

Столыпинский

вестник

Научная статья

Original article

УДК 631.42.05+ 631.171
DOI: 10.55186/2713-1424-2026-27-39

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЧВЫ

Синицын Алексей Витальевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г.Москва

Мацов Аркадий Давидович, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г.Москва

Аннотация

В статье исследуется возможность и целесообразность создания комплексной роботизированной системы, предназначенной для автоматизированного отбора и оперативного анализа проб грунта на борту беспилотного летательного аппарата. Основной целью при этом является повышение эффективности мониторинга плодородия почв на крупных и труднодоступных сельскохозяйственных территориях за счет интеграции в единый цикл функции отбора пробы и её оперативного химико-физического анализа с передачей данных в реальном времени. Рассмотрены существующие методы отбора проб почвы, проведён сравнительный анализ современных БПЛА-платформ и многофункциональных почвенных датчиков. Сформулированы требования, предъявляемые к роботизированной системе.

Ключевые слова: точное земледелие, отбор проб почвы, почвенные датчики, агрохимический анализ, оперативный мониторинг, роботизированная система, шнековый пробоотборник.

INVESTIGATION INTO THE FEASIBILITY OF CREATING A ROBOTIC SYSTEM FOR SOIL ANALYSIS

Sinitsyn A.V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of “Robotics Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow sinitsynav@bmstu.ru

Matsov A.D. master's student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow matsovad@student.bmstu.ru

Annotation

This article explores the feasibility and advisability of developing an integrated robotic system designed for the automated collection and on-board, real-time analysis of soil samples using an unmanned aerial vehicle (UAV). The primary objective is to enhance the efficiency of soil fertility monitoring across large or hard-to-reach agricultural areas by combining sample collection and rapid physicochemical analysis into a single, streamlined process, with data transmitted in real time. The study reviews existing soil sampling methods and provides a comparative analysis of current UAV platforms and multifunctional soil sensors. Furthermore, the requirements for such a robotic system are defined.

Keywords: precision agriculture, soil sampling, soil sensors, agrochemical analysis, real-time monitoring, robotic system, auger-type sampler.

Введение.

Современный агропромышленный комплекс сталкивается с необходимостью устойчивого повышения продуктивности сельского хозяйства при одновременном снижении антропогенной нагрузки на окружающую среду. Ключевым инструментом для достижения этих целей является точное земледелие, основанное на принятии управленческих решений на основе данных о неоднородности почвенных свойств внутри одного поля [1].

Для эффективного управления плодородием необходим мониторинг комплекса ключевых почвенных характеристик. К ним относятся: температура, влажность, электропроводность (EC), уровень pH, а также содержание основных питательных элементов. Традиционные методы отбора почвенных проб для лабораторного агрохимического анализа, основанные на использовании тяжелой техники или ручном труде, обладают рядом существенных недостатков: они трудоемки, требуют значительных временных затрат, приводят к уплотнению почвы и не обеспечивают необходимой оперативности и плотности данных для принятия быстрых управленческих решений [2].

В этой связи разработка высокоавтоматизированных систем, позволяющих быстро, точечно и без ущерба для почвенной структуры проводить отбор проб и оперативный анализ комплекса агрохимически значимых параметров, представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве мобильных платформ для таких систем открывает новые возможности для комплексного мониторинга крупных и труднодоступных сельскохозяйственных территорий [3, 4].

Существующие на рынке решения для отбора и анализа проб почвы либо являются полностью ручными и измеряющими ограниченное число параметров, либо требуют использования наземной техники для доставки проб в лабораторию, что ограничивает их производительность и повышает

стоимость операций. Таким образом, создание роботизированной системы для анализа почвы на базе БПЛА является актуальной практической задачей.

Существующие методы отбора проб.

Существующие подходы к отбору почвенных проб можно разделить на три основные категории: традиционные (ручные), механизированные (на базе наземной техники) и перспективные (роботизированные и дистанционные).

Традиционные (ручные) методы наиболее распространены и являются стандартом для агрохимических лабораторий. Технические средства — ручные пробоотборники: зонды, буры, совки. Преимущества: низкая стоимость оборудования, простота использования. Недостатки: высокая трудоёмкость и временные затраты, низкая пространственная плотность данных, субъективность и влияние человеческого фактора, отсутствие оперативности: длительный цикл «отбор — доставка — лабораторный анализ — отчёт».

Механизированные методы применяются в крупных агрохолдингах для обследования больших площадей. Технические средства — специализированные агрегаты на базе тракторов или квадроциклов. Преимущества: более высокая производительность по сравнению с ручным трудом. Недостатки: значительное уплотнение почвы тяжёлой техникой, наличие «слепых зон» — труднодоступные для техники участки (склоны, переувлажнённые зоны), высокая стоимость эксплуатации.

Перспективные роботизированные и дистанционные методы — новое направление, активно развивающееся в рамках концепции точного земледелия. Технические средства: наземные роботизированные платформы, дистанционное зондирование с использованием БПЛА [5]. Преимущества: высокая автономность, потенциально высокая точность позиционирования. Недостатки: низкая скорость обследования больших площадей, уязвимость к сложному рельефу и высокой растительности.

Сочетание высокой скорость и автономности БПЛА с функцией прямого физического отбора и оперативного анализа пробы позволит устранить ключевые недостатки существующих методов.

Анализ технических решений с использованием БПЛА.

В качестве примера роботизированного технического средства рассмотрим систему Terra-22, представленную канадскими исследователями в 2024 году и являющуюся одним из наиболее продвинутых воплощений концепции БПЛА-пробоотборника [6]. Система Terra-22 представляет собой специализированный инструмент, подвешиваемый к многороторному БПЛА (DJI M600), для автоматического отбора проб почвы в плотных сельскохозяйственных грунтах.

В конструкцию системы входят следующие модули:

- Буровой модуль: состоит из лёгкого композитного шнека и двигателя с жидкостным охлаждением, что позволяет развивать высокий крутящий момент при малом весе.
- Система анкерного крепления: четыре электроприводных винтовых анкера, которые вкручиваются в грунт после посадки для обеспечения устойчивости и противодействия реактивному моменту при бурении.
- Накопитель проб: карусельный механизм, позволяющий собрать и хранить до 5 отдельных почвенных проб (по 80 г) за один полёт.
- Модуль управления: реализует интеллектуальный алгоритм бурения, который регулирует скорость проходки в зависимости от сопротивления грунта, предотвращая перегрузку и обеспечивая эффективное заглубление до 150 мм.

Пробоотборный механизм системы Terra-22 представляет собой сложное электромеханическое устройство, спроектированное для решения трёх основных задач: создания высокого крутящего момента, погружения в плотный грунт и сбора образца с минимальным перекрёстным загрязнением.

Анализ системы Terra-22 показывает, что для преодоления проблем, связанных с высокими нагрузками при бурении, целесообразно применение

активного охлаждения силовых приводов, использование композитных материалов и аддитивных технологий, а также разработка адаптивного алгоритма управления, регулирующего усилие бурения в зависимости от сопротивления грунта.

За основу механической части целесообразно взять шнековую схему с системой осевой подачи, дополнив ее решением для удержания пробы. Система управления должна включать адаптивный алгоритм, регулирующий усилие бурения в зависимости от сопротивления грунта, для предотвращения перегрузок и обеспечения надежности. Ключевой задачей является интеграция в конструкцию блока датчиков для проведения анализа непосредственно после отбора со сбором и отправкой данных.

Анализ существующих на рынке БПЛА платформ.

Выбор базового беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является критически важным этапом, так как платформа определяет ключевые ограничения и возможности всей системы в целом: грузоподъемность, время работы, стабильность полета и посадки, а также массогабаритные характеристики полезной нагрузки. Для задачи точечного отбора проб грунта, требующей точного позиционирования, зависания и вертикальной посадки, мультироторная платформа является наиболее целесообразным выбором**.**

Перед выбором конкретной модели платформы необходимо определить оптимальную аэродинамическую схему мультикоптера, которая обеспечит требуемые характеристики стабильности, грузоподъемности и отказоустойчивости для задачи отбора проб грунта. В соответствии с существующей классификацией можно рассмотреть следующие конфигурации.

Квадрокоптер**:** наиболее распространенная и простая схема. Обладает минимальным весом и стоимостью. Однако данный тип платформы имеет низкую отказоустойчивость — отказ даже одного двигателя или пропеллера, как правило, приводит к падению аппарата. Для задачи, связанной с посадкой

на неподготовленный грунт, в болотистую местность необходима большая и сбалансированная тяга всех двигателей.

Гексакоптер**:** шестироторная схема. Ключевое преимущество — повышенная отказоустойчивость. При отказе одного двигателя гексакоптер сохраняет способность к стабилизированному полету и совершению аварийной посадки. Данная схема обеспечивает лучшую стабильность и распределение нагрузки по сравнению с квадрокоптером, что критически важно для точного позиционирования пробоотборника.

Октокоптер**:** восьмироторная схема, часто построенная по коаксиальному принципу, где на одной оси устанавливаются два двигателя, вращающихся в противоположные стороны. Это решение обеспечивает наивысшую отказоустойчивость (возможность продолжать полет при отказе двух двигателей) и максимальную тягу среди мультироторных схем. Недостатком является несколько возросшая сложность и энергопотребление.

Гибридные схемы**:** хотя они имеют преимущества в дальности полета, их сложность, стоимость и избыточность для задач, не требующих длительного маршрутного полета, делают их нецелесообразными для использования в указанных целях.

Таким образом**,** для надежного и безопасного выполнения миссии по отбору проб, учитывая стоимость полезной нагрузки и риски работы в автономном режиме, предпочтение следует отдать отказоустойчивым схемам: гексакоптеру или октокоптеру**.** Гексакоптер представляет собой оптимальный баланс между надежностью, сложностью и стоимостью. Октокоптер предпочтителен в случае, если расчетная масса полезной нагрузки приближается к верхнему пределу возможностей гексакоптерных платформ или требования к отказоустойчивости являются максимальными.

Анализ устройств для измерения показателей почвы

Измерение параметров почвы является основой точного земледелия. Полученные данные служат для принятия управленческих решений, направленных на оптимизацию агропроизводства и снижение антропогенной

нагрузки на окружающую среду. Проанализируем взаимосвязь измеряемых параметров и практических действий в системе точного земледелия.

Влажность измеряется для определения реальной потребности сельскохозяйственных культур в воде в разных частях поля. На основе карты влажности создаются задания для дифференцированного орошения**.** Это позволяет подавать воду только в те зоны и в том объеме, где это необходимо. Практическим результатом является экономия водных ресурсов, предотвращение переувлажнения и связанных с этим болезней, увеличение урожайности за счет поддержания оптимального водного режима.

Электропроводность (EC) измеряется для оценки неоднородности поля по гранулометрическому составу (глина/песок), содержанию солей и органических веществ. Для данных параметров электропроводность является интегральным показателем, по которому выполняется создание зональной карты поля**.** Зоны с высокой электропроводностью (часто глинистые, более плодородные) и низкой EC (песчаные, менее плодородные) требуют разного подхода. Практическим результатом является обоснованное выделение зон для дифференцированного внесения удобрений, подбора гибридов, планирования глубины обработки почвы.

Уровень кислотности измеряется для определения доступности питательных веществ для растений. В сильнокислых или щелочных почвах многие вещества (фосфор, микроэлементы) переходят в формы, плохо усваиваемые растениями. Исходя из измеренного уровня кислотности происходит расчет доз и создание карты-задания для дифференцированного внесения известковых материалов (мелиорантов) или гипса для корректировки pH. Как результат - повышение эффективности усвоения растениями внесенных удобрений, устранение "голодания" культур на фоне их достаточного содержания в почве, повышение урожайности.

Измерение содержания основных макроэлементов (азот N, фосфор P, калий K) выполняется для прямой оценки обеспеченности почвы элементами питания, критически важными для роста и развития растений. При

обнаружении критического дефицита того или иного элемента в конкретной точке можно оперативно скорректировать план подкормки. На основе созданных карт NPK рассчитываются переменные нормы внесения удобрений. Результатом может быть снижение затрат на дорогостоящие удобрения на 10-25%, минимизация риска нитратного загрязнения грунтовых вод, выравнивание урожайности по полю и повышение ее общего уровня.

Полученные с дрона-анализатора данные после геопривязки загружаются в компьютер сельхозпредприятия. Далее строятся карты пространственного распределения каждого параметра. В результате агроном получает не просто набор цифр, а цифровую модель плодородия поля, которая позволяет выявить причинно-следственные связи, например, понять, что низкая урожайность на определенном участке вызвана не дефицитом азота, а закисленностью почвы, которая блокирует его усвоение. При этом возможно осуществлять мониторинг в динамике: регулярные облеты позволяют отслеживать изменения в состоянии почвы после проведенных мероприятий и оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Помимо мониторинга уже засеянного поля есть возможность выделять в поле проблемные зоны и избегать их при посадке культур, а также проверять поля на пригодность к выращиванию тех или иных культур.

Таким образом, дрон-анализатор почвы трансформируется из простого измерительного инструмента в ключевой элемент системы управления продукционным процессом в современном агробизнесе.

Интеграция модуля оперативного анализа является ключевой задачей для дрона-анализатора почвы. Существующие методы и средства измерения параметров почвы можно разделить на две крупные категории: лабораторные (косвенные, требующие пробоподготовки) и прямые (с использованием зондов).

Лабораторные методы (спектрофотометрия, хроматография, атомно-абсорбционная спектрометрия) являются стандартом точности. Однако они требуют сложного, громоздкого и дорогостоящего оборудования,

квалифицированного персонала и многочасовой пробоподготовки. Их интеграция в бортовую систему БПЛА нецелесообразна из-за массогабаритных ограничений, требований к энергопотреблению и виброустойчивости.

Прямые методы основаны на использовании электрохимических сенсоров, которые позволяют измерять параметры непосредственно в почвенной среде. Именно эта технология является наиболее подходящей для интеграции в мобильную роботизированную платформу.

Рассмотрим основные типы датчиков.

- Датчики влажности и температуры — наиболее распространены и технологически отработаны. Наиболее надёжным и точным методом, принятым в агрономической практике, является измерение диэлектрической проницаемости почвы. Для бортового применения оптимальны ёмкостные датчики, так как они компактнее, дешевле и потребляют меньше энергии, сохраняя приемлемую для агрономических задач точность (±2–3%).
- Датчики электропроводности — измеряют сопротивление между двумя или более электродами, помещёнными в почвенную среду. Электропроводность почвенного раствора является интегральным показателем засоленности и коррелирует с содержанием питательных веществ. Принцип действия: измеряется сопротивление между двумя или более электродами, помещенными в почвенную среду. Существуют также электромагнитные индукционные датчики, но они не применимы для точечного анализа малого объема пробы
- Датчики кислотности — измерение уровня pH — одна из самых сложных задач для оперативного анализа. Используются потенциометрические методы с помощью ионоселективных электродов (в основном стеклянных, чувствительных к ионам водорода). Электроды pH требуют регулярной калибровки по буферным растворам. Для стабилизации показаний может требоваться от 30 секунд до нескольких минут. Измерения могут быть

неточными в очень сухих или засоленных почвах. Требуется поддержание влажности мембраны электрода.

- Датчики макроэлементов — прямое измерение макроэлементов в почве является наиболее сложной задачей. Наиболее перспективными для полевого использования являются ионоселективные электроды (ISE), чувствительные к ионам NO_3^-, K^+ и $H_2PO_4^-$.

Для мониторинга относительного изменения состояния почвы не требуется лабораторная точность, при этом важно отслеживать множество параметров, на основании которых агроном может принять управленческие решения. Для интеграции в пробоотборник лучше всего подходит датчик, позволяющий измерять сразу множество параметров.

Выводы.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод о возможности и целесообразности разработки роботизированной системы для анализа почвы, предназначенной для оперативного мониторинга ключевых агрохимических и физических параметров почвы на крупных и труднодоступных сельскохозяйственных территориях с целью повышения эффективности мониторинга плодородия почв за счет интеграции в единый цикл функции отбора пробы и её оперативного химико-физического анализа с передачей данных в реальном времени. При этом целесообразно выдвинуть следующие основные требования к системе:

- Оперативный анализ пробы на борту по следующим параметрам: влажность, температура, электропроводность (EC), уровень pH, содержание нитратного азота (N), фосфора (P) и калия (K).
- Геопривязка результатов измерений.
- Передача данных в реальном времени или их сохранение на борту.
- Использование для пробоотборника шнекового механизма с независимыми приводами вращения и осевой подачи.
- Глубина отбора пробы: до 150 мм**.**

- Система стабилизации в виде легкой системы анкеровки для компенсации реактивного момента и обеспечения устойчивости.
- Минимизация перекрестного загрязнения в системе удержания пробы.
- Наличие адаптивного алгоритма бурения, регулирующего скорость проходки в зависимости от сопротивления грунта для предотвращения перегрузок.

Литература

1. Шаповалов Д.А., Черкашина Е.В., Клюшин П.В., и др. Методы дистанционного зондирования и космическая навигация в технологиях точного земледелия: монография. – М., 2022. – 423 с.
2. Manfreda S., Ben Dor E. (eds.) Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and River Environments. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – (Earth Observation Series).
3. Широков Р.С., Барбасов В.К., Ведешин Л.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга состояния почв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 112–126.
4. Ринас М.А., Косников М.С. Анализ интеллектуальных систем мониторинга состояния почвы с использованием беспилотных летательных аппаратов // Региональная и отраслевая экономика. – 2025. - №1 – С 17-23.
5. Шайтура С.В., Барбасов В.К., Минитаева А.М., Кожаев Ю.П. Мониторинг сельскохозяйственных земель при помощи беспилотных летательных аппаратов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. - №12 – С 947-953.
6. Hugo B. Klopfenstein and Alexis Lussier Desbiens. 2024. Terra-22: an aerial soil sampling in densely compacted agricultural fields. *Drone Systems and Applications. 12:* 1-14. https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0010.

Literature

1. Shapovalov D.A., Cherkashina E.V., Klyushin P.V., et al. (2022) Metody distantsionnogo zondirovaniya i kosmicheskaya navigatsiya v tekhnologiyakh tochnogo zemledeliya: monografiya [Remote Sensing Methods and Space-Based Navigation in Precision Agriculture Technologies: A Monograph]. – Moscow. (in Russian)
2. Manfreda S., Ben Dor E. (eds.) (2023) Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and River Environments. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – (Earth Observation Series).
3. Shirokov R.S., Barbasov V.K., Vedeshin L.A. (2021) Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitoringa sostoyaniya pochv [The use of unmanned aerial vehicles for monitoring soil conditions]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 18, no 3, pp. 112–126.
4. Rinas M.A., Kosnikov M.S. (2025) Analiz intellektual'nykh sistem monitoringa sostoyaniya pochvy s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Analysis of intelligent soil monitoring systems using unmanned aerial vehicles]. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika*, no 1, pp. 17-23.
5. Shautura S.V., Barbasov V.K., Minitaeva A.M., Kozhaev YU.P. (2021) Monitoring sel'skokhozyaistvennykh zemel' pri pomoshchi bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Monitoring of Agricultural land with unmanned aerial vehicles]. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel'*, no 12, pp. 947-953.
6. Hugo B. Klopfenstein and Alexis Lussier Desbiens. (2024). Terra-22: an aerial soil sampling in densely compacted agricultural fields. *Drone Systems and Applications*, no 12, pp. 1-14. doi: 10.1139/dsa-2023-0010.