

- Тарушкин В. И. Диэлектрическая сепарация семян. Автореф. ... дисс. д-ра техн. наук. М. Т. 1. 1991. 32 с.
- Abdel-Salam M., Ahmed A., Kishki H. El. Seed sorting by electrostatic separation: an experimental study // Annual Report conference «Electrical Insulation and Dielectric Phenomena» on 17–20 October 2004, pp. 377–380.
- Harmond J. E., Brandenburg N. R., Booster D. E. Seed cleaning by electrostatic separation // Agricultural Engineering, 1961, v. 42, pp. 22–25.

REFERENCES

- Arkhipov M. V., Gusakova L. P., Velikanov L. P., Vilichko A. K., Zheludkov A. G., Alferov V. B. *Metodika kompleksnoi otsenki biologicheskoi i khoziaistvennoi prigodnosti semennogo materiala* [Method of complex estimation of biological and economic suitability of seed material]. S-Peterburg: AFI, 2013. 52 p.
- Arkhipov M. V., Priiatkin N. S., Velikanov L. P., Bondarenko A. S., Zhigunov A. S. *Identifikatsiia pustykh i vypolnennykh semian eli evropeiskoi metodami miagkoluchevoi rentgenografii i gazorazriadnoi vizualizatsii* [Identification of empty and filled seeds of Norway spruce Masalucia methods of x-ray and gas discharge visualization] // *Agrofizika*, 2013, no. 1(9), pp. 8–12.
- Basov A. M., Izakov F. Ia., Shmigel' V. N. i dr. *Elektrozernoochistitel'nye mashiny: Teoriia, konstruksii i raschet* [Electro grain-cleaning machines: Theory, design and calculation]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 203 p.
- Maisurian N. A. *Rastenievodstvo* [Plant growing]. Moscow: Sel'khozgiz, 1960. 520 p.
- Makrushin N. M., Makrushina E. M., Shabanov R. Iu., Esoian E. A., Cheremkha B. M. *Semenovodstvo (metodologiya, teoriia, praktika)* [Seed production (methodology, theory, practice)]. Simferopol': IT «Arial», 2012. 564 p.
- Sterkhova T. N. *Sortirovanie semian ogurtsa v elektrosticheskom pole na lentochnom triere: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Screening of cucumber seeds in an electrostatic field onto a belt Trier. Cand. teh. sci. abst. diss.]. Moscow, 2005. 18 p.
- Tarushkin V. I. *Dielektricheskaiia separatsiia semian. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Dielectric separation of seeds Abst. diss. Doc. teh. sci.]. Moscow, 1991, v. 1, 32 p.
- Abdel-Salam M., Ahmed A., Kishki H. El. Seed sorting by electrostatic separation: an experimental study // Annual Report conference «Electrical Insulation and Dielectric Phenomena» on 17-20 October 2004, pp. 377–380.
- Harmond J. E., Brandenburg N. R., Booster D. E. Seed cleaning by electrostatic separation // Agricultural Engineering, 1961, v. 42, pp. 22–25.

УДК 633.11:535.3

DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.08

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

С. В. Железова

ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева,

ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127550

E-mail: soferrum@mail.ru

Поступила в редакцию 11 декабря 2017 г., принята к печати 28 августа 2018 г.

На примере сезонного мониторинга посевов озимой пшеницы в рамках опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева рассмотрены методические аспекты приземного зондирования зерновых с применением трёх оптических датчиков: Yara N-tester™, GreenSeeker® RT200 и Yara N-sensor® ALS. Для обследования посевов в поле использовался метод трансект. Установлено, что индексы растительности, определяемые при помощи оптических датчиков, проявляют значительную вариабельность, что связано как с естественной изменчивостью состояния посева, так и с технологией возделывания. Так, в мае коэффициенты вариации индексов в разных местах поля лежали в диапазоне от 8 до 57%, а в среднем по полю составили 22%. Показания приборов зависят от размера охватываемой площади посева и в силу разного масштаба усреднения индивидуальных измерений могут существенно различаться. В течение всего вегетационного сезона сохранялась тесная прямая корреляционная связь между показаниями приборов GreenSeeker® RT200 и Yara N-sensor® ALS. Растительные индексы изменялись вдоль трансекты сопряженно. Связь азотного статуса, определяемого по показаниям прибора N-tester™, с растительными индексами NVDI и VI в разных частях поля могла быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от густоты стояния растений посева и индивидуальной обеспеченности их легкодоступным минеральным азотом. При разработке рекомендаций по внесению азотных подкормок в дифференцированных дозах следует отдавать предпочтение методам оценки азотного статуса не по отдельным растениям, а по показателям пространственно распределенного вегетационного индекса NDVI посева.

Ключевые слова: оптические датчики, NDVI, азотный статус, пространственная вариабельность, озимая пшеница.

APPLICATION OF OPTICAL SENSORS FOR ESTIMATION OF THE CROP STATE OF WINTER WHEAT

S. V. Zhelezova

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academ,
9 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550
E-mail: soferrum@mail.ru

The paper considers methodological aspects of surface monitoring of crops using three optical sensors: Yara N-tester™, GreenSeeker® RT200 and Yara N-sensor® ALS. Monitoring of winter wheat crop has been carried out at the experimental field of the Precision agriculture center, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Field measurements were conducted using the transect method. It was found that the vegetation indices determined by the optical sensors had considerable variability, which was due both to the natural variability of the crop state and to the crop management. For example, in May coefficients of variation of the indices at different spots of the field lay in the range from 8 to 57%, and were 22% on the average for the field. The instruments' readings depended on the size of the area covered by the crop and were varying significantly due to the different scale of averaging of individual measurements. During the whole vegetation season there was a strong direct correlation between the readings of the GreenSeeker® RT200 and Yara N-sensor® ALS. The correlation of the nitrogen status determined by the indications of the N-tester™ with vegetation indexes NDVI and BI in different parts of the field could be either positive or negative, depending on the plant density and availability of mineral nitrogen for individual plants. Recommendations for the application of nitrogen fertilizer at differentiated rates should be based on the estimation of nitrogen status according to the indicators of the spatially distributed NDVI of crops, rather than on the estimation of nitrogen status of an individual plant.

Keywords: optical sensors, NDVI, nitrogen status, spatial variability, winter wheat.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в точном земледелии для оценки состояния посевов в период вегетации используются оптические датчики (Якушев и др., 2010; Балабанов и др., 2016). Принцип работы датчиков основан на измерении оптических характеристик посевов. Для оценки состояния растительности используется около 160-ти вариантов вегетационных индексов (Черепанов, 2011). Наиболее широко применяемым среди них является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который вычисляется по формуле:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}),$$

где ρ_{NIR} – коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра; ρ_{RED} – коэффициент отражения в красной области спектра. Диапазон абсолютных значений индекса NDVI лежит в интервале от -1 до $+1$. Для растительности индекс принимает положительные значения в диапазоне примерно от $0,2$ до $0,9$. Чем больше зелёная фитомасса растений в момент измерения, тем ближе значение NDVI к единице. Показатель NDVI сельскохозяйственных посевов является удобным инструментом мониторинга: по нему можно судить о состоянии посевов в разные фазы вегетации и, в частности, оценивать обеспеченность растений азотом. Для определения индекса NDVI при наземном обследовании посевов разработаны оптические датчики с различной конструкцией, но единым техническим принципом, который заключается в измерении отражения электромагнитных волн в красном и ближнем инфракрасном диапазоне. В наиболее современных оптических датчиках для

наземного обследования посевов используются активные источники излучения в красной и ближней инфракрасной областях спектра, а отраженный от растительности сигнал поступает в принимающее «окно» датчика. По значениям испускаемого и принимаемого сигналов прибор автоматически вычисляет растительный индекс. Основное целевое назначение подобных оптических систем в растениеводстве – оптимизация расхода вносимых в качестве подкормки азотных удобрений на основе оперативной оценки вариабельности растительной массы посева. Однако даже при едином принципе обследования оптические показатели, полученные при помощи разных приборов на одном и том же тестовом участке, могут существенно различаться, что может привести к противоречивым выводам об азотном статусе посевов.

Цель исследования заключалась в оценке состояния посевов озимой пшеницы в разные фазы развития по вегетационным индексам, определенным с помощью трёх оптических датчиков с активными источниками излучения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОБСЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в рамках научно-производственного опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева на посевах озимой пшеницы (*Triticum aestivum*, линия Л-15 сорта Звезда) в течение вегетационного сезона 2011 г. Размер опытного поля составлял 1,4 га. Пшеница в опыте возделывается по интенсивной технологии: норма высева – 5,5 млн. шт. зёрен га⁻¹, перед посевом вносится основное удобрение «Комплексное

Н9Р16К30» в дозе 200 кг га⁻¹, азотные подкормки проводятся аммиачной селитрой (N34) в дозе 200 кг га⁻¹ дважды за вегетацию. Для оценки потребности растений в азотных подкормках проводились измерения при помощи трех оптических датчиков: Yara N-tester™ (<http://www.yara.ru/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-tester/>), GreenSeeker® RT200 (<http://www.trimble.com/agriculture/greenseeker>) и Yara N-sensor® ALS (<http://www.n-sensor.de>) (далее в статье используются сокращенные обозначения приборов –NT, GS, NS соответственно). Все три прибора имеют активный источник излучения и принимающее светочувствительное окно для измерения отраженного сигнала. Принципиальное отличие приборов друг о друга заключается в том, что у них разный размер «точки» получаемой информации о посевах. NT работает с отдельными растениями: необходимо провести 30–32 точечных измерений, затем по полученным данным прибор автоматически высчитывает среднее значение индекса. GS измеряет среднее значение NDVI на

площади около 0,6–0,8 м². NS автоматически усредняет показания с площади около 30 м². Кроме того, NS выдает итоговую информацию не в виде индекса NDVI, а при помощи встроенной базы данных пересчитывает показатель NDVI в относительную биомассу посева (BI), для которой затем необходимо назначить рекомендуемую дозу азотной подкормки. По данным производителя, на начало 2017 г. во встроенной базе данных прибора содержалось 23 готовых сценария по внесению азотных подкормок под различные культуры в зависимости от фазы развития. Прибор NT отличается от двух других также тем, что в качестве отклика измеряет не отраженный от зеленого листа оптический сигнал, а сигнал после прохождения листовой пластинки насквозь.

На рис. 1 представлены соотношения размеров «точек» информации о посевах у трех перечисленных приборов и частные случаи размещения «точек» в посевах.

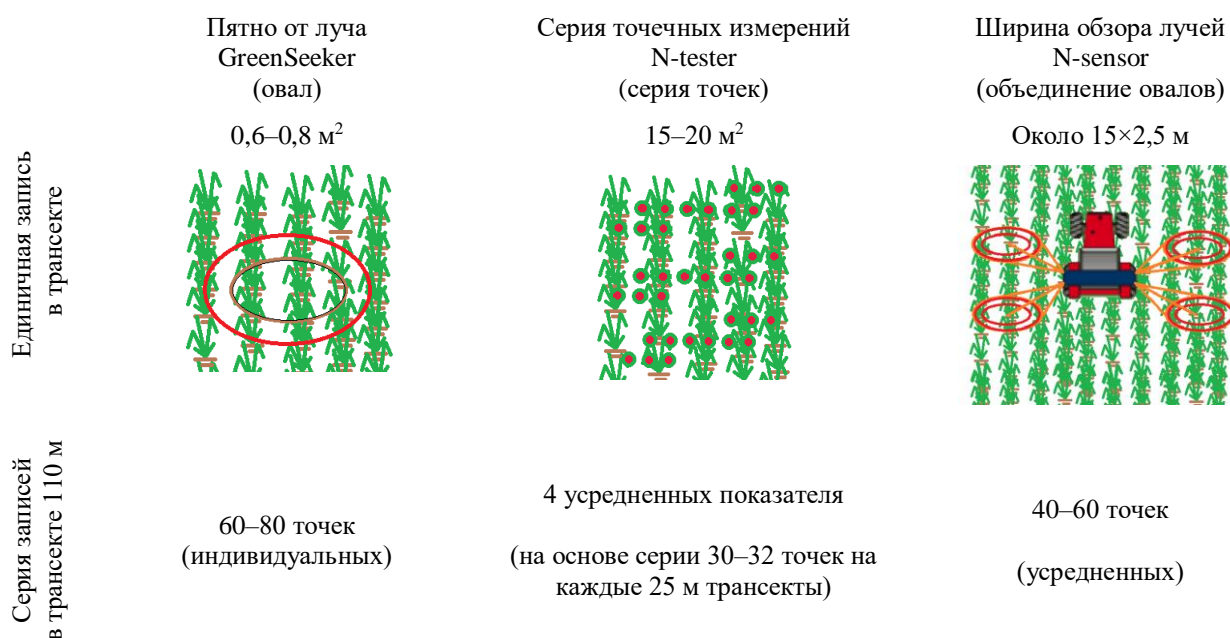


Рис. 1. Схема единичных и серийных измерений на посевах при помощи трех оптических датчиков: соотношение размеров «точек» и схематическое размещение в посевах при обследовании

В рамках опыта Центра точного земледелия (ЦТЗ) измерения на посевах зерновых при помощи трех указанных приборов проводились каждый сезон с различной периодичностью для выработки оптимального алгоритма обследования. Массив данных, полученных за один срок обследования, являлся достаточно большим: файл единичного обследования с помощью GS содержал около 2,5–3 тысяч индивидуальных записей при покрытии всей площади поля, файл обследования с помощью NS – 400–500 таких записей по точкам, а файл обследования с помощью NT – 40–70 записей, каждая из которых является усредненным показателем для 30-ти случайно выбранных растений на делянке. Объектом исследования являлась вся площадь поля, а для обработки первичных данных на нем было выбрано 9 постоянных линий опробования, которые

представляют собой трансекты, заложенные вдоль рядков посева.

Одновременное обследование всей площади поля при помощи тех приборов по данной методической схеме позволяет сравнивать результаты методов оценки состояния посева. Поскольку оптические измерения на посевах проводились с разным масштабом входной информации (размер «точки»), то для сопоставления полученных результатов между собой необходимо было выбрать эталонный размер «пиксела измерений». В настоящем исследовании в качестве эталона оптического измерения NDVI приняты показания прибора GreenSeeker® RT200, площадь захвата луча которого составляет 0,6–0,8 м². Для культур сплошного сева такой размер точки опробования является наиболее подходящим, т.к. он позволяет оценить

вариабельность посевов, обусловленную различными причинами: тренды плодородия на поле, полосы технологий и биологическое варьирование объекта исследования (посева и почвы). Посредством принятия показаний GS за эталон была достигнута пространственная стандартизация измерений. Также для сопоставления данных, полученных с разных приборов, в динамике необходима стандартизация шага временных рядов. Согласно результатам настоящего исследования, для оценки динамики изменения состояния растительности по индексу NDVI необходимо проводить съемку не реже одного раза в 7–10 дней, подобная рекомендация по обследованию посевов содержится также в работах других исследователей (Савин, 2015). В опыте ЦТЗ данный временной шаг был принят для определения NDVI в динамике. С указанной периодичностью проводились исследования при помощи оптических датчиков GS и NT. Прибор NS в опыте ЦТЗ используется в два–три срока за вегетационный сезон для оценки пространственной неоднородности биомассы посева озимой пшеницы перед проведением азотной подкормки. В мае 2011 г., перед второй азотной подкормкой пшеницы (в фазу выхода в трубку), обследования были проведены при помощи всех трех приборов одновременно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При сравнении показателей трех оптических датчиков (GS, NS и NT) за один и тот же срок (фазу выхода в трубку) была выявлена их сильная вариабельность, которая складывается из нескольких типов: технологическая вариабельность (зависимость значений измеряемого показателя от технологии возделывания), почвенно-биологическая вариабельность (зависимость от состояния растений в каждом конкретном месте на поле) и приборно-аналитическая вариабельность (зависимость от способа получения и усреднения информации). Приборно-аналитическая составляющая вариабельности ничтожно мала по сравнению с вкладом природных и технологических факторов – аналитическая ошибка данных методов не превышает 1–2%.

На рис. 2 в графическом виде представлены совмещённые показания трёх приборов для одного из сроков обследования (май, фаза выхода в трубку) на примере двух трансект на поле. Показатель относительной биомассы (BI, определен с помощью прибора NS) сравнивается с NDVI (определен с помощью прибора GS) и показателями прибора NT (относительные единицы, на графике отображены в масштабе шкалы NDVI). Все три показателя являются относительными оценками обеспеченности посева легкодоступным азотом.

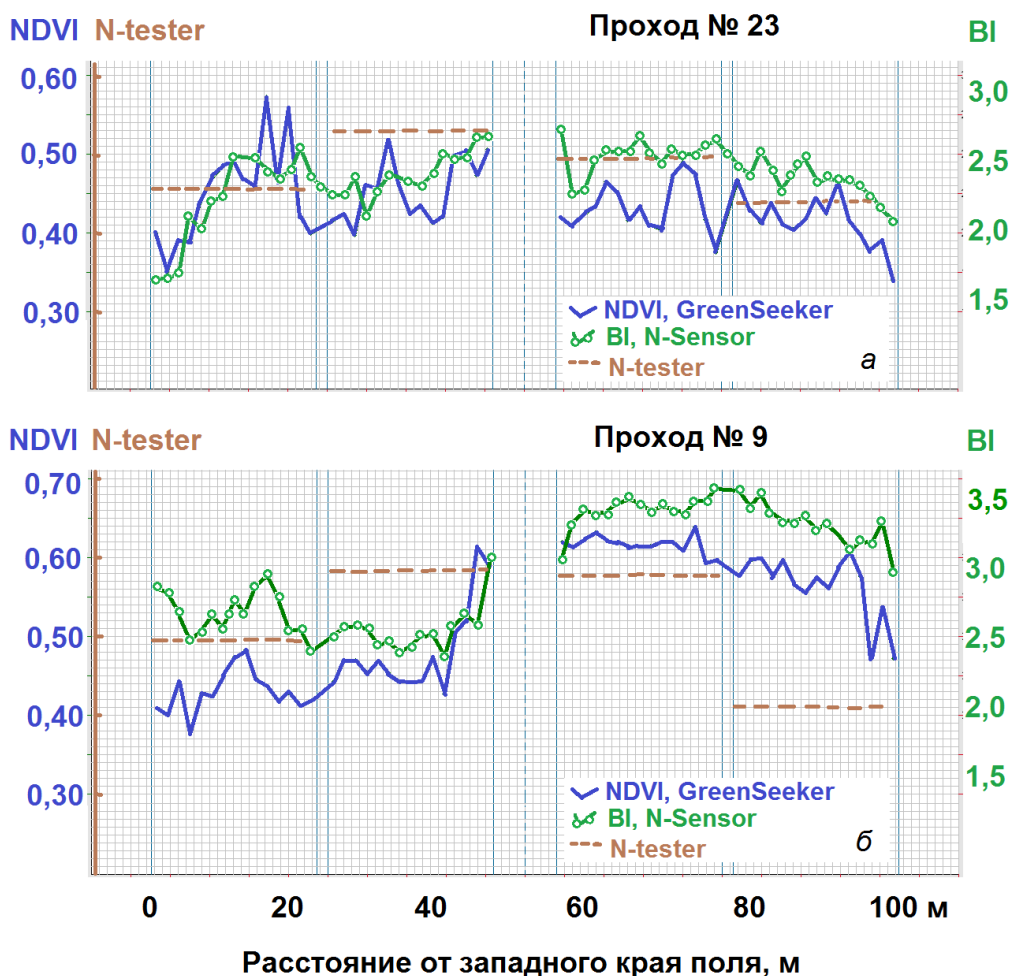


Рис. 2. Сопоставление пространственных данных о растительных индексах, определенных при помощи трех оптических датчиков, для двух линий-трансект на поле (вдоль направления посева).

Дата обследования – 5 мая 2011 г.; фаза развития посева озимой пшеницы – выход в трубку

Измеренные с помощью приборов GS и NS показатели, построенные по линии трансекты (с учётом усреднения по ширине захвата луча NS), выглядят идентично друг другу, но при этом они достаточно сильно варьируются на малых расстояниях в пределах нескольких метров. Коэффициенты вариации NDVI и BI по отдельным учётным площадкам для указанного срока составляют от 8 до 57%, в среднем – 21–22%. Показания прибора NT (по которым оценивается так называемый «азотный статус растений») – это среднее значение, полученное при измерении 30–32 растений на тех же площадках опыта, где проводились измерения с помощью GS и NS. Характерно, что при сопоставлении показателей NT и GS достоверной связи между ними в указанный срок обследования (май) не выявлено (коэффициент корреляции $R = 0,05$), то есть индекс NDVI посева в целом не совпадает с аналогичным показателем отдельных растений (рис. 2). Видно, что в большинстве случаев измеряемые показатели близки друг к другу и их изменение вдоль линии опробования происходит сопряженно, т. е. они находятся в прямой зависимости друг от друга. Однако в некоторых местах на поле выявляется противоположная зависимость: при высоких значениях NDVI и BI

отмечаются низкие показатели N-tester и наоборот (рис. 2, б). Несоответствия результатов совместных приборных измерений друг другу объясняются, во-первых, высокой вариабельностью состояния посевов на малых расстояниях и, во-вторых, неравномерной обеспеченностью отдельных растений минеральными элементами, в первую очередь – легкодоступным азотом.

При большой густоте стояния всходов общий показатель NDVI (определенный с помощью GS) на пробной площадке может быть относительно высоким, т. к. в начальные фазы роста NDVI напрямую зависит от общей площади проективного покрытия зеленой массы растений. При этом показатели прибора NT, полученные при обследовании группы индивидуальных растений в том же месте и в тот же срок, могут свидетельствовать о недостаточной обеспеченности азотом, т. к. каждое отдельное растение в загущенном посеве будет испытывать недостаток азота из-за конкуренции. Данный недостаток будет обнаружен прибором GS лишь спустя несколько дней по недостаточному приросту NDVI. Причины существенных различий между значениями NDVI (определенными при помощи GS) и показаниями NT могут быть разными, например, большая погрешность определения по листу

прибором NT в данный срок обследования, локальные условия роста посева, несоответствие густоты стояния растений уровню обеспеченности легкодоступным азотом.

Показатели растительных индексов, определенные с помощью приборов GS и NS, исходно имеют усреднение по площади посева, попадающей под луч прибора (рис. 1): для GS – 0,6–0,8 м², для NS

– около 30 м². Несмотря на различия в размере входной информации и высокую природную вариабельность состояния посева, при сопоставлении значений растительных индексов в каждый срок обследования была выявлена достоверная положительная и достаточно тесная корреляционная связь между NDVI и BI (рис. 3).

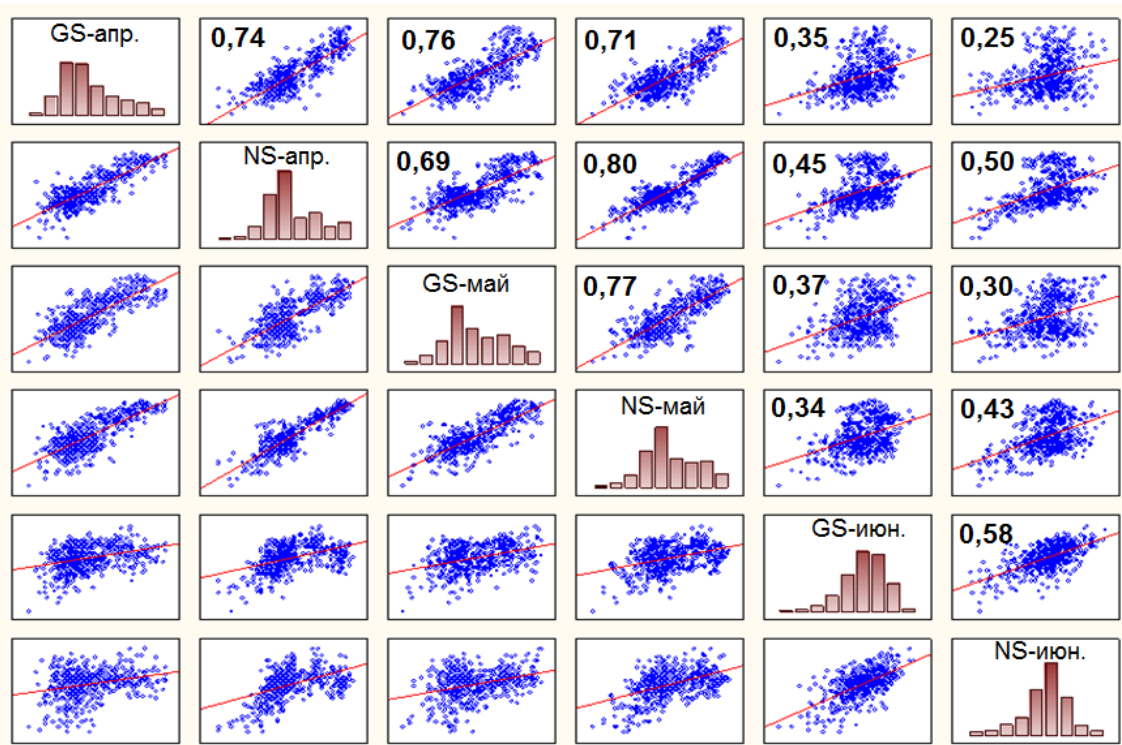


Рис. 3. Диаграммы корреляционных связей между исходными показаниями приборов GreenSeeker (GS) и N-Sensor (NS) в разные сроки наблюдения в 2011 г. В ячейки диаграммы вписаны коэффициенты корреляции Спирмена для сравниваемых пар; все коэффициенты определены достоверно на уровне значимости $p < 0,05$

Распределение значений NDVI и BI отличается от нормального, поэтому для оценки тесноты связи между данными показателями был использован коэффициент корреляции Спирмена R_s . Для обследования в апреле (фаза кущения, до проведения первой азотной подкормки) и в мае (фаза выхода в трубку, через две недели после проведения подкормки) коэффициенты корреляции Спирмена составили 0,74 и 0,77 соответственно; для обследования в июне (фаза начала колошения, перед второй подкормкой) R_s составил 0,58. По мере развития посева теснота связи между NDVI и BI снижалась (рис. 3), однако в течение всего периода вегетации оставалась достоверной на уровне значимости $p < 0,05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обследования посевов озимой пшеницы с помощью трех оптических датчиков можно сделать вывод, что для оценки состояния и развития посева в период вегетации предпочтительно использовать приборы GreenSeeker и N-sensor. При помощи данных приборов определяется показатель NDVI посева на тестовой площади, что позволяет учесть его пространственную неоднородность и

использовать полученные данные для проведения азотной подкормки в дифференцированных дозах. Вариабельность растительных индексов на близких расстояниях выявляется при помощи всех трех оптических датчиков. В то же время в случае проведения измерений на неоднородных участках посева показания прибора N-tester могут существенно отличаться от показаний GreenSeeker и N-sensor, что может привести к неправильному выбору планируемых доз азотных удобрений. Таким образом, метод оценки азотного статуса посевов при помощи только прибора N-tester является уязвимым к высокой пространственной неоднородности развития посевов в разных частях поля и потому не может быть надёжным. Приборы GreenSeeker и N-sensor являются взаимозаменяемыми при оценке состояния посевов по индексу NDVI, т. к. их показатели хорошо сопоставимы друг с другом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Е.В. Березовскому и Д.В. Гусеву за помощь при проведении обследования посевов при помощи оптических датчиков GreenSeeker ® RT 200 и Yara N-Sensor ®ALS, а также В.Л. Иванову за помощь в

создании алгоритма математической обработки больших массивов пространственно распределенных первичных данных по индексам NDVI и BI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балабанов В. И., Федоренко В. Ф. (ред.) Технологии, машины и оборудование для координатного (точного) земледелия. М.: Издательство ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 220 с.
- Савин И. Ю. Современный спутниковый мониторинг почв и посевов: достижения и проблемы // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 29–32.
- Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
- Якушев В. П., Канаш Е. В., Конев А. В., Ковтюх С. Н., Лекомцев П. В., Матвеев Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В., Буре В. М., Русаков Д. В., Осипов Ю. А. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева. Практическое пособие. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2010. 60 с.
- <http://www.trimble.com/agriculture/greenseeker> [Электронный ресурс].
- <http://www.n-sensor.de> [Электронный ресурс].
- <http://www.yara.ru/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-tester/> [Электронный ресурс].

REFERENCES

- Balabanov V. I., Fedorenko V. F. (red.). *Tehnologii, mashiny i oborudovanie dlja koordinatnogo (tochnogo) zemledelija* [Technologies, equipment and devices for coordinate (precision) agriculture]. Moscow: Publishing house FGBNU «Rosinformagroteh», 2016. 220 p.
- Savin I. Ju. *Sovremennyy sputnikovyj monitoring pochv i posevov: dostizhenija i problemy* [Current satellite monitoring of crops: achievements and problems] // *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Primenenie sredstv distancionnogo zondirovanija Zemli v sel'skom hozjajstve»*. Sankt-Petersburg, 16–17 sentjabrja 2015 g. [Materials of the international conference «Remote sensing methods in agriculture». St. Petersburg, September 16–17, 2015]. Sankt-Petersburg, Publishing house ARI, 2015. pp. 29–32.
- Cherepanov A. S. *Vegetacionnye indeksy* [Vegetation indices] // *Geomatika*, 2011, no. 2, pp. 98–102.
- Jakushev V. P., Kanash E. V., Konev A. V., Kovtiukh S. N., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Jakushev V. V., Bure V. M., Rusakov D. V., Osipov Ju. A. *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydelenija odnorodnyh tehnologicheskikh zon dlja differencirovannogo primenenija sredstv himizacii po opticheskim harakteristikam poseva. Prakticheskoe posobie* [Theoretical and methodological approaches for optical detection of homogeneous technological zones of crop for differential application of agrochemicals. A practical guide]. Sankt-Petersburg: Publishing house ARI, 2010. 60 p.
- <http://www.trimble.com/agriculture/greenseeker>
- <http://www.n-sensor.de>
- <http://www.yara.ru/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-tester/>

УДК: 546.26:631.8:581.1, 635.07

DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.09

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ И КРЕМНЕЗОЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ К ЗАБОЛЕВАНИЮ КОРНЕВЫМИ ГНИЛЯМИ

Г. Г. Панова¹, К. Н. Семенов², О. А. Шилова^{3,4}, Д. Л. Корнюхин⁵, А. М. Шпанев¹, Л. М. Аникина¹,
Т. В. Хамова³, А. М. Артемьева⁵, Е. В. Канаш¹, Н. А. Чарыков⁶, О. Р. Удалова¹, А. С. Галушко¹,
А. С. Журавлева¹, П. С. Филиппова¹, Д. В. Кудрявцев¹, С. Ю. Блохина¹

¹ ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, 195220,
E-mail: gaiane@inbox.ru;

² ФГБОУ ВПО СПбГУ, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, 199034
E-mail: semenov1986@yandex.ru;

³ ФГБНУ ИХС, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034

⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376
E-mail: olgashilova@bk.ru; ltrp@rambler.ru;

⁵ ФГБНУ ФИЦ ВИР, ул. Большая Морская, 42-44, Санкт-Петербург, 190000
E-mail: akme11@yandex.ru

⁶ Санкт-Петербургский технический университет
Московский пр., д. 26, Санкт-Петербург, 190013
E-mail: ncharykov@yandex.ru

