

of 2.5 was not achieved. The profitability of grain production in the planning of yield by 2.5 t/ha was: winter rye – 81%, winter vetch – 44.6%, grain mixtures – 96%. When spring feeding a basal dose of N20 profitability made: winter rye – by 12.4%, winter vetch – 40.6%, grain mixture – of 31.2%. The increase in the dose of nitrogen basal feeding to 40 kg/ha reduced the profitability of production: winter rye to 8.3%, winter vetch – 24.5%, grain mixtures – 23.4%, respectively. In the forest-steppe of Western Siberia, the cultivation of grain mixture "winter rye + winter vetch" is economically advantageous when planning yields up to 2.5 t/ha with spring basal fertilizing with nitrogen at the level of 20 kg/ha.

Key words: winter rye, winter Vica, grain mix, productivity, economic efficiency.

УДК 631.8

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ И ИДЕНТИФИКАЦИИ АЗОТА ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

**Р.А. Афанасьев, д.с.-х.н., В.В. Носиков, к.б.н., В.А. Литвинский, к.б.н., И.Н. Ворончихина,
ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» им. Д.Н. Прянишникова
127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 31А, e-mail: vl.litvinskiy@gmail.com**

Работа выполнена по государственному заданию № 0572-2019-0013

Показано, что современные спектральные методы диагностики питания растений, как дистанционные, так полевые и лабораторные аналитические, позволяют оценить потребность сельскохозяйственных культур в азотном питании и отследить поступление в растения азота органических и минеральных удобрений.

Ключевые слова: растительная диагностика, фотометрия, изотопная масс-спектрометрия, беспилотные летательные аппараты, точное земледелие, изотопы азота, минеральные удобрения, органические удобрения.

DOI: 10.25680/S19948603.2019.109.09

Определение нужд посевов сельскохозяйственных культур в азотной подкормке в режиме on-line стало возможным только с появлением наземных механизированных агрегатов, авиакосмических объектов (самолетов, вертолетов, космических спутников) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных мультиспектральными фотокамерами. До этого, как известно, предпочтение отдавалось химическим методам диагностики азотного питания растений, основанным или на полуколичественном определении нитратного азота в выжатом соке растений 1%-ным раствором дифениламина в крепкой серной кислоте, или на определении общего азота в их биомассе путем кислотного сжигания по Кьельдалю [1]. Эти методы химической диагностики азотного питания растений не получили широкого распространения из-за сложности, недостаточной производительности и небезопасности. Если для определения нужд растений в таких элементах питания как фосфор и калий допускается временной интервал в 4-5 лет ввиду относительной стабильности содержания данных элементов в почвенной среде, то обеспеченность растений азотом требует постоянного контроля в течение каждого вегетационного периода. Достаточную обеспеченность растений фосфором и калием можно достичь заблаговременным применением удобрений, но с азотом дело обстоит несколько иначе. Азотные удобрения вносят в почву, как правило, ранней весной непосредственно перед посевом яровых культур или поверхностно в начале вегетации озимых зерновых, реже – осенью до посева озимых культур. В критические периоды вегетации (кущение – ветвление, трубкование – стеблевание, колошение – цветение, формирование семян, других репродуктивных органов) для оптимизации азотного питания зерновых и других сельскохозяйственных культур проводят вегетацион-

ные подкормки азотными удобрениями по данным различных методов растительной диагностики.

В последние десятилетия все большее значение, особенно за рубежом, приобретают физические, преимущественно фотометрические, методы диагностики азотного питания посевов, основанные на связи интенсивности зеленой окраски растений с обеспеченностью их азотом. С помощью фотоприемников диагностических приборов определяют концентрацию хлорофилла в индикаторных органах или во всей биомассе растений. В результате тематической обработки данных контактного или дистанционного определения этих показателей рассчитывают потребность определенных сельскохозяйственных культур в азотных удобрениях в конкретный период их вегетации. При этом наибольшее распространение получило определение так называемого вегетационного индекса (NDVI), представляющего собой отношение разности величин инфракрасного и красного спектров электромагнитного отражения солнечного или искусственного света от растений к их сумме: $NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}}$ (рис. 1). В зависимости от обеспеченности растений азотным питанием значение вегетационного индекса в период активной вегетации может колебаться от 0,3 до 0,9.

В настоящее время в агрохимии и физиологии растений для решения широкого круга исследовательских задач используют отношение $^{15}N/^{14}N$. Это отношение в воздухе, почвах, водах и удобрениях практически одинаково. Однако в конкретных условиях выращивания растений наблюдаются значительные отклонения, которые следует учитывать в пересчете экспериментальных значений. Для расчета состава изотопов азота в почвах и удобрениях в качестве стандарта принимают отношение $^{15}N/^{14}N$ в атмосфере. Однако азот органического вещества почв по сравнению с азотом атмосферы может быть обогащен тяжелым изотопом ^{15}N макси-

мально до 13-17 % [2]. Различен и изотопный состав азотных удобрений. Азот нитратных удобрений в среднем обогащен ^{15}N до $\delta = +2,6...+2,0$ ‰, азот аммонийных удобрений в среднем обеднен ^{15}N до $+1,3...+1,5$ ‰. Жидкие аммиачные удобрения обычно обеднены ^{15}N еще больше – до $-6,0$ ‰. Потеря почвами аммиака будет способствовать фракционированию и относительно увеличению в азоте почв доли ^{15}N , что, происходит, вероятно, в результате процессов аммонификации в почвах и водах. В будущем целесообразно, используя методы фотометрии и изотопной масс-спектрометрии, выявить корреляционную зависимость NDVI и изотопного соотношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ на различных стадиях развития растений в различных почвах при применении разных форм и доз удобрений.

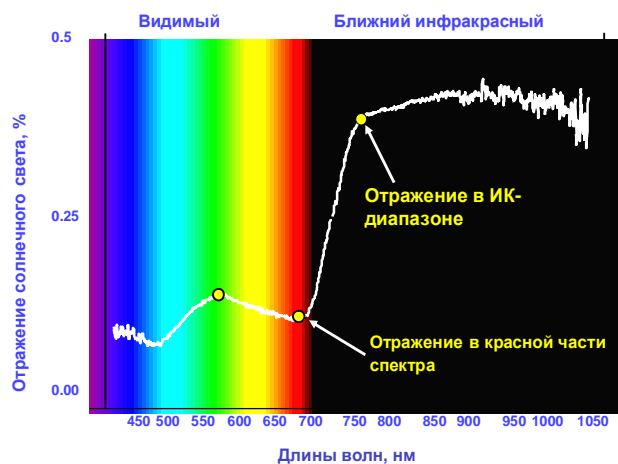


Рис. 1. Спектрограмма солнечного света

Детекторами электромагнитного излучения биомассой растений служат фотометрические устройства различной конструкции, используемые в качестве портативных (ручных) приборов [европейские «YARA» (рис. 2), «Crop Circle», американские CCM-200, CCM-1000, «Green Seeger», 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 и космических платформах.



Рис. 2. Портативный фотометр (N-тестер) «Yara»

Из видов космической съемки выделяют фотографирование и ТВ-съемку с длиной фиксируемых волн 0,3-1,1 мкм, спектрометрическую индикацию – 0,3-3,0 мкм,

инфракрасную индикацию – 3-300 мкм, микроволновую индикацию – 0,3-10,0 см, радарную индикацию – 10-70 см. Так, 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 панхrome и 4 м в спектре, с общим количеством спектральных каналов 266.

Проведенные исследования показали, что наземная и авиакосмическая съемки могут с успехом использоваться для диагностики азотного питания растений, в том числе в технологиях точного земледелия, когда удобрения применяют с учетом внутрипольной пестроты почвенного плодородия. Ранее совместно с РосИМЗ, НПО машиностроения (г. Реутов), НПО «Астрофизика», Краснодарским НИИАП, бывшим Смоленским филиалом ВИУА, было установлено, что один из наиболее эффективных способов картографирования внутрипольной пестроты почвенного плодородия – дистанционное авиакосмическое зондирование земельных угодий в радио- и ИК-диапазонах электромагнитных волн [3, 4]. Исследованием показано, что сканирование поверхности полей спутниковыми радиолокаторами возможно в любое время суток и при любой облачности. В частности, по результатам радиолокации полей ОПХ «Газырское» Краснодарского края с искусственного спутника Земли (ИСЗ) «Алмаз-1» коэффициенты корреляции (корреляционные отношения) между величиной отраженных сигналов и основными агрохимическими показателями, установленными при анализе почвы на выделенных контурах, составили для гумуса 0,4, минерального азота 0,7, подвижного фосфора 0,6, подвижного калия 0,5, кальция и магния 0,3. Аналогично, связь между агрохимическими показателями дерново-подзолистой почвы с отраженными сигналами, зафиксированными сканирующим фотометром МСУ-Э на ИСЗ «Ресурс-01» характеризовалась коэффициентами: для гумуса 0,7, общего азота 0,4, подвижных форм фосфора 0,5 и калия 0,8, pH 0,6. Эти данные свидетельствуют о существенных различиях между отдельными, выделенными по результатам дистанционного зондирования, контурами плодородия в условиях черноземных и дерново-подзолистых почв, т.е. о целесообразности использования данного метода для картографирования их внутрипольной пестроты.

Характерно, что с агрохимическими показателями почвы коррелируют не только отраженные электромагнитные волны разной длины, но и собственная электропроводность почвы. При изменении электропроводности образцов черноземной почвы, отобранных на контурах плодородия в ОПХ «Газырское», предварительно просушенных, измельченных и затем доведенных до одинаковой (30%) влажности, установлено, что она обусловлена наличием в почве элементов питания, находящихся в ионной форме. Наибольшей электропроводностью характеризовались образцы с повышенной концентрацией нитратов, образующихся при минерализации органического вещества почвы ($r = 0,76$). С радиолокационными сигналами, отраженными от выделенных контуров, электропроводность почвенных об-

разцов характеризовалась также тесной связью ($r = 0,82$). При подсушивании образцов электропроводность почвы снижалась, однако зависимость ее от агрохимических показателей сохранялась.

Из этих данных следует, что электропроводность почв может объяснить, во-первых, физическую природу информации, получаемой при радиолокации почв, так как радиоволны не отражаются от диэлектриков, и, во-вторых, то, что внутрипольные контуры плодородия могут идентифицироваться и при наземном сканировании электропроводности почвы, что находит свое выражение в создании соответствующей сканирующей аппаратуры, главным образом за рубежом (рис. 3).

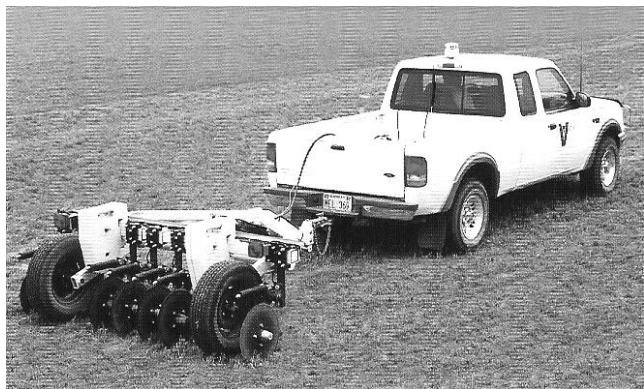


Рис. 3. Агрегат для сканирования электропроводности почвы

Дистанционная радиолокация и ИК-спектрометрия пригодны и для оперативной диагностики азотного питания сельскохозяйственных культур, прежде всего зерновых. Подспутниковые опыты, заложенные путем внесения возрастающих доз азота от 0 до 120 кг/га на посевах озимой пшеницы в ОПХ «Газырьское» и Смоленском филиале ВИУА, выявили тесную связь отраженных радиосигналов и ИК-излучения с содержанием общего азота в растениях. Так, в условиях Северного Кавказа средняя разница в содержании азота в растениях озимой пшеницы в фазе трубкования, определенная лабораторным и дистанционным методами, составила 4,4% (относительных). Не менее успешной была ИК-спектрометрия посевов озимой пшеницы в обычных полевых опытах с удобрениями в ОПХ «Газырьское» с использованием вертолета, где коэффициенты корреляции между величиной сигналов и содержанием общего и нитратного азота в растениях составляли 0,8-0,9. В условиях Нечерноземной зоны (Смоленская обл.) корреляция между интенсивностью инфракрасного отражения от посева и содержанием азота в растениях озимой пшеницы, выращиваемой на разноудобренных делянках подспутникового опыта, характеризовалась коэффициентами не ниже 0,9.

Составление картограмм содержания азота в посевах сельскохозяйственных культур в разные фазы вегетации на основе дистанционных снимков открывает возможности для оперативного дробно-дифференцированного применения азотных удобрений. Наземными агрегатами для диагностики азотного питания растений с одновременной подкормкой посевов азотом могут служить подкормщики типа «AMAZONE», когда внутрипольные агроконтуры по интенсивности зеленой окраски растений выделяются автоматически в процессе движения машины N-сенсорами, установленными над ее кабиной (рис. 4). Одновременно сигналы N-сенсора и

GPS/ГЛОНАСС-навигатора, обработанные бортовым компьютером машины, передаются на рабочие органы подкормщика, и средняя, заранее определенная для всего поля, доза удобрения дифференцированно распределяется по каждому агроконтуру.



Рис. 4. Разбрасыватель «AMAZONE ZA-M» с N-сенсором «Яра»

Однако, несмотря на значительные преимущества по сравнению с традиционной химической диагностикой, и наземная, и авиакосмическая индикации обеспеченности сельскохозяйственных культур азотом имеют определенные ограничения: наземная – по масштабности охвата, авиационная – по стоимости работ, космическая – по временным параметрам, связанным с определенной периодичностью пролета спутников над одной и той же местностью. В данном отношении наиболее перспективно использование для оперативной диагностики азотного питания растений беспилотных летательных аппаратов – БПЛА, снабженных соответствующей фотометрической аппаратурой. Проведенные исследования подтверждают возможность использования беспилотников для агродиагностики посевов сельскохозяйственных культур (рис. 5).



Рис. 5. Съемка полевого опыта БПЛА производства ООО «АгроДрон-Групп» (2017 г.).

Разработка метода дистанционного мониторинга азотного питания озимой пшеницы с использованием БПЛА осуществлялась на Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова.

Схема заложенного полевого опыта включала 7 вариантов в трехкратной повторности в соответствии с принятыми в агрономии правилами. Размер делянки: ширина 4 м, длина – 15 м, площадь – 60 м². Общая площадь опытного участка – 28 м x 45 м = 1260 м². Делянки со всех сторон ограничены защитными полосами. По данным агрохимического обследования, почва опытного участка дерново-подзолистая тяжелосуглинистая

слабокислая слабогумусированная. По вариантам полевого опыта определяли обеспеченность растений азотным питанием с помощью одного химического метода (стеблевая диагностика) и двух физических методов – с использованием портативного фотометра «Яра» и мультиспектральной аппаратуры беспилотного летательного аппарата (БПЛА) фирмы ООО «АгроДрон-Групп». Кроме того, изучали связь фотометрических показателей с биологической активностью почвы с помощью количественного измерения интенсивности эмиссии диоксида углерода в зависимости от доз азотных удобрений под озимую пшеницу. Установлена тесная зависимость фотометрических показателей дистанционного зондирования посева озимой пшеницы с дозами азотного удобрения и другими диагностическими показателями азотного питания растений, а также с урожайностью культуры (табл.).

Связь фотометрических показателей дистанционного зондирования посева озимой пшеницы (NDVI) с использованием БПЛА и других диагностических показателей азотного питания (фаза трубкования) и урожайностью (2017 г.)

Показания с БПЛА, балл NDVI	Доза азота, кг д.в./га	Показания фотометра «Яра», балл	Данные стеблевой диагностики, индекс	Эмиссия CO ₂ , г/(м ² ·сут)	Урожайность озимой пшеницы, т/га
0,65	0	356	0	7,7	2,83
0,81	30	511	0,87	8,2	4,41
0,84	60	541	1,4	10,1	4,99
0,85	90	580	2,5	9,7	5,0
0,86	120	620	2,7	12,3	5,1
Коэфф. корреляции	0,84	0,97	0,86	0,73	0,99

Полученные значения демонстрируют эффективность дистанционной диагностики азотного состояния посевов зерновых культур с использованием БПЛА, оснащенных соответствующей фотометрической аппаратурой. Рассчитанный по результатам дистанционной съемки с БПЛА вегетационный индекс (NDVI) был связан даже с биологической активностью почвы, определенной по эмиссии из почвы диоксида углерода при

коэффициенте парной линейной корреляции $r = 0,73$. Эта связь обусловлена тем, что азотные удобрения, внесенные в почву, усиливали процессы минерализации почвенного органического вещества, состоящего, как известно, более чем на половину из углерода, который при биологическом окислении и превращался в диоксид углерода.

Заключение. Проверка эффективности дистанционной диагностики азотного питания тестовой культуры – озимой пшеницы – в полевом опыте с возрастающими дозами азотных удобрений выявила 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 диагностике 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 проведение 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. Проведенные исследования показали, что этот прогноз имеет реальную научную основу.

Литература

1. Методические указания по комплексной диагностике азотного питания озимых зерновых культур. - /М.: Колос, 1984. – 48 с.
2. Fry, B. Stable Isotope Ecology. Springer-Verlag New York, 2006. DOI 10.1007/0-387-33745-8.
3. Афанасьев, Р.А., Ширинян М.Х., Коробской Н.Ф. Диагностика и оптимизация минерального питания озимой пшеницы на обыкновенных черноземах Северного Кавказа /Научные основы и рекомендации по диагностике и оптимизации минерального питания зерновых и других культур. - /М.: ВИУА, 2000. – С. 55-71.
4. Афанасьев, Р.А. Физические методы растительной диагностики азотного питания сельскохозяйственных культур / Р.А. Афанасьев, Е.В. Березовский, И.В. Горбачев, А.А. Кондратьев // Доклады ТСХА. – 2007. – Вып. 27. – Ч. 1. – С. 350-353.

UDC 631.8

OAT PRODUCTIVITY FORMATION UNDER RADIOACTIVE POLLUTION SODDY-PODZOLIC SOIL

R.A. Afanasev, V.V. Nosikov, V.A. Litvinskiy, I.N. Voronchihina
Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Pryanishnikova ul. 31A, 127434 Moscow, Russia,
e mail: vl.litvinskiy@gmail.com

Modern spectral methods of nutritional diagnostics, such as remote, field and laboratory, allow to estimate the need of crops for nitrogen nutrition and to track the nitrogen of organic or mineral fertilizers delivered to plants.

Keywords: plant diagnostics, photometry, IRMS, UAV, precision agriculture, nitrogen, isotopes, mineral fertilizers, organic fertilizers.