

ДИАГНОСТИКА АЗОТНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.Г. Сычев, ак. РАН, Р.А. Афанасьев, д.с.-х.н., ВНИИА, И.Л. Ермолов, д.т.н., Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлунского РАН, С.Г. Кладко, В.В. Ворончихин, ООО «АгроДронГрупп»

Рассматриваются результаты исследований по дистанционной диагностике азотного питания озимой пшеницы с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сравнении с данными наземной индикации. Установлено, что фотометрическое обследование стеблестоя озимой пшеницы БПЛА адекватно результатам наземной индикации азотного питания растений и после соответствующей проработки может быть рекомендовано для широкого применения в практическом земледелии.

Ключевые слова: почва, растение, БПЛА, азотное питание, диагностика.

Диагностика минерального, прежде всего азотного, питания растений издавна, еще со времен Ю. Либиха и Ж.Б. Буссенго, относилась к приоритетным направлениям агрохимической науки и земледельческой практики [4]. Для определения потребности сельскохозяйственных культур в таких основных элементах питания, как фосфор и калий, широко применяли почвенную диагностику, т.е. определение в почвах подвижных форм этих элементов, на основании которой рассчитывали дозы соответствующих видов и форм удобрений. Почвенную диагностику использовали и для выявления нужды растений в азотных удобрениях, главным образом в допосевной период или в начале активной вегетации культур. В отличие от содержания подвижных форм фосфора и калия, характеризующегося относительной стабильностью даже в течение нескольких лет, содержание доступных для питания растений соединений азота в почвах требует постоянного контроля в течение каждого вегетационного периода из-за неустойчивости во времени, динамичности данного показателя, с одной стороны, и особой требовательности растений к азоту практически в течение всей их вегетации, с другой. Если достаточной обеспеченности растений фосфором и калием можно достичь заблаговременным применением удобрений, то с азотом несколько иначе. Азотные удобрения вносят в почву, как правило, ранней весной непосредственно перед посевом яровых культур или поверхностно в начале вегетации озимых зерновых, ориентируясь на данные агрохимического обследования почв, включая оперативную диагностику. В критические периоды вегетации (кущение-ветвление, трубкование – стебление, колошение-цветение, формирование семян, других репродуктивных органов) для оптимизации азотного питания зерновых и других сельскохозяйственных культур проводят вегетационные подкормки азотными удобрениями по данным химических методов растительной диагностики – стеблевой и листовой [2, 5].

В последние десятилетия все большее значение, особенно за рубежом, наряду с химическими, приобретают физические, а именно фотометрические, методы диагностики азотного питания посевов, основанные на свя-

зи интенсивности зеленой окраски растений с обеспеченностью их азотом. Фотоприемниками диагностических приборов фиксируется концентрация хлорофилла в индикаторных органах растений или интенсивность его флуоресценции. В результате тематической обработки данных интактного или дистанционного определения этих показателей рассчитывают потребность определенных сельскохозяйственных культур в азотных удобрениях в тот или иной период их вегетации. При этом наибольшее распространение получил расчет вегетационного индекса (NDVI), представляющего отношение разности между величинами инфракрасного и красного спектров электромагнитного отражения солнечного или искусственного света от растений к их сумме. Детекторами электромагнитного излучения биомассой растений служат фотометрические устройства различной конструкции, используемые в качестве портативных (ручных) приборов (европейские «YARA», «Crop Circle», американские CCM-200, CCM-1000, «Green Seecet», отечественные модели – однолучевой и двухлучевой «Спектролюкс»), а также в виде мобильных N-сенсоров, устанавливаемых на агрегатах по внесению удобрений («YARA», «ALS»), и многозональные фотометры, устанавливаемые на авиационных или космических платформах. Из видов космической съемки выделяют: фотографирование и ТВ-съемку с длиной фиксируемых волн 0,3-1,1 мкм, спектрометрическую индикацию – 0,3-3,0, инфракрасную индикацию – 3-300 мкм, микроволновую индикацию – 0,3-10 см, радарную индикацию – 10-70 см. Например, российский спутник «Ресурс-02Д» оснащен многозональным сканирующим устройством «АДАПТОН» со спектральным диапазоном от 0,5 до 2,4 мкм с разрешением на местности 30 м, видеоспектрометрической аппаратурой «ВС» со спектральным диапазоном от 0,4 до 1,0 мкм и разрешением 30 м, сканирующим устройством сверхвысокого разрешения «ВЗОР» со спектральным диапазоном 0,5-0,9 мкм и разрешением 2 м в панхроме и 4 м в спектре с общим количеством спектральных каналов 266. Спектрометрическая или радарная информация, получаемая тем или иным способом, используется в разных отраслях. Прежние исследования показали, что результаты наземной и авиакосмической съемки могут с успехом применяться для диагностики азотного питания растений [1]. Однако, несмотря на значительные преимущества по сравнению с традиционной химической диагностикой, наземная и космическая индикация обеспеченности сельскохозяйственных культур азотом имеют определенные ограничения: наземная – по масштабности охвата, авиакосмическая – по временным параметрам. В то же время установлено, что для фотометрического обследования посевов более всего подходит использование низколетящей авиации, в частности вертолетов, хотя и ее применение имеет суще-

ственное ограничение по стоимости диагностических работ. В данном отношении наиболее перспективно использование для оперативной диагностики азотного питания растений беспилотных летательных аппаратов – БПЛА [2], снабженных соответствующей фотометрической аппаратурой.

Цель исследований – изучить возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативной диагностики азотного питания сельскохозяйственных культур.

Методика. Исследования проводили на базе Центральной полевой опытной станции ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова (Московская обл.) путем постановки полевого опыта с возрастающими дозами азотных удобрений, внесенных весной 2017 г. под озимую пшеницу сорта Московская 39. Повторность опыта 3-кратная, размер делянок 4 x 15 м. Схема опыта включает 5 вариантов: 1) Контроль – N₀, 2) N₃₀, 3) N₆₀, 4) N₉₀, 5) N₁₂₀. В опыте применяли традиционную агротехнику озимой пшеницы, включающую борьбу с вредными организмами с помощью химических средств защиты растений.

В течение вегетационного периода проводили наблюдения за ростом и развитием растений, по вариантам полевого опыта определяли обеспеченность растений азотным питанием химическим методом (стеблевая диагностика) и двумя физическими методами с использованием портативного фотометра «Яра» и мультиспектральной аппаратуры беспилотного летательного аппарата (БПЛА) фирмы ООО «АгроДронГрупп». Для решения основной задачи исследований применяли периодический облет опытного посева озимой пшеницы как тестовой культуры беспилотным летательным аппаратом, фиксирующим отражение от посева в зеленой (550 нм), красной (660 нм), ближней (735 нм) и дальней инфракрасной (790 нм) областях электромагнитного спектра. Наряду с дистанционной диагностикой, для проверки ее адекватности наземным методом и в целях калибровки аппаратуры БПЛА, параллельно проводили фотометрическую диагностику с использованием N-тестера «Яра», а также стеблевую диагностику с применением дифениламина по методу В.В. Церлинг [5]. Кроме того изучали связь фотометрических показателей с биологической активностью почвы путем количественного измерения интенсивности эмиссии диоксида углерода в зависимости от уровня применения азотных удобрений под озимую пшеницу.

Результаты их обсуждение. Как показали исследования, внесение азотных удобрений под озимую пшеницу в возрастающих дозах – от 0 до 120 кг д.в./га, т. е. азота (N), привело к соответствующему повышению концентрации нитратов в соке стеблей растений (рис. 1) и активности хлорофилла, определяемых в баллах по показаниям фотометра «Яра» (рис. 2). Из рисунка 1 видно, что при оценке содержания нитратов в соке, выжатом из отрезков стеблей озимой пшеницы в фазе выхода растений в трубку, в контрольном варианте нитраты практически отсутствовали, тогда как возрастающие дозы азотных удобрений от 30 до 120 кг д.в./га, вызвали в соке почти пропорциональное повышение концентрации нитратного азота (N-NO₃). Нитратные индексы, определяемые по шкале диагностического прибора, возросли от нуля до 2,7 ед., что указывает на высокую обеспеченность посева азотным питанием и

отсутствие или незначительную (не более 20 кг/га азота удобрения) потребность в вегетационной подкормке.

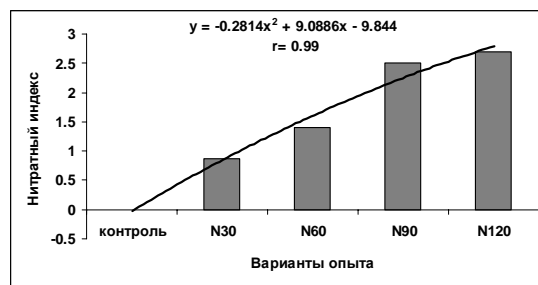


Рис. 1. Зависимость нитратных индексов от доз азотных удобрений, внесенных под озимую пшеницу

Из рисунка 2 также следует, что активность хлорофилла, определенная в тот же срок, что и нитратный индекс, была тесно связана с возрастающей обеспеченностью растений озимой пшеницы азотным питанием. По результатам диагностики азотного питания озимой пшеницы, проведенной в прежние годы, установлено, что показания фотометра «Яра» от 300 до 400 баллов характеризуют низкую обеспеченность растений азотным питанием, от 400 до 500 – среднюю, от 500 до 600 – повышенную, более 600 баллов – высокую [3]. В контрольном варианте опыта по показаниям фотометра «Яра» отмечена низкая обеспеченность озимой пшеницы азотом, не превышающая 360 баллов, при внесении от 30 до 90 кг/га азота обеспеченность растений им возрастала от средней до повышенной, а в варианте N₁₂₀ – до высокой. Иными словами, данные фотометрической диагностики, полученные в описываемом полевом опыте, фактически полностью подтверждают ранее установленную закономерность связи показаний фотометра «Яра» с обеспеченностью озимой пшеницы азотным питанием. При этом на причинно-следственную связь изучаемых показателей с дозами внесенных азотных удобрений указывает высокий коэффициент парной линейной корреляции – для фотометрии – 0,93, для нитратных индексов – 0,98. Отсюда можно сделать вывод, что показания фотометра и результаты стеблевой диагностики могут служить экспериментальной основой для оценки показаний аппаратуры БПЛА.

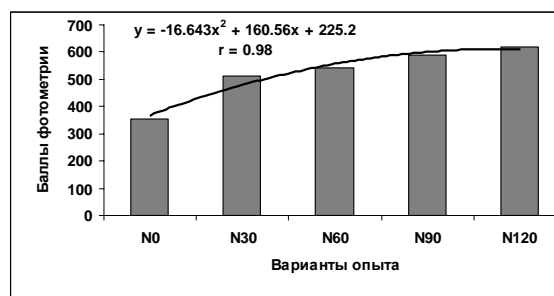


Рис. 2. Зависимость показаний фотометра «Яра» (в баллах) от доз азотных удобрений, внесенных под озимую пшеницу

Крупномасштабная съемка посева озимой пшеницы в полевом опыте беспилотным летательным аппаратом выявила довольно тесную связь величины вегетационного индекса (NDVI), рассчитанного по результатам съемки, с индексами стеблевой диагностики (рис. 3) и баллами фотометрии (рис. 4).

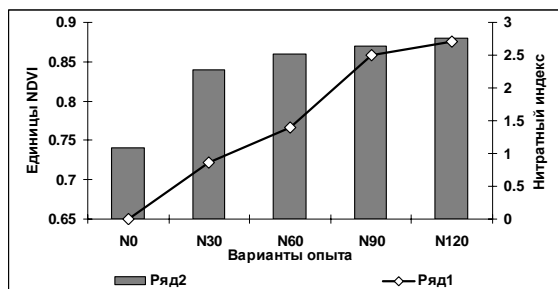


Рис. 3. Зависимость вегетационного индекса (NDVI) от обеспеченности растений азотным питанием, определенной по нитратному индексу: ряд 1 – нитратные индексы, ряд 2 – единицы NDVI

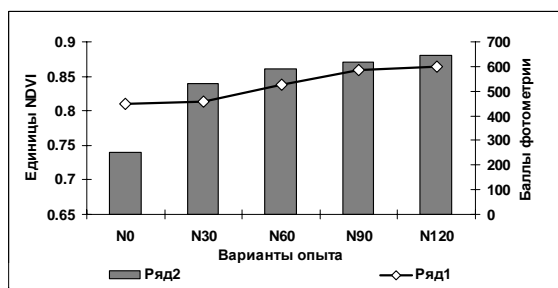


Рис. 4. Взаимосвязь вегетационного индекса (NDVI), полученного с помощью БПЛА, и баллов фотометрии N-тестера «Яра»: ряд 1 – баллы фотометрии, ряд 2 – единицы NDVI

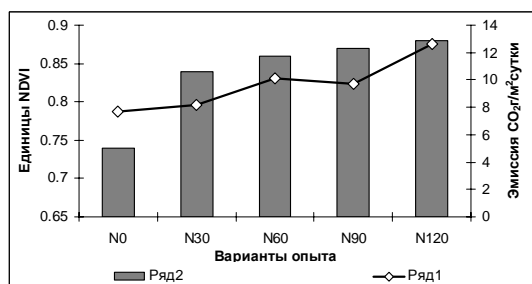


Рис. 5. Зависимость вегетационного индекса (NDVI) от биологической активности почвы, диагностируемой по интенсивности эмиссии диоксида углерода: ряд 1 – эмиссия CO₂, ряд 2 – единицы NDVI

Коэффициенты парной линейной корреляции между величинами вегетационного и нитратного индексов составляли $r = 0,86$, между вегетационным индексом и баллами фотометрии – $r = 0,98$, между вегетационным индексом и дозами азота – $r = 0,78$. Они указывают на эффективность дистанционной диагностики азотного состояния посевов зерновых культур с использованием БПЛА, оснащенных соответствующей фотометриче-

ской аппаратурой. Показательно, что рассчитанный по результатам дистанционной съемки вегетационный индекс связан даже с биологической активностью почвы, определенной по эмиссии из почвы диоксида углерода (рис. 5) при коэффициенте парной линейной корреляции $r = 0,74$. Эта связь обусловлена тем, что азотные удобрения, внесенные в почву, усиливали процессы минерализации почвенного органического вещества, состоящего более чем наполовину из углерода, который при окислении превращался в диоксида углерода.

Заключение. Определение эффективности дистанционной диагностики азотного питания тестовой культуры (озимой пшеницы) в полевом опыте с возрастающими дозами азотных удобрений выявило тесную зависимость показаний аппаратуры БПЛА, а именно вегетационного индекса (NDVI), от обеспеченности растений азотом. Оперативность и технологическая простота, а также экономическая составляющая использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур по существу открывают новую страницу в решении проблемы диагностики азотного питания растений. Известно, что прежние методы наземного и космического мониторинга посевов не вполне удовлетворяли потребность земледелия в оперативной диагностике состояния посевов, что сдерживало принятие адекватных технологических решений, в частности о проведении азотных подкормок в период вегетации растений. По некоторым оценкам, в обозримом будущем до 75% выпускаемых в мире беспилотных летательных аппаратов будет использоваться в сельском хозяйстве. Наши исследования показали, что этот прогноз имеет реальную научную основу.

Работа над данным материалом поддержана Программой Президиума РАН №1.31 "Актуальные проблемы робототехники".

Литература

1. Афанасьев Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия // Проблемы агрохимии. – 2008. – № 3. – С. 46-53.
2. Методика полевых опытов по оптимизации азотного питания зерновых культур, сахарной свеклы и картофеля на основе оперативной почвенной и растительной диагностики. Коллектив авторов. – М.: ВНИИА, 1985. – 92 с.
3. Осипов Ю.Ф., Иваницкий Я.В., Ширинян М.Х., Афанасьев Р.А., Галицкий В.В. Использование прибора «N-тестер «Яра» для диагностики азотного питания озимой пшеницы // Плодородие. – 2011. – № 1.
4. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. Т. 1. – М.: Колос, 1965. – 767 с.
5. Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1990. – 235 с.

DIAGNOSTICS OF PLANT NITROGEN NUTRITION USING DRONES

V.G. Sychev¹, R.A. Afanas'ev¹, I.L. Ermolov², S.G. Kladko³, V.V. Voronchikhin³

¹Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry, Russian Academy of Sciences, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550 Russia

²Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, pr. Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526 Russia

³ООО AgroDronGrup, ul. Kolyakovskaya 3/13, Moscow 115201 Russia

Results of the remote diagnostics of winter wheat nitrogen nutrition using drones have been compared to the land indication data. It is found that the photometric survey of winter wheat stand by drones is adequate to the land indication of plant nitrogen nutrition and can be recommended, after the corresponding elaboration, for wide use in agricultural practice.

Keywords: soil, plant, drone, nitrogen nutrition, diagnostics.