

14.8

Прижизненные неразрушающие исследования влажности растений в реальном времени с помощью миллиметровой спектроскопии

© М.П. Пархоменко, С.В. фон Гратовски, Д.С. Каленов, И.С. Еремин, Н.А. Федосеев, В.М. Колесникова

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: pamikle@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 января 2020 г.
В окончательной редакции 21 февраля 2020 г.
Принято к публикации 23 марта 2020 г.

Для реализации в селекции растений методом фоновых признаков, который требует отбирать растения со средней или низкой влажностью, предложена технология миллиметровой влагометрии. Эта технология, основанная на радиофизических методах, позволила провести неразрушающие прижизненные измерения в течение коротких и длинных промежутков времени, вплоть до непрерывных. Проведенные предварительные измерения влажности пера зеленого лука показали, что погрешность измерения влажности не превышает 1%.

Ключевые слова: влажность, селекция растений, метод фоновых признаков, миллиметровые волны.

DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49793.13-20

Введение

Одна из важнейших проблем человечества — это проблема пищи. Производство продуктов питания отстает от роста населения на планете. Согласно исследованиям авторитетных международных организаций, если растениеводы Земли к 2025-му году не увеличат валовую продукцию растениеводства в два раза, то над двумя миллиардами людей из будущего населения Земли нависнет угроза голодной смерти. Один из способов решения этой проблемы — это повышение урожайности сельскохозяйственных растений путем создания новых сортов и гибридов с помощью генетико-селекционных технологий. Для резкого повышения урожайности необходимо в корне изменить традиционную селекцию растений.

В настоящее время в селекции растений отбирают самые лучшие растения по фенотипам (по внешнему виду). Этот метод визуального отбора имеет очень низкую разрешающую способность — из 5000 самых внешне мощных отобранных растений генетически „мощным“ оказывается лишь одно. Это происходит потому, что одно растение (генетически плохое) может попасть на поле в ямку с водой и азотом и дать очень хороший фенотип. Другое растение (генетически хорошее) может попасть на сухой бугорок без азота и дать очень плохой фенотип. Визуальный отбор по фенотипу отберет генетически плохое растение. Кроме фенотипического отбора наилучшие растения в настоящее время выявляются также с помощью аппаратных физических методов, например, путем измерения влажности почвы в прикорневой области растения. Но влажность почвы является для растения косвенным параметром. И вот почему. С точки зрения физики, растение, находящееся во внешней среде, подчиняется принципу Ле Шателье,

согласно которому устанавливается динамическое равновесие между уровнем влажности воздуха и почвы („фактором принуждения“) и уровнем влажности материала, в данном случае растения („отклик“). Однако так как гигроскопичность растений, как правило, неизвестна, то в качестве параметра, адекватно описывающего состояние растений, относительная влажность воздуха и почвы („фактор принуждения“) выступать не может. Но в качестве одного из таких параметров может выступать „отклик“, т.е. уровень влажности самого материала, в данном случае растения.

Коллективом под руководством академика В.А. Драгавцева [1, 2] разработан принципиально новый метод в селекции растений — метод фоновых признаков, который позволяет оценить качество материнского растения не за 15–20 лет, а за 2–3 min. Обнаружены признаки, которые не имеют генетической изменчивости в популяции, но очень чувствительны к уровням факторов внешней среды, главным из которых является влажность листьев и других органов. Так, в засушливых условиях необходимо отбирать генотип, который способен максимально усваивать влажность из почвы и воздуха, а также выживать в этих условиях. У таких растений содержание влаги в листьях и других зеленых частях растений будет наибольшим. Этот генотип соответствует средней или низкой влажности и является самым ценным, засухоустойчивым генотипом. Именно его надо размножать и высаживать в засушливых условиях.

Возникает следующая задача: как выявлять такие растения? Эту задачу целесообразно решать путем неразрушающих *in vivo* измерений влажности различных частей этих растений, например, листьев, стебля и т.д. Для мониторинга в режиме реального времени наиболее перспективными являются электромагнитные методы, которые могут обеспечивать неразрушающие измерения

влажности в течение как коротких, так и длинных промежутков времени, вплоть до непрерывных.

Для практической реализации контроля влажности растений предлагается технология, основанная на радиофизических методах — технология миллиметровой влагометрии. Эта технология в законченном варианте исполнения будет включать в себя датчик для измерения влажности и методику измерения.

Почему именно миллиметровая влагометрия? С точки зрения электродинамики все растения являются композитными водными средами с высоким содержанием воды. Вода является высокополярной жидкостью и имеет область диэлектрической релаксации в области микроволнового и нижней части миллиметрового (ММ) диапазонов длин волн (примерно 17–24 GHz в зависимости от температуры). Этим и обусловлен выбор частотного диапазона. Выделим основные положения, на которых базируется метод миллиметровой влагометрии [3]: 1) в частотном диапазоне вблизи частоты релаксации параметры электромагнитного сигнала миллиметрового диапазона имеют сильную зависимость от процентного состава воды в композитном материале; 2) дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости для материалов со сложным составом в линейном приближении приблизительно равна аддитивной сумме дисперсий комплексных диэлектрических проницаемостей отдельных полярных компонент этой смеси; 3) чувствительность к содержанию воды и других дипольных жидкостей в тканях растений увеличивается с частотой электромагнитных волн в этом диапазоне; 4) поглощение волн ММ диапазона в воде превышает 15 dB/mm, что намного выше, чем у всех контролируемых материалов; 5) по мере уменьшения длины волны поглощение в воде увеличивается быстрее, чем поглощение в остальных материалах; 6) ММ волны практически не чувствительны к проводящим примесям в жидкостях; 7) значения диэлектрической проницаемости неполярных веществ на частотах ММ диапазона выходят на свои предельные значения, которые чаще всего являются константами, не зависящими от частоты. Все это позволяет с помощью ММ спектроскопии быстро оценивать влажность листьев и отбирать лучшие генотипы.

1. Материалы и метод

Для практической реализации заданной технологии на первом этапе необходимо определить комплексную диэлектрическую проницаемость листьев растений. Проведенный литературный анализ показал, что данной проблемой практически никто не занимался. В качестве исследуемых объектов нами были выбраны перо лука и лист пеперомии туполистной.

На рис. 1 показано поперечное сечение пера лука. Толщина стенки лука составляет примерно 0.25 mm.

Пеперомия туполистная представляет собой трехслойную структуру: очень тонкий нижний слой, за

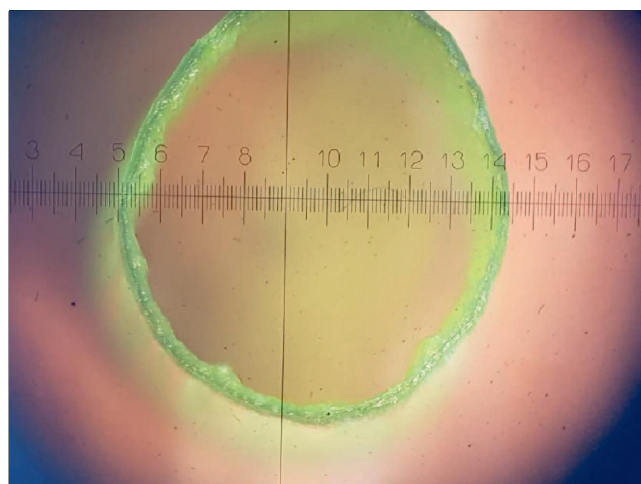


Рис. 1. Перо лука в разрезе.

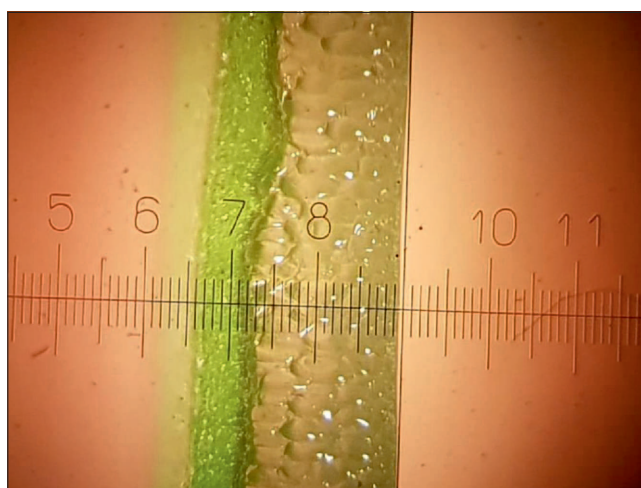


Рис. 2. Лист пеперомии туполистной в разрезе.

которым следует водянистый слой с толщиной 0.7 mm, и затем зеленый слой кожицы с примерной толщиной 0.3 mm (рис. 2).

Определение влажности этих растений стандартным методом взвешивания и высушивания при температуре 105°C показало, что она превышает 90%. При таком уровне влажности эти растения являются сильно отражающими объектами, поэтому для определения комплексной диэлектрической проницаемости использовался разработанный нами резонаторный метод [4]. Измерения проводились на экспериментальной установке, представленной на рис. 3. Она включает в себя панорамный измеритель Agilent, коаксиально-волноводный переход, подводящий металлический волновод и резонатор отражательного типа. Резонатор состоит из индуктивной диафрагмы, отрезка прямоугольного металлического волновода, заполненного фторопластом, и исследуемого объекта. Сильно отражающий исследуемый объ-

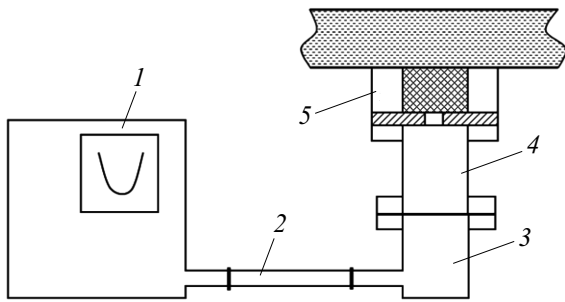


Рис. 3. Экспериментальные установки на базе панорамного измерителя Agilent: 1 — панорамный измеритель PNA-L N5230C, 2 — коаксиальный кабель, 3 — коаксиально-волноводный переход, 4 — подводящий прямоугольный металлический волновод, 5 — резонатор отражательного типа с исследуемым объектом.

ект выполняет роль задней стенки резонатора. В этом случае длина резонатора l_p фактически определяется длиной прямоугольного волновода резонатора (здесь и далее индекс $p = 1, 2, 3, \dots$ определяет число полуволн, укладываемых на длине резонатора). Рабочим типом волны в прямоугольном волноводе является волна H_{10} .

При проведении измерений сигнал от панорамного измерителя (рис. 3) через подводящий волновод поступает в резонатор, где и взаимодействует с исследуемым объектом. Отраженный от резонатора сигнал возвращается к панорамному измерителю, на экране которого отображается резонансная зависимость коэффициента отражения R резонатора от частоты f . Панорамный измеритель позволяет посредством преобразования аналогового сигнала в цифровой сохранять в памяти прибора полученные экспериментальные резонансные зависимости, которые в дальнейшем используются для определения действительной ε_1 и мнимой ε_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2$ исследуемого объекта, а также тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_2/\varepsilon_1$.

Непосредственное определение диэлектрической проницаемости исследуемого объекта на основе экспериментальных резонансных зависимостей проводилось с помощью численного моделирования эксперимента с использованием трехмерного электродинамического программного пакета [4]. Фактически решалась обратная задача, т.е. по экспериментальным характеристикам S -параметров резонатора подбирались значения диэлектрической проницаемости исследуемого объекта так, что расчетные по программе S -параметры совпадали с экспериментальными. Эта задача решалась в несколько этапов, из которых первые два являются подготовительными. На первом этапе проводилась расчетная калибровка параметров экспериментальной установки, в ходе которой уточнялись длина резонатора, размер раскрыва a_1 индуктивной диафрагмы и ее толщина, диэлектрическая проницаемость фторопласта. Для этого для резонатора, нагруженного на дистиллированную воду

при заданной температуре, снималась экспериментальная зависимость коэффициента отражения резонатора от частоты. Диэлектрические свойства дистиллированной воды в настоящее время изучены достаточно хорошо, и существует несколько расчетных методик, которые позволяют определять значения действительной ε_1 и мнимой ε_2 составляющих комплексной диэлектрической проницаемости воды в широком диапазоне частот и при разных температурах. Мы использовали методику, изложенную в работе [5], по которой и находили значения ε_1 и ε_2 воды на резонансной частоте при заданной температуре. Далее, используя эти значения ε_1 и ε_2 диэлектрической проницаемости воды, уточнялись и подбирались параметры экспериментальной установки таким образом, чтобы расчетная резонансная кривая зависимости коэффициента отражения от частоты совпадала с экспериментальной в области резонансного минимума (по резонансной частоте и глубине минимума на резонансной частоте). Второй этап включал в себя проверку расчетной калибровки установки. Для этого, используя экспериментальные резонансные кривые резонатора, нагруженного на воду при других температурах, с помощью трехмерного электродинамического программного пакета путем перебора определялись значения ε_1 и ε_2 воды при этих температурах, которые затем сравнивались с данными из [5]. Калибровка установки признавалась положительной, если расхождение подобранных значений диэлектрической проницаемости воды с данными работы [5] не превышало одного процента. Затем на откалиброванной установке для каждого исследуемого объекта, используя экспериментальные резонансные зависимости коэффициента отражения резонатора от частоты, по описанной выше методике определялись значения действительной ε_1 и мнимой ε_2 составляющих диэлектрической проницаемости этого объекта.

2. Результаты

Представим экспериментальные данные для лука. При проведении резонаторных измерений толщины одного кольца лука было недостаточно для исключения влияния интерференции, поэтому использовались три кольца. Измерения проводились в течение нескольких дней при разной влажности лука: для этого одно растение ежедневно поливалось, другое не поливалось. Результаты одного эксперимента представлены в таблице, проведем их анализ. Для лука, который не поливали: резонансная частота 30.4638 GHz; минимум коэффициента отражения на резонансной частоте равен -24.20 dB. Полученные путем решения обратной задачи значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь составили $\varepsilon_1 = 21.746$; $\operatorname{tg} \delta = 1.24$. Для лука, который поливали, эти параметры составляют: резонансная частота 30.4427 GHz; минимум коэффициента отражения на резонансной частоте -25.37 dB. Вычис-

Лук	Влажность, %	f , GHz	R , dB	ϵ_1	$\text{tg } \delta$
Не поливали	92.9	30.4638	-24.20	21.746	1.24
Поливали	94.4	30.4427	-25.37	21.16	1.34

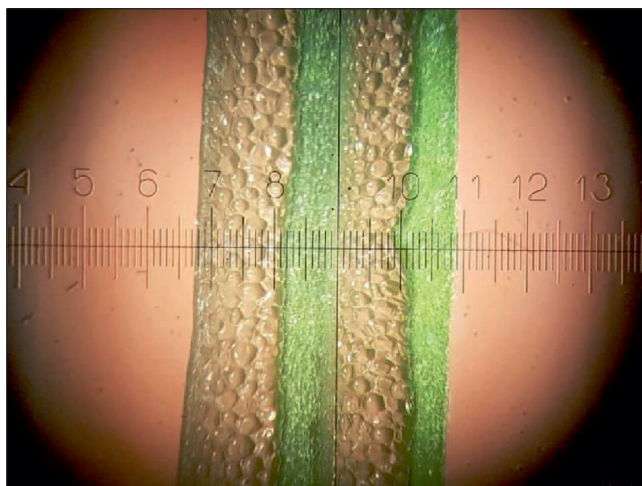


Рис. 4. Многослойная структура пеперомии туполистной. Склеены два листа.

ленные значения диэлектрических параметров равняются: $\epsilon_1 = 21.16$; $\text{tg } \delta = 1.34$, т.е. потери в этом случае возросли. Большему значению тангенса угла диэлектрических потерь соответствует и большая влажность. Это подтверждается экспериментально. Определенная в этом случае стандартным методом взвешивания и высушивания влажность для лука, который не поливали, составила 92.9%. Для лука, который поливали, она равнялась 94.4%. Сравнивая значения влажности с полученными значениями коэффициента отражения резонатора в минимуме резонансной кривой для резонатора, который работал в режиме „недосвязи“, наблюдаем полное электродинамическое соответствие, т.е. большому значению влажности соответствует меньшее значение коэффициента отражения. Таким образом, используя калибровочную зависимость между влажностью и минимумом коэффициента отражения резонатора, мы можем предложенным методом определять влажность лука. Проведенный анализ показал, что погрешность определения влажности в данном методе не превышает 1%.

Для пеперомии туполистной резонаторные исследования не обнаруживают однозначной зависимости между влажностью листьев и минимумом коэффициента отражения резонатора. Это объясняется тем, что при составлении многослойной структуры она получается неоднородной, так как в промежутке между влажными составляющими листа располагается достаточно толстый слой кожицы (рис. 4).

В проведенном эксперименте использовались два листа, в которых толстый слой кожицы был удален. Ис-

следовались три комбинации соединения таких листьев и наложения их на резонатор. Полученные средние значения составили для действительной части комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon_1 = 22.24$; величина тангенса угла диэлектрических потерь равнялась $\text{tg } \delta = 1.39$. Измеренная стандартным методом влажность составила 94.2%.

Заключение

Проведенные калибровочные эксперименты и анализ результатов измерений показали, что метод миллиметровой влагометрии позволяет проводить прижизненное неразрушающее измерение влажности растений в реальном времени. Таким образом, предлагаемый метод удовлетворяет требованиям, необходимым для быстрого и эффективного подбора растений с целью их последующего селекционного отбора. Эти исследования требуют продолжения проведения измерений на широком классе растений.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Драгавцев В.А., Макарова Г.А., Кочетов А.А., Кочерина Н.В., Мирская Г.В., Синявина Н.Г. // *Агрофизика*. 2011. № 1. С. 14–22.
- [2] Драгавцев В.А. // *Эко-потенциал*. 2016. № 2 (14). С. 22–27.
- [3] Meriakri V.V. // *Proc. of the 2000 Material Research Society Spring Meeting, Symp AA*. San Francisco, USA, 2000. Paper AA2.6.
- [4] Пархоменко М.П., Савельев С.В., ФонГратовски С.В. // *Радиотехника и электроника*. 2017. Т. 62. № 3. С. 276–291.
- [5] Meissner T., Wentz F.J. // *IEEE Tr. Geosci. Remote* 2004. Vol. 42. N 9. P. 1836–1849.