



ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ЛИСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

М.В. Суханова, Л.А. Бондарева (ОГУ им. И.С. Тургенева)

Предложено введение в состав агротехнических мероприятий по выращиванию растений процедуры функциональной диагностики растительных организмов. Представлен принцип действия и результаты испытаний устройства для определения влагообеспеченности листовых растений, использующего в качестве критерия оценки функционального состояния растений результаты измерения зеркальной составляющей смешанного отражения от листьев на длине волны ближнего инфракрасного излучения.

Ключевые слова: автоматизация агропромышленного комплекса, точное земледелие, функциональная диагностика, смешанное отражение, зеркальная составляющая.

Введение

Современные цифровые технологии все больше и больше проникают в промышленность и сельское хозяйство. Однако российские агрохолдинги только начинают внедрять подобные технологии, получившие название точного земледелия. На сегодняшний день те или иные элементы технологий точного земледелия используют только 5...10 % производителей [1], тогда как по оценке Агрофизического НИИ Санкт-Петербурга, в странах Евросоюза их применяют около 80 % фермеров, а в США – 60 %.

Развитие данного направления во всех странах мира в последние годы в большей степени ориентировано на использование IT-технологий, но нельзя забывать, что создание адекватно управляемой системы предполагает в первую очередь оценку свойств объекта управления. Контроль параметров почвы и воздуха, окружающего растения, безусловно, дает важную информацию о состоянии среды, в которой произрастают растения, но не позволяет оценить состояние самих растительных объектов. Результатом является ситуация, когда, например, дифференцированное внесение удобрений, основанное на агрохимическом обследовании, не приводит к запланированному увеличению урожая из-за того, что нет однозначной связи между содержанием элементов питания и зонами фактической продуктивности растений. Более того в зонах с низкой урожайностью агрохимические анализы могут показывать высокое содержание элементов питания [1].

Решение проблемы лежит в изменении объекта управления. Оценивая функциональное состояние

растений, а не состояние зоны их произрастания, можно добиться снижения неоднородности отдельных участков за счет регламентированного воздействия на растения. Введение в алгоритм управления выборочного контроля за функциональным состоянием растений позволит осуществить переход к совершенно новым технологиям, основанным на использовании биологических обратных связей, когда воздействия на биологические по своей природе организмы будут проводиться исходя из потребностей этих организмов.

Постановка задачи

На сегодняшний день отсутствуют измерительные технологии, позволяющие неинвазивно, без повреждения растения получить прижизненную информацию о нем в режиме реального времени и без использования лабораторного оборудования. Отсутствие стандартизованных подходов существенно ограничивает развитие автоматизации в этом направлении. При этом как в России [2, 3], так и за рубежом [4-6] появляются устройства, использование которых позволяет получить информацию о состоянии растений для регулирования условий выращивания, либо для оценки жизнеспособности отдельных растений.

Принимая во внимание вышесказанное, очевидна необходимость разработки прибора, простого в реализации и методике использования, который позволил бы применять его как в фермерских хозяйствах, так и в повседневной жизни для выращивания растений на приусадебных участках.

¹ Бондарева Л.А., Суханова М.В. Устройство для определения влагообеспеченности листовых растений // Патент РФ №2710009 G01B 11/30, A01G 25/16. – Оpubл. 23.12.2019 г., Бюл. №36.



Рис. 1. Формирование зеркальной и диффузной составляющих отраженного излучения

Теоретическое обоснование

Дефицит влагообеспеченности растения приводит к тому, что обводненность листьев снижается, при этом первоначальные изменения касаются, прежде всего, тургора листа, то есть напряженное состояние оболочек живых клеток уменьшается, что приводит к появлению дополнительных шероховатостей на поверхности листовой пластины. Данное явление характерно для всех видов лиственных растений и неизменно наблюдается при недостатке полива растений. Причем увядание листа, неизменно связанное с образованием большего числа микронеровностей, начинается значительно раньше момента, когда происходящие внутри листовой пластины изменения можно будет увидеть визуально, так как увядание, заметное для человеческого глаза, начнет проявляться позже.

Зафиксировать эти изменения можно с использованием оптических методов. Традиционно в отраженном излучении в зависимости от свойств и состояния отражающей поверхности выделяют две составляющие: зеркальную и диффузную (рис. 1).

При отражении света от неровной поверхности лучи расходятся в разные стороны, а диффузным отражение становится при неровностях поверхности порядка длины волны и более. Данная теория применялась для оценки свойств стеклянных, металлических и т.п. поверхностей, однако для оценки свойств поверхностей биологических объектов она не использовалась.

Растительная ткань представляет собой сложную оптически неоднородную систему, способную продуктивно использовать солнечное излучение. Основными оптическими свойствами листьев растений являются отражение, пропускание и поглощение электромагнитного излучения, которые могут быть количественно охарактеризованы с помощью соответствующих коэффициентов. Процесс отражения от листьев растений определяется, прежде всего, свойствами самого листа. По мере роста и вызревания листьев их отражательная способность в видимой

области спектра снижается, а в ближней ИК-области возрастает. В целом, спектральная отражательная способность зеленых листьев достигает абсолютного максимума в ближней инфракрасной области в диапазоне 750...1200 нм [7].

Растительный лист является сложной оптической системой, а формирование зеркальной составляющей в смешанном отражении говорит о состоянии «комфорта», характеризующемся блеском поверхности листа, ее высоким тургором, отсутствием различных изменений и повреждений как возрастных, механических, так и прочих, соответствующих дефициту микроэлементов питания (когда наблюдается изменение окраски листа, появление пятен и отмирание тканей и т.д.). На зеркальную составляющую также будет влиять стадия вегетационного периода, так у молодых растений зеркальная составляющая всегда будет выше (до 15 %), чем у стареющих (5...10 %).

Диффузная составляющая присутствует в случае наличия на поверхности листа растения различных видов шероховатостей и неровностей, которые неизменно увеличиваются при недостаточном влагообеспечении. Появление дополнительных шероховатостей приводит к неизменному уменьшению зеркальной составляющей отраженного излучения, которое, в свою очередь, и будет являться информативным признаком увядания всего растения в целом.

Соответственно наличие зеркальной составляющей в смешанном отраженном потоке от листьев растений говорит о том, что не требуется никакого воздействия со стороны человека (полив, подкормка и т.д.). Однако к уменьшению зеркального отражения может привести не только недостаток полива. На состояние растительных клеток оказывают влияние различные заболевания, увеличение или уменьшение температуры, внешние механические повреждения, избыток и недостаток микроэлементов, стадия вегетационного периода и другие факторы, но наиболее значимым для них является количество содержания воды в клеточных структурах. Именно поэтому по интенсивности зеркального отражения можно

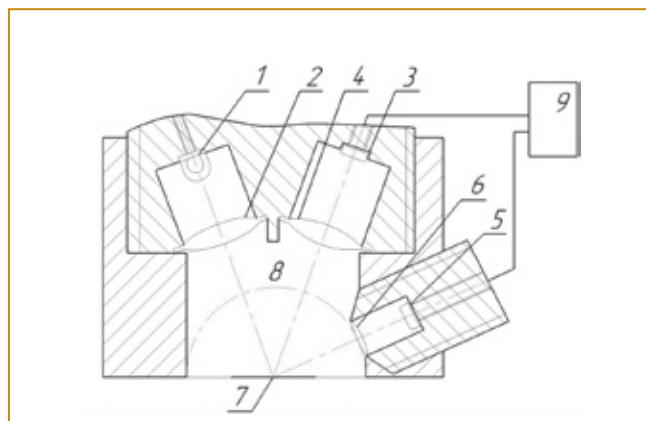


Рис. 2. Конструкция устройства (продольное сечение)

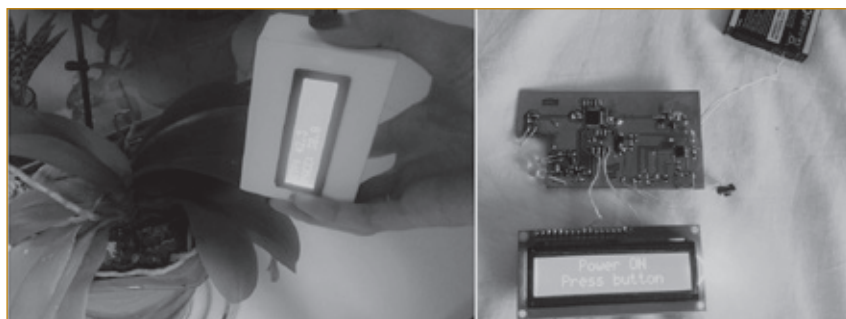


Рис. 3. Внешний вид макета разрабатываемого устройства

делать выводы о достаточности влагообеспеченности растительного организма, и оно может быть использовано в качестве критерия оценки функционального состояния растения.

Принцип действия измерительного устройства

На основании проведенных теоретических и экспериментальных изысканий было разработано устройство для оценки функционального состояния растительных объектов, основанное на измерении зеркальной составляющей отраженного светового потока от листьев растений. Принцип измерения предполагает выделение двух каналов для регистрации диффузного и зеркального отражения. Однако зафиксировать только зеркальное отражение не представляется возможным, так как оба отраженных потока будут распространяться в направлении зеркального отражения, формируя тем самым смешанное отражение (рис. 1). Для выделения зеркальной составляющей в смешанном отраженном потоке измеряются суммарное отражение и его диффузная составляющая, а разница между измерениями, полученными по двум каналам, и будет являться зеркальной составляющей. Таким образом, диффузный канал необходим, чтобы из суммарного отраженного потока отсечь диффузную составляющую и получить зеркальную, так как именно зеркальная составляющая несет полезную информацию.

Пучок монохроматического света от источника излучения 1 (рис. 2) падает под острым углом на контролируемую поверхность листа 7. В связи с тем, что распределение микронеровностей по поверхности листовой пластины неоднородно, исследование проводится на площадке, диаметр которой составляет 15 мм, а излучение от источника 1 проходит через конденсор 2 для формирования светового пятна указанного диаметра. Отразившись от неровностей профиля поверхности листа растения, поток электромагнитного излучения разделяется на зеркальную и диффузную составляющие отраженного света [8].

Диффузная составляющая фокусируется собирающей линзой 6 на чувствительной поверхности фотоприемника 5, регистрирующего интенсивность диффузной компоненты. Отметим, что измерение параметров отраженного излучения традиционно ориентировано на использование фотометрических ша-

ров, которые сложны в исполнении, имеют большие габариты и являются дорогостоящими. Для удешевления, упрощения и уменьшения размеров конструкции было решено перейти от фотометрического шара к фотометрическому стакану, который имеет равномерное покрытие внутренней поверхности без искажения цветового баланса света. Внутренняя поверхность измерительной камеры 8, выполненной в форме полового цилиндра, имеет светоотражающее

покрытие, обеспечивающее в области длин волн ближнего инфракрасного диапазона показатель отражения 84...99 %.

Фокусирующая линза 6 должна лежать касательно к полусфере диффузного распределения светового потока. При этом равномерное во всех направлениях распределение диффузно отраженного потока предполагает, что он будет попадать не только на фотоприемник 5, но и на фотоприемник 3, который расположен под тем же углом, что и источник излучения 1. Подобное расположение предполагает возможность регистрации зеркальной составляющей отраженного излучения в случае, если исследуемая поверхность листа 7 растения обладает минимально выраженными микронеровностями и формирует направленный поток излучения. Зеркальная составляющая фокусируется собирающей линзой 4 на чувствительной поверхности фотоприемника 3, регистрирующего интенсивность зеркальной составляющей совместно с диффузной.

Сигналы с фотоприемников 3 и 5 поступают в блок 9 обработки информации, осуществляющий вычитание диффузной составляющей излучения из суммарного отраженного потока.

В процессе исследований был создан макет устройства для измерения отраженной мощности светового потока, который регистрирует две составляющие — суммарную и диффузную. Устройство представляет собой блок, состоящий из оптического канала, печатной платы, дисплея и кнопки для манипуляций, которые помещены в корпус (рис. 3).

Результаты измерений обрабатываются в микропроцессорном блоке, алгоритм работы которого предусматривает расчет среднего арифметического значения полученных результатов. За время проведения одного измерения после нажатия кнопки управления пять раз опрашивается АЦП с интервалом 100 мс. Затем микроконтроллер рассчитывает среднее арифметическое значение полученных результатов, что позволяет увеличить точность проводимого измерения, избежав, в том числе неточностей, связанных с тремором рук оператора, проводящего измерения, и приводит результат к процентам в диапазоне 0...100%, после чего полученные значения выводятся на дисплей устройства.

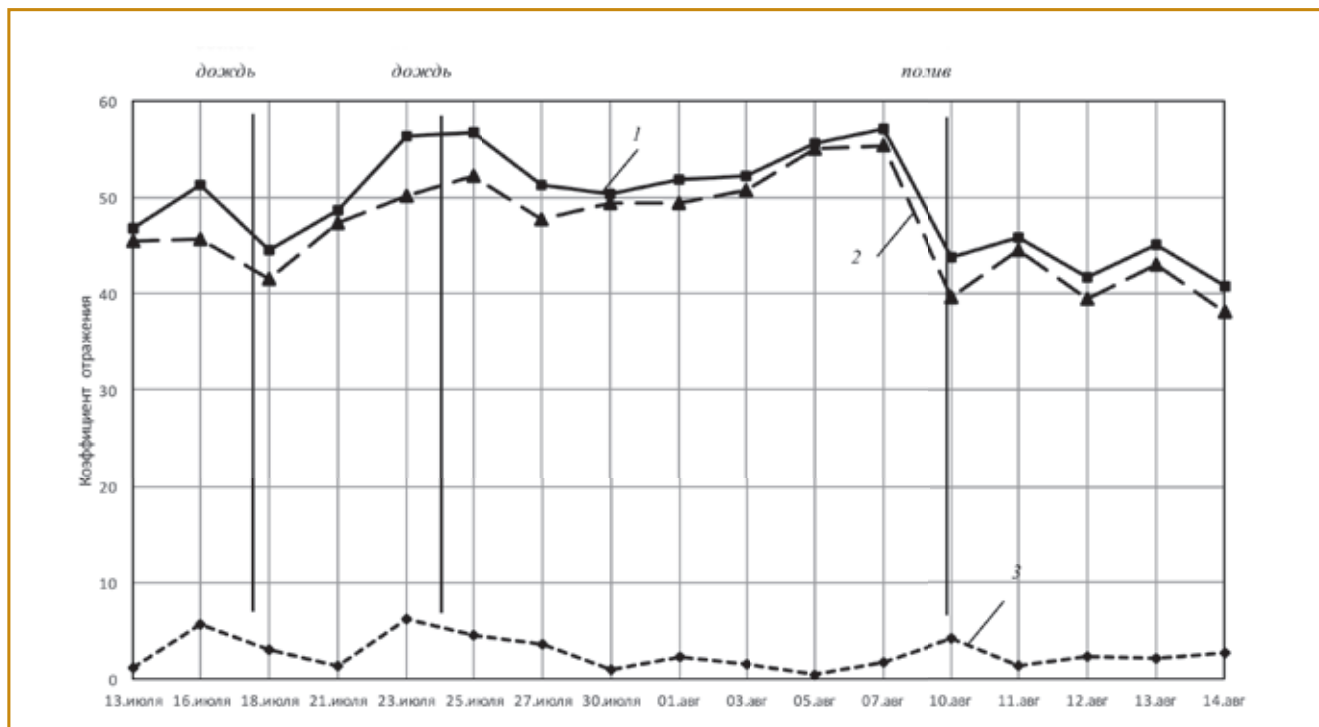


Рис. 4. Исследование влияния полива на величину зеркальной составляющей отраженного излучения от листьев перца сладкого сорта Восковидный Сенюшкина, где

- 1- график изменения смешанного отражения от листовой пластины;
- 2 - график изменения диффузной составляющей отраженного светового потока;
- 3 - график изменения зеркальной составляющей отраженного светового потока.

Результаты экспериментальных исследований

Испытания устройства проводились с целью изучения изменения зеркальной и диффузной составляющих смешанного отражения от листьев зеленых растений, выявления их зависимости от влагообеспеченности растительных объектов и возможности применения разработанного метода для оценки функционального состояния растений в процессе их жизнедеятельности. Экспериментальные исследования проводились как в лабораторных, так и в полевых условиях на площадях фермерского хозяйства.

В качестве примера представлены результаты исследования перца сладкого сорта Восковидный Сенюшкина (рис. 4), которые показали изменение зеркальной составляющей отраженного потока от листьев растений в зависимости от выпавшего дождя или проведенного полива растений. Исследования проводились ежедневно в течение месяца. Выборка растений на делянке включала порядка восьми объектов.

Усредненные значения изменения зеркальной составляющей отраженного излучения показали, что ее рост соответствовал моментам выпадения дождя или осуществления полива, когда наблюдался период затишного отсутствия осадков. В эти моменты значения коэффициентов отражения зеркальной составля-

щей составили величины 5,6, 6,2 и 4,2 % соответственно. При этом в промежутках происходило ее снижение практически до нулевых значений (0,5 % в период затишной засухи), что соответствует крайне высоким потребностям растительных объектов в воде.

Проведенный полив привел к увеличению измеряемого параметра, однако его величина не достигла значений, зафиксированных в начале месяца, и вновь быстро уменьшилась до 2,2 %, что свидетельствовало о необходимости дополнительного полива, так как растения находились в удовлетворительном функциональном состоянии с дефицитом содержания воды в листьях. Данный факт является убедительным доказательством того, что инструментальные методы оценки состояния растительных объектов позволяют не только получать информацию о самих растениях, но и своевременно осуществлять различные мероприятия по их возделыванию и тем самым реализовывать оптимальную программу агротехнических мероприятий.

Исследования растений томатов сорта Орловский (рис. 5) показали изменение зеркальной составляющей отраженного потока от листьев растений в зависимости от выпавшего тумана или проведенного полива растений. В эксперименте использовалось порядка десяти растений, измерения проводились ежедневно в течение месяца.

² Бондарева Л.А., Суханова М.В. Способ оценки функционального состояния растений для определения их потребностей в воде// Патент РФ №2719788 A01G 7/04, G01N 21/17. — Оpubл. 23.04.2020 г., Бюл. № 12

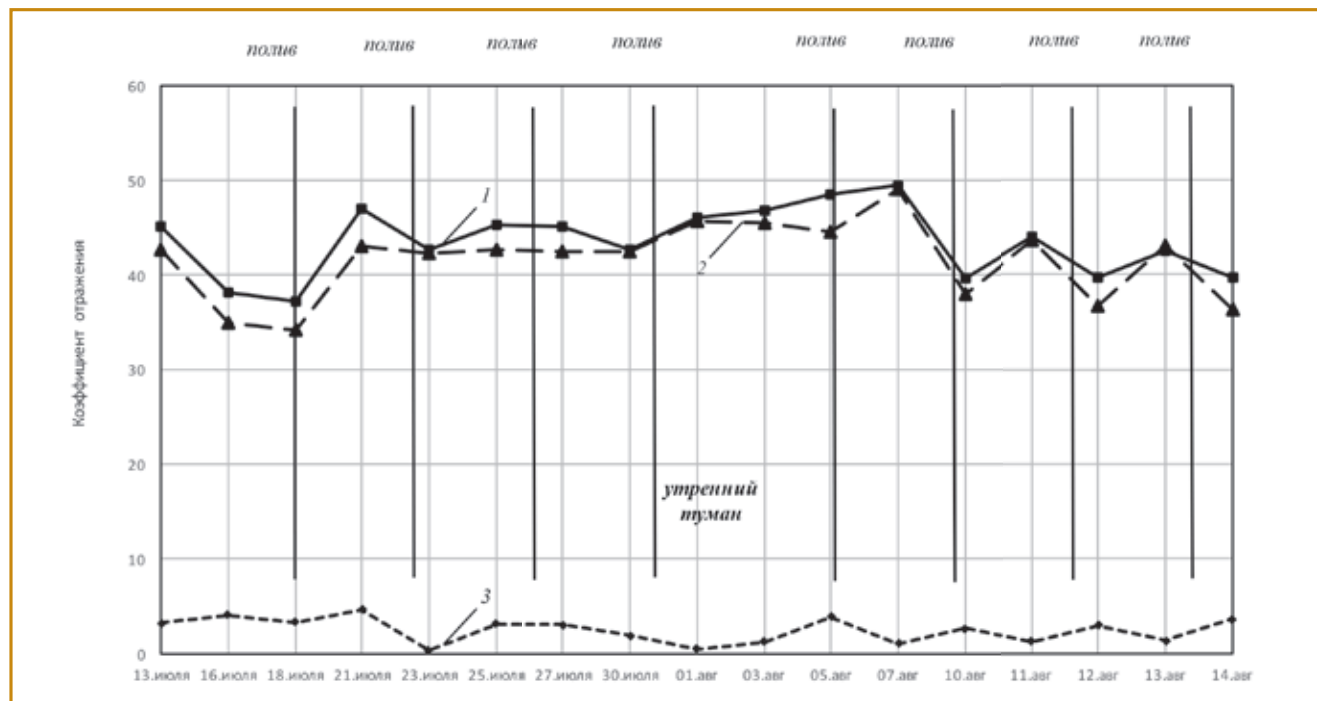


Рис. 5. Исследование влияния полива на величину зеркальной составляющей отраженного излучения от листьев томата сорта Орловский ранний, где

- 1 - график изменения смешанного отражения от листовой пластины;
 2 - график изменения диффузной составляющей отраженного светового потока;
 3 - график изменения зеркальной составляющей отраженного светового потока.

Как видно из графика, рост зеркальной составляющей отраженного светового потока наблюдался при осуществлении полива, однако после тумана функциональное состояние растений томата резко ухудшилось, визуально это проявлялось появлением на ряде растений признаков фитофтороза.

Заключение

Любое воздействие на растения различных стрессовых факторов приводит к ответной реакции многих физиологических показателей. В результате комплекса экспериментальных исследований, проведенных на различных видах растений, установлено, что наличие зеркальной составляющей отраженного светового потока может стать критерием оценки функционального состояния растений для определения их потребностей в воде. Знание данной информации позволит адаптировать технологию возделывания различных растительных объектов с учетом их особенностей и потребностей в реальном времени.

Универсальность представленного оборудования позволяет решать широкий спектр задач и предоставляла возможность работы с различными видами растений, как в открытом, так и в закрытом грунте.

Список литературы

1. Максимова Е. Precision farming для российских аграриев. Как внедряются технологии точного земледелия // Агроинвестор. 2017. №7.
2. Будаговский, А.В. Новый подход к проблеме функциональной диагностики растений // Аграрная наука. 2009. № 9. С. 19-21.
3. Кувалдин Э.В. Дистанционный и контактный приборы для диагностики состояния растений // Оптический журнал. № 80 (11). 2013. С. 68-77.
4. Malinda S. Thilakarathna, Manish N. Raizada Challenges in Using Precision Agriculture to Optimize Symbiotic Nitrogen Fixation in Legumes: Progress, Limitations, and Future Improvements Needed in Diagnostic Testing // Agronomy. 2018. 8 (5). 78.
5. Opti-Sciences. The Standard in Plant Stress Measurement Systems. <http://www.optisci.com>
6. Trimble. <http://agromonitoring.ru/catalog/sensorj/>
7. Суханова М.В., Бондарева Л.А. Обоснование оптимального выбора длины волны для проведения функциональной диагностики растений оптическим методом в условиях недостаточного влагообеспечения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. № 3 (341). 2020. С. 146-153.

Суханова Марина Владимировна, Бондарева Людмила Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева.
 E-mail: Suhanova.M.V@yandex.ru