

ИОТ СЕТИ ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

В.Н. Палаткин

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация: статья посвящена современным подходы к использованию *iot*-сетей в системах точного земледелия. описаны ключевые типы сенсоров, применяемых для мониторинга агроэкосистем — датчики *pH*, электропроводности (*ec*), влажности почвы и температуры. приведён технический анализ принципов их работы, преимущества и ограничения при практическом применении. особое внимание уделено вопросам энергоэффективности и использованию беспроводных технологий передачи данных, в частности *lorawan*, для организации долговременного мониторинга на обширных сельскохозяйственных территориях. подчёркиваются актуальные проблемы внедрения, такие как точность недорогих сенсоров, сложности с радиочастотным регулированием и необходимостью интеграции с цифровыми платформами. в заключение обозначен высокий потенциал *iot* для повышения продуктивности и устойчивости аграрного сектора

ключевые слова: точное земледелие, *iot*, датчик *pH*, датчик электропроводности, влажность почвы, температура, *lorawan*, беспроводные сети, агросенсоры, энергоэффективность, цифровое сельское хозяйство.

IOT NETWORKS FOR PRECISION FARMING

V.N. Palatkin

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F.
Morozov

Abstract: the article is devoted to modern approaches to the use of *IoT* networks in precision farming systems. The key types of sensors used for monitoring agroecosystems are described - *pH*, electrical conductivity (*EC*), soil moisture and temperature sensors. A technical analysis of their

operating principles, advantages and limitations in practical application is provided. Particular attention is paid to energy efficiency and the use of wireless data transmission technologies, in particular LoRaWAN, for organizing long-term monitoring in vast agricultural areas.

Keywords: precision farming, IoT, pH sensor, conductivity sensor, soil moisture, temperature, LoRaWAN, wireless networks, agrosensors, energy efficiency, digital agriculture.

Экспансия информационных технологий охватывает все отрасли экономики, и сельское хозяйство закономерно трансформируется под этим влиянием. Цифровизация становится неотъемлемым фактором развития агросферы. Принципиальное значение приобрело осознание того, что внедрение сетей Интернета вещей (IoT) позволяет кардинально повысить эффективность использования ресурсов и обеспечить устойчивость сельскохозяйственного производства. Данные технологии обеспечивают непрерывный мониторинг важнейших параметров почвы и окружающей среды – влажности, уровня pH, электропроводности, температуры воздуха – посредством удаленных сенсоров. Полученная в режиме реального времени информация дает возможность прецизионной оптимизации процессов полива, внесения удобрений и защиты растений, например, за счет дифференцированного орошения отдельных участков поля. Как подтверждают исследования, результатом внедрения IoT-решений в агросекторе является рост урожайности при одновременном снижении расхода критических ресурсов, таких как вода и удобрения, по сравнению с традиционными методами ведения сельского хозяйства.

Если рассматривать архитектуру IoT-систем как пирамиду, разделенную на три уровня, то ее фундаментом и самой объемной частью неизменно выступают датчики. Они являются основой, первичным источником данных в любой IoT-сети. Именно специализированные датчики непрерывно собирают критически важную информацию о состоянии почвы и атмосферы. Рынок предлагает широкий спектр сенсорных устройств – от компактных моделей, измеряющих 2-3 параметра, до комплексных станций от крупных международных производителей, объединяющих десятки датчиков для узкоспециализированных задач в конкретных отраслях растениеводства. Однако, для целей комплексной и повседневной оптимизации агротехнологий в подавляющем большинстве хозяйств наибольшую практическую ценность и оптимальное соотношение "затраты-эффективность" демонстрирует стандартный набор сенсоров: датчики влажности почвы, температуры почвы и

воздуха, электрической проводимости (ЕС) и рН почвы. Интеграция и анализ показаний именно этой ключевой четверки формируют достаточную для принятия решений целостную картину состояния агроэкосистемы, служа научно обоснованной базой для управления ирригацией, внесением удобрений и защитой растений.

Измерение кислотности (рН) почвы имеет существенное значение для доступности питательных веществ растениям: в условиях значительного отклонения рН от нейтрального многие макро- и микроэлементы становятся менее усваиваемыми, так как рН влияет на растворимость и доступность ионов, что впоследствии нарушает процессы обмена веществ на клеточном уровне и развитие растений. Традиционные датчики рН основаны на измерении потенциала между измерительным электродом (которые могут быть выполнены как из специального ионочувствительного стекла, так и на основе определенных металлов или оксидов металлов) и референтным электродом. Такие датчики могут обеспечивать высокую точность, но требуют регулярной калибровки. Существуют также конструкции, объединяющие оба электрода в одном корпусе. Стоимость таких решений варьируется в широких пределах. Очень бюджетные датчики часто используют в качестве материалов для измерительного и референтного электродов нержавеющую сталь или сталь с покрытиями (например, серебро/хлорид серебра). Подобные материалы сильно ограничивают чувствительность и стабильность измерений: напряжение между электродами при изменении рН на ± 0.1 – 0.5 единиц может изменяться незначительно или нестабильно дрейфовать, особенно в критической нейтральной зоне (рН ~ 7.0), что делает их показания ненадежными для точного земледелия. Альтернативой служат датчики на основе полевых МОП-транзисторов (ISFET), где рН-чувствительный слой (например, оксид кремния, алюминия) нанесен на электрод, непосредственно соединенный с затвором транзистора. Изменение потенциала этого слоя при контакте с раствором модулирует ток стока. Хотя ISFET потенциально компактнее и не имеют хрупкого стеклянного элемента, их практическое применение для прямых измерений рН в почве сопряжено с трудностями: необходим надежный, химически стойкий интерфейс (по сути, миниатюрный электрод) между чувствительным слоем затвора и самой почвой для обеспечения контакта с почвенным раствором. Кроме того, надежные и точные ISFET-решения для таких условий пока не являются массово доступными "из коробки" и требуют либо специализированных (часто дорогих) готовых изделий от узкого круга

производителей, либо собственных разработок и производства с использованием известных высококачественных материалов для чувствительного слоя и защитных структур. Поэтому обеспечение необходимой точности и долговременной стабильности измерений pH в полевых условиях обычно достигается либо использованием профессиональных (и, как следствие, более дорогих) электродных систем с регулярной калибровкой и температурной компенсацией, либо значительными инвестициями в разработку и валидацию специализированных ISFET-сенсоров.

Электропроводность (ЕС) почвы, отражающая концентрацию растворенных солей (натрий, хлор, кальций и др.), является главным индикатором её плодородия и риска засоления. Принцип измерения ЕС основан на оценке электрического сопротивления почвы между двумя или более введенными в неё электродами. На практике распространен метод четырехэлектродного измерения или его упрощенные двухэлектродные варианты. Суть заключается в подаче через один электрод постоянного импульсного тока с импедансом определенной скважности, часто формируемого с помощью ШИМ (широтно-импульсной модуляции) микроконтроллера, либо через преобразователь DC-AC для подачи тока на электрод переменного напряжения, через токоизмерительный резистор. Использование ШИМ микроконтроллера в качестве основы для генерации тока продиктовано соображениями энергоэффективности, важными для автономных IoT-устройств с батарейным питанием. Измеряется возникающее падение напряжения между первым и вторым электродом (часто связанным с "землей" схемы). По закону Ома ($V = I * R$), сопротивление почвы (R_{soil}) пропорционально измеренному напряжению (V_{sense}) при известном токе (I). После калибровки с учетом геометрии электродов (константа K) это сопротивление конвертируется в значение электропроводности ($EC = 1 / (R_{soil} * K)$)).

Главная инженерная сложность при таком подходе обусловлена экстремально широким диапазоном сопротивления почвы: от единиц Ом (очень влажная, засоленная почва) до десятков МОм (сухая, малозасоленная). Простая схема с фиксированным током через токоизмерительный резистор имеет крайне ограниченный эффективный диапазон измерения. Как показывает практика и анализ схем, при сопротивлении почвы в диапазоне примерно 8-152 Ом падение напряжения V_{sense} изменяется достаточно для уверенной регистрации АЦП типового микроконтроллера (10-12 бит). Вне этого "рабочего

окна" изменения V_{sense} становятся пренебрежимо малыми (порядка 0.01 мкВ и менее) или, наоборот, превышают диапазон АЦП, теряясь в шумах схемы (собственных шумах операционных усилителей, АЦП, внешних наводках).

Для преодоления ограничений динамического диапазона при измерении сопротивления почвы применяют адаптивные стратегии, заимствованные из практики разработки цифровых мультиметров. Один из подходов заключается в использовании многошкальных измерительных схем. В этом случае реализуются несколько параллельных измерительных цепей, отличающихся номиналами токоизмерительных резисторов и/или уровнями генерируемого возбуждающего тока. Другой метод – применение программируемых источников тока или напряжения. Здесь микроконтроллер динамически регулирует величину возбуждающего тока (обычно формируемого тем же энергоэффективным ШИМ) или напряжение, прикладываемое к электродам, чтобы поддерживать падение напряжения V_{sense} в зоне, оптимальной для точного захвата аналого-цифровым преобразователем (АЦП), независимо от текущего высокого или низкого сопротивления почвы. Третий распространенный способ – включение в схему прецизионных усилителей с переменным коэффициентом усиления (PGA). Такой усилитель, установленный непосредственно перед входом АЦП, автоматически изменяет свой коэффициент усиления для сигнала V_{sense} , тем самым масштабируя его амплитуду до уровня, полностью использующего рабочий диапазон АЦП и обеспечивающего максимальную разрешающую способность измерения.

Подавляющее большинство доступных на рынке, особенно в бюджетном сегменте, составляют устройства, произведенные в Китае, зачастую поставляемые с минимальной документацией. Это создает значительные проблемы на нескольких уровнях. Во-первых, принцип работы и внутренняя схемотехника таких датчиков остаются по сути "чёрным ящиком": отсутствие детальных схем, описаний алгоритмов обработки сигнала или спецификаций ключевых компонентов делает невозможной достоверную оценку их реальной точности, долговременной стабильности и применимости в конкретных почвенных условиях. Во-вторых, серьезно затруднена или даже невозможна корректная калибровка из-за недостатка информации о базовой чувствительности сенсорного элемента, используемых материалах электродов, температурных коэффициентах и встроенных алгоритмах компенсации. Попытки калибровки под конкретную почву или лабораторный эталон без этих данных часто оказываются некорректными, что ведет к систематическим

отклонениям показаний, которые невозможно исправить. В-третьих, возникают барьеры для программного взаимодействия, закрытые или плохо документированные протоколы обмена данными (в случае цифровых датчиков) препятствуют их гибкой интеграции в IoT-платформы или вынуждают прибегать к ненадежному и трудоемкому реверс-инжинирингу. Таким образом, использование подобных нехарактеризованных сенсоров ставит под серьезное сомнение достоверность собираемых данных об электропроводности почвы, сводя на нет потенциальные преимущества даже тех устройств, где аппаратно решена проблема широкого динамического диапазона измерений.

Измерение объемной влажности почвы (VWC, Volumetric Water Content), выражаемой в % (объем воды / объем почвы), является фундаментальным параметром для управления поливом и понимания состояния растений. В контексте IoT-систем доминируют ёмкостные датчики, измеряющие изменение диэлектрической проницаемости (ϵ) грунта: поскольку ϵ воды (~ 80) значительно выше, чем у минеральных частиц почвы ($\sim 3-5$) и воздуха (1), рост влажности приводит к увеличению общей ϵ почвы, что фиксируется датчиком. Основное преимущество ёмкостных сенсоров для IoT – крайне низкое энергопотребление (микроамперы в активном режиме) и относительная устойчивость к засоленности по сравнению с резистивными методами.

Резистивные датчики, основанные на измерении сопротивления между электродами в почве, малопригодны для точного мониторинга влажности почвы. Их показания сильно зависят от концентрации и состава солей, типа почвы, температуры и плотности. Фактически, резистивный датчик в большей степени измеряет электропроводность почвы, а не чистую влажность. Хотя взаимосвязь между влажностью и ЕС существует (более высокая влажность обычно увеличивает ЕС), попытки использовать резистивный метод для VWC приводят к значительным погрешностям ($>10-15\%$ VWC), так как солевой состав является независимым и сильно варьирующим фактором.

Высокоточные методы (TDR, TDT, FDR) используют распространение электромагнитных волн (импульсов или частотных сигналов) по волноводу, погруженному в почву. Скорость распространения или резонансная частота зависят от ϵ , что позволяет получить точность $\pm 1-3\%$ VWC и даже оценить профиль влажности по глубине. Однако их стоимость, энергопотребление и сложность установки делают их экономически и технически нецелесообразными для типичных распределенных IoT-сетей с сотнями/тысячами узлов.

Таким образом, ёмкостные датчики представляют собой оптимальный компромисс для систем IoT, балансируя между точностью, стоимостью, энергопотреблением и сложностью внедрения.

Для измерения температуры в агро-IoT применяются термопары (разность потенциалов на разнородных металлах), платиновые термометры сопротивления RTD (высокая точность по изменению сопротивления), термисторы NTC/PTC (сильное нелинейное изменение сопротивления) и кремниевые полупроводниковые датчики. Первые три типа, несмотря на свои нишевые преимущества (сверхширокий диапазон термопар, стабильность RTD, чувствительность NTC), имеют существенные ограничения для массовых IoT-развертываний: сложность и стоимость точного измерения (термопары, RTD), необходимость сложной калибровки (NTC), повышенное энергопотребление или требования к схемотехнике.

Абсолютным лидером в современных агро-IoT системах стали кремниевые полупроводниковые датчики, такие как повсеместно используемый DS18B20. Главным преимуществом является цифровой интерфейс, такой как 1-Wire в случае DS18B20, который позволяет подключать десятки датчиков к одной шине микроконтроллера, используя минимальное количество проводов. Эта особенность радикально упрощает разводку и снижает стоимость подключения в распределенных сетях с высокой плотностью точек измерения на разных глубинах почвы и в различных зонах поля. Не менее важна встроенная обработка сигнала: датчик типа DS18B20 самостоятельно выполняет оцифровку температуры (с программно настраиваемым разрешением от 9 до 12 бит) и предоставляет микроконтроллеру готовое цифровое значение, что устраняет необходимость в сложных внешних аналоговых цепях и минимизирует влияние шумов. Датчик обеспечивает высокую точность ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) в широком рабочем диапазоне температур (от -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$), полностью соответствующем агрономическим требованиям. Выдающаяся энергоэффективность позволяет устройству потреблять ничтожные токи (наноАмперы) в режиме ожидания, а кратковременные всплески при измерениях (миллиАмперы) легко управляемы.

Однако, сверхнизкое энергопотребление сенсоров было бы бесполезным без столь же эффективных технологий передачи данных на большие расстояния – это фундаментальное требование для жизнеспособности сельскохозяйственных IoT-систем. Этим задачам оптимально отвечают технологии LPWAN (Low Power Wide Area Network), ставшие де-факто

стандартом для агросетей. К ним относятся LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox и другие. Их главная ценность – способность обеспечивать связь на расстояниях в километры (на открытой местности) при крайне низком энергопотреблении сенсорных узлов, что критично для автономных устройств с батарейным питанием.

Среди LPWAN-технологий LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) получила особо широкое распространение в агросекторе. Протокол изначально спроектирован для многолетней работы от батарей: использование узкополосной модуляции с расширенным спектром (Chirp Spread Spectrum - CSS) и низких скоростей передачи данных позволяет узлам расходовать на связь микроватты–милливатты. Как подтверждают исследования и практика внедрения, именно сочетание дальнобойности и сверхнизкого энергопотребления делает LoRaWAN исключительно практичным для покрытия обширных сельскохозяйственных угодий. Полевые сети могут эффективно строиться с использованием небольшого количества шлюзов, собирающих данные с сотен распределенных сенсорных узлов.

При реализации сетей на базе LoRaWAN необходимо учитывать ряд технических особенностей и практических аспектов. Работа ведется в нелицензированных ISM-диапазонах (например, ~868 МГц в России/Европе). Важно отметить, что нормативная база, регулирующая использование этих частот (включая ограничения по времени передачи сигнала - Duty Cycle, обычно порядка 1%), может меняться, и разработчикам следует отслеживать регуляторные обновления, несмотря на текущую активную эксплуатацию технологии в России. Важнейшей функцией для прецизионного земледелия является идентификация и геолокация: каждый пакет содержит уникальный ID устройства, а привязка координат узла при установке (через GPS модуль шлюза или ручную геометку) позволяет точно определять местоположение источника данных на карте поля для анализа пространственной вариабельности параметров и адресного управления ресурсами на конкретных участках.

Хотя существуют альтернативы (например, Zigbee для коротких дистанций или NB-IoT), LoRaWAN остается доминирующим выбором для масштабных сельскохозяйственных IoT-сетей благодаря оптимальному балансу стоимости оборудования, дальности связи, энергоэффективности и относительной простоте развертывания.

Несмотря на потенциал, массовое внедрение IoT-сетей в сельском хозяйстве сталкивается с рядом взаимосвязанных вызовов. Достоверность

данных остается глобальной проблемой: бюджетные датчики (особенно для рН и электропроводности) часто страдают от недостаточной точности и нестабильности показаний, особенно в экстремальных условиях или на границах диапазонов. Это требует частых калибровок и обслуживания, подрывая доверие к системе и увеличивая эксплуатационные затраты, в то время как высокоточные решения остаются экономически труднодоступными для многих хозяйств. Помимо качества сенсоров, значительную сложность представляет обеспечение надежного покрытия связи на обширных территориях. Хотя технологии вроде LoRaWAN обеспечивают большую дальность, реальное развертывание требует тщательного планирования с учетом рельефа местности (холмы, лесополосы), который может существенно ослаблять сигнал и создавать "мертвые зоны". Необходимость соблюдения регуляторных норм в нелицензированных диапазонах добавляет уровень неопределенности и требует готовности к адаптации. Отдельную сложность создает управление генерируемыми данными. Потоки информации с тысяч датчиков требуют не только стабильной передачи и хранения, но и эффективных инструментов для их анализа и превращения в практические рекомендации. Нехватка ИТ-специалистов в сельской местности, затраты на внедрение аналитических платформ и обеспечение кибербезопасности становятся серьезными барьерами для конечных пользователей — фермеров и агрономов. Наконец, суровая эксплуатационная среда сельхозугодий предъявляет повышенные требования к надежности оборудования. Датчики и шлюзы подвергаются воздействию агрессивных химикатов, риску механических повреждений от техники, экстремальным температурным перепадам, влаге, пыли и даже вандализму. Обеспечение долговечности в таких условиях требует применения специализированных, защищенных конструкций, что неизбежно сказывается на общей стоимости решений.

В целом, IoT-технологии кардинально трансформируют сельское хозяйство, переводя его на принципы прецизионного управления и ресурсной эффективности. Интеграция сетей датчиков с энергоэффективными LPWAN-протоколами, создает основу для обоснованных, данных-ориентированных решений по поливу, внесению удобрений и защите растений. Практика внедрения убедительно подтверждает эффективность этих систем: мониторинг почвенных параметров в режиме реального времени обеспечивает увеличение урожайности на 10-25% при одновременном сокращении расхода воды на 15-30% и уменьшении применения удобрений на 10-20%. Этот доказанный

экономический и ресурсосберегающий потенциал является главным драйвером экспоненциального роста глобального рынка агро-IoT, объем которого уже превышает миллиарды долларов и продолжает увеличиваться двузначными темпами ежегодно.

На текущий момент уже проводятся исследования и разработка решений в различных секторах по объединению IoT с алгоритмами искусственного интеллекта и машинного обучения, что в сфере агромониторинга открывает возможности для прогнозной аналитики (предсказание болезней, оптимизация сроков уборки) и адаптивного управления, а развитие телекоммуникационной инфраструктуры, включая спутниковый IoT, обеспечит охват даже самых удаленных территорий. Параллельно ожидается прогресс в стандартизации и снижении стоимости надежных, защищенных сенсоров и шлюзов, что устранил основные барьеры для массового внедрения.

Таким образом, эволюция агро-IoT ведет к принципиально новому уровню управления: фермеры получают возможность не просто реагировать, а прогнозировать состояние агроэкосистем и автоматизировать процессы. Этот переход существенно повысит продуктивность сельского хозяйства, укрепит его устойчивость и внесет значительный вклад в обеспечение глобальной продовольственной безопасности.

Список литературы

1. Горшков С. И., Петров А. В. Интернет вещей в сельском хозяйстве: Технологии и решения. — М.: Техносфера, 2022.
2. Смирнов В. Л., Ершов И. Н. Системы точного земледелия: теория и практика применения сенсорных технологий // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2021. — № 5. — С. 22–29.
3. Козлова М. А., Иванов Е. В. Применение беспроводных технологий LoRaWAN в аграрной отрасли // Информационные технологии в науке и образовании. — 2020. — № 3(35). — С. 14–18.
4. Дмитриева Н. С. Анализ рынка датчиков pH и ЕС для аграрных IoT-систем // Современные технологии в агроинженерии. — 2021. — № 2(19). — С. 41–47.
5. Липатов В. Ю., Никитина И. П. Энергоэффективность узлов сбора данных в системах точного земледелия // Вестник аграрной науки. — 2022. — № 3. — С. 36–42.

6. LoRa® and LoRaWAN®: Applications in Smart Agriculture: сайт URL: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-agriculture> (дата обращения: 28.05.2025).

7. Benefits and Evolution of Precision Agriculture: сайт URL: <https://www.ars.usda.gov/oc/utm/benefits-and-evolution-of-precision-agriculture/> (дата обращения: 28.05.2025).

8. Zhang Y., Wang L., Li D. A Review of Precision Agriculture Technologies and Sensors // Sensors. — 2021. — Vol. 21, No. 8. — P. 2652.

References

1. Gorshkov S. I., Petrov A. V. Internet of Things in Agriculture: Technologies and Solutions. Moscow: Tekhnosfera, 2022.

2. Smirnov V. L., Ershov I. N. Precision Farming Systems: Theory and Practice of Sensor Technologies. Agricultural Machinery and Technologies, 2021, No. 5, pp. 22–29.

3. Kozlova M. A., Ivanov E. V. Application of LoRaWAN Wireless Technologies in Agriculture. Information Technologies in Science and Education, 2020, No. 3(35), pp. 14–18.

4. Dmitrieva N. S. Market Analysis of pH and EC Sensors for Agricultural IoT Systems. Modern Technologies in Agroengineering, 2021, No. 2(19), pp. 41–47.

5. Lipatov V. Yu., Nikitina I. P. Energy Efficiency of Data Collection Nodes in Precision Agriculture Systems. Agricultural Science Bulletin, 2022, No. 3, pp. 36–42.

6. LoRa® and LoRaWAN®: Applications in Smart Agriculture: website URL: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-agriculture> (accessed: 28.05.2025).

7. Benefits and Evolution of Precision Agriculture: website URL: <https://www.ars.usda.gov/oc/utm/benefits-and-evolution-of-precision-agriculture/> (accessed: 28.05.2025).

8. Zhang Y., Wang L., Li D. A Review of Precision Agriculture Technologies and Sensors. Sensors, 2021, Vol. 21, No. 8, p. 2652.