

ПЕРСПЕКТИВЫ ОПЕРАТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ СОПРЯЖЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ДИСТАНЦИОННЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В.П. Якушев, ак. РАН, тел.: 8(812)5341219, e-mail: vyakushev@agrophys.ru),
В.В. Якушев, чл.-корр. РАН, тел.: 8(812)5341219, e-mail: mail@agrophys.com),
С.Ю. Блохина, к.б.н., тел.: 8(812)5341337, e-mail: sblokhina@agrophys.ru),
Ю.И. Блохин, тел.: 8(812)5341337, e-mail: sblokhina@agrophys.ru),
Д.А. Матвеевко, к.с.-х.н., тел.: 8(812)5341511, e-mail: dmatveenko@agrophys.ru),

**ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт (ФГБНУ АФИ)
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14**



Технологии спутникового мониторинга земель в комплексе с наземными измерениями являются эффективным инструментом пространственной оценки водообеспеченности больших сельскохозяйственных территорий. Рассмотрены методологические основы и конкретные примеры сопряженного применения данных дистанционного зондирования, математических моделей и наземных методов получения опорной информации при решении задачи пространственной оценки водообеспеченности на заданной территории. Представлены результаты апробации на тестовом полигоне АФИ мобильного комплекса для определения гидрофизических характеристик пахотного слоя почвы в режиме реального времени и стационарной информационно-измерительной системы, включающей беспроводную сенсорную сеть (БСС). Разработан прототип сенсорного узла БСС, включающий многоканальный емкостной скважинный влагомер для оперативного мониторинга влажности и температуры почвы на сельскохозяйственном поле в режиме реального времени с учётом его размещения под поверхностью земли. Представлено подробное описание структуры сенсорных узлов, обеспечивающих последовательное измерение и передачу данных с использованием внешней выдвигающей антенны.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, математические модели, мобильный комплекс для измерения свойств почв в движении, информационно-измерительная система, беспроводная сенсорная система, сенсорный узел, скважинный влагомер.

Для цитирования: Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Блохин Ю.И., Матвеевко Д.А. Перспективы оперативной пространственной оценки водообеспеченности сельскохозяйственных территорий на основе сопряженного использования математических моделей, дистанционных и наземных измерений // Плодородие. – 2021. – №3. – С. 108-116. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.21

В производстве растениеводческой продукции оперативная информация о пространственном распределении влажности на сельскохозяйственных полях необходима для оптимального управления поливами на орошаемых землях, а также для определения сроков и доз внесения удобрений, мелиорантов и средств защиты растений. Эффективное решение задачи масштабной пространственной оценки водообеспеченности сельскохозяйствен-

ных полей невозможно без современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Методы и средства ДЗЗ позволяют проводить сплошной непрерывный мониторинг состояния посевов и среды их обитания с одновременным охватом значительных площадей, что весьма затруднительно при проведении наземных исследований. Данные ДЗЗ и информационные системы дистанционного мониторинга уже широко используют в

сельском хозяйстве [1, 2]. Большие размеры территории нашей страны, а также возрастающая доступность спутниковых снимков предопределяют целесообразность более широкого использования данных ДЗЗ в информационном обеспечении современных систем земледелия. Анализ мирового и отечественного опыта интерпретации данных ДЗЗ показывает, что наиболее подходящим методом определения внутритропического варьирования водообеспеченности является сопряженное использование дистанционных и наземных измерительных средств [3-6]. Несмотря на то, что данные ДЗЗ являются ценной информацией о влажности почвы в глобальном масштабе, измерения *in situ*, осуществляемые с помощью наземных информационно-измерительных систем (ИИС), необходимы для калибровки и проверки достоверности алгоритмов интерпретации спутниковых данных, характеризующих водообеспеченность сельскохозяйственных земель. В частности, установлено, что результаты оценки влажности почвы, полученные на основе данных ДЗЗ, имеют значительные погрешности по абсолютной величине и динамическому диапазону в сравнении с соответствующими показателями, измеренными при помощи наземных ИИС [7, 8]. Вместе с тем, осуществить масштабную пространственную оценку водообеспеченности производственных полей только при помощи данных ДЗЗ и потенциально имеющихся на рынке наземных измерительных средств весьма затруднительно. Если доступность спутниковых данных в настоящее время постепенно расширяется, например, с помощью Центра коллективного пользования Института космических исследований РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») [9], то с использованием измерительных средств, обеспечивающих формирование опорной информации для интерпретации снимков производственных полей, всё значительно сложнее. Имеющиеся в продаже ИИС, как правило, импортные и дорогостоящие, а выпуск для данных целей апробированных отечественных ИИС пока не налажен.

В таких условиях для решения задачи пространственной оценки влагообеспеченности сельскохозяйственных территорий, наряду с данными ДЗЗ и наземными ИИС, необходимо дополнительно более широко использовать различные математические модели и информационные сервисы их применения [10].

Цель работы – представить результаты системных исследований, отражающие возможности созданных и разрабатываемых в настоящее время измерительных и вычислительных методов, средств, подходов, и рассмотреть перспективы их сопряженного применения при решении актуальных задач комплексного дистанционного мониторинга, включая оперативную пространственную оценку водообеспеченности сельскохозяйственных полей.

Методические аспекты сопряженного использования современных методов и средств дистанционного зондирования, наземных ИИС и математических моделей

Создание, поддержка функционирования и развитие Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) ЦКП «ИКИ-Мониторинг» свидетельствуют о появлении научно-методической базы для совершенствования и интеграции технологий комплексного дистанционного (прежде всего — спутникового) мониторинга в интересах сельского хозяйства [11]. Спутниковые технологии предоставляют многочисленным пользова-

телям ЦКП «ИКИ-Мониторинг» возможности не только поиска и получения объективной информации, но и проведения ее обработки и анализа состояния агроэкосистем. Все это стало осуществимо за счет стремительного развития новых методов и технологий обработки спутниковых данных (в том числе полностью автоматизированных), а также встраивания в функционал ЦКП «ИКИ-Мониторинг» различных специализированных информационных систем дистанционного мониторинга, ориентированных на проведение системных исследований, контроль и оценку состояния сельскохозяйственных земель и посевов [12].

Инфраструктура работы со сверхбольшими данными, реализованная в рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг», позволила создать информационную систему VEGA-GEOGLAM, предоставляющую пользователям возможность работы со спутниковыми данными о применении методов мониторинга сельскохозяйственных земель и классификации культур в разных странах и регионах мира [13]. Рассматриваемая система ориентирована также на проведение совместного анализа данных ДЗЗ и результатов контактных измерений на тестовых участках. Такой подход, основанный на интеграции наземных измерений и спутниковых наблюдений, позволяет решать различные задачи оценки и прогнозирования состояния посевов и среды их обитания, в том числе задачу пространственной оценки водообеспеченности сельскохозяйственных полей. При оценке водообеспеченности конкретного поля для проведения наземных измерений применяют мобильные и стационарные ИИС, оснащенные специальными датчиками. Контактный мониторинг агроэкосистем в последние годы получил мощный импульс развития благодаря разработке надежных электрических, оптических, механических, радиометрических и других датчиков для определения агрофизических и агрохимических свойств почвы. Ввиду того, что почва представляет собой сложную гетерогенную многофазную капиллярно-пористую систему, стационарные измерительные узлы ИИС целесообразно объединять в репрезентативно распределенную сеть на тестовых участках поля. В следующем подразделе будут рассмотрены некоторые результаты проводимых АФИ исследований по апробации мобильных и стационарных ИИС для определения гидрофизических характеристик почвы и их пространственного распределения по полю, а также опыт применения данных ДЗЗ в указанных целях и перспективы использования спутниковой информации. Здесь же будут охарактеризованы методические основы создания и применения математических моделей для оценки состояния и прогнозирования водообеспеченности корнеобитаемого слоя почвы сельскохозяйственного поля.

Прежде всего следует отметить, что возможность создания расчетных алгоритмов в области оценки состояния и прогнозирования динамики почвенной влаги в значительной степени зависит от изученности гидрофизических свойств почвы и ее водоудерживающей способности. Впервые проблема физического обоснования и математического описания гидрофизических свойств возникла в связи с формулировкой уравнения Ричардса [14], и она актуальна до настоящего времени. Данное уравнение описывает перенос воды в ненасыщенной влагой почве. По сути, оно формулирует условие неразрывности потока почвенной влаги и в матема-

тическом отношении представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа с переменными коэффициентами. Переменный характер коэффициентов рассматриваемого уравнения свидетельствует о том, что оно не имеет аналитического решения. Поэтому в мире создан целый ряд алгоритмов и программных средств, позволяющих найти численное (приближенное) решение уравнения такого класса. Поиск приближенного решения сводится к функциональному описанию входящих в данное уравнение двух коэффициентов. Первым коэффициентом уравнения Ричардса является функция дифференциальной влагоемкости почвы. Первообразная данной функции характеризует водоудерживающую способность почвы в форме зависимости объемной влажности почвы от капиллярного давления почвенной влаги. Указанная зависимость называется функцией водоудерживающей способности почвы, или основной гидрофизической характеристикой почвы [15]. Вторым коэффициентом уравнения Ричардса является функция гидравлической проводимости почвы. Данная функция описывает зависимость коэффициента влагопроводимости от капиллярного давления почвенной влаги или от величины объемной влажности почвы.

Важно отметить, что наиболее известные и широко используемые на практике функции водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы предложены Ван Генухтенем в 1980 г. [16]. Их достоинство состоит в том, что обе функции имеют общий набор параметров. Это удобно при проведении расчетов, так как прямые измерения гидрофизических свойств почвы отличаются высокой трудоемкостью. При этом функция водоудерживающей способности почвы достаточно точно аппроксимирует данные прямых измерений. Параметры указанной функции, идентифицированные методом точечной аппроксимации, используют при прогнозировании значений функции относительной гидравлической проводимости почвы. Поэтому абсолютное большинство исследований в области прогнозирования динамики почвенной влаги в настоящее время опирается на функции гидрофизических свойств почвы, предложенные Ван Генухтенем. Вместе с тем, исследования в области совершенствования моделирования гидрофизических свойств почв активно и эффективно развиваются [17-19]. На основе усовершенствованного функционального представления гидрофизических свойств почв [19] разработан пакет компьютерных программ для моделирования гидрофизических свойств почвы Soil Hydrophysics [20].

Перспективным направлением оценки и прогнозирования состояния водообеспеченности на заданном сельскохозяйственном поле являются имитационные динамические модели. В каждой такой модели имеется программный модуль расчета динамики почвенной влаги. При наличии достоверной агрометеорологической информации за определенный период может быть составлен достаточно точный краткосрочный прогноз запасов влаги в корнеобитаемом слое почвы. Авторами выполнен обзор применяемых методических подходов и проблем прогнозирования продуктивности агроценозов с помощью различных моделей данного класса [21]. Из зарубежных моделей следует отметить MONICA (Германия) и WOFOST (Нидерланды). Из отечественных

разработок одной из наиболее известных в мире моделей является система имитационного моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL [22], разработанная в АФИ.

В настоящее время вычислительные компьютерные эксперименты с использованием различных математических моделей проводятся децентрализованно, т.е. расчеты с помощью той или иной модели можно производить только на инфраструктуре разработчика, что ограничивает исследователей в возможности проведения ансамблевых расчетов с применением различных моделей (используется один и тот же набор исходных данных). Для снятия данного ограничения необходимо разработать соответствующую поддерживающую инфраструктуру. В отделе моделирования адаптивных агротехнологий АФИ разрабатываются новая версия системы APEX для поливариантных расчетов и Web-сервер для ее размещения [23]. Ввод данной разработки в эксплуатацию весьма полезен исследователям, так как обеспечивает логику поливариантных ансамблевых расчетов с различными моделями на одной сервисной платформе.

Еще одним перспективным сегментом применения цифровых технологий является ассимиляция спутниковых данных ДЗЗ с различными математическими моделями и геоинформационными системами для визуализации и представления результатов моделирования. Математическая модель SWAP, включающая блоки описания водного и теплового режимов системы «атмосфера-агроценоз-почва-грунтовые воды», использовалась, например, для оценки водного стресса орошаемых посевов люцерны, кукурузы и сои на территории Саратовского Заволжья [24]. Гидравлические характеристики почвенно-грунтовой толщи и граничные условия были сформированы по результатам наземного и спутникового мониторинга, а также диспетчерского контроля за проведением поливов сельскохозяйственных посевов. В результате установлены связи рассчитанных величин накопленного за период вегетации водного стресса отдельных посевов с урожайностью.

Возможность ассимиляции спутниковых данных разных спектральных диапазонов позволяет успешно использовать созданные математические модели для получения надежных оценок водообеспеченности значительных по площади территорий сельскохозяйственных районов и составления гидрологических прогнозов их состояния. Наиболее подходящим инструментом для проведения таких оценок оказались физико-математические модели вертикального влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой LSM (Land Surface Model) при использовании спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. В результате моделирования для сезонов вегетации 2016-2017 г. получены оценки влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов территории Центрально-Черноземного района площадью 227300 км² [25].

Результаты применения наземных информационно-измерительных систем (ИИС) и методов дистанционного зондирования при решении задачи производственной оценки водообеспеченности сельскохозяйственного поля

Для оптимизации процесса управления водным режимом почв при производстве растениеводческой продукции необходима достоверная информация о пространственном распределении влажности на сельскохозяйственном поле на разных глубинах (в поверхностном, пахотном и подпахотном слоях). Это определило появление и развитие нового направления измерения гидрофизических и других характеристик почв — внутрипочвенное зондирование в движении [26, 27]. Один из таких мобильных комплексов создан в АФИ. Комплекс, наряду с диэлектрической проницаемостью

и электропроводностью почв, по которым определяют объемную влажность, измеряет также сопротивление горизонтальной пенетрации, температуру почвы и скорость движения [28]. Возможность регулирования глубины погружения измерительного блока с вмонтированными в него на одном горизонтальном уровне датчиками позволяет проводить измерения в движении на глубине 15; 20; 25; 30 или 35 см. Мобильность комплекса обеспечивается сцепкой с трактором, к которому подключено питание измерительного блока (рис. 1).



Рис. 1. Мобильный комплекс для измерения в движении агрофизических характеристик пахотного слоя почвы

Апробацию мобильного комплекса для определения пространственного распределения влажности на полигоне АФИ осуществляли в 2019 г. посредством параллельных проходов по опытному полю. Для регистрации координат точек измерений применялся GPS-приемник (компания Trimble, США), обеспечивающий точность до 1 м. Для записи измеряемых величин использовали портативный компьютер Panasonic Semi Rugged. Пе-

риодичность измерений составляла 1 сек, что обеспечивало запись результатов автоматических измерений приблизительно через каждый метр. Для проведения градуировки измерительного блока на первой полосе прохода мобильным комплексом (рис. 2) отбирали вручную несколько образцов почвы с шагом 20 м при фиксации соответствующих координат.



Рис. 2. Фрагмент расположения точек измерения в движении мобильным комплексом (желтые) и точек отбора образцов (красные) для градуировки измерительного блока на экспериментальном поле (Ленинградская обл.)

После градуировочных процедур провели сплошное обследование части опытного поля общей площадью около 7 га с помощью мобильного комплекса. Одновременно со сплошным автоматическим измерением агрофизических характеристик почвы было отобрано вручную около 200 почвенных образцов с глубины 20 см, соответствующей глубине погружения измерительного блока. Значения влажности, определенные по ре-

зультатам лабораторного анализа отобранных вручную образцов, сравнивали со значениями, полученными при измерении мобильным комплексом в тех же точках. На рисунке 3 прослеживается сходство сравниваемых динамик изменения влажности почвы на экспериментальном поле, а на рисунке 4 представлена карта пространственного распределения влажности, созданная на основе геостатистической обработки дан-

ных (программа SAGA GIS), полученных с помощью мобильного комплекса. Полевая апробация мобильного ИИС показала ее перспективность для оценки пространственного распределения влажности на сельскохозяйственном поле.

В реализованном варианте рассматриваемая мобильная ИИС позволяет также устанавливать распределение других важных агрофизических характеристик почвы. Планируется расширить функциональные возможности ИИС путем создания прототипа, измеряющего наряду с агрофизическими параметрами почвы ее агрохимические характеристики, за счёт использования канала внутри-

почвенной отражательной спектроскопии почв в видимой и ближней ИК областях спектра. Вместе с тем, для увеличения масштабов применения мобильного комплекса на производственных полях потребуется ряд дополнительных усилий по совершенствованию его архитектуры и методик, обеспечивающих автоматизацию градуировочного процесса с целью повышения эксплуатационных возможностей ИИС на различных почвах. Для этого, в свою очередь, необходимо разработать инфраструктуру эталонного синхронизированного автоматизированного измерения показателей влажности почвы на различных глубинах с помощью стационарных ИИС.

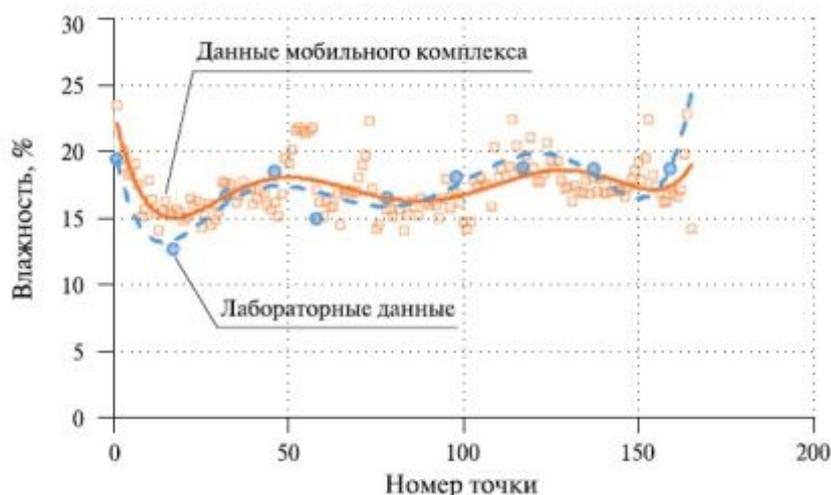


Рис. 3. Значения влажности почвы, полученные при измерении мобильным комплексом в движении, и данные лабораторных исследований

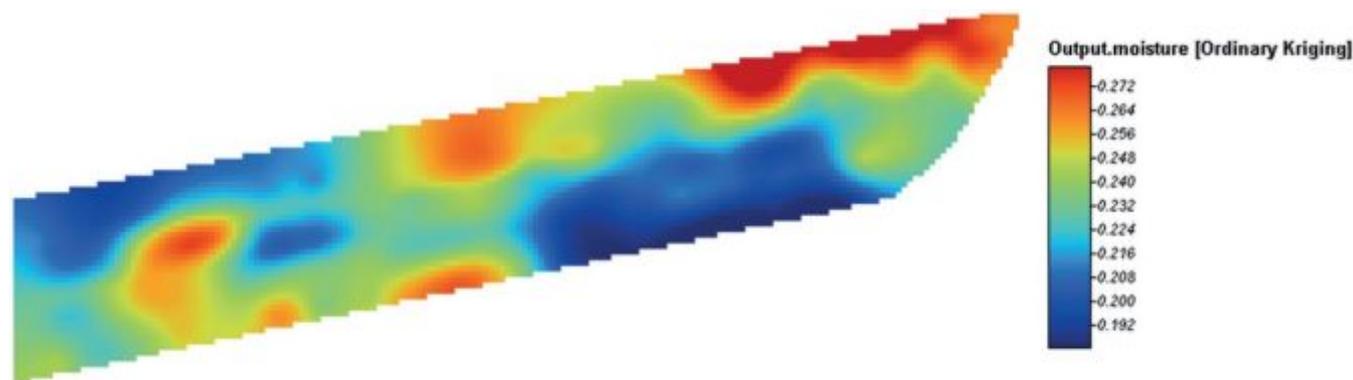


Рис. 4. Карта распределения влажности почвы на глубине 20 см

В этой связи далее будет кратко рассмотрен опыт использования стационарных ИИС и методов передачи измеряемой информации.

Задача построения распределенных систем сбора, передачи и обработки разнородной внутриполевой информации и метеоанных наиболее актуальна в опытном деле и в информационном обеспечении современных систем земледелия. В ее реализации существенная роль отводится сети тестовых агроэкологических полигонов, оснащенных современными техническими средствами. На заседании Бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН (2016 г.) была рассмотрена и одобрена инициатива ИКИ РАН и АФИ о создании сети специализированных тестовых полигонов для спутниковых наблюдений на базе научных учреждений сельскохозяйственного профиля. Учеными ИКИ РАН и АФИ были сфор-

мулированы общие требования к комплектации технической инфраструктуры тестового полигона, разработаны унифицированные методики идентификации, калибровки, верификации и создано программно-аппаратное обеспечение для автоматизации сбора и первичной обработки опорной подспутниковой информации. При этом был определен способ организации измерений и передачи их результатов. Его суть заключается в том, что для оперативного получения данных датчики должны располагаться на поле в течение вегетационного периода растений и функционировать автономно в составе сенсорных узлов, объединенных в беспроводную сеть. Использование традиционных проводных соединений не всегда эффективно из-за высокой стоимости и технического обслуживания. В связи с этим для систем автоматического мониторинга весьма актуальны беспроводные сис-

темы передачи данных, являющиеся одним из примеров применения технологии интернета вещей (IoT) в интеллектуальном земледелии [29].

Беспроводные сенсорные технологии мониторинга основных свойств почвы в последние несколько лет получили мощный импульс к развитию благодаря разработке недорогих датчиков, предназначенных для определения пространственно-временной динамики влажности и температуры почвы, и технологиям передачи данных через централизованную архитектуру. Беспроводная сенсорная сеть – это распределенная в пространстве на расстоянии от нескольких метров до нескольких километров сеть, обладающая свойством самоорганизации множества сенсорных узлов, объединенных между собой посредством радиоканала, и использующая включенные в состав узлов датчики для мониторинга различных процессов.

Через два года после решения Бюро Отделения сельскохозяйственных наук в АФИ уже был создан прототип комплексной ИИС, которая включала 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 происходят сбор и первичная обработка данных, получаемых с базовой станции и приборов для маршрутного обследования опытных полей; беспилотный летательный аппарат (БЛА) для получения аэрофотоснимков [5]. Ап-

робация прототипа комплексной ИИС на опытных полях биополигона АФИ в 2018 г. позволила оперативно сформировать и использовать базу разнородных данных, что способствовало существенному повышению уровня информационного обеспечения проводимых экспериментов по внесению удобрений в системе точного земледелия с учетом измеряемых показателей влажности почв. Получение в режиме реального времени с помощью рассматриваемого прототипа комплексированных пространственно-атрибутивных опорных данных также обеспечивало накопление калиброванной и верифицированной информации для интерпретации аэрокосмических снимков.

В то же время апробация комплексной ИИС позволила выявить существенный недостаток. Во избежание повреждения оборудования для регистрации и передачи информации внутри сети сельскохозяйственной техники при проведении технологических операций сенсорные узлы для измерения влажности почвы на различных глубинах целесообразно размещать под землей в составе беспроводной подземной сенсорной сети (БПСС). Данное обстоятельство послужило основанием для усовершенствования комплексной ИИС. На рисунках 5 и 6 представлены соответственно структура модернизированного сенсорного узла и схема его размещения [6]. Разработанная конфигурация позволяет скрыто устанавливать оборудование под поверхностью земли, не опасаясь его повреждения наземной техникой, а с помощью выдвижной антенны осуществлять связь с другими узлами и координатором БПСС.

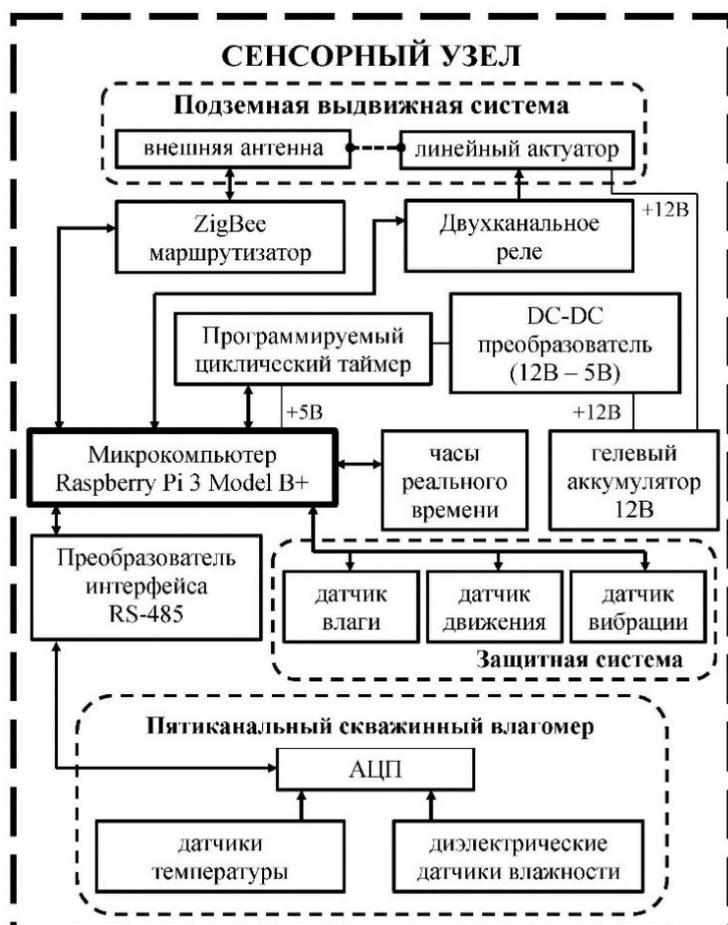


Рис. 5. Структура сенсорного узла БПСС

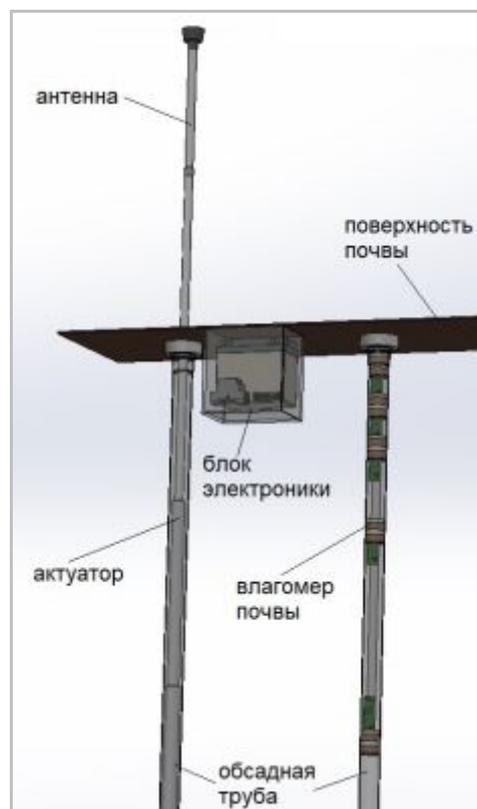


Рис. 6. Схема размещения сенсорного узла под поверхностью земли

Линейный актуатор выдвигает антенну из шахты на высоту 1 м. После успешной передачи данных он возвращает антенну в шахту и плотно закрывает выходное отверстие, предотвращая попадание в шахту почвы и влаги. Для выявления возможных проблем в работе узла внутри корпуса расположены датчики влаги, вибрации и движения. О нарушении герметичности и попадании влаги внутрь корпуса будет сигнализировать датчик влажности. При физическом повреждении корпуса датчик вибрации подаст сигнал об опасности. В случае приближения движущегося объекта к узлу во время передачи информации датчик движения, расположенный на крыше антенны, оповестит систему о возможной угрозе.

Полевую апробацию модернизированного прототипа ИИС планируется осуществить в 2021-2023 г. по мере изготовления нескольких сенсорных узлов для измерения влажности почвы на различных глубинах. В этом случае схему их размещения можно определенным образом представить в первом приближении репрезентативной сетью измерений для оценки пространственного распределения влажности на сельскохозяйственном поле. Мониторинг и формирование репрезентативной опорной почвенной агрофизической и агрохимической информации объективно являются весьма сложными задачами. В настоящее время отрабатываются различные подходы к решению данных задач. Среди традиционных методов выделяются два подхода: размещение сенсорных узлов случайным образом и распределение по однородным зонам. Предлагается применять второй подход: классификация изображений поля по оптическим показателям (внутриполевой неоднородности урожайности) с помощью методов вероятностно-стохастического моделирования и пространственная интерполяция данных наземных измерений геостатистическими методами.

В АФИ накоплен значительный опыт определения однородных (квазиоднородных) зон на сельскохозяйственном поле для прецизионного внесения удобрений, мелиорантов и средств защиты растений в системе точного земледелия [30] и разработано оригинальное программное обеспечение для кластеризации сельскохозяйственного поля по данным электронной карты урожайности [31]. Карты урожайности формируются автоматически с помощью уборочной техники, оборудованной мониторами и специальными датчиками, с привязкой урожайности к глобальной системе координат. Достижением рассматриваемой программы является отсутствие каких-либо априорных предположений о количестве однородных зон (задается лишь верхняя граница числа однородных зон, равная пяти) и их локализации на поле.

Опыт прецизионного производства растениеводческой продукции показывает, что для дифференцированного управления технологической интенсивностью нецелесообразно выделять на сельскохозяйственном поле более пяти кластеров (зон). Первый кластер соответствует очень благоприятным условиям для возделывания сельскохозяйственной культуры, второй – включает участки с хорошими условиями, третий – соответствует в целом удовлетворительным условиям, четвер-

тый – включает неблагоприятные для произрастания культуры зоны и, наконец, пятый – имеет в составе участки с очень плохими условиями. Конечно, в действительности на конкретном поле количество агрономически значимых однородных зон может быть меньше пяти, а в идеальном случае поле в целом представляет собой однородную зону.

Второй подход к размещению сенсорных узлов для репрезентативного измерения влажности почв базируется на количественном и визуальном анализе аэрокосмических снимков. Примеры практического использования спутниковых данных для указанных целей приведены в работах [32-34], где также изложены два количественных подхода к анализу спутниковых данных. Один из них предполагает применение вариограммного анализа спутниковых снимков, а другой – основан на комплексной оценке динамики изменения оптических показателей различных индексов отражения, вычисленных по гиперспектральным снимкам. Пример визуального анализа аэроснимков для решения задачи размещения сенсорных узлов представлен на рисунке 7.

Данный снимок сделан ранней весной после схода снежного покрова. В правой части рисунка показано поле, где на пашне отмечены три участка с повышенной влажностью.

В левой части рисунка поле, на котором ранее была пашня, а теперь появились всходы яровой пшеницы.

Здесь также отмечены три участка (примерно в тех же местах, что и в правой части рисунка) с очевидно более развитой структурой посева. Это свидетельствует, что на идентифицированных ранней весной участках с различной водообеспеченностью сложились наиболее благоприятные условия для продукционного процесса яровой пшеницы. Следовательно, визуальный анализ аэроснимков, сделанных ранней весной или на стадии высыхания почвы после дождя, позволяет выделять на сельскохозяйственном поле участки с различной водообеспеченностью и осуществлять более рациональное решение задачи размещения сенсорных узлов на заданной территории.

Заключение. Для развития «умного сельского хозяйства» и его главного сегмента интеллектуального земледелия необходима «прорывная» методологическая, физико-техническая и экспериментальная база, создающая основу для информационного обеспечения прецизионного ресурсосберегающего производства растениеводческой продукции. Рассмотренные методология и примеры сопряженного применения данных ДЗЗ, математических моделей, мобильных и стационарных ИИС при решении актуальной задачи оценки водообеспеченности и ее пространственного распределения по заданной территории являются существенным шагом в данном направлении. Таким образом, вполне очевидно, что в настоящее время в России уже создан задел для комплексного развития технологии спутникового мониторинга в интересах сельского хозяйства, включая новые методы и подходы к получению опорной информации для интерпретации данных ДЗЗ.



Рис. 7. Вид поля ранней весной и после появления всходов (отмечены участки со значительными запасами влаги (справа) и лучшим состоянием растений (слева))

Литература

1. Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А. 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.
2. 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.
3. Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xavier 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. Iss. 5. pp. 1675-1698.
4. 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. Iss. 1. pp. 71–91.
5. Блохин Ю.И., Белов А.В., Блохина С.Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеословий 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.
6. Блохин Ю.И., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф. и др. Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 4. – С. 164-178. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
7. 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.
8. 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., Richaun 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806>.
9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и

- мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263–284.
10. Якушев В.П., Якушев В.В. Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // Вестник РАН. – 2018. – № 9. – Т. 88. – С. 773-784. DOI: 10.31857/S086958730001690-7.
11. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В. и др. 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.
12. Буланов К.А., Денисов П.В., Лупян Е.А., Мартынов А.С. и др. Блок работы с данными дистанционного зондирования Земли Единой федеральной информационной системы о землях сельскохозяйственного назначения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 171-182. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-171-182.
13. Толпин В.А., Барталев С.А., Елкина Е.С., Кашицкий А.В. и др. Информационная система VEGA-GEOGLAM — инструмент разработки методов и подходов использования данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения задач глобального сельскохозяйственного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 183-197. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-183-197.
14. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // J. Appl. Physics. 1931. Vol. 1 (5). pp. 318-333.
15. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 356 с.
16. Van Genuchten M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. Vol. 44. pp. 892-989.
17. Терлеев В.В., Гиневский П.С., Лазарев В.А., Тонаж А.Г. Функциональное представление гидрофизических свойств почвы как основа информационных технологий в мелиоративном прецизионном земледелии // Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки. – СПб.: АФИ, 2020. – С. 744-751.
18. Терлеев В.В., Гиневский П.С., Лазарев В.А., Тонаж А.Г., Дунаева Е.А. Функциональное представление гидрофизических свойств почвы и его верификация // Агрофизика. – 2020. – № 2. – С. 61-69.
19. Терлеев В.В., Мишель В., Баденко В.Л., Гусева И.Ю. Усовершенствованный метод Муалема-Ван Генухтена и его верификация на примере глинистой почвы Бейт Нетофа // Почвоведение. – 2017. – № 4. – С. 457-467. DOI: 10.7868/S0032180X1704013X

20. Гиневский П.С., Терлеев В.В., Топаж А.Г., Лазарев В.А. SOILHYDROPHYSICS-V.1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667106, 19.12.2019. Заявка № 2019662561 от 12.10.2019.
21. Якушев В.П., Якушев В.В., Баденко В.Л., Матвеев Д.А., Чесноков Ю.В. Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчетов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор) // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – Т. 55. – № 3. – С. 451-467. DOI: 10.15389/agrobiol.2020.3.451rus
22. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Терлеев В.В., Бакаленко Б.И., Полуэктов М.А., Кобылянский С.Г. AGROTOOL, V.4 Программа для поливариантного расчета динамики продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2011611819. Заявка № 2011610229 от 13.01.2011.
23. Медведев С.А., Черяев А.С. Перспективы создания универсального сервиса удаленных ансамблевых расчетов динамических моделей продукционного процесса культурных растений // Агрофизика. – 2020. – № 3. – С. 45-52. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.07.
24. Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Музылев Е.Л., Старцева З.П., Сухарев Ю.И. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 33-43.
25. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Осипов А.И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 44-60. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60.
26. Mobile system for on-the-go measuring and mapping soil permittivity, electrical conductivity, moisture content, temperature and mechanical resistance/I. Ananyev // 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing. 26-29 May 2013. Organized under the auspices of the International Union of Soil Sciences Working Group on Proximal Soil Sensing. Bornimer Agrartechnische Berichte. Heft 82. Potsdam-Bornim, 2013. pp. 201-209.
27. Adamchuk V.I., Allred B., Doolittle J., Grote K., Viscarra Rossel R.A. Tool for proximal soil sensing. In: C. Ditzler and L. West, editors, Soil survey manual. In: USDA, editors, USDA Hand-book 18. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. 2015.
28. Аняньев И.П., Зубец В.С., Белов А.В., Блохин И.Ю., Конев А.В. Мобильный комплекс для внутрипочвенного измерения и картирования агротехнологических характеристик пахотного слоя почвы // Информация и космос. – 2015. – № 2. – С. 69-84.
29. Блохина С.Ю., Блохин И.Ю. Интеллектуальное земледелие на основе интернета вещей // Земледелие. – 2020. – № 7. – С. 7-15.
30. Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. – 364 с.
31. Буре В.М., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Автоматизированная система стохастического выделения однородных технологических зон на сельскохозяйственном поле по данным урожайности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614663 от 29 сентября 2008 г.
32. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П., Петрушин А.Ф., Блохина С.Ю., Якушев В.В. Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 114-122. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122.
33. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2020. – Т. 16. – № 1. – С. 31-40. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2020.103.
34. Якушев В.П., Матвеев Д.А., Петрушин А.Ф., Блохина С.Ю. и др. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 2. – С. 4-10. DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10.

PROSPECTS FOR THE OPERATIONAL SPATIAL ASSESSMENT OF THE WATER AVAILABILITY OF AGRICULTURAL AREAS BASED ON INTEGRATED APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS, REMOTE AND GROUND MEASUREMENTS

V.P. Yakushev, V.V. Yakushev, Yu.I. Blokhin, S.Yu. Blokhina, D.A. Matveenko

Agrophysical Research Institute, Grazhdanskij pr. 14, 195220 Sankt Petersburg, Russia, e-mail: office@agrophys.ru

Satellite land monitoring technologies in complex with ground measurements are an effective tool for spatial assessment of the water availability of large agricultural areas. The paper considers the methodological basis and specific examples of the integrated application of remote sensing data, mathematical models and ground methods for obtaining reference information to solve the problem of spatial assessment of water availability in a given territory. The results of field tests of mobile complex for on-the-go soil sensing and the information-measuring systems, including wireless sensor networks (WSN), at the Agrophysical Research Institute experimental station (Leningrad region) are presented. The prototype of the WSN sensor unit has been developed, including a multichannel capacitive borehole moisture meter for real-time monitoring of soil moisture and temperature in an agricultural field, taking into account its location below the earth's surface. A detailed description of the structure of sensor nodes providing sequential measurement and data transmission using an external retractable antenna is presented.

Key words: remote sensing, mathematical models, mobile complex for on-the-go soil sensing, information-measuring system, wireless sensor network, sensor node, borehole moisture meter.