

Земледелие и мелиорация

УДК 631.171

DOI: 10.31857/S2500262723060091, EDN: NIBVVQ

МЕТОДОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ***И. Ю. Савин^{1,2}**, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук,
Ю. И. Блохин³, **А. В. Чинилин¹**, кандидат биологических наук¹Федеральный исследовательский центр
«Почвенный институт им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7 стр. 26²Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6³Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Цифровые технологии активно распространяются в сельском хозяйстве России на разных уровнях анализа информации (от делянки, до поля, хозяйства, региона и страны в целом). В растениеводстве на уровне поля одно из самых важных значений приобретает освоение систем точного, оперативного и автоматизированного мониторинга состояния посевов, успешность которого во многом предопределяет эффективность точного земледелия. Цель исследований – разработка методологии использования технологий интернета вещей для бесконтактного мониторинга посевов сельскохозяйственных культур и сопутствующих метеорологических и почвенно-гидрологических параметров. В качестве основы системы используется беспроводная сеть, в состав которой входят сенсорные узлы, оснащенные датчиками метеорологических параметров и влажности почв, а также фотокамеры с широкоформатными объективами. Сенсорные узлы, оснащенные датчиками и фотокамерой, размещаются в соответствии со специально разработанной схемой, индивидуальной для каждого поля. Разработка схемы размещения датчиков базируется на анализе многолетних архивов спутниковых данных высокого пространственного разрешения и уточненных почвенных карт крупного масштаба. Информация с датчиков посредством беспроводной связи передается на координаторы сети (или базовую станцию) и далее на удаленный сервер в базу данных, где автоматизированно анализируется и интерполируется на все поле. На основе анализа формируются рекомендации по коррекции агротехнологии возделывания культуры. Элементы методологии прошли апробацию на ряде тестовых полей и показали высокую эффективность. Освоение предложенных подходов может служить альтернативой использованию данных дистанционного зондирования для мониторинга посевов в офлайн системах точного земледелия.

METHODOLOGY OF OPERATIONAL MONITORING OF CROP STATUS BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES**I. Yu. Savin^{1,2}**, **Yu. I. Blokhin³**, **A. V. Chinilin¹**¹Federal Research Center «Dokuchaev Soil Science Institute»,
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 26²Peoples' Friendship University of Russia,
117198, Moskva, ul. Miklukho-Maklaya, 6³Agrophysical Research Institute,
195220, St. Petersburg, Grazhdansky pr., 14
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Digital technologies are being actively introduced into Russian agriculture at different levels of information analysis (from the plot to the field, farm, region and country as a whole). In crop production at the field level, one of the most important values is the introduction of systems for accurate, rapid and automated monitoring of crop condition, the success of which largely predetermines the effectiveness of precision farming systems. The aim of the research is to develop a methodology for using Internet of Things technologies for non-contact monitoring of crops and related meteorological and soil-hydrological parameters. A wireless network is used as the basis for monitoring, which includes sensor nodes equipped with sensors for meteorological parameters, soil moisture and cameras equipped with a fish-eye lens. Sensor nodes equipped with sensors and cameras are placed in the field according to a specially designed scheme, individualized for each field. Development of the scheme of sensor placement on the field is based on the analysis of long-term archives of satellite data of high spatial resolution and refined soil maps of large scale. Information from sensors is wirelessly transmitted to the network coordinator (or base station) and then to the remote server in the database, and there it is automatically analyzed and interpolated for the whole field. Based on the analysis, recommendations for correction of agrotechnology of crop cultivation are formed. Elements of the methodology were tested on a number of test fields and showed high efficiency. Implementation of the proposed approaches can serve as an alternative to the use of remote sensing data for crop monitoring in offline precision farming systems.

Ключевые слова: мониторинг посевов, беспроводные сенсорные сети, сенсорный узел, биофизические параметры посева, внутривидовые неоднородности посевов, точное земледелие.

Key words: crop monitoring, wireless sensor networks, sensor node, biophysical crop parameters, in-field crop heterogeneities, precision agriculture

Тренд последних десятилетий в мировом сельском хозяйстве – широкое распространение цифровых технологий, которые используются для оперативного мониторинга сельскохозяйственного производства на основе

беспроводных сенсорных сетей (БСС), информационно-измерительных и дистанционных технологий, для создания интеллектуальных систем принятия решений и робототехники непосредственно для производственной

*исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России от 02.10.2020 г. № 075–15–2020–805).

деятельности [1, 2, 3]. Многие авторы определяют этот процесс как четвертую технологическую революцию в сельском хозяйстве, цифровым или умным сельским хозяйством [4, 5].

В земледелии этот процесс выражается в освоении технологий точного земледелия, а также разработке датчиков и систем принятия решений для этой технологии [6, 7, 8]. Принятие решений в технологии точного земледелия базируется на результатах мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур, который, в свою очередь, проводится на основе датчиков, непосредственно установленных на сельскохозяйственную технику, или данных дистанционной съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) либо со спутников [8].

Одно из перспективных направлений развития технологий точного земледелия – внедрение сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, которые стационарно или временно устанавливаются на поле для оперативного сбора информации о состоянии посевов [9, 10, 11]. Несмотря на перспективность этого подхода, он до сих пор не получил достаточного научного обоснования.

Цель исследований – разработать методологию использования сенсорных узлов для оперативного мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур.

Методика. При создании системы мониторинга посевов на основе сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, необходимо учитывать следующие обстоятельства:

почвенный покров практически любого поля неоднороден. Свойства почв могут сильно меняться в пространстве даже на расстоянии в нескольких метров. Поэтому для их мониторинга, который необходим для принятия управленческих решений, одного датчика на поле явно недостаточно. Это не обеспечивает сбор объективной информации о состоянии почв на всем поле, а не только в точке размещения датчика;

качество мониторинга зависит от подхода, используемого для пространственной интерполяции информации, собираемой датчиками;

использование традиционно составленной почвенной карты как источника информации о пространственной неоднородности свойств почв сильно ограничено, так как на ней акцент сделан только на варьировании наиболее важных классификационных свойств почв, которые часто не выступают агрономически значимыми и наоборот. Более того, традиционные методы составления почвенных карт не позволяют детально учитывать пространственные неоднородности отдельных свойств почв;

такая же ситуация с учетом неоднородностей посевов. Они могут быть обусловлены как пространственными неоднородностями свойств почв, так и другими причинами (например, неравномерностью посева или внесения питательных веществ, повреждением растений болезнями и вредителями или засоренностью посевов).

Для многих свойств почв и посевов отсутствуют датчики, которые позволили бы осуществлять их мониторинг в полевых условиях. Чаще всего используют мобильные системы для детектирования такого свойства почв, как электропроводность, с которой тесно связаны такие базовые агрономически значимые свойства, как влажность почв, их засоленность, минерализация почвенного раствора и гранулометрический состав почв. В экспериментальном режиме используют датчики плотности и сопротивления горизонтальной пенетрации (в движении) [12]. Для мониторинга состояния посевов чаще всего используют датчики, определяющие содержание азота, на основе вычисления спектральных

индексов [13]. Известны также датчики для оценки засоренности посевов и пораженности растений вредителями и болезнями [14, 15]. Достаточно широко распространены датчики для мониторинга метеорологических параметров, которые наиболее просты в использовании и хорошо апробированы [16].

Количество датчиков, размещаемых на поле, должно быть оптимальным с точки зрения возможностей сбора информации для всего поля и затрат на приобретение и обслуживание. Кроме того, необходимо учитывать возможности беспроводной передачи информации с датчиков на компьютер.

С учетом этих особенностей, создание системы мониторинга посевов на основе сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей, должно начинаться с разработки схемы оптимального размещения датчиков на поле (рис. 1). В качестве критерия для поиска оптимальных мест размещения сенсорных узлов целесообразно использовать информацию об устойчивых неоднородностях посевов на поле в течение последних десяти лет.

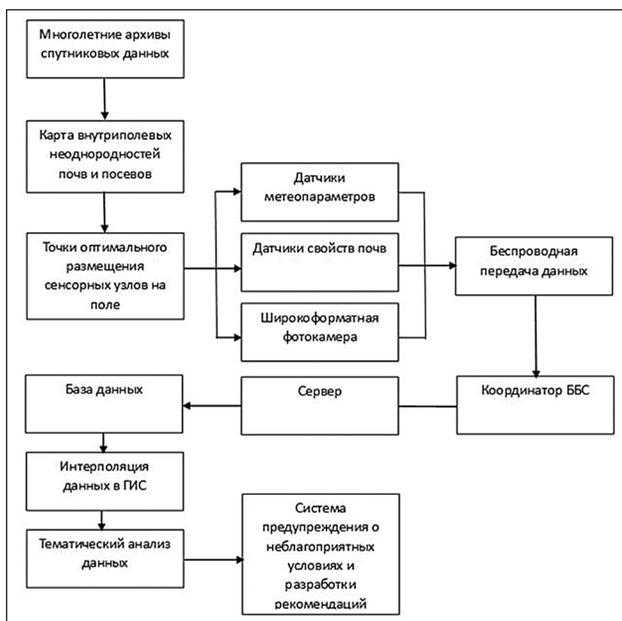


Рис. 1. Схема использования методологии.

С этой целью проводится выявление таких неоднородностей на основе анализа многолетних архивов спутниковых данных [9]. Сформированные за последние годы архивы позволяют проводить подобный анализ на большей части территории страны, за исключением полей небольшого размера, для которых пространственного разрешения спутниковых данных имеющихся архивов может оказаться недостаточно.

Опыт показывает, что для корректной интерполяции данных точечных наблюдений на все поле, необходимо не более 3...5 сенсорных узлов. В этом случае мониторинг почв и посевов можно проводить, опираясь исключительно на информацию с датчиков.

Тип датчиков интернета вещей, которые могут быть использованы для мониторинга, в последние годы ограничен. Это связано с наличием датчиков тех или иных свойств агроценозов. Из датчиков, регистрирующих метеорологические свойства приземной атмосферы и микроклимата, наиболее важны для сельскохозяйственных целей датчики температуры воздуха, количества атмосферных осадков, влажности воздуха,

скорости и направления ветра. Для мониторинга почв могут и должны использоваться датчики влажности, температуры, электропроводности почвы, установленные на глубине 10, 40, 60 и 100 см.

Мониторинг состояния посевов можно осуществлять с использованием датчиков содержания в листьях азота (или хлорофилла), опыт использования которых в системах точного земледелия и при дистанционном мониторинге посевов достаточно велик [7, 13]. Кроме того, необходимо обеспечить съемку посевов в надир с высоты 1,0...1,5 м на фотокамеру с широкоформатным объективом, что позволит собирать информацию о ходе развития растений и биофизических показателях посевов [17, 18].

Кроме того, в подобных системах мониторинга могут быть задействованы датчики состояния растений, которые крепятся непосредственно на модельное растение и анализируют состав раствора внутри стебля или листьев растения [19]. Однако они до сих пор достаточно дороги и мало апробированы в полевых (не тепличных) условиях.

Периодичность сбора данных о разных параметрах агроценоза должна различаться. Так, все метеорологические параметры достаточно получать 1 раз в 30 мин. в течение всего сезона вегетации. С такой же периодичностью целесообразно получать информацию с датчиков свойств почв. Оптимальная периодичность сбора сведений о состоянии посевов – 1 раз в неделю.

Информация со всех сенсорных узлов, установленных на поле, передается по беспроводной связи на координатор ББС, где накапливается, структурируется и анализируется.

Анализ метеорологических данных заключается в расчете агроклиматических параметров, важных для конкретной возделываемой культуры и конкретной местности, в слежении за трендами этих параметров и их прогнозе на ближайший период. На основе прогноза осуществляется заблаговременное предупреждение пользователя об опасности возникновения неблагоприятных метеорологических условий. Анализ поступающей метеорологической информации проводится для каждого сенсорного узла на поле, а результаты интерполируются на все поле с целью учета микроклимата. Аналогичным образом анализируются почвенные параметры.

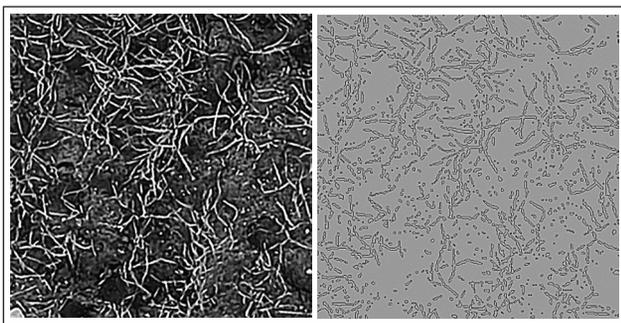


Рис. 2. Пример детектирования проективного покрытия посевов озимой пшеницы по изображениям, полученным в надир с широкоформатной камерой (слева – исходное изображение в черно-белом формате, справа – результат выделения растений (темно-серые выделки)).

Анализ состояния посевов ведется на основе оперативной съемки в надир с использованием широкоформатной камеры [18] (рис. 2). По широкоформатным изображениям в каждой точке рассчитываются такие параметры, как индекс поверхности растительности (РАI) (рис. 3), средний угол наклона листа (АLА), доля поглощенного фотосинтетически активного излучения

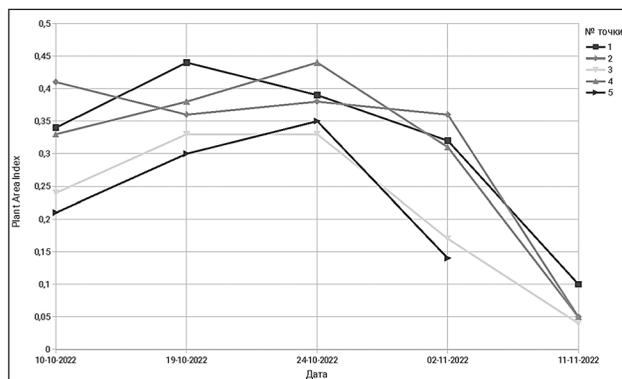


Рис. 3. Динамика значений РАI по ходу вегетации культуры в 5 точках на поле как результат мониторинга биофизических параметров посевов с использованием широкоформатной камеры.

(fAPAR) (рис. 4), доля проективного покрытия растительного покрова (fCOVER), которые затем также интерполируются на всю территорию поля в ГИС. Расчеты

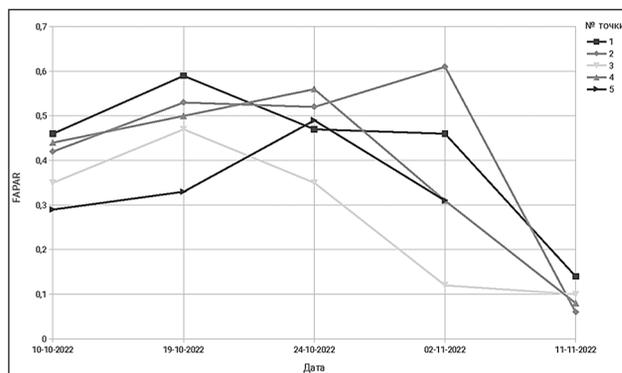


Рис. 4. Динамика значений fAPAR по ходу вегетации культуры в 5 точках на поле как результат мониторинга биофизических параметров посевов с использованием широкоформатной камеры.

могут проводиться с использованием программного обеспечения CAN-EYE [17, 18].

Тестирование элементов разработанной методологии осуществляли на примере полей Меньковского стационара Агрофизического научно-исследовательского института.

Результаты и обсуждение. Построенная предложенной системой мониторинга посевов (см. рис. 1) позволяет землевладельцу в реальном времени собирать информацию о состоянии метеоусловий, почв и посевов с учетом внутриполевых неоднородностей.

Согласно результатам тестирования элементов разработанной методологии, получение комплексной информации о состоянии почв, метеоусловий и посевов на основе других подходов (например, с использованием данных дистанционного зондирования или полевых обследований) с такой оперативностью и точностью сегодня практически неосуществимо. Об этом свидетельствуют как результаты наших исследований [8, 9, 12], так и данные других авторов [7, 10, 11].

Основными проблемами при практическом освоении описанных подходов представляются следующие:

- отсутствие надежных датчиков для детектирования многих свойств почв, особенно для подповерхностных горизонтов корнеобитаемой толщи;

- неустойчивость беспроводной передачи данных на больших полях и для датчиков, установленных внутри почвы;

недостаточный опыт моделирования биофизических параметров разных типов посевов;
отсутствие унифицированного программного обеспечения для анализа собираемой информации;
необходимость небольшого смещения части датчиков при обработке посевов в течение вегетации;
уязвимость сенсорных узлов к вандализму и повреждению от прочих негативных явлений. Разработка скрытых/замаскированных узлов для размещения на поле уже ведется в Агрофизическом научно-исследовательском институте.

Выводы. Технологии интернета вещей позволяют сегодня собирать наиболее полную, оперативную и точную информацию о состоянии посевов, почв и микроклимата на поле. При их использовании задействуется широкий набор современных цифровых методов и подходов: от спутниковых данных и дистанционной передачи информации, до распознавания образов и пространственного моделирования. Важное значение имеет проблема оптимизации размещения датчиков на поле с учетом внутривидовых неоднородностей. Дальнейшее развитие этих подходов должно быть направлено на создание датчиков иных свойств почв и посевов, которые позволят получать более полную информацию об их состоянии.

Литература

1. Soma T., Nuckchady B. *Communicating the Benefits and Risks of Digital Agriculture Technologies: Perspectives on the Future of Digital Agricultural Education and Training* // *Front. Commun.* 2021. 6:762201. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcomm.2021.762201/full> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3389/fcomm.2021.762201.
2. *Priorities for Science to Overcome Hurdles Thwarting the Full Promise of the 'digital Agriculture' Revolution* / M. Shepherd, J. A. Turner, B. Small, et al. // *J. Sci. Food Agric.* 2020. Vol. 100. No. 14. P. 5083–5092. doi:10.1002/jsfa.9346.
3. *Цифровое земледелие* / А. Л. Иванов, И. С. Козубенко, И. Ю. Савин и др. // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* 2018. № 5. С. 4–9.
4. Van der Burg S., Bogaardt M.-J., Wolfert S. *Ethics of Smart Farming: Current Questions and Directions for Responsible Innovation towards the Future* // *NJAS – Wageningen J. Life Sci.* 2019. 90–91, 100289. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.njas.2019.01.001> (дата обращения: 27.07.2023). doi:10.1016/j.njas.2019.01.001.
5. Sung J. *The Fourth Industrial Revolution and Precision Agriculture* // *InTech.* 2018. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/57703> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.5772/intechopen.71582.
6. *Точное земледелие как один из аспектов цифровизации сельского хозяйства* / С. В. Шаптура, А. В. Коломейцев, И. И. Позняк и др. // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.* 2022. № 3. С. 161–166.
7. Tendulkar A. *Introduction to Precision Agriculture: Overview, Concepts, World Interest, Policy, and Economics* // *Precision Agriculture Technologies for Food Security and Sustainability* / edited by Sherine M. Abd El-Kader and Basma M. Mohammad El-Basioni, IGI Global, 2021. P. 1–22. URL: https://www.researchgate.net/publication/348122259_Introduction_to_Precision_Agriculture_Overview_Concepts_World_Interest_Policy_and_Economics (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.4018/978-1-7998-5000-7.ch001.
8. Якушев В. В. *Точное земледелие: теория и практика.* СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
9. Савин И. Ю., Блохин Ю. И. *Об оптимизации размещения сети сенсорных узлов БСС, включенных в интернет вещей на пахотных угодьях* // *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева.* 2022. № 110. С. 22–50. doi: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50.
10. *Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors* / P. Placidi, R. Morbidelli, D. Fortunati, et al. // *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 5110. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/5110> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s21155110.
11. Ravesa A., Shabir A. S. *Precision agriculture using IoT data analytics and machine learning* // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences.* 2022. Vol. 34. No. 8. Part B. P. 5602–5618. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.013.
12. *Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным* / Ю. И. Блохин, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2020. Т. 17. № 4. С. 164–178. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
13. *State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review* / D. Radočaj, A. Šiljeg, R. Marinović, et al. // *Agriculture.* 2023. Vol. 13. No. 3. P. 707. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/3/707> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/agriculture13030707.
14. *Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot* / Oberti R., Marchi M., Tirelli P., et al. // *Biosyst. Eng.* 2016. Vol. 146. P. 203–215. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004.
15. Kim S., Lee M., Shin C. *IoT-Based Strawberry Disease Prediction System for Smart Farming* // *Sensors.* 2018. Vol. 18. No. 11. P. 4051. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/4051> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s18114051.
16. *Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt* / P. P. Jayaraman, A. Yavari, D. Georgakopoulos, et al. // *Sensors.* 2016. Vol. 16. No. 11. P. 1884. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1884> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.3390/s16111884.
17. *Can the plant area index of a submerged vegetation canopy be estimated using digital hemispherical photography?* / D. Zhao, M. Lv, P. Wang, et al. // *Agricultural and Forest Meteorology.* 2014. Vol. 192. P. 69–77.
18. *Methods for in situ leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies* / M. Weiss, F. Baret, G. J. Smith, et al. // *Agric. For. Meteorol.* 2004. Vol. 121. P. 17–53.
19. Guo Y. *Wearable sensors to monitor plant health* // *Nat. Food.* 2023. Vol. 4. P. 350. URL: <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00764-3> (дата обращения: 27.07.2023). doi: 10.1038/s43016-023-00764-3.

Поступила в редакцию 12.08.2023
После доработки 06.09.2023
Принята к публикации 10.10.2023