

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МНОГОТОЧЕЧНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ КУКУРУЗЫ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Шарипов Элдор Илхомбек угли

Государственное предприятие «Узбекский национальный институт
метеорологии»

E-mail: sharipoveldor245@gmail.com

Аннотация. Разработана методика полевого исследования точности многоточечного измерения влажности почвы и управления орошением кукурузы (*Zea mays* L.) по состоянию корнеобитаемого слоя. Предлагается размещать датчики на глубинах 10, 30 и 50 см и объединять их показания в интегральный индекс, веса которого изменяются с развитием корневой системы. Методика включает почвенно-специфическую градуировку датчиков гравиметрическим методом, оценивание смещения, повторяемости, RMSE и расширенной неопределенности. Полевой опыт предусматривает рандомизированное размещение четырех вариантов: традиционное орошение, управление по одному датчику, многоточечное управление и регулируемый дефицит влаги. Эффективность оценивается по расходу оросительной воды, урожайности зерна, массе 1000 зерен, биомассе, водопродуктивности и стабильности влажности в профиле. Поскольку эксперимент еще не проведен, представлены проверяемые гипотезы, алгоритм принятия решений и план статистической обработки без использования вымышленных результатов. Методика предназначена для последующей проверки в условиях орошаемого земледелия Хорезмской области.

Ключевые слова: влажность почвы, многоточечные измерения, кукуруза, полевые условия, орошение, градуировка, неопределенность измерений, урожайность, водопродуктивность, LoRa.

Abstract. A field research methodology is proposed to assess the accuracy of multi-point soil-moisture measurements and to manage maize (*Zea mays* L.) irrigation using root-zone data. Sensors are positioned at depths of 10, 30 and 50 cm. Their readings are integrated using growth-stage-dependent weights. The

protocol includes soil-specific gravimetric calibration, estimation of bias, repeatability, RMSE and expanded uncertainty, and a randomized block experiment with conventional, single-point, multi-point and regulated-deficit irrigation treatments. Outcomes include irrigation-water input, grain yield, thousand-kernel weight, biomass, water productivity and root-zone moisture stability. As the field experiment has not yet been conducted, the paper presents testable hypotheses and an analysis plan without fabricated results.

Keywords: *soil moisture, multi-point measurement, maize, field conditions, irrigation scheduling, calibration, measurement uncertainty, grain yield, water productivity, LoRa.*

Введение

Дефицит оросительной воды и повышение требований к устойчивости аграрного производства делают управление влажностью корнеобитаемого слоя одной из ключевых задач точного земледелия. При календарном поливе решение принимается по заранее установленному интервалу и не всегда отражает фактическую влагообеспеченность растений. Это может приводить как к водному стрессу, так и к переувлажнению, вымыванию питательных веществ, ухудшению аэрации корней и непроизводительным потерям воды. По методологии FAO потребность культуры в воде связана с эвапотранспирацией, однако расчетный водный баланс целесообразно дополнять непосредственными измерениями состояния почвы.

Кукуруза формирует мощную корневую систему, однако наиболее чувствительна к дефициту воды в период быстрого вегетативного роста, выметывания метелки, цветения и налива зерна. Недостаток влаги в критические фазы нарушает синхронность цветения, опыление и накопление сухого вещества, а избыточный полив снижает аэрацию и способствует потерям воды и питательных веществ. Опубликованные исследования показывают, что результат зависит от фазы развития, глубины контролируемого слоя и стабильности режима влажности. Поэтому показание одного датчика не всегда характеризует доступную влагу во всем профиле.

Дополнительной проблемой является метрологическая надежность недорогих емкостных датчиков. Заводская характеристика может давать систематическое смещение при изменении гранулометрического состава,



плотности, температуры и засоленности почвы. Почвенно-специфическая градуировка обычно повышает точность и сопоставимость показаний. Следовательно, агротехнический эффект авкукурузуизированного полива нельзя достоверно оценить без предварительной проверки измерительной системы.

Цель исследования — разработать методику оценки точности многоточечного измерения объемной влажности почвы и последующей полевой проверки влияния управляемого по этим данным орошения на урожайность и водопродуктивность кукурузы.

Для достижения цели поставлены задачи: 1) выполнить почвенно-специфическую градуировку датчиков; 2) оценить смещение, повторяемость, RMSE и неопределенность; 3) разработать алгоритм по данным горизонтов 10, 30 и 50 см; 4) сравнить многоточечное управление с традиционным и одноточечным; 5) установить связь между водным режимом, расходом воды, биомассой и урожайностью зерна.

Материалы и методы. Объект, условия и схема полевого опыта

Объектом служат растения кукурузы одного районированного гибрида, выращиваемые в открытом поле. До закладки опыта определяют гранулометрический состав, объемную массу, pH, электропроводность, наименьшую влагоемкость (НВ) и влажность устойчивого завядания отдельно для слоев 0–20, 20–40 и 40–60 см. В итоговой версии указывают координаты участка, гибрид, сроки сева, густоту стояния, систему удобрения, способ орошения и характеристики водоподачи.

Рекомендуется рандомизированный блочный опыт с четырьмя вариантами и не менее чем четырьмя повторностями. Каждая учетная делянка должна иметь защитные растения по краям; агротехнические приемы, питание и защита растений должны быть одинаковыми. Отличаться должен только способ назначения полива.

Вариант	Способ управления	Назначение
Т ₀	Традиционный полив по хозяйственному графику	Контроль



Вариант	Способ управления	Назначение
T ₁	Полив по показанию датчика на глубине 30 см	Оценка однотоочечного контроля
T ₂	Полив по интегральным данным датчиков на 10, 30 и 50 см	Основной многотоочечный вариант
T ₃	Регулируемый дефицит вне критических фаз развития	Оценка водосбережения и риска снижения урожая

Размещение датчиков и сбор данных

В каждом повторении вариантов T₁–T₃ устанавливают датчики на глубинах 10, 30 и 50 см. Верхний датчик отражает увлажнение и испарение пахотного горизонта, средний — состояние основной зоны активных корней, нижний — продвижение фронта увлажнения и возможную фильтрацию ниже целевого слоя. Рекомендуются не менее двух вертикальных профилей на делянку. Положение относительно ряда и точки подачи воды фиксируют на схеме. Интервал регистрации — 15–30 мин; данные передаются по LoRa и параллельно сохраняются локально.

Измерительная система должна регистрировать идентификатор узла, дату и время, глубину, сырое значение датчика, рассчитанную объемную влажность, температуру почвы, напряжение питания, качество радиосвязи и состояние исполнительного устройства. Показания с явными признаками обрыва, насыщения диапазона или резкого одиночного выброса помечаются, но не удаляются из первичного массива. Все изменения алгоритма и коэффициентов градуировки документируются.

Градуировка и оценка точности

Для каждого типа датчика проводится лабораторная градуировка в почве опытного участка. Формируют не менее пяти уровней влажности от воздушно-сухого состояния до уровня, близкого к НВ, и выполняют не менее трех повторов на каждом уровне. Эталонное значение получают гравиметрическим методом: образец взвешивают до и после высушивания, затем массовую влажность переводят в объемную с учетом объемной массы почвы. Датчик и эталонная проба должны характеризовать максимально близкий объем почвы.

$$w = (m_{вл} - m_{сух}) / m_{сух} \cdot 100 \%, \quad \theta_{ref} = (w / 100) \cdot \rho_b / \rho_w,$$

где w — массовая влажность; $m_{вл}$ и $m_{сух}$ — массы влажной и сухой почвы; ρ_b — объемная масса почвы; ρ_w — плотность воды; θ_{ref} — эталонная объемная влажность. Зависимость между сырым сигналом x и θ_{ref} аппроксимируется линейной или полиномиальной функцией. Модель выбирается не только по R^2 , но и по анализу остатков и проверочной выборке.

$$RMSE = \sqrt{[\sum(\theta_i - \theta_{ref,i})^2 / n]}, \quad Bias = \sum(\theta_i - \theta_{ref,i}) / n,$$

где θ_i — результат датчика после градуировки; n — число пар измерений. Дополнительно определяют стандартное отклонение повторяемости sr , максимальную абсолютную ошибку и коэффициент детерминации. Для оценки неопределенности учитывают повторяемость, неопределенность эталонного гравиметрического метода, взвешивания, определения объемной массы, градуировочной модели, температурное влияние и различия между экземплярами датчиков.

$$uc = \sqrt{(u^2_{rep} + u^2_{ref} + u^2_p + u^2_{cal} + u^2_{temp} + u^2_{sens})}, \quad U = k \cdot uc, \quad k = 2.$$

Расширенная неопределенность U указывается в единицах m^3/m^3 при коэффициенте охвата $k = 2$. До начала полевого опыта устанавливается критерий пригодности, например $RMSE \leq 0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и отсутствие статистически значимого смещения после коррекции. Конкретный предел должен быть согласован с паспортными характеристиками выбранного датчика и требуемой точностью решения о поливе.

Алгоритм многоточечного управления

Для трех горизонтов рассчитывается интегральный индекс состояния корнеобитаемого слоя. Веса не должны приниматься как постоянные без проверки. На ранних фазах больший вес отводят слою 0–20 см, после формирования развитой корневой системы — слоям 20–40 и 40–60 см. Исходный вариант для периода выметывания метелки и налива зерна составляет 0,25; 0,45 и 0,30 соответственно; он уточняется по динамике влагопотребления и контрольным почвенным пробам.

$$\theta_{root} = 0,25010 + 0,45030 + 0,30050.$$

Полив разрешается, если нижний доверительный предел интегральной влажности достигает установленного порога: $\theta_{root} - U_{root} \leq \theta_{start}$. Он прекращается при достижении верхнего порога θ_{stop} либо при исчерпании расчетной нормы. Учет неопределенности снижает риск запаздывания полива

при пограничных показаниях. Одновременно вводятся защитные условия: запрет полива при отказе двух и более каналов, контроль максимальной продолжительности, обнаружение утечки по расходомеру и ручное подтверждение после аварийного события.

Пороговые значения задают в процентах от НВ и корректируют по фазам развития. В качестве исходной гипотезы можно поддерживать более высокий уровень в периоды цветения и формирования зерна и допускать умеренное снижение в менее чувствительные периоды. Эти значения не следует переносить из литературы без проверки, поскольку они зависят от сорта, климата, засоленности, почвы и способа полива.

Показатели и статистическая обработка

Объем поданной воды определяют отдельным счетчиком для каждого варианта. В течение вегетации учитывают всхожесть, высоту растений, площадь листьев, сроки наступления фаз и надземную биомассу. При уборке определяют число початков, массу початка и зерна, влажность зерна, массу 1000 зерен, биологическую и стандартную урожайность зерна. Урожай пересчитывают на установленную базисную влажность.

$$IWUE = Y / I, \quad WP = Y / ETa, \quad \Delta Y = (YT_2 - YT_0) / YT_0 \cdot 100 \%,$$

где Y — урожайность, кг/м² или т/га; I — объем оросительной воды, м³; ETa — фактическое водопотребление; ΔY — относительное изменение урожайности. Водосбережение рассчитывают как $(IT_0 - IT_2) / IT_0 \cdot 100 \%$. Фактическое водопотребление определяют по водному балансу с учетом осадков, полива, изменения запаса воды и, при наличии, дренажа.

Данные проверяют на выбросы, нормальность распределения и однородность дисперсий. Влияние варианта орошения на урожайность, расход воды и качество оценивают дисперсионным анализом с учетом блока; при повторных измерениях влажности применяют смешанную модель с фиксированными эффектами варианта, глубины, времени и их взаимодействий. Парные различия оценивают, например, критерием Тьюки при $p < 0,05$. Связь урожая с продолжительностью пребывания ниже порога, амплитудой колебаний и средним θ_{root} анализируют регрессией. Вместе с p -значением приводят доверительные интервалы и размер эффекта.

Группа	Измеряемый показатель	Единица/способ
Влага	010, 030, 050; θ_{root} ; время ниже порога	м ³ /м ³ ; часы
Вода	Объем каждого полива; сезонный расход	л/делянку; м ³ /га
Урожай	Урожай зерна; число початков; масса 1000 зерен; биомасса	т/га; шт.; г
Эффективность	IWUE; WP; водосбережение	кг/м ³ ; %
Качество	Bias; RMSE; sr; U (k = 2)	%; °Brix; %
Метрология	Bias; RMSE; sr; U (k=2)	м ³ /м ³

Ожидаемые результаты и научная гипотеза

Основная гипотеза состоит в том, что многоточечный контроль уменьшит продолжительность дефицита и переувлажнения в корнеобитаемом слое, обеспечив сопоставимую или более высокую урожайность зерна при меньшем расходе воды. Ожидается, что датчик на 10 см быстрее отразит полив и испарение, на 30 см — водообеспеченность основной зоны корней, а на 50 см — избыточное глубокое промачивание.

Преимущество T₂ должно подтверждаться совокупностью признаков: урожайностью зерна, снижением сезонной нормы орошения, ростом IWUE, меньшей продолжительностью пребывания ниже допустимого порога и отсутствием ухудшения структуры урожая. Вариант T₃ позволяет определить допустимый дефицит вне критических фаз; снижение воды не считается эффективным, если оно вызывает непропорциональную потерю урожая.

Предполагаемая научная новизна заключается в объединении вертикально распределенных измерений, почвенно-специфической градуировки и алгоритма решения, учитывающего неопределенность. Для условий орошаемого земледелия Хорезмской области будет проверена возможность управления поливом кукурузы по интегральному состоянию слоев 0–60 см с автономной передачей данных по LoRa.

Ограничения исследования

Будущие выводы будут применимы прежде всего к исследованному гибриду, почве, сезону и способу орошения. Пространственная неоднородность, засоленность, различие водоподачи и положение датчиков могут смешивать эффекты. Необходимы рандомизация, проверка равномерности полива, независимые контрольные пробы и желательно повторение опыта минимум в двух сезонах. Градуировку проверяют до и после сезона.

Необходимо также разделять понятия точности измерения и агрономической эффективности. Даже точный датчик не гарантирует оптимальный полив при неверно выбранных порогах; напротив, положительный результат одного сезона не доказывает метрологическую состоятельность системы. Поэтому оба блока — измерительный и агрономический — анализируются независимо, а затем связываются общей моделью.

Заключение

Предложена методика полевой проверки многоточечного контроля влажности при орошении кукурузы. Она включает измерения на глубинах 10, 30 и 50 см, почвенно-специфическую градуировку, оценивание RMSE, смещения и расширенной неопределенности, рандомизированное сравнение четырех режимов и оценку урожайности зерна и водопродуктивности.

До получения полевых данных корректный научный вывод об увеличении урожайности или проценте экономии воды сделать невозможно. Разработанный протокол превращает предполагаемые преимущества системы в проверяемые гипотезы и предотвращает подмену фактических результатов расчетными ожиданиями. После проведения опыта в статью должны быть внесены таблицы исходных показателей, результаты ANOVA, доверительные интервалы, графики динамики влажности и фактические выводы.

Список литературы:

1. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.
2. Doorenbos J., Kassam A.H. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1979. 193 p.

3. Geerts S., Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas // *Agricultural Water Management*. 2009. Vol. 96. P. 1275–1284. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.04.009.
4. Djaman K. et al. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate // *Water*. 2018. Vol. 10. 405. DOI: 10.3390/w10040405.
5. Wang X. et al. Using irrigation intervals to optimize water-use efficiency and maize yield in Xinjiang, northwest China // *The Crop Journal*. 2019. Vol. 7. P. 322–334. DOI: 10.1016/j.cj.2018.10.008.
6. Adeboye O.B. et al. Assessment of planting method and deficit irrigation impacts on physio-morphology, grain yield and water use efficiency of maize on Vertisols of semi-arid tropics // *Plants*. 2021. Vol. 10. 1094. DOI: 10.3390/plants10061094.
7. Niu L., Wang Z., Zhu G., Yu K., Li G., Long H. Stable soil moisture improves the water use efficiency of maize by alleviating short-term soil water stress // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 833049. DOI: 10.3389/fpls.2022.833049.
8. Evett S.R. et al. Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making // *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 243. 106454. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106454.
9. Domínguez-Niño J.M. et al. On the accuracy of factory-calibrated low-cost soil water content sensors // *Sensors*. 2019. Vol. 19. 3101. DOI: 10.3390/s19143101.
10. Bogen H.R. et al. Effective calibration of low-cost soil water content sensors // *Sensors*. 2017. Vol. 17. 208. DOI: 10.3390/s17010208.
11. Roberti J.A. et al. A robust calibration method for continental-scale soil water content measurements // *Vadose Zone Journal*. 2018. Vol. 17. 170177. DOI: 10.2136/vzj2017.10.0177.
12. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
13. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2019.