

Робототехника и агрохимическое обеспечение растениеводства

Robotics technology and agrochemical support of plant cultivation

В. Г. СЫЧЕВ¹, академик РАН,
д-р техн. наук

Р. А. АФАНАСЬЕВ¹, д-р техн. наук

З. А. ГОДЖАЕВ², д-р техн. наук

А. П. ГРИШИН², д-р техн. наук

А. А. ГРИШИН², канд. экон. наук

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова, Москва, Россия, info@vniia-pr.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, Москва, Россия, vim-transport@mail.ru

V. G. SYCHEV¹, Academician of the Russian Academy of Sciences, DSc in Engineering

R. A. AFANAS'EV¹, DSc in Engineering

Z. A. GODZHAEV², DSc in Engineering

A. P. GRISHIN², DSc in Engineering

A. A. GRISHIN², PhD in Economics

¹ D. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agricultural Chemistry, Moscow, Russia, info@vniia-pr.ru

² All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russia, vim-transport@mail.ru

Дан обзор методов мониторинга внутривидовой вариативности (пестроты) почвенного плодородия и состояния посевов. Отмечены два направления их реализации, имеющие принципиальное значение для роботизированных технологий: дистанционное и наземное. К дистанционным методам идентификации пестроты почвенного плодородия и посевов относятся: инфракрасная спектрометрия посевов с применением вертолета, беспилотников-квадрокоптеров и других низколетящих аппаратов с фиксацией состояния обследуемых объектов на прикрепленные фотокамеры; радиолокационное и фотометрическое зондирование, позволяющее в режиме реального времени выделять на полях области с различными агрохимическими свойствами. Из наземных способов агрохимического обследования почв и посевов выделены сеточный метод отбора почвенных проб с использованием автоматизированных пробоотборников, оборудованных навигационными приборами, использование связи плодородия почв с их топографией, сканирование электропроводности почвы. Приведен вариант выявления внутривидовых контуров плодородия почвы при автоматическом определении урожайности сельскохозяйственных культур, главным образом зерновых, в процессе уборки. Дана блок-схема реализации этого способа. По полученным данным создается карта урожайности поля, что позволяет разделить участки (контуров) поля по уровню урожайности. Приведено описание гусеничного шасси, на котором размещаются гибридная энергоустановка, аппаратура управления движением, сенсорика и точного позиционирования, машинного зрения. Шасси служит практической основой развития роботизированных технологий растениеводства, в том числе машины-удобрителя, которая при полной роботизации агрохимического обеспечения растениеводства на основе беспилотных мобильных энергосредств станет основной робототехнической единицей.

Ключевые слова: робототехника; агрохимия; плодородие почвы; мониторинг; внесение удобрений; беспилотное мобильное энергосредство.

The article provides an overview of methods for monitoring of crop condition and variability (diversity) of soil fertility in the field. Two ways of their implementation having fundamental importance to robotic technologies are marked, namely the remote and at-ground ones. Remote methods for identification of diversity of soil fertility and crop condition are infrared spectrometry of crops by means of helicopters, quadcopters, drones and other low-altitude vehicles capable to shoot the condition of targets by means of attached camera, and also the radar-photometric remote sensing which allows to mark the field areas with different agrochemicals properties in real-time mode. Among the at-ground methods of agrochemical investigation of soils and crops special attention is paid to the mesh method of soil sampling with the use of automated samplers equipped with navigational devices, the usage of relation of soil fertility with its topography and the scanning of electrical conductivity of soil. The article presents a variant of identification of field contours of soil fertility during the automatic determination of productivity of crops (principally grain-crops) in harvesting process. A block diagram of implementation of this method is given. The obtained data is used for the construction of field productivity map, which allows to divide the areas (contours) on levels of productivity. A tracked chassis with hybrid power plant, motion control equipment and machine vision device is described. The chassis serves as the practical basis for development of robotic technologies in plant cultivation, including the fertilizer distributor that will become the base robotic unit in case of full robotization of agrochemical support of plant cultivation based on unmanned mobile power units.

Keywords: robotics technology; agrochemistry; soil fertility; monitoring; fertilizer application; unmanned mobile power unit.

Введение

В научной и производственной литературе все шире применяется термин "робототехника", обозначающий высшую ступень развития автоматизации технических устройств и технологических приемов.

В сельском хозяйстве роботизированные технологии нашли применение в точном (координатном) земледелии. Его характерная особенность — учет внутривидовой вариативности (пестроты) почвенного плодородия и состояния посевов, который практически невозможен

при ручном управлении производственными процессами дифференцированного применения агрохимических средств.

В частности, полевые научно-производственные опыты, проведенные специалистами Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии им. Д. Н. Прянишникова (ВНИИА) в условиях Воронежской обл. в 2007—2009 гг., показали, что внутривидовая пестрота содержания минерального азота в пахотном слое чернозема достигает 40 % и более.

Основоположник отечественной агрохимии Д. Н. Прянишников писал: "Определение содержания в почвах подвижных форм азота, фосфора и калия может быть использовано для дифференцировки доз и соотношений азотистых, фосфорнокислых и калийных удобрений, вносимых под одну и ту же культуру, в одном и том же поле севооборота, но на участках поля, различающихся по почвенным условиям. Отсюда большое значение приобретают разнообразные способы учета этих изменяющихся во времени и пространстве свойств почвы в целях наиболее эффективного применения удобрений" [1].

Цель исследования

В этом тезисе обозначены два направления реализации идеи точного земледелия, имеющих принципиальное значение для роботизированных технологий: 1) разработка методов выявления вариабельности плодородия почв и состояния посевов; 2) создание туковысевающих механизмов, позволяющих производить дифференцированное внесение агрохимических средств.

В связи с этим цель исследования состоит в поиске возможностей реализации методов выявления вариабельности плодородия почв и состояния посевов в робототехнике.

Материалы и методы

Дистанционные методы идентификации пестроты почвенного плодородия и состояния посевов могут выполняться с использованием авиакосмических снимков, в т.ч. с беспилотных летательных аппаратов (дронов, коптеров).

Оригинальные исследования ВНИИА показали, что дистанционное зондирование может проводиться как по открытой (вспаханной), так и по покрытой растительностью почве в радио- и фотодиапазонах электромагнитных волн [2, 3].

Важное значение имеет тот факт, что дистанционная радиолокация позволяет проводить обследование посевов независимо от погоды и времени суток. Успешной оказалась также инфракрасная спектрометрия посевов озимой пшеницы с применением вертолета в обычных (мелкоделяночных) полевых опытах с удобрениями в опытно-производственном хозяйстве "Газырьское". Коэффициенты линейной корреляции между величиной сигналов и содержанием общего и нитратного азота в растениях составили 0,8—0,9.

В последние годы активно развивается дистанционное зондирование почв и посевов с помощью беспилотников-квадрокоптеров и других низколетящих аппаратов с фиксацией состояния обследуемых объектов на прикрепленные фотокамеры. Это повышает точность и оперативность диагностического обследования, снижает себестоимость диагностических работ.

Радиолокационное и фотометрическое дистанционное зондирование почв и посевов с.-х. культур позволяет в режиме реального времени выделять на полях области с различными агрохимическими свойствами для отбора и агрохимического анализа почвенных и/или растительных проб, составлять электронные агрохимические картограммы обеспеченности почв и растений

элементами минерального питания. Иначе говоря, методы дистанционного зондирования с применением современных технических средств и компьютерных программ позволяют в оцифрованном виде или визуально выделять на площади полей при определенном масштабе и уровне генерализации элементарные участки как для отбора и агрохимического анализа почвенных образцов, так и для дифференцированного внесения удобрений.

Из наземных способов агрохимического обследования почв и посевов следует выделить сеточный метод отбора почвенных проб с использованием роботизированных пробоотборников, оборудованных навигационными приборами.

Используя выделенные контуры почвенного плодородия в качестве элементарных ареалов, можно провести по ним отбор почвенных проб и установить уровень обеспеченности почв теми или иными элементами, т.е. составить агрохимическую картограмму поля. Данный метод значительно экономичнее предыдущего, так как исключает "слепой" отбор почвенных проб по частой сетке. Его недостаток — ориентация на отзывчивость определенной культуры на факторы плодородия. Известно, что культуры неодинаково реагируют на почвенные условия, и контуры плодородия, определенные по урожайности этих культур, также различаются. Тем не менее данный способ выявления контуров почвенного плодородия вполне допустим в практике точного земледелия. Применение датчиков, регистрирующих урожайность в процессе уборки с.-х. культур, дает возможность не только составить картограммы урожайности, но и решить ряд других хозяйственных задач.

Существует непосредственная связь плодородия почв с их топографией, т.е. различиями в агрохимических и агрофизических свойствах почв на разных участках рельефа. Например, на Центральной опытной станции ВНИИА при анализе почвы агрополигона установлена вполне определенная зависимость кислотности и содержания в почве отдельных элементов питания от особенностей микрорельефа. На повышенных участках из форм минерального азота нитраты преобладают над аммонием, на пониженных — наоборот. Это объясняется миграцией высокоподвижных нитрат-ионов с водными потоками в пониженные участки и их восстановлением до аммония, фиксируемого почвой.

Посредством сканирования электропроводности почвы также можно выделить внутривольные контуры плодородия, поскольку при почти диэлектрических свойствах пород и минералов, образующих почвенный скелет, электропроводность зависит главным образом от ионов, которые преимущественно служат элементами питания растений.

По данным исследований [4], коэффициент корреляции между содержанием в почве минерального азота и показателем прямой электропроводности почвенных образцов, отобранных на элементарных участках дерново-подзолистой почвы и приведенных к равновесной влажности, составил 0,85 и был достоверен при уровне вероятности 95 % (рис. 1).

Дистанционное зондирование, сканирование урожайности и электросканирование почвы, ускоренное топографирование рельефа полей в сочетании с автоматизированным отбором почвенных проб и использованием

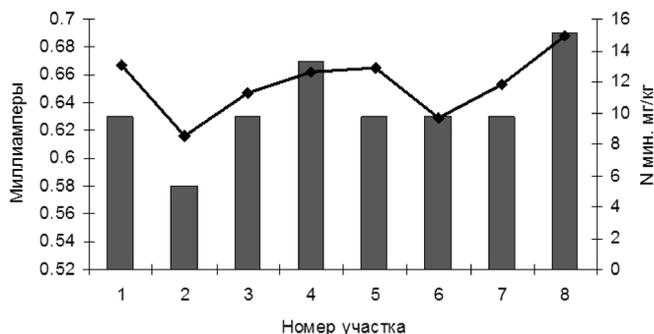


Рис. 1. Зависимость электропроводности почвы (столбцы) от содержания в ней минерального азота (линия)

ГИС-технологий для обработки картографического материала полей позволяют, по сравнению с сеточным методом, существенно сократить затраты на агрохимическое обследование полей за счет уменьшения количества отбираемых почвенных проб. Их отбор проводится не схематически, вслепую, а на элементарных участках, априори различающихся по плодородию и заранее выделенных на электронных картах полей.

В целом проблема применения агрохимических средств для оптимизации минерального питания растений существует с античных времен и ввиду ее сложности актуальна до настоящего времени [5, 6]. Ее решали различными способами и с разным успехом [7, 8]. В основном это были расчетные методы оптимальных доз удобрений с использованием в лучшем случае настольных калькуляторов, т.е. по сути вручную. С внедрением персональных компьютеров появилась возможность в определенной степени автоматизировать методы расчета, но, как показала практика, созданные ранее программы базировались на прежних методологических подходах, в частности на методе элементарного баланса, в большинстве случаев учитывающих коэффициенты использования питательных веществ растениями из почвы и применяемых удобрений, что оказалось неприемлемым с практической точки зрения.

Приоритет в диагностике азотного питания растений до сих пор остается за фотометрическими методами сканирования вегетирующих посевов ввиду их универсальности и достаточно высокой чувствительности. При определении средней дозы азота для дифференцирования машинами-удобрителями по результатам сканирования предварительно используют портативные фотометры типа Yara, ССМ-200, Crop Circle, "ВНИИА-Спектролюкс", заранее откалиброванные на базе полевых опытов. Затем средняя доза вводится в бортовой компьютер удобрения и при движении агрегата по полю распределяется в соответствии с показаниями фотосенсора.

Результаты и их обсуждение

Выявление внутривольных контуров плодородия возможно также при автоматическом определении урожайности с.-х. культур, главным образом зерновых, в процессе уборки (рис. 2).

Расходомер определяет плотность потока проходящего через него зерна. Полученные данные передаются в контроллер. Контроллер по изменяющейся плотности

потока зерна и заданному алгоритму определяет урожайность с привязкой к конкретным координатам, полученным с Глонасс-приемника. По полученным данным создается карта урожайности поля, которая сохраняется на встроенном накопителе или передается в облачное хранилище для дальнейшей обработки данных соответствующими службами, что позволяет в дальнейшем разделить участки (контуры) поля по уровню урожайности.

В качестве машин-удобрителей при полной роботизации технологий возделывания с.-х. культур могут применяться беспилотные мобильные энергосредства с.-х. назначения (БМЭСХ). Они послужат практической основой перспективного развития роботизированных технологий растениеводства [9].

БМЭСХ — это колесная или гусеничная платформа, на которой размещаются гибридная энергоустановка, аппаратура управления движением, сенсоры и точного позиционирования, машинного зрения, а также управления роботизированными навесными рабочими органами для дифференцированного внесения удобрений [10].

Рабочие органы подразделяются на виды в зависимости от технологий, применяемых в различных областях растениеводства: селекции, семеноводстве и полеводстве, садоводстве и питомниководстве, овощеводстве, в т.ч. тепличном.

В ВИМе разработан и изготовлен опытный образец такой платформы (рис. 3) со следующими характеристиками [11].

Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1000×1200×400
Мощность электродвигателей, кВт	1,5
Тип привода	трехфазный асинхронный
Аккумуляторное питание	12 В; 110 А·ч
Передаточное число понижающего редуктора	15
Момент на выходном валу редуктора, Н·м	145
Время работы до подзарядки, ч	4,5
Вес, кг	240

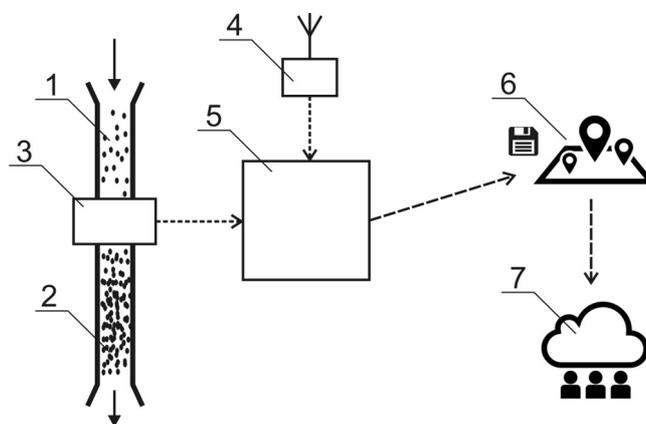


Рис. 2. Блок-схема регистрации урожайности внутривольных контуров:

1, 2 — поток зерна различной плотности; 3 — расходомер сыпучих тел (типа MaxxFlow); 4 — Глонасс/GPS-приемник; 5 — контроллер; 6 — накопитель (карта памяти на комбайне); 7 — облачное хранилище

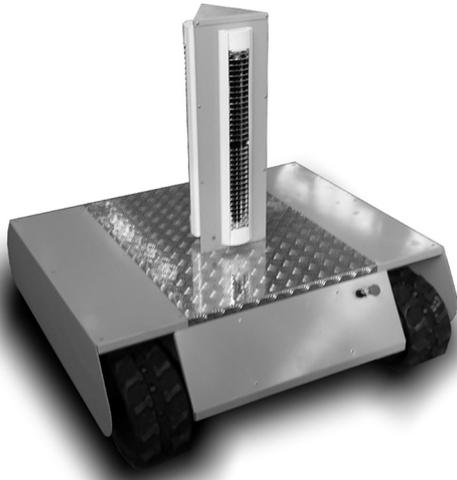


Рис. 3. Гусеничная платформа БМЭСХ

Машинное зрение — неотъемлемый элемент рабочих органов для каждой из областей растениеводства, поскольку значительную часть информации об окружающем мире, в т.ч. о состоянии азотного питания растений (фотометрическими методами при сканировании вегетирующих посевов) получают через зрительные образы, а также системы управления движением, точного позиционирования. Наличие такой информации позволяет роботизированным рабочим органам принимать технологические решения и осуществлять требуемые операции, а БМЭСХ — передвигаться согласно технологическому маршруту.

Выводы

Рассмотренные методы выявления вариабельности плодородия почв и состояния посевов могут быть реализованы в робототехнических комплексах с.-х. назначения.

Литература и источники

1. **Прянишников Д. Н.** Избранные сочинения. Т. 1. М.: Колос, 1965. 721 с.
2. **Афанасьев Р. А., Благов А. В., Мейер О. Н.** Усовершенствованный способ агрохимического обследования почв. Патент РФ № 2102748, 1998.
3. **Афанасьев Р. А., Ширинян М. Х., Благов А. В.** и др. Способ дистанционной диагностики озимой пшеницы вне зависимости от погодных условий и времени суток. Патент РФ № 2075076, 1997.
4. **Афанасьев Р. А., Аканов Э. Н., Сычев В. Г.** и др. Способ определения удельной электропроводности почвы. Патент РФ № 2331070, 2008.
5. **Крупеников И. А.** История почвоведения. М.: Наука, 1981. 328 с.
6. **Сычев В. Г., Байбеков Р. Ф., Измайлов А. Ю.** и др. Информационно-технологическое обеспечение точного земледелия // Плодородие. 2011, № 3. С. 44—47.

7. **Михайлов Н. Н., Книпер В. П.** Определение потребности растений в удобрениях. М.: Колос, 1971. 256 с.
8. **Афендулов К. П., Лантухова А. И.** Удобрения под планируемый урожай. М.: Колос, 1973. 240 с.
9. **Гришин А. П., Гришин В. А., Гришин А. А.** и др. Ключевые технологии и прогноз развития сельскохозяйственной робототехники // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф. М.: ВИЭСХ, 2016. С. 66—73.
10. **Годжаев З. А., Гришин А. П., Гришин А. А.** Перспективы развития роботизированных технологий в растениеводстве // Тракторы и сельхозмашины. 2015, № 12. С. 42—45.
11. **Гришин А. П., Гришин В. А., Гришин А. А.** и др. Программное обеспечение асинхронного привода гусеничной платформы // X Международная научно-практическая конференция "Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве". Май 2016. ВИЭСХ. С. 165—172.

References

1. **Pryanishnikov D. N.** *Izbrannye sochineniya* [Selected works]. Vol. 1. Moscow, Kolos Publ., 1965, 721 p.
2. **Afanas'ev R. A., Blagov A. V., Meyer O. N.** *Usovershenstvovannyy sposob agrokhimicheskogo obsledovaniya pochv* [Improved method of agrochemical inspection of soils]. RF patent no. 2102748, 1998.
3. **Afanas'ev R. A., Shirinyan M. Kh., Blagov A. V., Meyer O. N.** *Sposob distantsionnoy diagnostiki ozimoy pshenitsy vne zavisimosti ot pogodnykh usloviy i vremeni sutok* [Method for remote diagnostics of winter wheat regard less of weather conditions and time of the day]. RF patent no. 2075076, 1997.
4. **Afanas'ev R. A., Akanov E. N., Sychev V. G., Merzlaya G. E., Smirnov M. O.** *Sposob opredeleniya udel'noy elektroprovodnosti pochvy* [Method for determining the specific electric conductivity of soil]. RF patent no. 2331070, 2008.
5. **Krupenikov I. A.** *Istoriya pochvovedeniya* [History of soil science]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 328 p.
6. **Sychev V. G., Baybekov R. F., Izmaylov A. Yu., Afanas'ev R. A., Lichman G. I., Pugachev P. M.** Information and technology supply for precision farming. *Plodorodie*, 2011, no. 3, pp. 44—47 (in Russ.).
7. **Mikhaylov N. N., Kniper V. P.** *Opredelenie potrebnosti rasteniy v udobreniyakh* [Determination of needs of plants in fertilizers]. Moscow, Kolos Publ., 1971, 256 p.
8. **Afendulov K. P., Lantukhova A. I.** *Udobreniya pod planiruemuyu urozhay* [Fertilizers for the planned yield]. Moscow, Kolos Publ., 1973, 240 p.
9. **Grishin A. P., Grishin V. A., Grishin A. A., Godzhaev Z. A.** Key technologies and forecast of development of agricultural robotics. *Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve: Mat-ly X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Energy supply and energy saving in agriculture. Proc. of the X int. sci. and pract. conf.]. Moscow, All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture, 2016, pp. 66—73 (in Russ.).
10. **Godzhaev Z. A., Grishin A. P., Grishin A. A.** Development prospects of robotic technologies in plant cultivation. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2015, no. 12, pp. 42—45 (in Russ.).
11. **Grishin A. P., Grishin V. A., Grishin A. A., Godzhaev Z. A.** Software for asynchronous drive of a tracked platform. *Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve: Mat-ly X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Energy supply and energy saving in agriculture. Proc. of the X int. sci. and pract. conf.]. Moscow, All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture, 2016, pp. 165—172 (in Russ.).