

## Определение содержания влаги у вегетирующих культурных растений методом спектроскопии миллиметровых волн для задач повышения урожайности растений

© С.В. фон Гратовски,<sup>1</sup> Н.В. Кочерина,<sup>2</sup> М.П. Пархоменко,<sup>1</sup> Д.С. Каленов,<sup>1</sup> Н.А. Федосеев,<sup>1</sup> И.С. Еремин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал ФГБУН института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141191 Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: svetlana.gratowski@yandex.ru, pamikle@yandex.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2021 г.

Принято к публикации 1 марта 2022 г.

В работах генетико-селекционной направленности показано, что неэффективно изучать взаимодействие генотип–среда (ВГС) у растений на молекулярном уровне, так как на нем эффект ВГС бесследно исчезает, являясь эмерджентным свойством, возникающим при взаимодействии продуктов генов с лабильными в течение суток, недель, месяцев лимитирующими факторами среды. Такие исследования необходимо проводить для более высоких системных уровней, а именно на следующих ступенях организации жизни — организменном, популяционном, экологическом, фитоценологическом. Так как самый мощный „рычаг“ повышения продуктивности и урожая растений — ВГС — невозможно отследить на молекулярном уровне, то знание молекулярных структур генома без знания динамики лимитирующих факторов среды и взаимодействия с ними продуктов генов не способствует созданию высоких технологий эколого-генетического повышения продуктивности и урожая растений. Накопленный мировой опыт показывает, что быстрые методы измерений признаков у растений, дающие целостную характеристику сложной динамической системе (именно таковой является ВГС), могут быть созданы путем междисциплинарных подходов, в первую очередь с помощью физических методов измерений. В рамках этого подхода предложено использовать метод спектроскопии миллиметровых волн, который очень чувствителен к изменению водоснабжения тканей растения для селекции засухоустойчивых растений.

**Ключевые слова:** урожайность растений, принцип фоновых признаков, содержание влаги, спектроскопия миллиметровых волн.

DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52661.339-21

### Введение

Перед наукой остро стоит задача повышения продуктивности и урожайности возделываемых растений, и одна из них — проблема наследственного повышения засухоустойчивости [1]. Поэтому важно понимание эпигенетических процессов при взаимодействии генотип–среда (ВГС), возникающих лишь на достаточно высоких уровнях организации организма (онтогенеза, популяции, агроценоза, биогеоценоза). Именно эти уровни организации жизни обеспечивают человечество из растительного сырья пищей и одеждой. Теория эколого-генетической организации количественных признаков растений была выдвинута российскими учеными после открытия на однолетних культурах нового эпигенетического феномена — смены наборов продуктов генов, детерминирующих один и тот же количественный признак, при изменении лимитирующего фактора внешней среды [2]. Поиск устойчивых к неблагоприятным условиям среды генотипов растений для эффективной селекции включает в себя знание генетико-физиологических систем, в том числе адаптивности, решение задачи оптимиза-

ционными системными подходами в большей степени, нежели редуционно-механизменными. Как показывает огромный накопившийся опыт работы селекционеров, селекция растений может быть результативной, если селекционер располагает методами идентификации даже без знаний о генетике количественных признаков продуктивности [3].

В селекции традиционно идентифицируют генотип отдельного организма по его фенотипу путем многолетнего испытания его потомства. При этом частота встречаемости уникальных генотипов в реальных популяциях столь низка, а популяции столь объемны, что на первых этапах селекции исключаются по фенотипам до 80–90% особей расщепляющейся популяции. При недостатке надежных методов идентификации генотипов по их фенотипам безвозвратно утрачивается большая часть ценных форм, что нельзя восполнить более точными оценками совокупностей потомков на последующих этапах селекции. Для задач экспрессной идентификации без смены поколений уникальных генотипов по их фенотипам по количественным признакам при отборах из расщепляющихся гибридных и диких

популяции растений Драгавцевым предложен принцип фоновых признаков [4].

Суть принципа фоновых признаков заключается в том, что если в любой популяции растений можно найти количественный признак с нулевой (или близкой к нулю) генетической дисперсией, то изменчивость этого признака будет только экологической. Признаки с нулевым или очень низким генотипическим разнообразием называются фоновыми. В условиях лимитирующего фактора среды, например засухи, таким свойством обладает признак оводненности листьев. Когда фенотип, имеющий плюсовое отклонение по этому признаку от среднего популяционной величины, есть модификация, оказавшаяся в лучшей микроэкологической нише, и если при этом селекционный признак сдвинут у данной особи в плюс-сторону относительно фонового, то это будет модификация, и эту особь отбирать не нужно. Если же фоновый признак у другой особи определяется на уровне средней популяционной значения и селекционный признак сдвинут в плюс-сторону, то это — рекомбинация (или мутация), необходимая для эффективной селекционной работы. В этом смысле в литературе даже был введен термин „феномика“ [5].

Для того чтобы за кратчайший срок выявить лучшие по генотипу растения в условиях засухи, необходимо неинвазивно измерять содержание влаги в растениях. Такой подход можно назвать экспресс-измерением, который существенно экономит время и труд селекционера, позволяя исследовать значительно большее количество растений, нежели другими существующими контактными, трудоемким способами измерения влажности у растений.

На фоне засухи, неблагоприятного лимитирующего фактора среды, генетическая изменчивость содержания влаги в растениях сводится к нулю. Включаются стрессовые механизмы, имеет место быть экологическая и фенотипическая изменчивости [6]. С помощью физического измерения оводненности листьев, которая в условиях засухи является фоновым признаком, можно определить по селекционным признакам лучшие генотипы для задач наследственного повышения засухоустойчивости возделываемых растений.

В настоящей работе предлагается использовать метод спектроскопии миллиметровых (ММ) волн, который очень чувствителен к изменению водоснабжения тканей растения. Особенностью электромагнитных волн ММ диапазона является чрезвычайно высокое поглощение электромагнитных волн этого диапазона водой. Поглощение в свободной воде составляет более 20 dB/mm. Это больше, чем во всех средах на Земле. Поэтому с помощью ММ волн можно фиксировать малые изменения содержания воды в самых различных средах. Изменение содержания воды будет вызывать изменение комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ -среды, которая может быть измерена методами ММ спектроскопии. Изменение  $\epsilon$ -среды, в свою очередь, изменяет поглощение в ней, а также комплексный коэффициент

отражения  $r$  от ее поверхности. Измерение  $r$  не требует проникновения в среду, т.е. является неинвазивным. То есть предлагаемые методы являются, с одной стороны, неразрушающими, и с помощью них можно проводить прижизненные измерения, с другой стороны, на основе ММ спектроскопии можно создать методы, работающие в режиме реального времени.

Изучение растений с помощью исследования их диэлектрических свойств в последние 50 лет стало одним из классических методов агрофизических исследований, которому посвящено большое число работ в мировой литературе [7–41]. Изучение диэлектрических свойств растений широко применяется для широкого спектра нужд сельского хозяйства. Результаты первых исследований в этой области представлены в работах [7–10]. Так, в [8] растительный покров исследовался с помощью микроволновой радиометрии. Изучение растительных покровов с помощью радиометрических методов с тех пор является одной из важных тем в плане изучения растений диэлектрическими методами [11,32,39]. С помощью дистанционного микроволнового зондирования растительных покровов можно определять содержание воды в растениях на полях, водный потенциал растительного покрова, водный стресс в аграрном секторе [39]. Для проведения этих исследований необходимо знать диэлектрические свойства растений (ветвей, листьев, корней, плодов). Этому посвящена обширная литература [8–25,28–34], где были определены диэлектрические свойства многих сельскохозяйственных культур, включая свежие фрукты и овощи [17,18,27,35]. Так, в [8] изучались диэлектрические свойства листьев и стеблей кукурузы и пшеницы в частотных диапазонах от 1 до 8.5 GHz в зависимости от влажности. Важную роль диэлектрические свойства играют при изучении спелости и зрелости плодов [14–19,21–23,29–31,34], что важно как для своевременной уборки урожая, так и обеспечения необходимых условий хранения.

Одним из самых важных параметров в жизни растения является влажность. Одной из первых работ, связанных с рассмотрением движения воды в цепи почва–растение–атмосфера, была [6]. В ней представлено приближенное решение дифференциального уравнения, описывающего поток почвенной влаги к корню растения, который поглощает воду с периодически изменяющейся скоростью. Это дает возможность сформировать модель гидравлического поведения культуры. На основании этой модели водного обмена в растениях были построены модели растений как водных сред для определения влажности растений различными методами [9,10,13,19,23,27,29,30,33,37–40]. В [32] было выяснено, какую информацию можно почерпнуть из микроволновых наблюдений, их чувствительности к измерению влажности растений, а также связь между микроволновыми показателями влажности и обычно используемыми показателями состояния засухи растений.

В различных частотных диапазонах были разработаны и применялись различные модели влияния влажности на диэлектрические свойства [8,9]. В работе [8] влажность в растениях моделировалась с помощью модельных жидкостей, с учетом солености (наличие NaCl во влаге растения). Было установлено, что на частотах ниже 5 GHz при солености около 10% и более приводит к ошибкам определения содержания воды. Другой работой, связанной с влиянием солевого стресса на растения и их диэлектрические свойства, является [20].

В работах [9,10] оценивается микроволновое диэлектрическое поведение растительного материала в зависимости от содержания воды, частоты микроволн и температуры. В работе [9] представлены экспериментальные измерения диэлектрического спектра в диапазоне частот 0.2 до 20 GHz для различных типов растительного материала, включая листья, стебли и стволы при различных условиях влажности. Измерения проводились с использованием метода коаксиального зонда, с помощью которого можно определять диэлектрическую проницаемость как толстых материалов, таких как стволы деревьев, и тонких материалов, например, листьев. На основе полученных экспериментальных данных [10] была построена модель растения как сложного диэлектрика с двойной дисперсией Дебая–Коула, включающей воду как в „свободной“, так и в „связанной“ форме.

Многие приложения, включая дистанционное зондирование растительного покрова и измерения содержания воды, требуют имитационной модели для листьев, которая обеспечивает точную комплексную диэлектрическую проницаемость, соответствующую геометрической структуре и природе самой растительности. Много таких моделей описано в [11] и цитированной там литературе.

Для исследования применялись различные техники, включая радиометрию, широкополосные и узкополосные измерения в различных частотных диапазонах и различные техники, включая волноводные, резонаторные, коаксиальные методы для различных описанных выше применений.

Представленная работа посвящена созданию физических методов селекции растений, на основе модели генотип–среда [1–4]. В [5] в этом смысле введен даже новый термин „Феномика“. Феномика растений предлагает набор новых технологий для ускорения прогресса в понимании функции генов и окружающей среды ответы. Это позволит растениеводам разработать новые сельскохозяйственные гермоплазмы для поддержки будущего сельскохозяйственного производства. В этом обзоре [5] представлена физиология растений с точки зрения „омики“, рассмотрены некоторые из новых инструментов фенотипирования с высокой пропускной способностью, в том числе физические методы с высоким разрешением, и обсуждены их применения в биологии растений, функциональной геномике и селекции растений.

## 1. Материалы и методы

Настоящая работа посвящена созданию физических методов прижизненного изучения влажности для селекции растений, на основе модели генотип–среда [1–4]. Эта модель требует быстрого одновременного прижизненного определения влажности большого числа растений на определенной высоте от почвы. Для этой цели в работе предлагается использование влагометрии волн ММ диапазона. Выбор диапазона частот обусловлен следующими особенностями — растения являются водными средами, с высоким содержанием влаги. Вода, одно из самых полярных веществ на Земле, имеет дисперсию диэлектрической релаксации в области микроволнового и ММ диапазонов (примерно 17–24 GHz в зависимости от температуры). Поэтому исследования будут проводиться в этих диапазонах. Данный метод основан на двух явлениях. Во-первых, дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости для материалов со сложным составом приблизительно равна аддитивной сумме дисперсий комплексных диэлектрических проницаемостей отдельных полярных компонент этой смеси. Второе явление заключается в том, что диэлектрическая релаксация проявляется, в частности, в очень большом затухании электромагнитных волн этого диапазона в воде и водных средах. А в частотном диапазоне вблизи частоты релаксации любой полярной компоненты комплексная диэлектрическая проницаемость имеет самую сильную зависимость от процентного состава именно этой полярной компоненты в композитном материале. Это связано с тем, что именно в области релаксации диэлектрические свойства полярных материалов изменяются наиболее сильно. На основе этого для неразрушающих и неинвазивных методов исследования водных композитов были созданы методы микроволновой и ММ акваметрии [41]. ММ влагометрия обладает рядом существенных преимуществ перед микроволновой влагометрией, и другими, описанными выше, методами изучения влажности. Эти преимущества обеспечивают следующие физические явления:

1) поглощение ММ волн в воде  $\alpha > 15$  dB/mm, что значительно больше, чем практически у всех известных материалов;

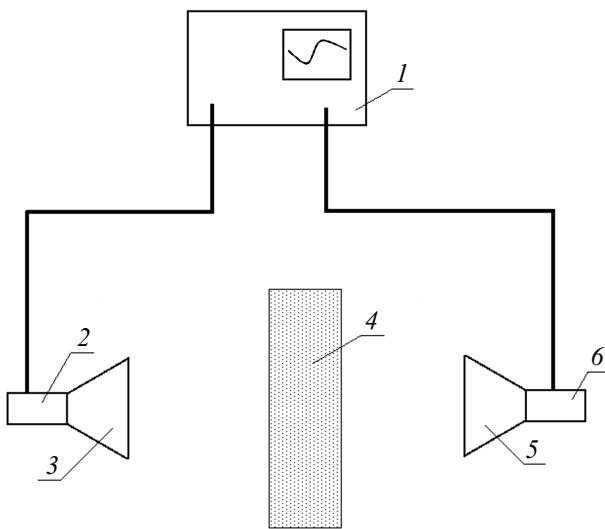
2) по мере уменьшения длины волны адсорбция в воде возрастает более быстро, чем в других материалах.

Поэтому

- ММ волны обеспечивают лучшую чувствительность к содержанию воды, чем микроволны;

- ММ волны обеспечивают лучшее пространственное разрешение, чем микроволны, что важно для обнаружения локализованного определения водных сред в неполярной матрице;

- ММ волны менее чувствительны, чем микроволны, к присутствию проводящих примесей в воде, что важно для растений, так как в них встречаются проводящие примеси, например, соли;



**Рис. 1.** Блок-схема измерительной установки: 1 — панорамный измеритель, 2, 6 — коаксиально-волноводные переходы, 3 — передающая рупорная антенна, 4 — образец, 5 — приемная рупорная антенна.

- 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 дает возможность с максимальной точностью определять содержание влажности и биообъектов, являющихся водными средами, с помощью ММ спектроскопии в неполярных матрицах.

Поэтому растение моделируется как биоорганический композит, твердая часть растений рассматривается как неполярная матрица, а вода, без влияния солевых примесей, является сильнополярным наполнителем этой матрицы.

Целью эксперимента было определение коэффициентов отражения, прохождения и затухания листьев пеперомии туполистной в диапазоне частот 26.5–40 Ghz. Блок-схема установки представлена на рис. 1. Сигнал от передающей рупорной антенны 3 частично проходил через образец 4 и принимался приемной рупорной антенной 5. Часть сигнала отражалась от образца и поступала в передающую антенну 3. Панорамный измеритель 1 фиксировал зависимости коэффициента прохождения ( $T$ , dB) и коэффициента отражения ( $R$ , dB) от частоты. Для исключения нежелательных погрешностей измерений, обусловленных взаимным перемещением элементов установки, все элементы конструкции были жестко прикреплены к направляющему рельсу. Общий вид установки представлен на рис. 2. Исследуемый образец прижимался вплотную к рупору 3. Расстояние между рупорами составляло около 55 mm.

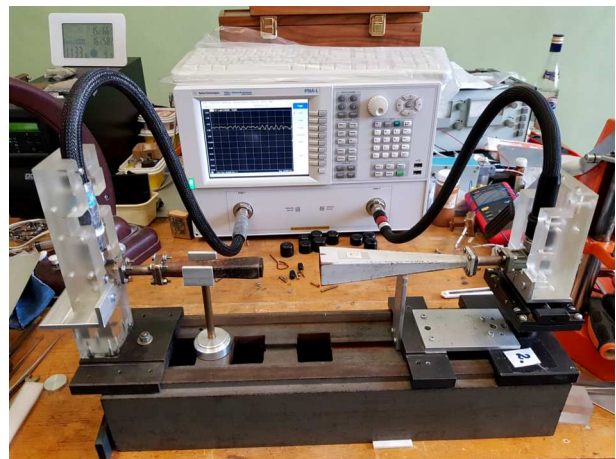
После измерения зависимостей  $T$  и  $R$  образца от частоты кривые были аппроксимированы полиномом второй степени методом наименьших квадратов и рас-

считаны средние значения по диапазону частот. Далее, используя значения  $T$  и  $R$ , находился коэффициент затухания  $\alpha$  электромагнитной волны образца, толщиной  $L$ , используя формулу (1):

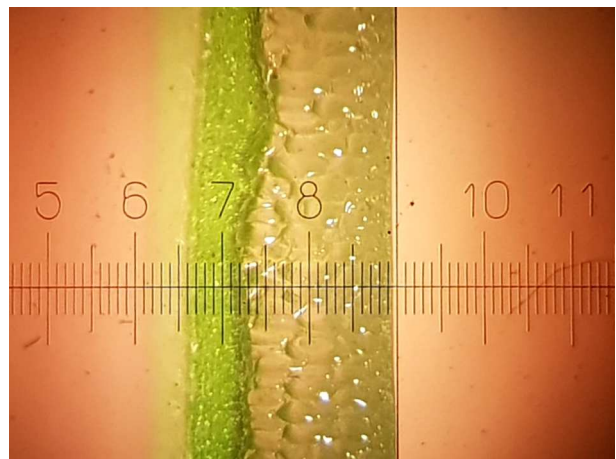
$$\alpha = \frac{1 - T - R}{L}, \quad (1)$$

где  $T$  и  $R$  подставлялись в разгах, а  $L$  — в mm.

Визуальный осмотр листьев пеперомии туполистной (рис. 3) показывает, что верхняя часть листа является глянцевой на вид и более светлой, а нижняя часть листа — более матовой и темной. Толщина листьев измерялась электронным микрометром. Каждый лист измерялся 3 раза (без индекса, индекс  $a$  и индекс  $b$ ). Без индекса и индекс  $a$  — лист прижимался внутренней светлой стороной к рупору. Индекс  $b$  — лист прижимался к рупору внешней темной стороной. Измерения проводились непосредственно на растении, т. е. без срывания листьев. После проведения измерений листья срывались с растения, взвешивались, а затем производилась



**Рис. 2.** Общий вид установки.



**Рис. 3.** Разрез листа пеперомии туполистной. Цена деления 0.05 mm.

Примечания	Толщина, mm	$m_1$ , g	$m_2$ , g	$W$ , %	$N_0$	$R$ , dB	$T$ , dB	$\alpha$
Лист 1	0.68	1.706	0.130	92.38	1	-2.75	-15.07	0.64
					1a	-2.76	-15.4	0.65
					1b	-2.26	-15.27	0.55
Лист 2	1.05	2.972	0.198	93.34	2	-3.49	-20.61	0.52
					2a	-3.38	-20.99	0.51
					2b	-2.70	-20.91	0.43
Лист 3	1.20	4.343	0.319	92.66	3	-3.39	-27.09	0.45
					3a	-3.30	-25.06	0.44
					3b	-2.58	-24.41	0.37
Лист 4	1.30	5.082	0.287	94.35	4	-3.14	-27.32	0.39
					4a	-2.97	-27.31	0.38
					4b	-2.55	-26.53	0.34
Лист 5	1.35	3.594	0.238	93.38	5	-3.30	-25.82	0.39
					5a	-3.35	-27.16	0.40
					5b	-2.64	-26.79	0.34
Лист 6	1.0	5.011	0.400	92.02	6	-3.65	-20.04	0.56
					6a	-3.76	-20.28	0.57
					6b	-2.67	-19.80	0.45
Лист 7	1.18	7.425	0.535	92.80	7	-3.43	-23.92	0.46
					7a	-3.30	-24.73	0.45
					7b	-2.64	-23.70	0.38
Лист 8	1.20	6.342	0.489	92.29	8	-3.24	-25.63	0.44
					8a	-3.55	-25.48	0.46
					8b	-2.67	-25.15	0.38
Лист 9	1.15	4.725	0.385	91.85	9	-3.49	-22.26	0.48
					9a	-3.51	-23.17	0.48
					9b	-2.64	-24.61	0.39
Лист 10	1.05	4.090	0.311	92.40	10	-3.76	-20.94	0.54
					10a	-3.44	-22.15	0.52
					10b	-2.70	-21.48	0.43

их сушка. Длительность сушки составляла 10 h. Данные всех измерений сведены в таблицу. По полученным данным построены графики — рис. 4–6.

Проведем анализ полученных результатов. Обращает внимание, что поверхности листьев с разных сторон сильно отличаются. С одной стороны толстая кожа, а с другой стороны просматривается вода внутри листа. Поэтому коэффициенты отражения и прохождения для разных сторон отличаются. Во-первых, коэффициенты

отражения и пропускания листьев пеперомии зависят от типа состояния поверхности листа. Во-вторых, коэффициенты отражения и пропускания зависят от высоты листа на стволе растения. И, наконец, зависимость коэффициента отражения и пропускания от влажности, измеряемой с помощью сушки, носит неоднозначный характер. Наблюдается существенный разброс между влажностью и коэффициентами отражения и прохождения.

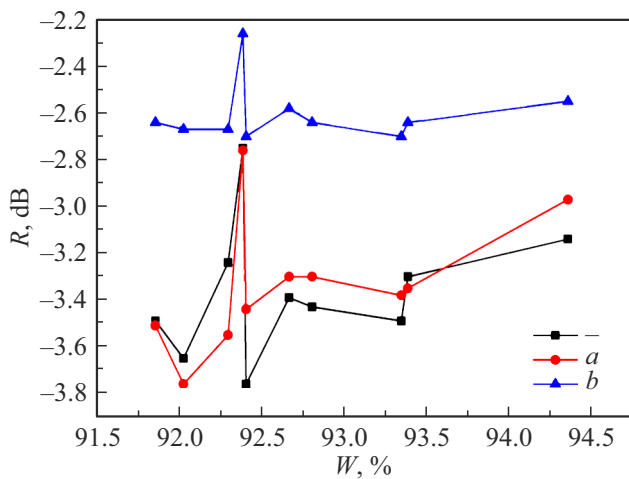


Рис. 4. Зависимость  $R$  от влажности  $W$ .

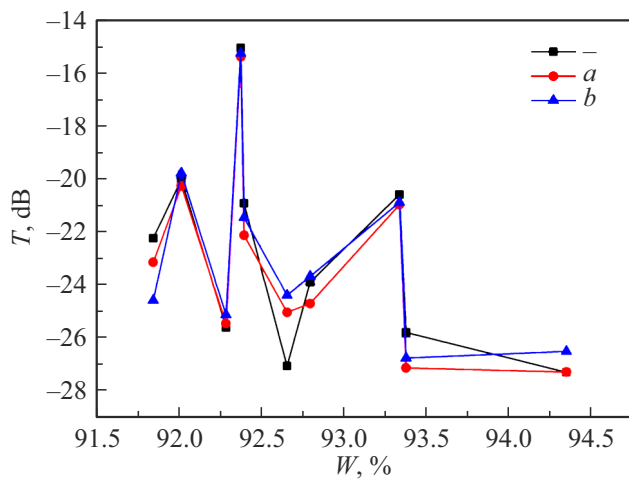


Рис. 5. Зависимость  $T$  от влажности  $W$ .

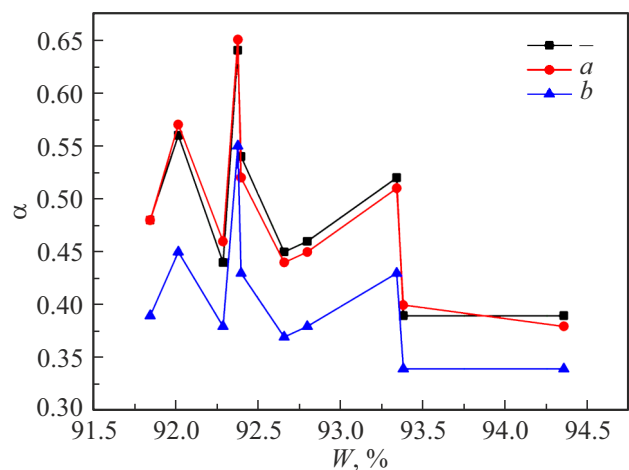


Рис. 6. Зависимость  $\alpha$  от влажности  $W$ .

## Выводы

Предлагаемая методика ММ влагометрии в принципе дает возможность измерять влажность растений неинва-

6\* Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 7

зивно по отражению или прохождению электромагнитной волны, фактически мгновенно, поскольку скорость измерений в большей степени зависит от скорости обработки информации. Для разных растений нужны разные датчики, которые определяются толщиной и размерами листа, состоянием поверхности и содержанием влаги. Лист растения — это неоднородная среда, поэтому нужны дополнительные исследования для получения более четкой зависимости коэффициентов отражения и прохождения от влажности.

## 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] В.А. Драгавцев, И.М. Михайленко, М.А. Проскуряков. *Сельскохозяйственная биология*, **52**, 487 (2017). DOI: 10.15389/agrobiol.2017.3.487rus
- [2] В.А. Драгавцев, П.П. Литун, И.М. Шкель, Н.Н. Нечипоренко. *ДАН СССР*, **274** (3), 720 (1984).
- [3] Н.В. Кочерина, В.А. Драгавцев. *Введение в теорию эколого-генетической организации полигенных признаков растений и теорию селекционных индексов* (СЦДБ, СПб., 2008)
- [4] V. Dragavtsev, J. Pesek. In: *Genetic Diversity in Plants. Encyclopedia of Basic Life Science*, ed. by A. Muhammed, R. Aksel, R.C. von Borstel. (Plenum Press., NY, London, 1977), v. 8. p. 233.
- [5] R.T. Furbank, M. Tester. *Trends Plant Sci.*, **16** (12), 635 (2011). DOI: 10.1016/j.tplants.2011.09.005
- [6] I.R. Cowan. *J. Appl. Ecol.*, **2** (1), 221 (1965). DOI: 10.2307/2401706
- [7] D.R. Brunfeldt, F.T. Ulaby. *IEEE Tr. Geosci. Remote*, **6**, 520 (1984). DOI: 10.1109/TGRS.1984.6499163
- [8] F.T. Ulaby, R.P. Jedlicka. *IEEE Tr. Geosci. Remote*, **4**, 406 (1984). DOI: 10.1109/TGRS.1984.350644
- [9] F.T. Ulaby, M.A. El-Rayes. *IEEE Tr. Geosci. Remote*, **5**, 550–557 (1987). DOI: 10.1109/TGRS.1987.289833
- [10] M.A. El-Rayes, F.T. Ulaby. *IEEE Tr. Geosci. Remote*, **5**, 541–549 (1987). DOI: 10.1109/TGRS.1987.289832
- [11] S. Trabelsi, M. Ghomi, J.C. Peuch, H. Baudrand. In: *Proceedings of The 22nd European Microwave Conference* (Helsinki, Finland, 2002), v. 2, p. 1234. DOI: 10.1109/EUMA.1992.335873
- [12] C. Matzler. *IEEE Tr. Geosci. Remote*, **32** (4), 947 (1994). DOI: 10.1109/36.298024
- [13] J. Liao, H. Guo, Y. Shao. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Toronto, Ontario, Canada, 2002), v. 5, p. 2620. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026720

- [14] S.O. Nelson. In: *Proceedings of The 2003 ASAE Annual Meeting* (Las Vegas, NV, USA, 2003), DOI: 10.13031/2013.14075
- [15] S.O. Nelson. In: *Proceedings of The IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting* (Columbus, OH, USA, 2003), v. 4, p. 46. DOI: 10.1109/APS.2003.1220116
- [16] A.W. Kraszewski, S.O. Nelson. *J. Microwave Power EE*, **39** (1), 41 (2004). DOI: 10.1080/08327823.2004.11688507
- [17] S.O. Nelson. *J. Microwave Power EE*, **40** (1), 31 (2005). DOI: 10.1080/08327823.2005.11688523
- [18] S.O. Nelson. In: *Proceedings of The 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* (Ottawa, ON, Canada, 2005), v. 1, p. 360. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604135
- [19] S.O. Nelson. In: *Proceedings of The 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (Washington, DC, USA, 2005), v. 4, p. 455. DOI: 10.1109/APS.2005.1552849
- [20] T. Shimomachi, S. Ou, Y. Ichimaru, S. Cho, T. Takemasa, S. Yamayaki, T. Takakura. *Environ. Control Biol.*, **43** (1), 47 (2005). DOI: 10.2525/ecb.43.47
- [21] D. Jamaludin, S. Abd Aziz, N.U.A. Ibrahim. *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, **5** (3), 286 (2014). DOI: 10.7763/IJESD.2014.V5.493
- [22] A. Kundu, B. Gupta. In: *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)* (Calcutta, India, 2014), p. 480. DOI: 10.1109/CIEC.2014.6959135
- [23] R. Vijay, R. Jain, K.S. Sharma. *J. Environ. Nanotechnol.*, **3** (1), 43 (2014). DOI: 10.13074/jent.2014.01.132035
- [24] J.Y. Zeng, Z. Li, Z.H. Tang, Q. Chen, H.Y. Bi, L.B. Zhao. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, **17** (1), 012055 (2014). DOI: 10.1088/1755-1315/17/1/012055
- [25] D.E. Khaled, N. Novas, J.A. Gazquez, R.M. Garcia, F. Manzano-Agugliaro. *Sensors*, **15** (7), 15363 (2015). DOI: 10.3390/s150715363
- [26] S. Dadshani, A. Kurakin, S. Amanov, B. Hein, H. Rongen, S. Cranstone, U. Blievernicht, E. Menzel, J. Leon, N. Klein, A. Ballvora. *Plant Methods*, **11** (1), 1 (2015). DOI: 10.1186/s13007-015-0054-x
- [27] R. Gente, A. Rehn, M. Koch. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **36** (3), 312 (2015). DOI: 10.1007/s10762-014-0127-3
- [28] H. Kraoui, F. Mejri, T. Aguilu. *J. Electromagnet. Wave.*, **30** (12), 1643 (2016). DOI: 10.1080/09205071.2016.1208592
- [29] D. El Khaled, N.N. Castellano, J.A. Gazquez, A.J. Perea-Moreno, F. Manzano-Agugliaro. *Materials*, **9** (5), 310 (2016). DOI: 10.3390/ma9050310
- [30] E.M. Cheng, A.B. Shahrman, H.A. Rahim, M.F. Abdul Malek, N.F. Mohd Nasir, N. Abdulaziz, M.S. Abdul Majid, K.S. Basaruddin. *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, **10** (1–14), 1 (2018).
- [31] M. Kafarski, A. Wilczek, A. Szyplowska, A. Lewandowski, P. Pieczywek, G. Janik, W. Skierucha. *Sensors*, **18** (1), 121 (2018). DOI: 10.3390/s18010121
- [32] A.G. Konings, K. Rao, S.C. Steele-Dunne. *New Phytologist*, **223** (3), 1166 (2019). DOI: 10.1111/nph.15808
- [33] B. Colak. *Microw. Opt. Techn. Lett.*, **61** (11), 2591 (2019). DOI: 10.1002/mop.31932
- [34] C.M.O. Muvianto, K. Yuniarto, S. Ariessaputra, B. Darmawan, M. Yadhya, A. Rachman. In: *Proceedings International Conference on Science and Technology (ICST)* (2020), v. 1.
- [35] P.F. Silva, E.E. Santana, M.S.S. Pinto, E.P. Andrade, J.N. Carvalho, R. Freire, M.A. Oliveira, E.E. Oliveira. *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, **19**, 86 (2020). DOI: 10.1590/2179-10742020v19i11868
- [36] F.V. Di Girolamo, A. Toncelli, A. Tredicucci, M. Bitossi, R. Paoletti. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1548** (1), 012002 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1548/1/012002
- [37] H. Dogan, I.B. Basyigit, A. Genc. *J. Microwave Power EE*, **54** (3), 254 (2020). DOI: 10.1080/08327823.2020.1794724
- [38] R. Li, Y. Lu, J.M. Peters, B. Choat, A.J. Lee. *Sci. Rep.*, **10** (1), 1 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-78154-z
- [39] C. Quemada, J.M. Pérez-Escudero, R. Gonzalo, I. Ederra, L.G. Santesteban, N. Torres, J.C. Iriarte. *Remote Sens.*, **13** (11), 2088 (2021). DOI: 10.3390/rs13112088
- [40] S. Metlek, K. Kayaalp, I.B. Basyigit, A. Genc, H. Dogan. *Int. J. RF Microw. CE*, **31** (1), e22496 (2021). DOI: 10.1002/mmce.22496
- [41] V.V. Meriakri. In: *Proceedings of The 2000 Material Research Society Spring Meeting, Symp AA.Paper AA2.6* (San Francisco, USA, 2000), DOI: 10.1557/PROC-631-AA2.6