / Цыганенко Н.М., Чернова А.П. СПб.: Соло, 2007. С. 56—57.
11. Интернет-ресурс: сельскохозяйственная техника AMAZONE // <http://www.amazone.ru/6.asp> 20.11.2016.

DOI: 10.22363/2312-797X-2017-12-1-7-16

NON-DESTRUCTIVE METHODS OF DIAGNOSTICS OF NITROGEN PROVISION OF PLANTS BY OPTOELECTRONIC SYSTEM OF PLANTS MONITORING

A.V. Vvedenskaya¹, V.V. Vvedenskiy²,
M.S. Gins², A.M. Khorokhorov¹

¹Bauman Moscow State Technical University
2 Baumanskaya str., 5, Moscow, Russia, 105005

²Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklay Str., 6, Moscow, Russia, 117198

Abstract. The article is devoted to solving actual scientific-technical and economic challenges — development of non-destructive method of diagnostics of the domestic varieties of plants, implemented by appropriate optoelectronic system. Substantiated general method [1] of the spectral analysis of the pigment composition of photosynthetic vegetation unit. Proved dependence of concentration of mineral substances in a plant from the pigment composition of photosynthetic vegetation unit. The character of the link between the nitrogen provision status of plants, depending of the spectral reflectance curves and of the value of the main vegetative index of the method — NDVI. Experimentally obtained the dependence of the spectral reflectance index of photosynthetic unit of vegetation from the concentrations of nitrogen fertilizers in the soil for selected plant species. During experimental studies confirmed the theoretical position on the possibility of using non-destructive optical methods for determining nitrogen provision of plants. To implement the proposed method is selected optoelectronic monitoring system according to the level of development of agricultural machinery.

Key words: precision agriculture, non-destructive methods, spectral composition, nitrogen provision of plants, vegetative indices, NDVI, monitoring, hyperspectrometr

REFERENCES

1. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.H., Poghosyan S.I. Using reflectance spectroscopy to analyze the pigments of higher plants. *Vegetable physiology*. 2003. Vol. 50. № 5. P. 785—792.
2. Afanasiev R.A., Sopov I.V., Galitsky V.V. Principles and methods of differentiated application of fertilizers using photometry. *Fertility*. 2008. № 6. P. 14—17.
3. Belousova K.V. Photometric diagnosis of nitrogen nutrition of plants. Author. on dis. candidate tehn. sciences. Institute of Agrochemistry. D.N. Pryanishnikova RAAS, Moscow, 2009. P. 9—11.
4. Cherepanov A.S., Druzhinin H.G. The spectral properties of vegetation and vegetative indices. *Geomatics*. 2009. № 3. P. 28—32.
5. Sopov I.V. Effect of nitrogen fertilizer on plant performance diagnostics and productivity of crops and white mustard in a central area of the non-chernozem zone. Author. on dis. candidate tehn. sciences. Institute of Agrochemistry D.N. Pryanishnikova RAAS. Moscow, 2009. P. 15—17.
6. Afanasiev R.A., Sopov I.V., Berezovsky H.V., Melnikov A.V., Sorokin A.V. Photometric diagnosis of nitrogen nutrition of crops. *Materials All-Russia Conference "Environmental Agrochemistry function in modern agriculture"*. M.: VNIIA, 2008. P. 32—35.
7. Budagovsky A.V., Budagovskaya O.N., Lenz F. A new approach to the problem of functional diagnostics of plants. *Agricultural science*. 2009. № 9. P. 19—21.
8. Yakushenkov Y.G. Theory and design of optoelectronic devices. M.: Logos, 2004. P. 201—203.
9. Orlov A.G. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов. Dis. Candidate-ta. tehn. Sciences., Institute of Chemical Physics them. NN Semenov, RAS, 2008. P. 120—135.
10. Zagrubsky A.A., Tsyganenko N.M., Chernova A.P. The manual "Fundamentals of optical measurement". SPb.: Solo, 2007. P. 56—57.
11. Internet resource: agricultural machinery AMAZONE. <http://www.amazone.ru/6.asp> 20.11.2016.