

## Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования

Ю. И. Блохин, А. В. Белов, С. Ю. Блохина

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

В настоящее время наиболее перспективным способом оперативного определения влажности почвы с высоким пространственным и временным разрешением для обоснования и последующего дифференцированного проведения азотных подкормок в системе точного земледелия считается подход, базирующийся на сопряжённой обработке данных дистанционного зондирования и наземной внутриполевой агрофизической информации. В статье представлена комплексная измерительная система для сбора опорной агрофизической информации и метеоданных в режиме реального времени с использованием беспроводной сенсорной сети. В состав системы входят: автоматическая метеорологическая станция для непрерывного получения метеоданных, расположенная в непосредственной близости от полей, скважинный влагомер для исследования профиля влажности почвы и штыревой влагомер для маршрутного обследования полей. Метеостанция используется для измерения температуры и относительной влажности воздуха, температуры почвы, скорости ветра, количества осадков за различные периоды времени, фотосинтетически активной радиации и радиационного баланса земной поверхности. Представлены результаты работы прототипа комплексной системы, апробированной на дерново-подзолистой почве Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (биополигон АФИ) в 2018 г. Комплексированная пространственно-атрибутивная информация поступала в базу данных системы ГИС-АФИ и использовалась для интерпретации данных дистанционного зондирования (ДДЗ) в опытах по прецизионному производству растениеводческой продукции.

**Ключевые слова:** точное земледелие, данные дистанционного зондирования, диэлектрическая проницаемость, объёмное влагосодержание, профиль влажности почвы, дерново-подзолистая почва

Одобрена к печати: 13.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95

### Введение

Успешное развитие и реализация технологий точного земледелия (ТЗ) основаны на использовании широкого спектра разнородных данных об агротехнологических характеристиках почв и посевов и их пространственно-временной неоднородности, получаемых с помощью измерительных средств. Наиболее разработанными и широко применяемыми среди них являются средства, основанные на использовании электромагнитных методов исследования почв в низкочастотном и радиочастотном диапазонах, а также средства оптического зондирования почв и растительности в видимом и ИК диапазонах.

Анализ мирового и отечественного опыта разработок в области ТЗ показывает, что наиболее перспективным для оценки влажности и температуры почвы считается подход, базирующийся на сопряжённой обработке спутниковых данных дистанционного зондирования Земли и наземной опорной и внутриполевой агрофизической информации.

Спутниковое дистанционное зондирование может существенно снизить стоимость информационного обеспечения ТЗ, а также повысить его качество и увеличить масштабы. При этом опорная информация, получаемая на специализированных полигонах с помощью наземных измерений и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), имеет большое значение для калибровки и валидации спутниковых данных.

## Методические основы формирования комплексной измерительной системы

Важнейшими факторами, влияющими на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, являются сложившиеся и ожидаемые погодные условия, в частности влажность и температура почвы в корнеобитаемом слое на глубине до 1 м. Оценка влагообеспеченности посевов — одна из наиболее важных задач мониторинга развития и формирования урожая сельскохозяйственных культур. Влажность верхнего слоя почвы можно определять с помощью ДДЗ и наземных наблюдений. Разработан алгоритм оптимального пересчёта ДДЗ с запасами продуктивной влаги для верхних 10- и 20-сантиметровых слоёв почвы и установлены приближённые нелинейные связи между данными спутниковых и наземных наблюдений (Быков и др., 2017). Выявлено наличие как положительной, так и отрицательной корреляции коэффициента обратного рассеяния по информации со спутника Sentinel-1 (S1) с наземными измерениями температуры и влажности почвы на глубинах 5, 10, 20 и 30 см и данными по температуре воздуха, находящимися в открытом доступе на веб-сайте International Soil Moisture Network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>) (Родионова, 2017). Установлены приближённые нелинейные связи между данными о влагозапасах в пахотном слое почвы (0–20 см), полученными при помощи дистанционных и наземных методов (Лупян и др., 2011). Для изучения статистических связей между толщиной эффективного слоя воды, установленной по данным спутников GRACE, и запасами продуктивной влаги использовались результаты наземных измерений поверхностного слоя почвы на тестовых участках, а также результаты метеорологических наблюдений, выполненных на находящихся в непосредственной близости метеостанциях. Для сопоставления привлекались такие параметры, как температура воздуха на высоте 2 м от поверхности земли, количество осадков и высота снежного покрова (Киселёв и др., 2015).

Для сбора, передачи и обработки больших объёмов внутривидеовой агрофизической информации и метеоданных с сельскохозяйственных полей используется сеть беспроводных датчиков (wireless sensor network, WSN), позволяющая в режиме реального времени получать данные о температуре и влажности почвы на различной глубине с определённого количества сенсорных узлов (Anisi et al., 2014). Примером системы сопряжения разнородных пространственно-временных данных для ТЗ является система IoT SoA (Internet of Things Service Oriented Architecture) (Cambra et al., 2017), представляющая собой мультимедийную платформу для принятия плановых решений. ДДЗ при этом получают с помощью беспилотников AR Drones.

В настоящее время на территории РФ мониторинг температурных и влажностных параметров агроэкосистем осуществляется с помощью сильно разреженной сети метеорологических станций, что не позволяет получить необходимый для решения задач ТЗ объём погодных данных, а также обеспечить их качество. Для повышения уровня обеспечения метеорологической информацией в процессе исследований на полигонах России целесообразно размещение метеопоста с подключением к беспроводной сети. Такой методический подход является эффективным способом получения необходимых данных в режиме реального времени, позволяющим более обоснованно оценить динамику пространственной неоднородности почв и посевов. Наряду с сенсорными измерительными системами оперативная оценка неоднородности посевов и среды их обитания будет способствовать совершенствованию научных исследований по развитию и внедрению систем точного земледелия.

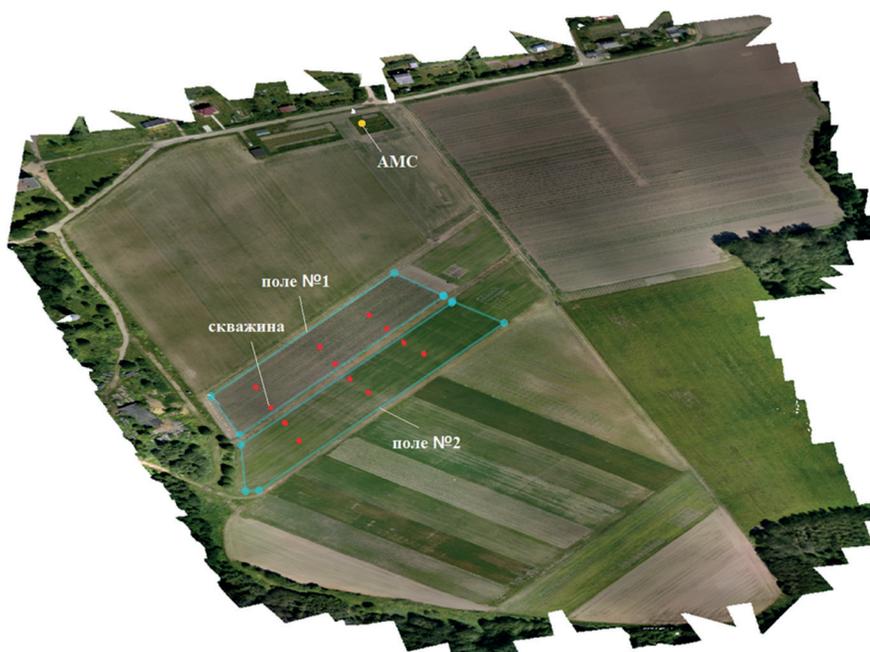
## Результаты

На основе созданных в АФИ разработок в 2018 г. начала функционировать комплексная измерительная система, в состав которой входят WSN и приборы для маршрутного обследования полей.

## Состав WSN:

- автоматическая семиканальная метеорологическая станция с интернет-каналом передачи данных на сервер, являющаяся базовой станцией для остальных сенсорных узлов WSN;
- сенсорные узлы, состоящие из датчиков, микропроцессорного блока, трансивера и антенны;
- сервер, на котором происходит сбор и обработка данных, получаемых с базовой станции и приборов для маршрутного обследования полей.

На *рис. 1* представлена схема расположения элементов WSN на экспериментальных полях № 1 и № 2 с различной степенью окультуренности дерново-подзолистой почвы. В скважинах глубиной 1 м, расположенных на высоко-, хорошо- и среднеокультуренных почвах, размещены обсадные трубы для проведения исследований профиля влажности скважинным влагомером. На площади каждого поля (контур отмечен линией) проводились маршрутные обследования, в процессе которых определялись влажность и температура поверхностного слоя почвы с синхронным получением снимков. WSN планируется разместить на всех экспериментальных полях Меньковского филиала АФИ. Создание WSN является продолжением проводимых в 2017 г. исследований и экспериментов (Блохин и др., 2017) по определению профиля влажности почвы одноканальным скважинным влагомером и влажности поверхностного слоя штыревым влагомером, а также получению локальных метеоданных при помощи автоматической метеорологической станции.



*Рис. 1.* Схема размещения WSN на двух полях Меньковского филиала АФИ.  
Площади полей: № 1 — 8000 м<sup>2</sup>, № 2 — 11 000 м<sup>2</sup>

Сенсорные узлы WSN включают: датчики температуры, пяти- или одноканальные скважинные влагомеры почвы либо штыревые влагомеры, микропроцессорный блок с аналого-цифровым преобразователем, трансивер, антенну и батареи питания. Для передачи данных на базовую станцию используется один из специальных коммуникационных протоколов RFID (Radio-frequency identification), протоколы альянса ZigBee или Wi-Fi. Во избежание радиочастотных помех, приводящих к большей потере пакетов, устанавливаются узлы-маршрутизаторы, не оснащённые датчиками, которые взаимодействуют с сенсорными узлами базовой станции.

Через определённые промежутки времени микропроцессорный блок получает данные с датчиков влажности и температуры и передаёт их по беспроводной связи в приёмник, после чего переключается в режим ожидания. Для уменьшения негативного влияния растений, рельефа и прочих объектов антенна сенсорного узла устанавливается на высоте не менее 1,2 м над уровнем земли. Сенсорные узлы создаются водонепроницаемыми для обеспечения надёжности при использовании в полевых условиях.

Усовершенствованная автоматическая семиканальная метеорологическая станция с интернет-каналом передачи данных установлена в непосредственной близости от полей (рис. 2а). Метеостанция оснащена шестью датчиками: совмещённым датчиком влажности и температуры воздуха, датчиком температуры поверхности почвы, датчиком фотосинтетически активной радиации солнца, датчиком радиационного баланса, анемометром, датчиком осадков (разработан в 2018 г. в АФИ), — а также микрокомпьютером, 4G-модемом, трансивером и антенной. Метеоданные передаются в базу данных на сервер и отображаются на специальном веб-сайте.

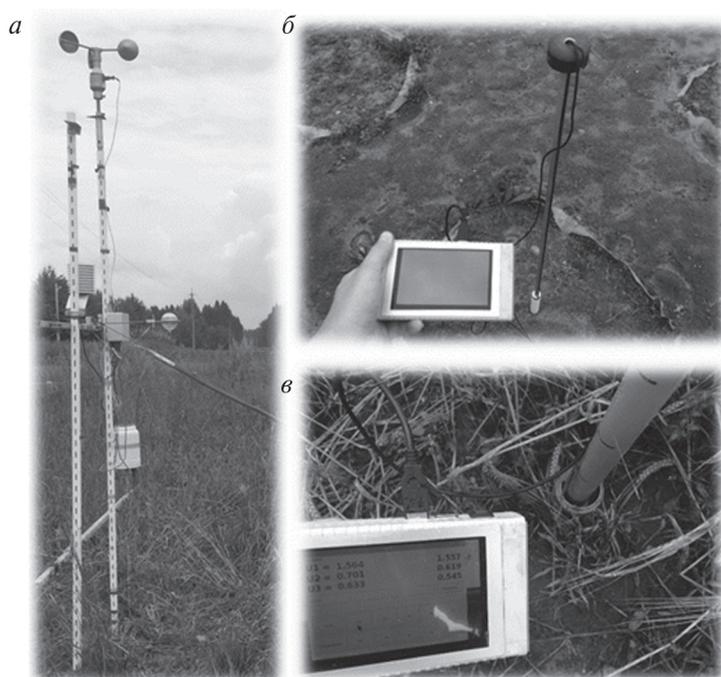


Рис. 2. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий: а — усовершенствованная автоматическая метеорологическая станция; б — штыревой полевой влагомер; в — скважинный влагомер

Измерение диэлектрических свойств материалов является одним из фундаментальных методов исследования свойств веществ, он основан на взаимодействии электромагнитного поля с материальной средой. Почва представляет собой сложную гетерогенную многофазную капиллярно-пористую систему, диэлектрические свойства которой определяются её составом, состоянием и протекающими в ней процессами. Наибольшее развитие и распространение получили диэлькометрические влагомеры, оснащённые ёмкостными штыревыми или цилиндрическими кольцевыми датчиками (Ананьев, 2009).

На данной основе созданы макеты одноканального и пятиканального скважинных диэлектрических влагомеров для использования в обсадных трубах (рис. 3). Ёмкостный цилиндрический датчик с соосными кольцевыми электродами подключается через два последовательно соединённых резистора к источнику высокочастотного синусоидального напряжения и образует R-R-C делитель для измерения объёмной влажности почв с низкой электропроводностью, при которой импеданс датчика определяется в основном диэлектрической проницаемостью влажной почвы и слабо зависит от электропроводности (Ананьев и др., 2016).

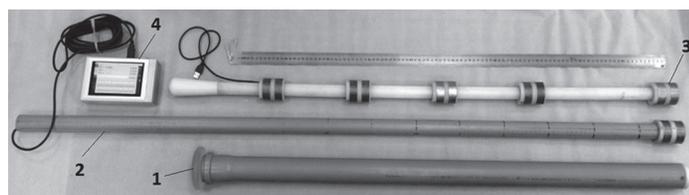


Рис. 3. Комплект для исследования профиля влажности почвы: 1 — обсадная труба; 2 — одноканальный скважинный влагомер почвы; 3 — пятиканальный скважинный влагомер почвы; 4 — портативный контроллер

Одноканальный скважинный влагомер почвы вводится в обсадную трубу для последовательного измерения параметров на заданных глубинах (рис. 2в) или одной фиксированной глубине в стационарном режиме. Пятиканальный скважинный влагомер позволяет производить одновременное измерение на глубине 10, 30, 50, 70 и 100 см. Результаты измерений записываются в базу данных портативного контроллера, разработанного для удобства применения влагомера в полевых условиях, или передаются на базовую станцию при использовании в составе WSN. Для незасолённых почв сельскохозяйственного использования разработан макет штыревого полевого влагомера с ёмкостным штыревым датчиком (рис. 2б). В данном устройстве в качестве ёмкостного датчика используется датчик с четырьмя параллельными штырями длиной 60 мм (Ананьев и др., 2016). Использование штыревого влагомера при маршрутном обследовании полей значительно упрощает и ускоряет процесс измерения объёмной влажности поверхностного слоя почвы. Датчик входит в состав сенсорного узла комплексной измерительной системы биополигона АФИ.

Важно отметить, что измерительному процессу с помощью рассматриваемых приборов предшествует обязательный этап их градуировки. Для этого разработана методика градуировки датчиков в широком диапазоне влажности для каждого типа почвы. На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены градуировочные характеристики соответственно скважинного и штыревого влагомеров для почв биополигона АФИ. Для проведения градуировок подготовлены образцы средне-, хорошо- и высококультуренной почвы, а также подпахотного слоя с низкой ( $1,08 \text{ г/см}^3$ ), средней ( $1,18 \text{ г/см}^3$ ) и высокой ( $1,28 \text{ г/см}^3$ ) плотностью сложения с заданной объёмной влажностью (Блохин и др., 2017). Получены зависимости отношения выходных напряжений детекторов электронной схемы влагомера к весовой влажности почвы с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,97-0,99$  (см. рис. 4) и зависимости отношения выходных напряжений детекторов электронной схемы влагомера к объёмной влажности почвы с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,99$  (см. рис. 5).

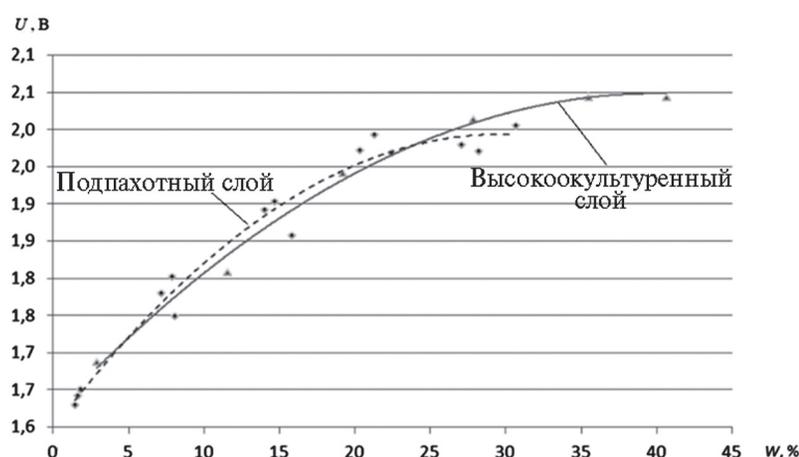


Рис. 4. Градуировочные характеристики скважинного влагомера для подпахотного слоя и высококультуренной почвы. Зависимость отношения выходного напряжения  $U$  от весовой влажности  $W$  образцов почвы при средней ( $\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$ ) плотности сложения высококультуренной почвы

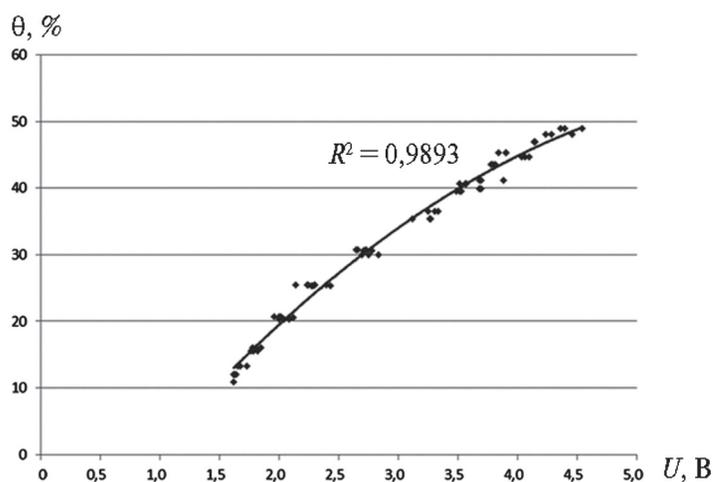


Рис. 5. Градуировочная характеристика штыревого влагомера почв. Зависимость отношения выходного напряжения  $U$  от объёмной влажности образцов почвы  $\theta$

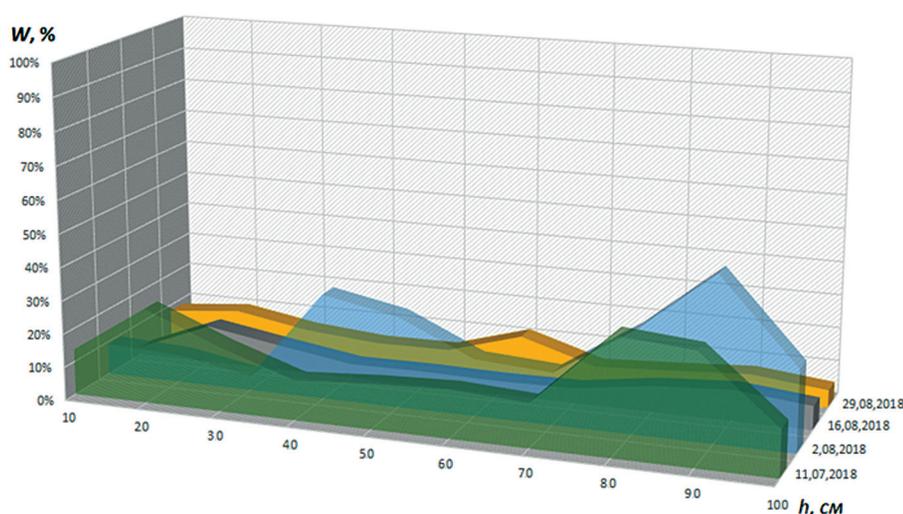


Рис. 6. Значения весовой влажности  $W$  высококультуренной почвы на поле с рожью на различной глубине  $h$  (2018)

На биополигоне АФИ в течение вегетационного периода с 11 июля по 28 августа 2018 г. была проведена апробация комплексной измерительной системы. С помощью штыревого и скважинного влагомеров почв получены значения объёмной и весовой влажности поверхностного слоя почвы и определён профиль влажности (рис. 6) дерново-подзолистых легкосуглинистых почв разной степени окультуренности в условиях стационарного полевого опыта.

На рис. 7 представлены данные о суммарном количестве осадков за указанный период и динамика распределения весовой влажности по профилю почвы (10–100 см). Сравнивая суммарное количество осадков за исследуемый период и распределение влажности по профилю почвы, можно установить зависимость между количеством осадков и влажностью почвы в слоях 10, 70 и 100 см.

Таким образом, при помощи прототипа комплексной системы сбора агрофизической информации на биополигоне АФИ была сформирована база данных, содержащая локальную метеоинформацию и данные о влажности почвы. Параллельно с этим, как отмечалось выше, проводилась аэрофотосъёмка полей биополигона АФИ и осуществлялось комплексирование базы данных. Комплексированная пространственно-атрибутивная информация использовалась в прецизионных опытах по дифференцированному управлению азотным режимом зерновых культур (Якушев, Блохина, 2018).

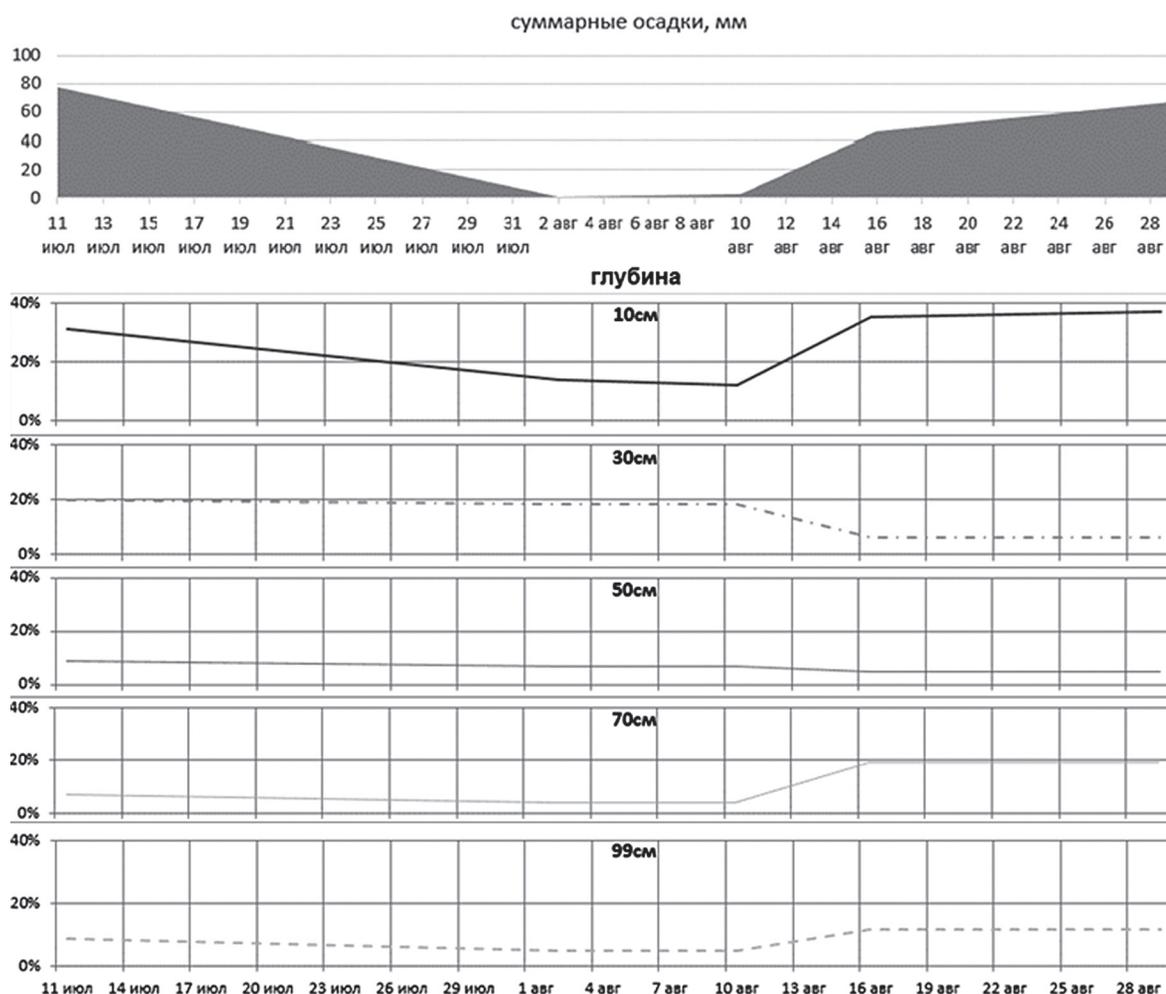


Рис. 7. Суммарное количество осадков за определённые периоды и динамика распределения весовой влажности по профилю почвы (10, 30, 50, 70 и 99 см)

## Заключение

Комплексная измерительная система, прототип которой апробирован на биополигоне АФИ, предназначена для получения широкого спектра пространственно-временных данных с полей в режиме реального времени при помощи предложенных инструментальных средств, а также на основе расширяющихся технических возможностей по информационно-измерительному обеспечению. На прошедшей в АФИ 26–28 сентября 2018 г. II Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» принято инициированное АФИ и ИКИ РАН решение о создании сети специализированных тестовых полигонов для подспутниковых наблюдений на базе опытных полей научно-исследовательских институтов и оснащении тестовых полигонов специализированными информационно-измерительными автоматизированными системами для полевых наблюдений, испытания оборудования и методик, предназначенных для оценки агроэкосистем и усовершенствования алгоритмов дешифрирования данных ДЗЗ. Опорные данные, собираемые в режиме реального времени с использованием предложенной комплексной измерительной системы и унифицированных методик, позволят разрабатывать методы обработки ДДЗ, обеспечивающие получение калиброванной и верифицированной информации об использовании пахотных земель, площади и состоянии посевов различных культур, а также их прогнозной и фактической урожайности.

## 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., Белов А. В., Зубец В. С.* Импедансные влагомеры незасоленных почв с емкостным датчиком // *Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления: материалы Всерос. науч. конф. с международным участием.* СПб.: Агрофиз. научно-исслед. ин-т, 2016. С. 365–372.
3. *Блохин Ю. И., Зубец В. С., Белов А. В., Филиппов П. А.* Исследование профиля влажности почвы с использованием скважного влагомера в стационарных обсадных трубах // *Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего: материалы Международной науч. конф., посвященной 85-летию Агрофизического НИИ.* СПб.: Агрофиз. научно-исслед. ин-т, 2017. С. 835–839.
4. *Быков Ф. Л., Василенко Е. В., Гордин В. А., Тарасова Л. Л.* Статистическая структура поля влажности верхнего слоя почвы по данным наземных и спутниковых наблюдений // *Метеорология и гидрология.* 2017. № 6. С. 68–84.
5. *Киселёв А. В., Муратова Н. Р., Горный В. И., Тронин А. А.* Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12. № 6. С. 7–16.
6. *Лупян Е. А., Савин И. Ю., Бартаев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
7. *Родионова Н. В.* Связь радарных данных Sentinel 1 с наземными измерениями температуры почвы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 5. С. 135–148.
8. *Якушев В. П., Блохина С. Ю.* Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в интересах сельского хозяйства // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15. № 5. С. 257–262.
9. *Anisi M. H., Abdul-Salaam G., Abdullah A. H.* A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture // *Precision Agriculture.* 2014. V. 16(2). P. 216–238.
10. *Cambra C., Sendra S., Lloret J., Garcia L.* An IoT service-oriented system for agriculture monitoring // *IEEE Intern. Conf. Communications.* 2017. P. 1–6.

## Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation

**Yu. I. Blokhin, A. V. Belov, S. Yu. Blokhina**

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

Currently, the ground within-field agrophysical information and remote sensing data fusion is the most promising approach of real-time soil moisture measurement with high spatial and temporal resolution for substantiation and subsequent site-specific application of nitrogen fertilizer in the precision agriculture. The paper presents an integrated system for collecting ground-based agrophysical information and weather conditions with the use of wireless sensor network. The system includes 7-channel agrometeorological station located next to the experimental fields with the Internet channel for remote access to the measured data, a soil vertical profile moisture sensor and a needle-type moisture sensor for topsoil route survey measurements. The agrometeorological station used for measuring temperature and relative air humidity, soil temperature, wind speed, accumulated precipitation, photosynthetic active radiation and radiation balance. The preliminary results of testing the prototype of in-field integrated system on the soddy-podzolic soil of the Menkovo experimental station of Agrophysical

Research Institute (biopolygon of ARI) in 2018 are reported. The complex spatial attribute information was transmitted into the database of the GIS-ARI and was used for remote sensing data interpretation in the experiments on the precision crop production.

**Keywords:** precision agriculture, remote sensing data, dielectric conductivity, volumetric moisture content, soil moisture profile, soddy-podzolic soil

Accepted: 13.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95

## References

1. Ananyev I. P., *Avtogeneratornye izmeritel'nye preobrazovateli dvukhkomponentnoi diel'kometrii sel'skokhozyaystvennykh materialov: Avtoref. dis. d-ra 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. Ananyev I. P., Belov A. V., Zubets V. S., Impedansnye vlagomery nezasolennykh pochv s emkostnym datchikom (Impedance moisture sensors for dissolved soils with capacitive sensor), *Agroekosistemy v estestvennykh i reguliruemyykh usloviyakh: ot teoreticheskoi modeli k praktike pretsizionnogo upravleniya* (Agro-Ecosystems in Natural and Adjustable Conditions: From a Theoretical Model to the Practice of Precision Management), Proc. All-Russia Conf. with Intern. Participation, 2016, pp. 365–372.
3. Blokhin Yu. I., Zubets V. S., Belov A. V., Filippov P. A., Issledovanie profilya vlazhnosti pochvy s ispol'zovaniem skvazhnogo vlagomera v stacionarnykh obsadnykh trubakh (Investigation of the soil moisture vertical profile using a soil profile moisture sensor in the stationary access tubes), *Tendentsii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nykh problem zemledeliya i rastenievodstva k tekhnologiyam budushchego* (Trends in the development of agrophysics: from modern problems of agriculture and crop production to the technology of the future), Proc. Intern. Scientific Conf. Dedicated to the 85<sup>th</sup> Anniversary of the Agrophysical Research Institute, 2017, pp. 835–839.
4. Bykov F. L., Vasilenko E. V., Gordin V. A., Tarasova L. L., Statisticheskaya struktura polya vlazhnosti verkhnego sloya pochvy po dannym nazemnykh i sputnikovykh nablyudenii, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, No. 6, pp. 68–84.
5. Kiselev A. V., Muratova N. R., Gornyi V. I., Tronin A. A., Svyaz' zapasov produktivnoi vlagi v pochve s polem sily tyazhesti Zemli (po dannym s"emok sputnikami GRACE) (Relation between available water content in soil and gravity force (from GRACE data)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 7–16.
6. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti ("VEGA") (Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
7. Rodionova N. V., Svyaz' radarnykh dannykh Sentinel 1 s nazemnymi izmereniyami temperatury pochvy (Sentinel 1 data correlation with ground measurements of soil temperature), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 135–148.
8. Yakushev V. P., Blokhina S. Yu., Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya distantsionnogo zondirovaniya Zemli v interesakh sel'skogo khozyaistva (Current problems and prospects for the use of remote sensing of the Earth in agriculture), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 257–262.
9. Anisi M. H., Abdul-Salaam G., Abdullah A. H., A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture, *Precision Agriculture*, 2014, Vol. 16(2), pp. 216–238.
10. Cambra C., Sendra S., Lloret J., Garcia L., An IoT service-oriented system for agriculture monitoring, *IEEE Intern. Conf. Communications*, 2017, pp. 1–6.