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, А. Ф. Петрушин, О. А. Митрофанова, Е. П. Митрофанов, А. В. Двирник

Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: blohin3k4@gmail.com, sblokhina@agrophys.ru

В статье рассматриваются подходы к построению и развитию информационно-измерительных систем (ИИС) для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почв по спутниковым данным. Информационно-измерительные системы, включающие беспроводные сенсорные сети, позволяют проводить мониторинг состояния почвы с высокой точностью и способны оперативно обнаруживать нежелательные состояния. Для определения основных агрофизических характеристик почв по спутниковым данным в глобальном масштабе необходимы измерения *in situ* с помощью наземных ИИС, позволяющие осуществить калибровку и проверку достоверности полученных спутниковых данных о характеристиках почвы. На экспериментальном опытном полигоне Агрофизического научно-исследовательского института проводится комплексный мониторинг пространственной изменчивости агрофизических свойств почв и метеорологической информации, определяющих особенности управления технологиями возделывания сельскохозяйственных культур. Установлено, что возможности научно-технической инфраструктуры, используемой для определения основных характеристик почв и детализации их пространственно-временного распределения, могут быть расширены за счёт применения средств измерения в движении и развёртывания беспроводной подземной сенсорной сети (БПСС), что позволит существенно повысить уровень интерпретации и масштабируемость процесса оценки агрофизических свойств сельскохозяйственных территорий по спутниковым данным. Рассмотрена структура БПСС, предназначенной для мониторинга влажности и температуры почв с высоким временным разрешением, а также представлена структурная схема сенсорного узла с учётом его размещения под поверхностью земли. Приведены предварительные результаты полевых испытаний мобильного комплекса для определения агрофизических характеристик пахотного слоя почвы в режиме реального времени. Полученные карты пространственного распределения влажности и электропроводности почвы позволят определить характер пространственной неоднородности урожайности и стратегию пространственного размещения стационарных узлов БПСС, функционирующих в течение вегетационного периода.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, почвенные исследования, данные дистанционного зондирования, системы мониторинга, беспроводные подземные сенсорные сети, агрофизические свойства почвы, мобильный комплекс для определения характеристик почвы в движении

Одобрена к печати: 21.07.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178

Введение

Эффективное решение задач мониторинга и оценки состояния сельскохозяйственных угодий, а также управления системами земледелия и землепользования нового поколения на уровне хозяйствующего субъекта, региона или страны невозможно осуществить без использования современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Потребность в спутниковых данных ДЗЗ инициировала разработку и создание специализированных информационных систем дистанционного мониторинга для сельского хозяйства (Лупян и др., 2018, 2019). В настоящее время поддерживаемый и развиваемый Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) методический и технологический потенциал обеспечивает не только доступ к постоянно пополняющимся многолетним архивам

спутниковых данных, но и использование специального функционала для обработки и анализа получаемой информации, прогнозирования влияния сельскохозяйственного производства на экосистемы и природные ресурсы, а также способствует развитию систем точного земледелия (ТЗ) и мелиорации (Дубенок и др., 2019; Якушев и др., 2019а).

Методология систем ТЗ основана на количественной оценке внутриполевой изменчивости условий формирования урожая, включая агрофизические свойства почв. Определение с достаточной точностью пространственно-временной вариабельности объёмной влажности, температуры и плотности пахотного слоя почвы является важнейшей задачей, направленной на обоснование и реализацию прецизионных агроприёмов производства растениеводческой продукции и сырья. Для использования в системах ТЗ данных дистанционного зондирования (ДДЗ), получаемых со спутников, необходима их калибровка. Работы в данном направлении активно проводятся на полигоне Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ). Основное внимание уделяется развитию и совершенствованию инструментальных средств для формирования опорной информации в режиме реального времени, а также созданию методов её сопряжённой обработки с ДДЗ (Блохин и др., 2019; Матвеенко и др., 2019; Шпанев, 2019; Якушев и др., 2019б). Дальнейшему развитию и практическому применению методов интерпретации ДДЗ в управлении высокопродуктивным агрохозяйством нового технологического уклада будет способствовать создание в различных почвенно-климатических зонах России на базе экспериментальных станций научно-исследовательских институтов сельскохозяйственного профиля, где выполняется широкий спектр полевых опытов, специализированных тестовых полигонов для подспутниковых наблюдений с использованием современных информационно-измерительных систем (ИИС).

Методические аспекты применения инструментальных средств в почвенных исследованиях

Определение пространственной неоднородности почв до появления методологии ТЗ обычно включало в себя отбор образцов ручным способом (маршрутное обследование полей), их предварительную обработку, лабораторные химические и физические анализы и построение соответствующих картограмм распределения почвенных характеристик. Такой подход имеет существенные ограничения вследствие трудоёмкости, низкой производительности и небольшого количества точек измерения. В настоящее время широко используется метод ТЗ, позволяющий автоматизировать процесс отбора почвенных образцов в поле с последующим лабораторным исследованием, анализом и компьютерной интерпретацией полученных данных. Основное преимущество автоматизированного метода состоит в точной топографической привязке обследуемого поля и точек отбора почвенных проб, а также в создании электронных карт пространственно-временного распределения агрохимических и агрофизических характеристик почв, предназначенных для дифференцированного внесения агрохимикатов. Однако рассматриваемый метод имеет принципиальный недостаток, который заключается в том, что все выводы делаются на основе значений варьирующихся показателей почвы, полученных в результате дискретного отбора образцов на заданной территории. Свойства таких объектов настолько сложно и непредсказуемо меняются в пространстве, что практически не могут быть описаны никакими детерминированными зависимостями. У производителей растениеводческой продукции, естественно, возникает множество вопросов: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме отбора проб и определения в лаборатории показателей почвенного плодородия (Матвеенко и др., 2020).

С 2000-х гг. активно разрабатываются технологии непрерывного измерения важнейших технологических характеристик почв в движении (*англ.* on-the-go soil sensing) (Adamchuk et al., 2004; Mouazen, Ramon, 2006; Mouazen et al., 2007, Viscarra Rossel et al., 2011) с помощью современных методов анализа физики дисперсных сред и различных сенсоров (Peets et al., 2012). Для оперативного определения пространственной неоднородности физических

свойств почвы на разных глубинах (поверхностном, пахотном и подпахотном слоях) в различных масштабах поля обычно используются мультисенсорные мобильные комплексы, оснащённые набором датчиков, которые должны быть адаптированы к измерениям в движении. Большинство датчиков для измерения параметров почвы относятся к одному из следующих типов: 1) электрические и электромагнитные — для измерения электропроводности, диэлектрической проницаемости, индуктивности электрического сопротивления; 2) оптические и радиометрические — для определения уровня поглощаемой энергии, отражённой частицами почвы; 3) механические — для измерения силы, возникающей в результате сопротивления погружению в почву (например, датчики сопротивления горизонтальной и вертикальной пенетрации почв).

Среди физических параметров почвы наиболее важным для измерения является электропроводность как показатель засолённости, влагосодержания, объёмной плотности, механического состава, ёмкости катионного обмена и содержания органического вещества. Определение плотности почв и динамики их уплотнения/разуплотнения (как одних из основных показателей физического состояния и пригодности почв для возделывания сельскохозяйственных культур) можно осуществлять по показаниям датчика сопротивления горизонтальной пенетрации, а также диэлькометрического или оптического датчиков с использованием эмпирических статистических моделей. При этом необходимо учитывать зависимость электропроводности почвы от давления уплотнения, исходной плотности сложения, влажности и гранулометрического состава. Тензометрические и нагрузочные датчики, обеспечивающие оперативное измерение сил, действующих на почвообрабатывающие агрегаты, являются надёжными (способны выдерживать тяжёлые условия эксплуатации в поле) и легко интегрируются в системы сбора данных, что является неоспоримым преимуществом для приложений, позволяющих осуществлять измерения в режиме реального времени.

Важность комплексного мониторинга пространственной изменчивости агрофизических свойств почвы и метеорологической информации, влияющих на обоснование технологических решений, определила выбор способов организации измерений. Для оперативного получения данных датчики должны располагаться на поле в течение вегетационного периода растений и функционировать автономно в составе сенсорных узлов, объединённых в беспроводную сеть. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это распределённая в пространстве на расстоянии от нескольких метров до нескольких километров сеть, обладающая свойством самоорганизации множества сенсорных узлов, объединённых между собой посредством радиоканала, и использующая датчики, включённые в состав узлов, для мониторинга различных процессов. Прототип комплексной измерительной системы, разработанный в АФИ, включает в себя следующий функционал: сенсорные узлы БСС, состоящие из датчиков температуры, пяти- и одноканальных скважинных и штыревых влагомеров, микропроцессорного блока, трансивера и антенны; автоматическую семиканальную метеорологическую станцию с интернет-каналом передачи данных на сервер, являющуюся базовой станцией для остальных сенсорных узлов БСС; сервер, на котором происходит сбор и первичная обработка данных, получаемых с базовой станции и приборов для маршрутного обследования опытных полей; беспилотный летательный аппарат (БЛА) для получения аэрофотоснимков (Блохин и др., 2019).

Апробация прототипа измерительной системы на опытных полях биополигона АФИ в 2018 г. позволила сформировать базу разнородных данных, что способствовало существенному повышению уровня информационного обеспечения проводимых экспериментов по внесению удобрений. Получение в режиме реального времени с использованием рассматриваемого прототипа комплексированных пространственно-атрибутивных опорных данных обеспечило формирование калиброванной и верифицированной информации для интерпретации ДДЗ.

Во избежание повреждения оборудования для регистрации и передачи информации внутри сети сельскохозяйственной техникой при проведении технологических операций (внесение удобрений, мелиорантов, средств защиты растений) сенсорные узлы были размещены под поверхностью земли в составе беспроводной подземной сенсорной сети (БПСС).

Устройства БПСС, устанавливаемые в почве, не требуют проводных подключений. Каждое устройство содержит все необходимые датчики и компоненты для автономной работы узла сети на поле в течение вегетационного периода. Радиокоммуникации в почве — более сложная задача, чем беспроводная связь по воздуху. Поэтому, а также в связи с необходимостью экономии энергии из-за трудностей, связанных с обнаружением и зарядкой оборудования БПСС, необходимы корректировки архитектуры измерительной системы и пересмотр протоколов связи для повышения их эффективности.

Другое важное обстоятельство, также обуславливающее необходимость расширения технических возможностей ИИС для формирования опорной информации, используемой для интерпретации спутниковых ДДЗ, следует из международного опыта наблюдений. Так, например, в течение последних десятилетий были получены значительные массивы данных о влажности почвы при помощи различных спутников с использованием разных алгоритмов выборки (Naeimi et al., 2009; Njoku et al., 2002). Недавно некоторые из массивов данных, полученных методами как активного, так и пассивного микроволнового дистанционного зондирования, были объединены в глобальный массив данных о динамике влажности почвы за последние 30 лет (Liu et al., 2012). С другой стороны, существует международная сеть наблюдений за влажностью почвы, являющаяся глобальной базой данных измерений *in situ*, которая в основном используется для проверки достоверности ДДЗ. Было приложено множество усилий по проверке достоверности данных дистанционного зондирования при помощи результатов измерений *in situ* (Albergel et al., 2012; Su et al., 2013). Несмотря на то, что ДДЗ являются ценной информацией о влажности почвы в глобальном масштабе, измерения *in situ*, осуществляемые с помощью наземных ИИС, необходимы для калибровки и проверки достоверности полученных спутниковых данных о влажности почвы. Кроме того, многие исследования были сосредоточены на выявлении ошибок различных алгоритмов определения влажности почвы по ДДЗ (Dorigo et al., 2011; Gruber et al., 2020). Их результаты показывают, что большая часть информации, полученной с помощью дистанционного зондирования, достаточно точно отображает сезонные и краткосрочные изменения влажности почвы. Тем не менее при её сравнении с результатами измерений влажности почв *in situ* при помощи современных ИИС установлено, что погрешности абсолютной величины и динамического диапазона могут быть значительными.

Развитие научно-технической инфраструктуры и новые возможности в формировании опорной информации

Усовершенствованная научно-техническая инфраструктура для определения основных характеристик почв и детализации их пространственно-временного распределения по полю, по мнению авторов, позволит существенно повысить уровень интерпретации и масштабируемость процесса оценки агрофизических свойств сельскохозяйственных территорий по спутниковым данным. Расширение технических возможностей апробированного прототипа достигается за счёт развёртывания БПСС, датчиков для мониторинга влажности и температуры почв, а также применения мобильного комплекса для непрерывного определения сопротивления горизонтальной пенетрации, влажности, температуры и других характеристик пахотного слоя почвы в режиме реального времени.

Рассмотрим дополнительные возможности научно-технической инфраструктуры более подробно.

Сенсорный узел БПСС. Подземная среда — далеко не идеальное место для размещения электронных устройств. Влага, температура, внутреннее давление почвы, люди, животные, насекомые и землеройное оборудование представляют физическую угрозу для узлов БПСС. Процессоры, маршрутизаторы, источники питания и другие компоненты узлов должны размещаться в защитном корпусе и быть устойчивыми к указанным факторам. Кроме того, физический размер узла БПСС должен быть небольшим, так как при использовании устройств крупных габаритов затраты и время, необходимые для проведения земляных работ, увеличиваются.

Тип аккумуляторной батареи должен быть тщательно подобран таким образом, чтобы он соответствовал изменениям температуры окружающей среды и при этом обеспечивал баланс между экологическими требованиями, физическим размером и ёмкостью.

На *рис. 1* представлена структурная схема сенсорного узла, предназначенного для размещения на поле под поверхностью земли в составе беспроводной подземной сенсорной сети и осуществляющего оперативный мониторинг влажности и температуры почвы с высоким временным разрешением. Предложенная конфигурация позволяет скрыто устанавливать узел на поле под поверхностью земли, не опасаясь его повреждений наземной техникой и человеком, а с помощью выдвижной антенны — осуществлять связь с другими узлами и координатором БПСС, размещённым над поверхностью земли в удалении от поля (*рис. 2*).

Рис. 1. Структурная схема сенсорного узла БПСС

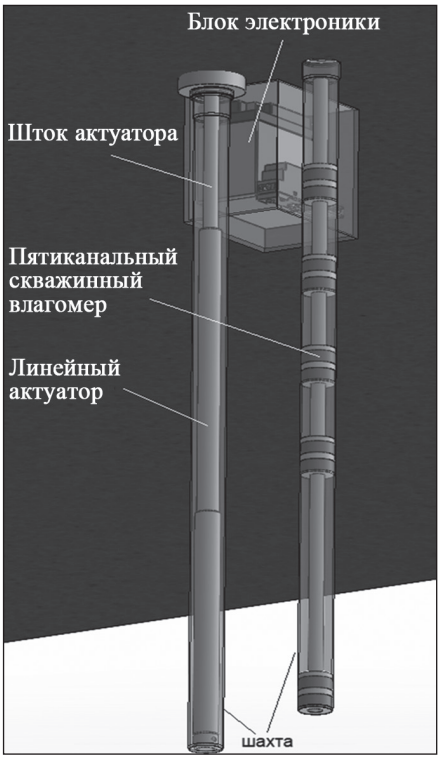


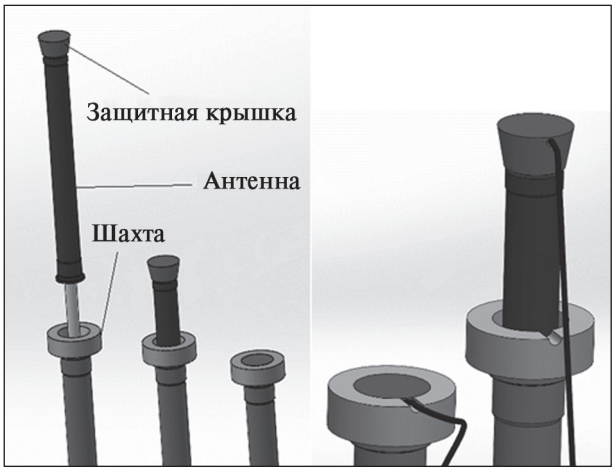
Рис. 2. Схема размещения сенсорного узла под поверхностью почвы

Питание сенсорного узла обеспечивает гелевый аккумулятор (12 В). Рекомбинация газов в гелевых аккумуляторах имеет эффективность до 97 %. Гель эффективнее фиксирует материал пластин, снижая их износ в режимах глубоких разрядов, что положительно влияет на длительность автономной работы узла. Для питания микрокомпьютера (5 В) узла используется DC-DC-преобразователь, способный одновременно стабилизировать и фильтровать выходное напряжение и при этом не вносить генерируемых помех. Программируемый циклический таймер обеспечивает вход и выход из режима ожидания сенсорного узла. Данные с сенсорного блока поступают по интерфейсу RS-485, который реализован на дифференциальных линиях связи и обладает хорошей помехозащищённостью.

Микрокомпьютер после выхода из режима ожидания производит опрос сенсорного блока, преобразует полученные данные в значения влажности и температуры, управляет с помощью реле работой двигателя актуатора и посредством ZigBee-маршрутизатора передаёт пакеты данных на базовую станцию БПСС.

Линейный актуатор выдвигает внешнюю антенну из шахты на высоту 1 м над поверхностью земли с силой 300 Н и скоростью 48 мм/с, что обеспечивает удаление почвы и растений с защитной крышки. После успешной передачи данных актуатор возвращает антенну в шахту

и плотно закрывает выходное отверстие, предотвращая попадание почвы и влаги, при этом сальниковое устройство блокирует попадание влаги и почвы в саму шахту в процессе движения поршня (*рис. 3*).



а *б*

Рис. 3. Схема выдвижения антенны из шахты (*а*); схема закрытия выходного отверстия шахты и расположение кабеля, ведущего к блоку электроники (*б*)

Для выявления возможных проблем в работе узла внутри корпуса расположены датчики влаги, вибрации и движения. В случае потери герметичности возможно попадание воды внутрь корпуса узла, о чём будет сигнализировать датчик влаги. При физическом повреждении корпуса (в результате наезда трактора или, например, вандализма) датчик вибрации подаёт сигнал об опасности. В случае приближения объекта к узлу датчик движения, расположенный на крышке антенны, оповестит систему о возможной угрозе.

Мобильный комплекс. В АФИ для измерения диэлектрической проницаемости почвы впервые разработан автогенераторный двухкомпонентный диэлькометрический преобразователь (ДДП) с ёмкостным датчиком (Ананьев, 2009). На его основе создано устройство (*рис. 4*) для контактного измерения в движении агрофизических характеристик почвы (Ананьев и др., 2015; Ananev et al., 2013).

Рис. 4. Мобильный комплекс для измерения в движении агрофизических характеристик пахотного слоя почвы

Устройство состоит из почвоуглубителя, который проникает в почву на требуемую глубину, образуя канаву (почвенный канал), дно которой выровнено благодаря направленным вниз силам, действующим на почвоуглубитель. Измерительный блок представляет собой монолит толщиной 30 мм из нержавеющей стали с заострённой скошенной лобовой кромкой,

в тело которого встроены датчики диэлектрической проницаемости и электропроводности почвы, температуры, сопротивления горизонтальной пенетрации для измерения на заданной глубине характеристик почвы, образующей стенки почвенного канала (*рис. 5*). Датчики снабжены двухсторонними чувствительными элементами, симметрично установленными по обе стороны блока. Ёмкостный плоскопараллельный датчик включён в колебательный контур автогенераторного двухкомпонентного диэлькометрического преобразователя, который осуществляет измерение диэлектрической проницаемости и электропроводности почв по аналоговому выходному сигналу. Датчик сопротивления горизонтальной пенетрации используется для определения твёрдости почвы путём измерения силы лобового сопротивления движению в почве, действующей на два чувствительных призматических элемента, симметрично выступающих из боковых поверхностей измерительного блока. Также применяется дополнительное средство измерения скорости и пройденного пути, которое выполнено в виде колеса и установлено в задней части измерительного блока. В процессе апробации измерительного блока модернизированный почвоуглубитель был установлен на раме, которая крепилась к трактору с помощью жёсткой сцепки типа «треугольник», при этом обеспечивалась возможность ступенчатого изменения глубины измерительного модуля (15 см, 20, 25, 30 или 35 см). Для регистрации мобильным комплексом координат точек измерений применялась GPS (Global Positioning System, система глобального позиционирования) (компания Trimble, USA) с точностью до 1 м. Для записи данных и их передачи использовался портативный компьютер Panasonic Semi-Rugged. Измерительный блок рассчитан на подключение к бортовому источнику питания трактора и предназначен для представления в цифровой форме аналоговой информации и данных GPS, получаемых от измерительных датчиков мобильного комплекса, и передачи их в бортовой компьютер. Измерительный блок мобильного комплекса построен на микроконтроллере широкого назначения ADUC845 (компания Analog Devices, США).

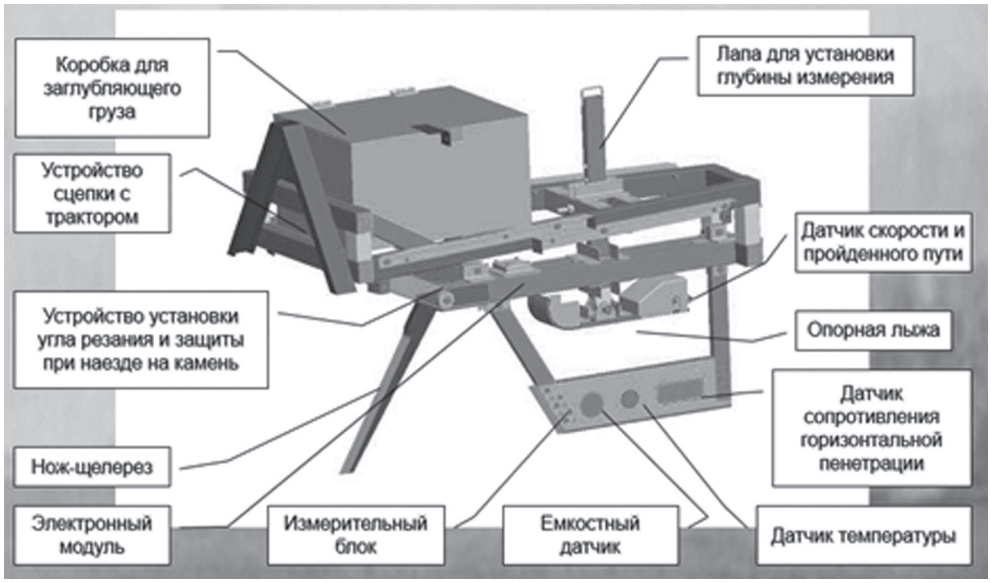


Рис. 5. Макет мобильного комплекса

Измерения на полигоне АФИ для картирования агротехнологических характеристик полей проводились посредством параллельных проходов по полю (*рис. 6*, см. с. 171). Периодичность записи данных составляла 1 с, что обеспечивало запись результатов измерений через каждый метр. Трактор начинал движение с определённой точки («начало») в западном направлении (1-й проезд), после чего производился разворот и начинался 2-й проезд в восточном направлении и т. д. Общая площадь обследованной территории составила около 65 800 м^2 (6,58 га). На проведение полевого обследования было затрачено 2 ч, на подготовку комплекса и настройку оборудования — около 1 ч.

Рис. 6. Фрагмент схемы расположения точек измерения в движении мобильным комплексом (жёлтые) и точек отбора образцов (красные) на экспериментальном поле (Ленинградская обл., 59,420859° с. ш., 30,023044° в. д.)

Для всех датчиков проводятся лабораторные градуировки в диапазонах измеряемых величин. Автогенераторный ДДП с ёмкостным датчиком градуируется как измеритель диэлектрической проницаемости и электропроводности, а также как измеритель влажности по диэлектрической проницаемости (для песчаных и дерново-подзолистых почв) в диапазоне влажностей от воздушно-сухого до влагонасыщенного состояния.

Для проведения градуировки ёмкостных датчиков измерительного блока на первой полосе прохода мобильного комплекса (см. *рис. 6*) от начала движения было выбрано 15 точек отбора образцов с шагом в 20 м. Образцы агродерново-подзолистой почвы отбирались из почвенного канала, образованного почвоуглубителем в процессе измерений в движении, при этом осуществлялась запись координат точек отбора. В общей сложности во время полевых испытаний комплекса было отобрано 174 почвенных образца из каналов глубиной 20 см, соответствующей глубине погружения блока датчиков мобильного комплекса.

На *рис. 7* представлена градуировочная характеристика ёмкостного датчика мобильного комплекса, определяемая зависимостью значений влажности почвы от изменения частоты электромагнитного поля ёмкостного датчика. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,92.

Значения влажности почвы, полученные в результате лабораторного анализа отобранных вручную образцов, сравнили со значениями, измеренными в движении при помощи мобильного комплекса в тех же точках на поле. На *рис. 8* (см. с. 172) прослеживается сходство (синхронность) динамики изменения влажности почвы.

Полевые исследования, выполненные в 2019 г., показали, что использование измерительного устройства для определения агрофизических характеристик почв в движении является быстрым и надёжным способом автоматического сбора данных о почвенных характеристиках.

С помощью мобильного комплекса было получено приблизительно 7000 записей с данными по экспериментальному полю, из которых были выбраны только записи, сделанные в движении при заглублении измерительного блока, исключая развороты и остановки.

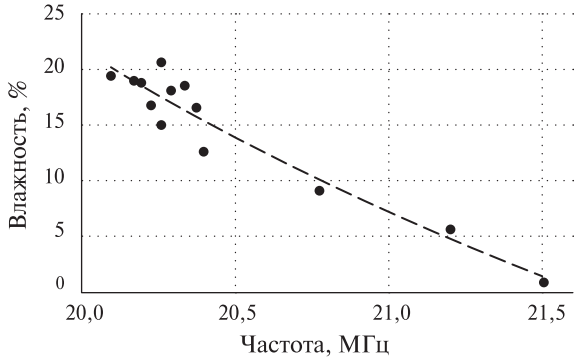


Рис. 7. Градуировочная характеристика ёмкостного датчика влажности мобильного комплекса (зависимость влажности почвы от частоты электромагнитного поля)

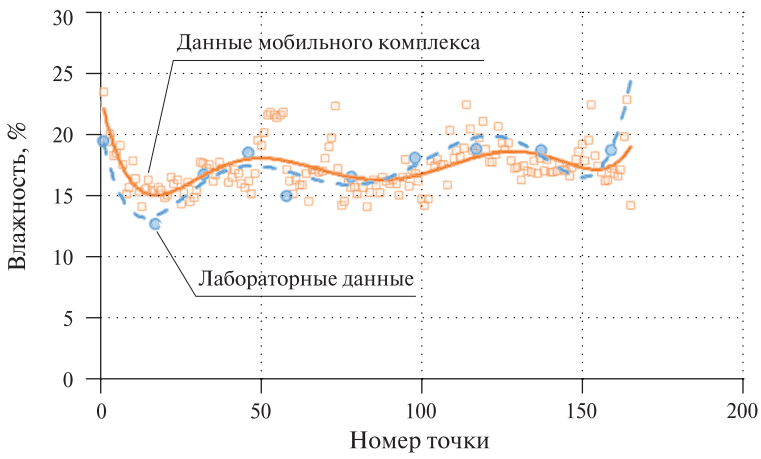


Рис. 8. Значения влажности почвы, измеренные мобильным комплексом, и данные лабораторных исследований

В результате обработки полученных данных было выявлено неравномерное распределение точек измерения по координатам, обусловленное непостоянной скоростью движения комплекса по полю. Для получения равномерного распределения исследуемое поле было разбито на квадраты площадью 25 м^2, после чего из значений во всех точках измерений, попадающих в отдельный квадрат, было выбрано среднее значение влажности и электропроводности. В результате из 2400 точек измерений осталось 702. Затем точечные значения были записаны в центроиды квадратов для дальнейшей обработки (*рис. 9*).

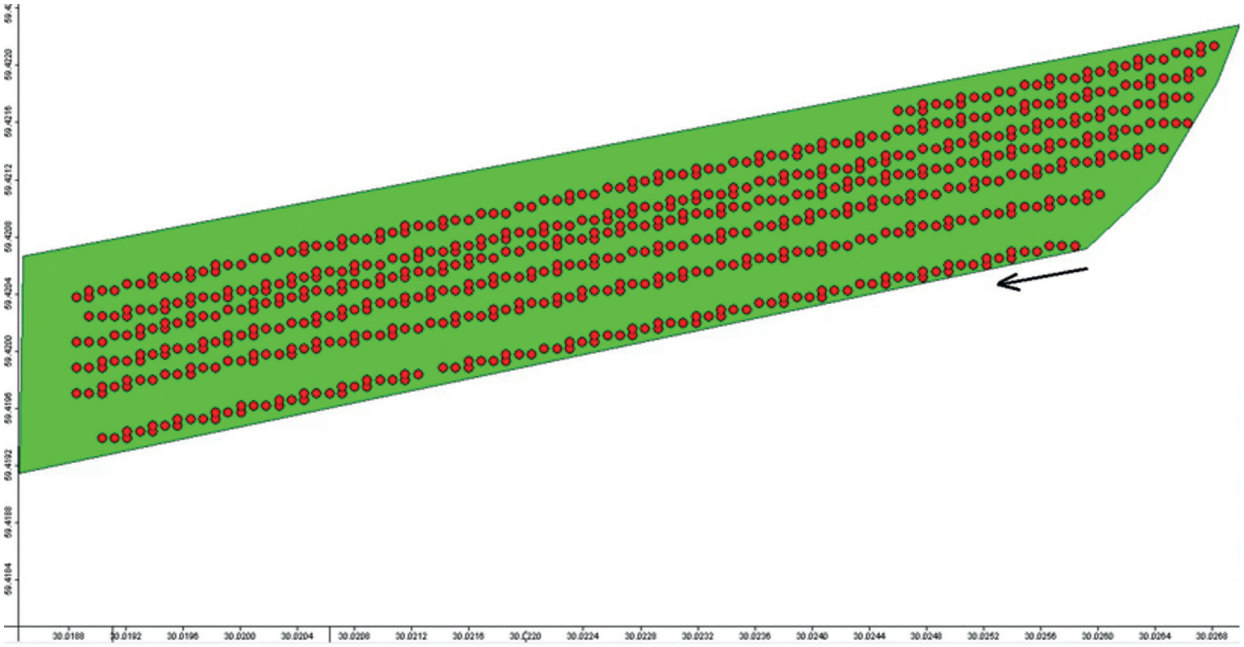


Рис. 9. Карта усреднённых значений влажности почвы

Для пространственной интерполяции значений экспериментальных измерений $Z(x_i)$ использовался наиболее распространённый метод геостатистики, в котором учитывается пространственная статистическая структура исследуемых характеристик почвы, — ординарный кригинг (Демьянов, Савельева, 2010):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i),$$

где $\hat{Z}(x_0)$ — прогнозируемое значение рассматриваемого параметра в местоположении x_0; λ_i — неизвестный вес для него; $Z(x_i)$ — наблюдаемое значение в местоположении i; n — количество наблюдений, причём

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1.$$

Веса λ_i, в свою очередь, зависят в том числе от теоретической модели вариограммы для установленных точек, которая оценивается на основе экспериментальной вариограммы (Oliver, 2010):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i) - Z(x_i + h) \right]^2,$$

где $\gamma(h)$ — значение вариограммы на расстоянии h; $Z(x_i)$ — значение исследуемой характеристики почвы в местоположении x_i; $N(h)$ — общее количество экспериментальных пар точек на расстоянии h.

С помощью метода ординарного кригинга осуществлён прогноз пространственного распределения параметров электропроводности и влажности почвы для каждого набора из 702 точек. Все построения проводились в программе SAGA GIS. В ходе расчётов построены экспериментальные вариограммы с аппроксимирующими теоретическими моделями. В каждом случае наиболее близкой оказалась сферическая модель. На *рис. 10* и *11* представлены полученные карты распределения исследуемых характеристик почвы.

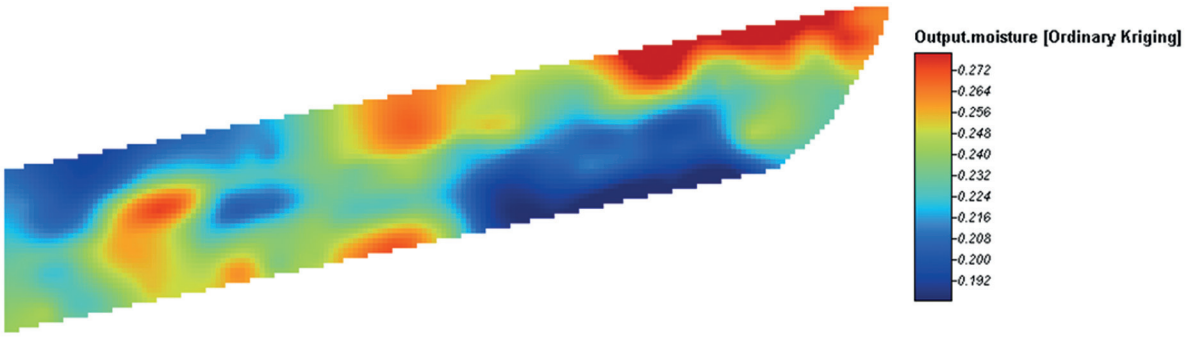


Рис. 10. Карта пространственного распределения влажности почвы на глубине 15 см

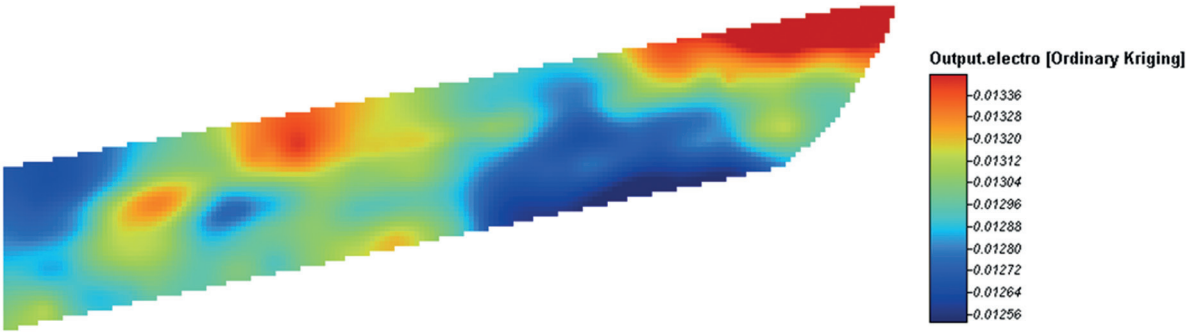


Рис. 11. Карта пространственного распределения электропроводности почвы на глубине 15 см

Заключение

Информационно-измерительная система, разработанная в АФИ, может использоваться для интеллектуального управления системами землепользования на больших территориях. Она позволяет проводить мониторинг пространственной изменчивости влажности, плотности,

температуры и других характеристик почв в режиме реального времени на тестовых полигонах. Информация, полученная посредством ИИС, используется для управления технологиями возделывания сельскохозяйственных культур непосредственно на полигоне АФИ с использованием базы данных системы ГИС-АФИ (географическая информационная система), однако она может более широко применяться для интерпретации спутниковых данных на значительных территориях вне полигона. Из-за высокой внутриполевой изменчивости показателей, обусловленной пространственно-временными вариациями сопутствующих метеорологических (осадки, температура, солнечная радиация, скорость ветра и влажность) и биогеофизических (почвенные характеристики, топографические особенности и характеристики растительности) параметров, измерение и мониторинг динамики основных агрофизических характеристик почвы на значительной площади оказываются весьма сложными задачами.

Почва, как известно, представляет собой гетерогенную многофазную капиллярно-пористую систему, диэлектрические свойства которой определяются её составом, состоянием и протекающими в ней процессами. Поэтому для решения указанных задач целесообразно использовать ДДЗ и обеспечить получение качественной опорной информации для дешифрования спутниковых снимков.

Результаты апробации модернизированной комплексной ИИС предложенной архитектуры свидетельствуют о её практической применимости для формирования опорной информации. Мобильную систему целесообразно применять весной до посева и осенью после уборки урожая для картирования основных характеристик почв, в том числе влажности, температуры и сопротивления горизонтальной пенетрации, а также для построения карт их распределения. Полученные карты позволят определить характер пространственной неоднородности урожайности и стратегию пространственного размещения стационарных узлов БПСС, функционирующих в течение вегетационного периода. Ближайшие перспективы расширения технических возможностей комплексной ИИС по сбору опорной информации связаны с картированием агрохимических свойств почв в движении.

Литература

1. *Ананьев И. П.* Автогенераторные измерительные преобразователи двухкомпонентной диэлькометрии сельскохозяйственных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2009. 48 с.
2. *Ананьев И. П.*, *Зубец В. С.*, *Белов А. В.*, *Кувалдин Э. В.*, *Кулибаба А. Р.*, *Завитков Ю. В.*, *Блохин Ю. И.* Устройство для внутрипочвенного измерения агротехнологических характеристик пахотного слоя почвы в движении. Патент РФ 2537908. Рег. 10.01.2015.
3. *Блохин Ю. И.*, *Белов А. В.*, *Блохина С. Ю.* Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 87–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
4. *Демьянов В. В.*, *Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика / Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН. М.: Наука, 2010. 327 с.
5. *Дубенок Н. Н.*, *Янко Ю. Г.*, *Петрушин А. Ф.*, *Калиниченко Р. В.* Перспективы использования данных дистанционного зондирования в оценке состояния мелиоративных систем и эффективности использования мелиорированных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 96–104. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104.
6. *Лупян Е. А.*, *Бурцев М. А.*, *Прошин А. А.*, *Кобец Д. А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
8. *Матвеенко Д. А.*, *Якушев В. В.*, *Якушев В. П.* Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // Современные про-

блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.

9. *Матвеенко Д. А.*, *Воропаев В. В.*, *Якушев В. В.*, *Блохин Ю. И.*, *Блохина С. Ю.*, *Митрофанов Е. П.*, *Петрушин А. Ф.* Состояние и перспективы создания новых методов количественной оценки внутриполевой изменчивости в точном земледелии // Агрофизика. 2020. № 1. С. 59–70.
10. *Шпанев А. М.* Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 61–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
11. *Якушев В. П.*, *Дубенок Н. Н.*, *Лупян Е. А.* (2019а) Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
12. *Якушев В. П.*, *Канаш Е. В.*, *Якушев В. В.*, *Матвеенко Д. А.*, *Русаков Д. В.*, *Блохина С. Ю.*, *Петрушин А. Ф.*, *Митрофанов Е. П.* (2019б) Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
13. *Adamchuk V. I.*, *Hummel J. W.*, *Morgan M. T.*, *Upadhyaya S. K.* On-the-go soil sensors for precision agriculture // Computer and Electronics in Agriculture. 2004. V. 44. Iss. 1. P. 71–91.
14. *Albergel C.*, *de Rosnay P.*, *Gruhier C.*, *Muñoz-Sabater J.*, *Hasenauer S.*, *Isaksen L.*, *Kerr Y.*, *Wagner W.* Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 118. P. 215–226.
15. *Ananev I. P.*, *Zubets V. S.*, *Belov A.*, *Blokhin Yu. I.* Mobile system for on-the-go measuring and mapping soil permittivity, electrical conductivity, moisture content, temperature and mechanical resistance // Proc. 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing / eds. R. Gebbers, E. Luck, J. Ruhlmann. Potsdam, 26–29 May 2013. 2013. P. 201–209.
16. *Dorigo W. A.*, *Wagner W.*, *Hohensinn R.*, *Hahn S.*, *Paulik C.*, *Xaver A.*, *Gruber A.*, *Drusch M.*, *Mecklenburg S.*, *van Oevelen P.*, *Robock A.*, *Jackson T.* The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements // Hydrology and Earth System Science. 2011. V. 15. Iss. 5. P. 1675–1698.
17. *Gruber A.*, *De Lannoy G.*, *Albergel C.*, *Al-Yaari A.*, *Brocca L.*, *Calvet J.-C.*, *Colliander A.*, *Cosh M.*, *Crow W.*, *Dorigo W.*, *Draper C.*, *Hirschi M.*, *Kerr Y.*, *Konings A.*, *Lahoz W.*, *McColl K.*, *Montzka C.*, *Muñoz-Sabater J.*, *Peng J.*, *Reichle R.*, *Richaum P.*, *Rüdiger C.*, *Scanlon T.*, *van der Schalie R.*, *Wigneron J.-P.*, *Wagner W.* Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors? // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 244. URL: https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806.
18. *Liu Y. Y.*, *Dorigo W. A.*, *Parinussa R. M.*, *De Jeu R.*, *Wagner W.*, *McCabe M. F.*, *Evans J. P.*, *van Dijk A. I. J. M.* Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 123. P. 280–297.
19. *Mouazen A. M.*, *Ramon H.* Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content // Soil and Tillage Research. 2006. V. 86. No. 2. P. 218–229.
20. *Mouazen A. M.*, *Maleki M. R.*, *De Baerdemaeker J.*, *Ramon H.* On-line measurement of some selected soil properties using a VIS–NIR sensor // Soil and Tillage Research. 2007. V. 93. No. 1. P. 13–27.
21. *Naeimi V.*, *Scipal K.*, *Bartalis Z.*, *Hasenauer S.*, *Wagner W.* An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. No. 7. P. 1999–2013. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2011617.
22. *Njoku E. G.*, *Wilson W. J.*, *Yueh S. H.*, *Dinardo S. J.*, *Li F. K.*, *Jackson T. J.*, *Lakshmi V.*, *Bolten J. D.* Observations of soil moisture using a passive and active low-frequency microwave airborne sensor during SGP99 // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. V. 40. Iss. 12. P. 2659–2673. DOI: 10.1109/TGRS.2002.807008.
23. *Oliver M. A.* An overview of geostatistics and precision agriculture // Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Netherlands: Springer, 2010. P. 1–34.
24. *Peets S.*, *Mouazen A. M.*, *Blackburn K.*, *Kuang B.*, *Wiebensohn J.* Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors // Computers and Electronics in Agriculture. 2012. V. 81. P. 104–112.
25. *Su C.-H.*, *Ryu D.*, *Young R. I.*, *Western A. W.*, *Wagner W.* Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 134. P. 1–11.
26. *Viscarra Rossel R. A.*, *Adamchuk V. I.*, *Sudduth K. A.*, *McKenzie N. J.*, *Lobsey C.* Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time. Ch. 5 // Advances in Agronomy. V. 113. 2011. P. 243–291.

New solutions for the reference data formation to improve the accuracy of the agrophysical soil properties determination from satellite data

Yu. I. Blokhin, V. V. Yakushev, S. Yu. Blokhina, A. F. Petrushin, O. A. Mitrofanova, E. P. Mitrofanov, A. V. Dvirnik

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: blohin3k4@gmail.com, sblokhina@agrophys.ru

The paper provides the approaches to the design and development of information-measuring systems for the reference data formation in order to improve the accuracy of the agrophysical soil properties determination from satellite data. The information-measuring systems (IMS), including wireless sensor networks (WSN), facilitate the monitoring of soil conditions with high precision and can efficiently detect adverse status. To determine the main properties of soil cover based on remote sensing data at global scale, *in situ* ground truth measurements based on IMS are required which allow to calibrate and validate the obtained satellite information. Complex monitoring of the spatial variability of soil agrophysical properties and the meteorological information influencing the management of crop production technologies has being implemented at the AFI experimental station (Leningrad region). The possibilities of the scientific and technical infrastructure of IMS for determining the main soil characteristics and detailing their spatial and temporal distribution can be expanded through on-the-go soil sensing and a wireless underground sensor network (WUSN) for improving the interpretation level and scalability of the agrophysical properties' assessment based on satellite data. The structure of WUSN for soil moisture and temperature profiles monitoring with high temporal resolution and the structural scheme of the underground sensor node that communicate untethered through soil are considered. Preliminary results of field tests of mobile complex for determination of agrophysical characteristics of arable soil layer in real time are given. The obtained maps of the spatial distribution of soil moisture and electrical conductivity will determine the nature of the spatial heterogeneity of yield and used to determine the strategy of the spatial location of stationary sensor nodes of WUSN, that function during the vegetation period.

Keywords: information-measuring systems, soil studies, remote sensing data, monitoring systems, wireless underground sensor networks, soil agrophysical properties, mobile complex for on-the-go soil sensing

Accepted: 21.07.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178

References

1. Ananyev I. P., *Avtogeneratornye izmeritel'nye preobrazovateli dvukhkomponentnoi diel'kometrii sel'skokhozyaistvennykh materialov: Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* (Self-maintained dielcometric transducers for two-component complex permittivity of agricultural materials, Ext. abstract Dr. techn. sci. thesis), Saint Petersburg, 2009, 295 p.
2. Anan'yev I. P., Zubets V. S., Belov A. V., Kuvaldin E. V., Kulibaba A. R., Zavitkov Yu. V., Blokhin Yu. I., *Ustroistvo dlya vnutripochvennogo izmereniya agrotekhnologicheskikh kharakteristik pakhotnogo sloya pochvy v dvizhenii* (Device for subsurface measuring agrotechnological characteristics of soil arable layer in motion), Patent RU 2537908, Reg. 10.01.2015.
3. Blokhin Yu. I., Belov A. V., Blokhina S. Yu., Kompleksnaya sistema kontrolya vlazhnosti pochvy i lokal'nykh meteouslovii dlya interpretatsii dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 87–95, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
4. Dem'yanov V. V., Savel'eva E. A., *Geostatistika: teoriya i praktika* (Geostatistics: theory and practice), Moscow, Nauka, 2010, 327 p.
5. Dubenok N. N., Yanko Yu. G., Petrushin A. F., Kalinichenko R. V., Perspektivy ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya v otsenke sostoyaniya meliorativnykh sistem i effektivnosti ispol'zovaniya melioririovannykh zemel' (Remote sensing data in land-reclamation systems and reclaimed land manage-

ment assessment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 96–104, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104.
6. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Razvitie podkhodov k postroeniyu informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Evolution of remote monitoring information systems development concepts), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
7. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
8. Matveenko D. A., Yakushev V. V., Yakushev V. P., Pretsizionnoe upravlenie azotnym rezhimom yarovoi pshenitsy na osnove distantsionnogo zondirovaniya posevov (Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 79–86, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.
9. Matveenko D. A., Voropaev V. V., Yakushev V. V., Blokhin Yu. I., Blokhina S. Yu., Mitrofanov E. P., Petrushin A. F., Sostoyanie i perspektivy sozdaniya novykh metodov kolichestvennoi otsenki vnutripolevoi izmenchivosti v tochnom zemledelii (Current state and trends of developing new methods for quantitative assessment of within-field heterogeneity for precision agriculture), *Agrofizika*, 2020, No. 1, pp. 59–70.
10. Shpanev A. M., Eksperimental'naya baza dlya distantsionnogo zondirovaniya fitosanitarnogo sostoyaniya agroekosistem na Severo-Zapade RF (Experimental basis for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 61–68, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
11. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Loupian E. A. (2019a), Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya sel'skogo khozyaistva (Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 11–23, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
12. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V., Matveenko D. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P. (2019b), Novye vozmozhnosti avtomatizatsii protsessa obnaruzheniya vnutripolevoi neodnorodnosti po giperspektral'nym snimkam i opticheskim kriteriyam (Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 24–32, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
13. Adamchuk V. I., Hummel J. W., Morgan M. T., Upadhyaya S. K., On-the-go soil sensors for precision agriculture, *Computer and Electronics in Agriculture*, 2004, Vol. 44, Issue 1, pp. 71–91.
14. Albergel C., de Rosnay P., Gruhier C., Muñoz-Sabater J., Hasenauer S., Isaksen L., Kerr Y., Wagner W., Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 118, pp. 215–226.
15. Ananev I. P., Zubets V. S., Belov A., Blokhin Yu. I., Mobile system for on-the-go measuring and mapping soil permittivity, electrical conductivity, moisture content, temperature and mechanical resistance, *Proc. 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing*, R. Gebbers, E. Luck, J. Ruhlmann (eds.), Potsdam, 26–29 May, 2013, 2013, pp. 201–209.
16. Dorigo W. A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T., The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements, *Hydrology and Earth System Science*, 2011, Vol. 15, Issue 5, pp. 1675–1698.
17. Gruber A., De Lannoy G., Albergel C., Al-Yaari A., Brocca L., Calvet J.-C., Colliander A., Cosh M., Crow W., Dorigo W., Draper C., Hirschi M., Kerr Y., Konings A., Lahoz W., McColl K., Montzka C., Muñoz-Sabater J., Peng J., Reichle R., Richaum P., Rüdiger C., Scanlon T., van der Schalie R., Wigneron J.-P.,Wagner W., Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors? *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 244, available at: https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806.
18. Liu Y. Y., Dorigo W. A., Parinussa R. M., De Jeu R., Wagner W., McCabe M. F., Evans J. P., van Dijk A. I. J. M., Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 123, pp. 280–297.
19. Mouazen A. M., Ramon H., Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content, *Soil and Tillage Research*, 2006, Vol. 86, No. 2, pp. 218–229.
20. Mouazen A. M., Maleki M. R., De Baerdemaeker J., Ramon H., On-line measurement of some selected soil properties using a VIS–NIR sensor, *Soil and Tillage Research*, 2007, Vol. 93, No. 1, pp. 13–27.

21. Naeimi V., Scipal K., Bartalis Z., Hasenauer S., Wagner W., An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 7, pp. 1999–2013, DOI: 10.1109/TGRS.2008.2011617.
22. Njoku E. G., Wilson W. J., Yueh S. H., Dinardo S. J., Li F. K., Jackson T. J., Lakshmi V., Bolten J. D., Observations of soil moisture using a passive and active low-frequency microwave airborne sensor during SGP99, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, Issue 12, pp. 2659–2673, DOI: 10.1109/TGRS.2002.807008.
23. Oliver M. A., An overview of geostatistics and precision agriculture, In: *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Netherlands: Springer, 2010, pp. 1–34.
24. Peets S., Mouazen A. M., Blackburn K., Kuang B., Wiebensohn J., Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, Vol. 81, pp. 104–112.
25. Su C.-H., Ryu D., Young R. I., Western A. W., Wagner W., Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 134, pp. 1–11.
26. Viscarra Rossel R. A., Adamchuk V. I., Sudduth K. A., McKenzie N. J., Lobsey C., Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time, Chapter 5, *Advances in Agronomy*, 2011, Vol. 113, pp. 243–291.