

## ОБНАРУЖЕНИЕ ПЯТНИСТОСТЕЙ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

<sup>1,2</sup>Алейников А.Ф., <sup>1</sup>Минеев В.В., <sup>1</sup>Чешкова А.Ф., <sup>3</sup>Беляев А.А.

<sup>1</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук  
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный аграрный университет  
Новосибирск, Россия

**Для цитирования:** Алейников А.Ф., Минеев В.В., Чешкова А.Ф., Беляев А.А. Обнаружение пятнистостей земляники садовой методом импедансной спектроскопии // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020. Т. 50. № 1. С. 81–91. DOI: 10.26898/0370-8799-2020-1-9.

**For citation:** Aleynikov A.F., Mineev V.V., Cheshkova A.F., Belyaev A.A. Obnaruzhenie pyatnistostei zemlyaniki sadovoi metodom impedansnoi spektroskopii [Detecting spots of garden strawberry by impedance spectroscopy method] *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2020, vol. 50, no. 1, pp. 81–91. DOI: 10.26898/0370-8799-2020-1-9.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Проведены исследования по выявлению восьми информативных параметров электрического импеданса тканей листьев земляники: активного и реактивного сопротивления при последовательной и параллельной схемах электрической модели объекта измерения, фазового сдвига, емкости, тангенса угла потерь, модуля импеданса. Данные параметры связаны с воздействием грибов-возбудителей пятнистостей земляники садовой *Ramularia tulasnei* Sass, *Marssonina potentillae* (Desm), *Dendrophoma obscurans* (Ell. & Ev.) Anderson). Диагностику болезней проводили методами визуального анализа симптомов и микроскопического анализа спороношений грибов-возбудителей. Исследования осуществлены с использованием прецизионного анализатора импеданса WK 6505B по разработанной методике. Измерения параметров биоимпеданса тканей листьев земляники производили с использованием датчиков-электродов, накладываемых на верхнюю сторону листа с постоянным усилием прижима. Каждый параметр биоимпеданса ткани на листовой пластинке измеряли при установке электродов справа и слева от центральной жилки. Для уменьшения контактного сопротивления между электродами и поверхностью листа электроды смазывали специальным электродным ге-

## DETECTING SPOTS OF GARDEN STRAWBERRY BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD

<sup>1,2</sup>Aleynikov A.F., <sup>1</sup>Mineev V.V.,  
<sup>1</sup>Cheshkova A.F., <sup>3</sup>Belyaev A.A.

<sup>1</sup>Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences

Krasnoobsk, Novosibirsk region

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Novosibirsk State Agrarian University  
Novosibirsk, Russia

The study was conducted to identify eight informative parameters of the electrical impedance of strawberry leaf tissue: active and reactive resistance in series and parallel circuits of the measurement object electrical model, phase shift, capacitance, loss tangent, impedance module. These parameters are associated with the action of fungi pathogens of garden strawberry spots *Ramularia tulasnei* Sass, *Marssonina potentillae* (Desm), *Dendrophoma obscurans* (Ell. & Ev.) Anderson). Diagnosis of diseases was carried out by visual analysis of symptoms and microscopic analysis of the sporulation of fungi pathogens. The study was carried out using a precision impedance analyzer WK 6505B in accordance with the developed technique. The bio-impedance parameters of the strawberry leaf tissue were measured using sensor electrodes placed on the upper side of the leaf with a constant clamping force. Each parameter of the tissue bio-impedance on the leaf surface was measured when electrodes were installed to the right and left of the central leaf vein. To reduce the contact resistance between the electrodes and the leaf surface, the electrodes were lubricated with a special electrode gel. There were 2624 dependences obtained of the bio-impedance

лем. Получены 2624 зависимости исследуемых параметров биоимпеданса здоровых и пораженных белой, бурой и угловатой пятнистостями листовых пластинок трех сортов земляники садовой (Элиани, Танюша и Даренка). Дисперсионный анализ средних значений полученных данных выявил, что наиболее информативная часть изменений всех параметров лежит в низкочастотной области  $\alpha$ -дисперсии биоимпеданса: от 20 Гц до 10 кГц. В качестве основного информативного параметра биоимпеданса для обнаружения пятнистостей предлагается использовать реактивное сопротивление, измеренное в низкочастотной области  $\alpha$ -дисперсии биоимпеданса. При данном реактивном сопротивлении проявляются экстремумы его изменения для здоровых и пораженных грибными болезнями листовых пластинок земляники садовой. Результаты исследований будут использованы при создании прибора ранней диагностики пятнистостей земляники садовой.

**Ключевые слова:** земляника садовая, пятнистость земляники, степень поражения, диагностика, метод, импеданс

## ВВЕДЕНИЕ

Диагностика болезней и их возбудителей – важное звено в системе защиты растений. В настоящее время в диагностике используется большое количество специальных методов обнаружения болезней с присущими им преимуществами и недостатками. Визуальная диагностика не теряет своей актуальности, так как часто является предварительной для других диагностических технологий. Основными недостатками визуального метода можно считать ненадежность, обусловленную совпадением внешних признаков инфекционного поражения растений и физиологических нарушений, вызванных неблагоприятными внешними воздействиями, необходимость высокой квалификации эксперта и поздний факт обнаружения болезней. Для установления возможного наличия того или иного возбудителя метод визуального осмотра необходимо проводить в сочетании с микроскопированием [1].

parameters of healthy leaves and the ones affected with white, brown, and angular spots of three varieties of garden strawberry (Eliani, Tanyusha, and Darenka). The variance analysis of the average values of the data revealed that the most informative part of the changes in all parameters lies in the low-frequency region of  $\alpha$ -dispersion of bio-impedance: from 20 Hz to 10 kHz. It is proposed to use reactive impedance measured in the low-frequency region of  $\alpha$ -dispersion of bio-impedance as the main informative parameter of bio-impedance for detecting spots. With this reactive impedance, extreme values of its change appear for healthy leaves of garden strawberries and the diseased ones. The results of the research will be used to create a device for the early diagnosis of spots of wild strawberries.

**Keywords:** garden strawberry, spots, degree of damage, diagnosis, method, impedance

Технология диагностики возбудителей болезней с помощью выделения в чистую культуру с последующим микробиологическим исследованием – трудоемкий метод, занимает много времени, имеет низкую производительность. Зависимость от морфологического определения требует от исследователя обширных знаний классической таксономии<sup>1</sup>.

Методы диагностики, основанные на полимеразной цепной реакции (ПЦР), могут выявлять в растительной ткани присутствие ДНК любого организма. Они отличаются высокой чувствительностью, специфичностью и наличием количественной оценки присутствия объекта<sup>2</sup>. Данные методы подходят для определения любых патогенов даже на этапе довизуального проявления болезни, что перспективно для ранней диагностики. Однако ПЦР-анализаторы имеют высокую стоимость, применяемые реактивы также дороги. Требования к организации по-

<sup>1</sup>Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П., Неменуцкая Л.А. Перспективные технологии диагностики патогенов сельскохозяйственных растений: науч. аналитический обзор. М.: Росинформагротех, 2018. 68 с.

<sup>2</sup>Дьяков Ю.Т., Еланский С.Н. Общая фитопатология: учеб. пособ. для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2018. 230 с.

мещений лаборатории, где они размещены, повышены, обслуживающий персонал должен иметь высокую квалификацию. Ограничением применения этих методов является отсутствие тест-систем для многих фитопатогенов.

Технологии диагностики с применением иммуноферментного анализа (ИФА) высокочувствительны и точны. Их использование обеспечивает выявление довизуальных признаков проявления болезней растений. Для применения технологий ИФА также требуются квалифицированный персонал, дорогостоящее оборудование, что, несмотря на большую перспективность, ограничивает область их применения [2].

Использование иммунохроматографического анализа (ИХА) позволяет проводить анализ непосредственно в поле в течение 10–15 мин без использования специального оборудования. Однако технологии ИХА обладают низкой чувствительностью и специфичностью по отношению к некоторым патогенам и в большинстве случаев доступны лишь в формате «один тест – один патоген» и не позволяют диагностировать спектр патогенов и их комбинаций [1].

Применение существующих методов подсчета пикселей изображения в пространстве цветовых каналов красного, зеленого и синего цвета (R, G, B) для диагностики грибных болезней, на основе которых можно разработать портативные приборы на базе смартфонов, требуют разработки сложной системы распознавания образов и применения систем искусственного интеллекта, например искусственных нейронных сетей [3, 4].

Биологические объекты удобно изучать путем наблюдения их реакции на слабое внешнее воздействие, не повреждающее ткани живого объекта. Метод спектроскопии электрического импеданса (Spectroscopy of an electric impedance – EIS) дает возможность получать информацию о процессах транспорта носителей заряда в любых материалах и позволяет характеризовать системы, электрохимическое поведение которых обусловлено несколькими неразрывно связанными процессами [5, 6]. При получении

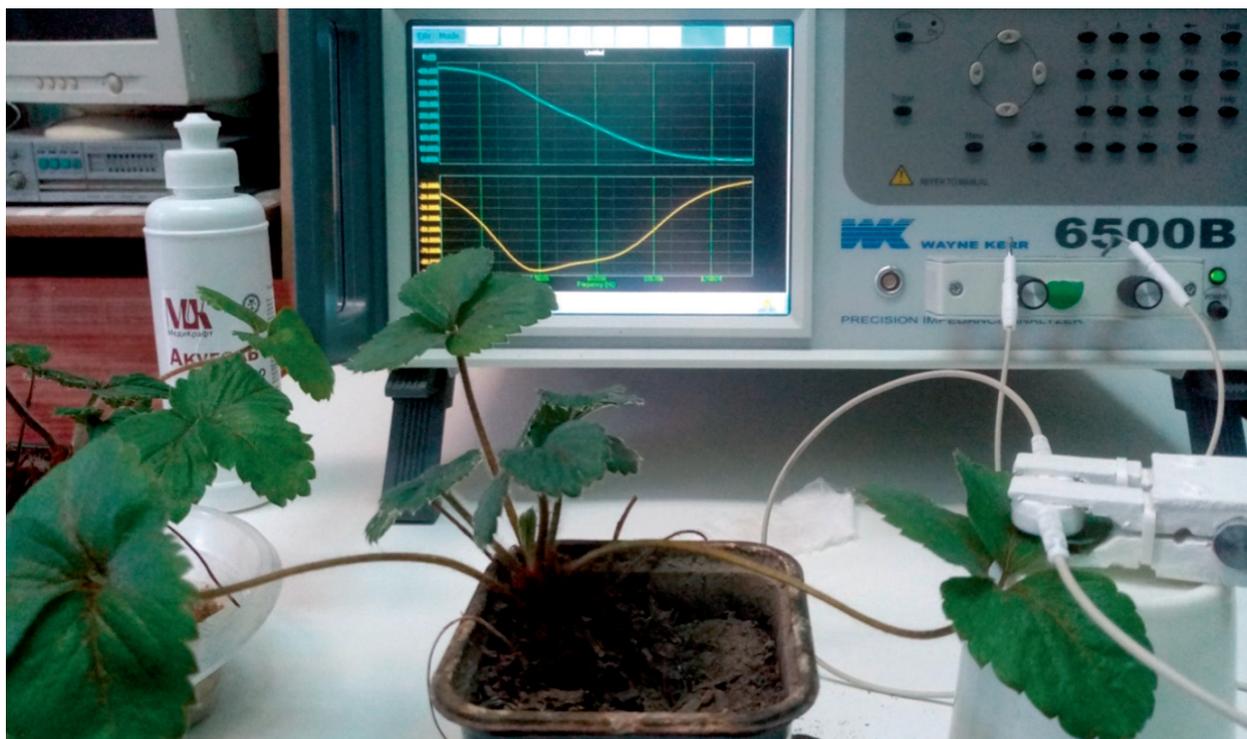
информации о сложных процессах переноса заряда в животных и растительных тканях метод спектроскопии импеданса часто незаменим. Спектроскопия электрического импеданса – относительно новая технология, в которой сигнал с широкой полосой пропускания и непрерывной полосой частот используется в качестве источника возбуждения для измерений импеданса, характеризующего электрические свойства исследуемого объекта, изучения структуры и физико-химических характеристик неорганических и органических материалов. Метод EIS позволяет получать значительный объем информации о процессах транспорта носителей заряда в твердых и жидких материалах. Он чрезвычайно важен для изучения переноса зарядов в гетерогенных системах, включающих фазовые границы, электродные границы, элементы микроструктуры. Разработана методология определения физиологического статуса растительных тканей посредством измерения электрического импеданса. Например, эту методологию широко применяют в исследованиях растений и почв [7–11]. Установлена взаимосвязь между электрическим импедансом и биохимическими свойствами плода: pH, содержанием сахара, зрелостью и др. [10].

Цель исследований – выявить возможность обнаружения белой, бурой и угловатой пятнистостей земляники садовой с помощью информативных параметров биоимпеданса растительных тканей ее листьев для создания простого и недорогого неинвазивного экспресс-метода диагностики болезней садовых культур.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили с использованием прецизионного анализатора импеданса WK 6505B (Wayne Kerr Electronics, Великобритания), включенного в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации (см. рис. 1).

Для проведения измерения физических параметров состояния тканей листьев растений земляники выбирали нормально развитые растения трехлетнего возраста с ти-



**Рис. 1.** Процедура проведения измерений параметров импеданса  
**Fig. 1.** Procedure for measuring impedance parameters

пичными сортовыми признаками. Растения с различной интенсивностью (степенью) были поражены белой пятнистостью (возбудитель – *Ramularia tulasnei* Sacc.), бурой (*Marssonina potentillae* Desm.), угловатой [*Dendrophoma obscurans* (Ell. & Ev.) Anderson] и имели типичные симптомы указанных листовых пятнистостей.

Диагностику болезней проводили общепринятыми методами визуального анализа симптомов и микроскопического анализа спораношений грибов-возбудителей<sup>3</sup> [11].

Растения выкапывали утром в день проведения измерений на коллекционном участке сада Сибирского физико-технического института аграрных проблем СФНЦА РАН – полигоне лаборатории экспериментальных исследований. Растения выкапывали с комом почвы вокруг корней (объемом около 3 л), поливали и затем переносили в помещение лаборатории для проведения измерений. Перед началом физических измерений проводили оценку воз-

раста листьев, выбранных для исследований (менее 5 нед, более 5 и 10 нед), а также оценку интенсивности поражения листовых пластинок и непосредственных участков ткани (половинок листовых пластинок), где затем устанавливали контактные измерительные электроды.

Оценку интенсивности поражения проводили с использованием методики оценки и визуальной шкалы для пятнистостей [11, 12]. Интенсивность поражения каждой из болезней (пятнистостей) определяли в баллах по площади поверхности листовой пластинки, занятой некротическими пятнами (отдельно для каждой из трех пластинок сложного листа земляники), выраженной в процентах от ее общей площади. Аналогичным образом дополнительно оценивали интенсивность поражения конкретной половинки листовой пластинки (отдельно слева и справа от ее центральной жилки), на которой затем проводили измерения физических параметров.

<sup>3</sup>Хохряков М.К., Доброзракова Т.Л., Степанов К.М., Летова М.Ф. Определитель болезней растений. 3-е изд., испр. СПб.: Изд-во «Лань», 2003. 592 с.

Измерения физических параметров осуществляли на целых листьях, не отчленяя их от всего растения и полностью исключая механические повреждения при нанесении проводящего геля, прикреплении и снятии электродов.

На каждой листовой пластинке всех листьев в выбранном образце куста земляники садовой проводили измерения восьми параметров биоимпеданса: модуля полного сопротивления ( $Z$ ), фазового сдвига ( $\theta$ ); активного ( $R$ ) и реактивного сопротивления ( $X$ ) при последовательной и параллельной схеме замещения объекта исследований [9]; емкости ( $C$ ) и добротности ( $D$ ). Каждый параметр биоимпеданса ткани на листовой пластине измеряли при установке электродов справа и слева от центральной жилки.

Измерения параметров биоимпеданса растительных тканей листьев земляники производили с использованием датчиков-электродов, состоящих из двух неполяризуемых чашечковых электродов H124SG диаметром 8 мм фирмы COVIDIEN (США), накладываемых на верхнюю сторону листа с постоянным усилием прижима, которое обеспечивали с помощью зажимов типа «прищепка».

Для уменьшения контактного сопротивления между электродами и поверхностью листа электроды смазывали электродным гелем «Акугель-Электро» производства ООО «МедиКрафт» (Россия).

Перед измерением осуществляли документирование исследуемого листа растения с получением цветных изображений фотоаппаратом.

При измерении контролировали температуру и относительную влажность окружающего воздуха с помощью термогигрометра ИВА-6 (инв. № 9974).

Необходимые данные о выбранных образцах земляники садовой, ее сорте, нумерации здоровых и пораженных пластинок листьев, на которые накладывали электроды, степени поражения и конкретном виде грибной болезни, температуре и влажности окружающего воздуха и другое заносили в рабочий журнал.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения проводили на трех сортах земляники садовой: Элиани, Танюша и Даренка. Получено 2624 зависимости восьми параметров импеданса от частоты тока в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц здоровых и пораженных белой (рамуляриоз), бурой и угловатой пятнистостями листовых пластинок трех сортов.

Число проведенных измерений параметров биоимпеданса на листовых пластинках земляники садовой исследуемых сортов следующее.

Число измерений	Степень поражения, балл	Число измерений	Степень поражения, балл
<b>Сорт Элиани</b>		<b>Сорт Танюша</b>	
<i>Угловатая пятнистость</i>		<i>Угловатая пятнистость</i>	
5	4	1	1
1	5	3	2
<i>Бурая пятнистость</i>		<i>Бурая пятнистость</i>	
12	1	8	3
7	2	9	4
5	3	1	5
4	4		
<b>Сорт Даренка</b>			
<i>Бурая пятнистость</i>		<i>Белая пятнистость</i>	
14	1	11	1
11	2	1	3
16	3	3	4
6	4		
4	5		
<i>Белая пятнистость</i>			
6	1	3	2
2	2	8	3
16	3	9	4
		1	5

Таким образом, измерения восьми параметров биоимпеданса проводили на пластинках листьев трех сортов земляники садовой. Подвержены исследованиям электрических свойств ткани по всем восьми параметрам импеданса: 28 пластинок, пораженных угловатой пятнистостью, 46 – белой пятнистостью и 103 – бурой. Общее число измерений параметров биоимпеданса здоровых пластинок на всех исследуемых кустах земляники садовой составило 151.

Зависимости усредненных значений параметров биоимпеданса от частоты по трем исследуемым сортам земляники садовой при последовательной и параллельной схеме модели приведены на рис. 2, 3.

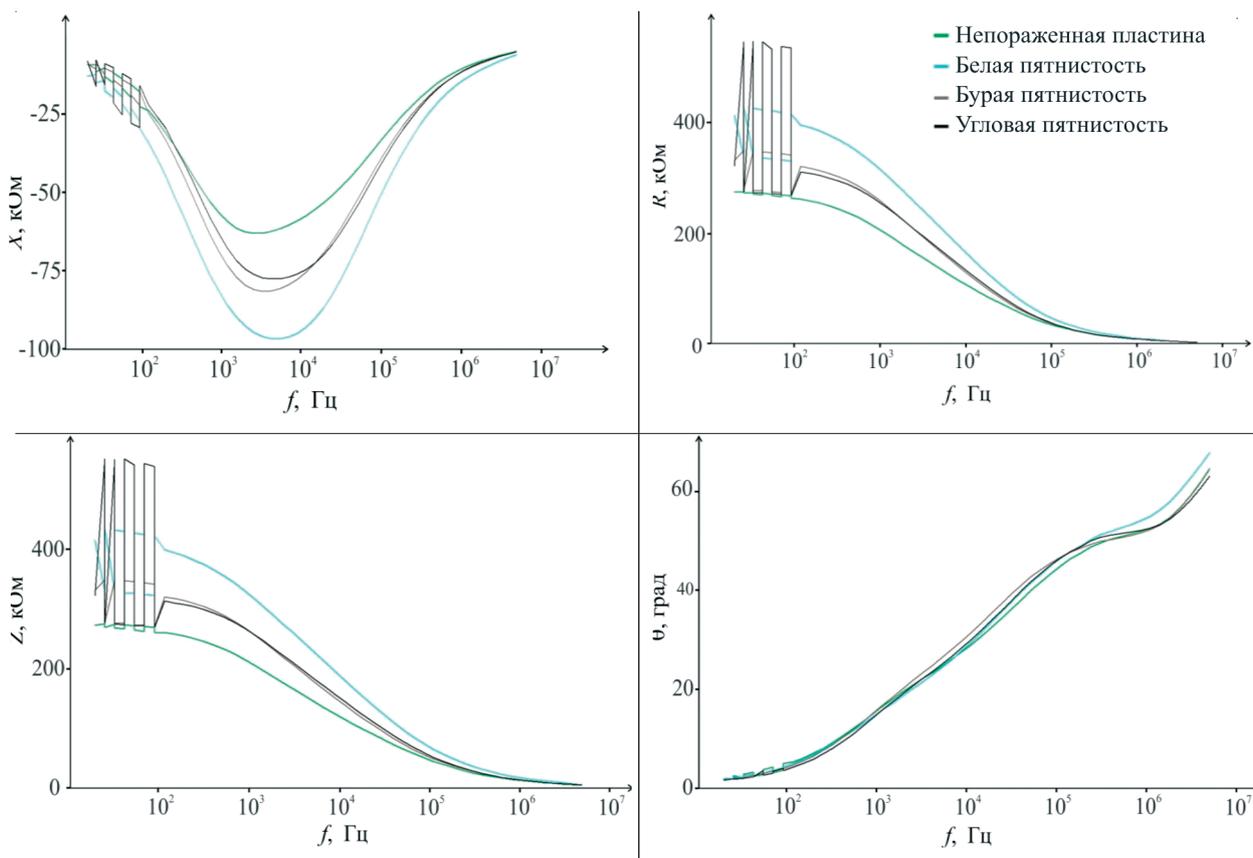
При анализе зависимостей выявлено, что наиболее информативная часть изменений всех параметров лежит в низкочастотной области  $\alpha$ -дисперсии биоимпеданса – от 20 Гц до 10 кГц.

В результате воздействия биострессора нарушается нормальное взаимодействие между отдельными компонентами клетки. Вследствие этого в ней возникают патологические реакции с образованием токсичных веществ, что вызывает изменение поляризационных свойств растительной ткани. При  $\alpha$ -дисперсии происходит поляризация целых клеток в результате диффузии ионов, что занимает относительно большой промежуток времени. В этой низкочастотной области ем-

костное сопротивление мембран очень велико, поэтому преобладают токи, огибающие клетки и протекающие через окружающие клетки растворы электролитов.

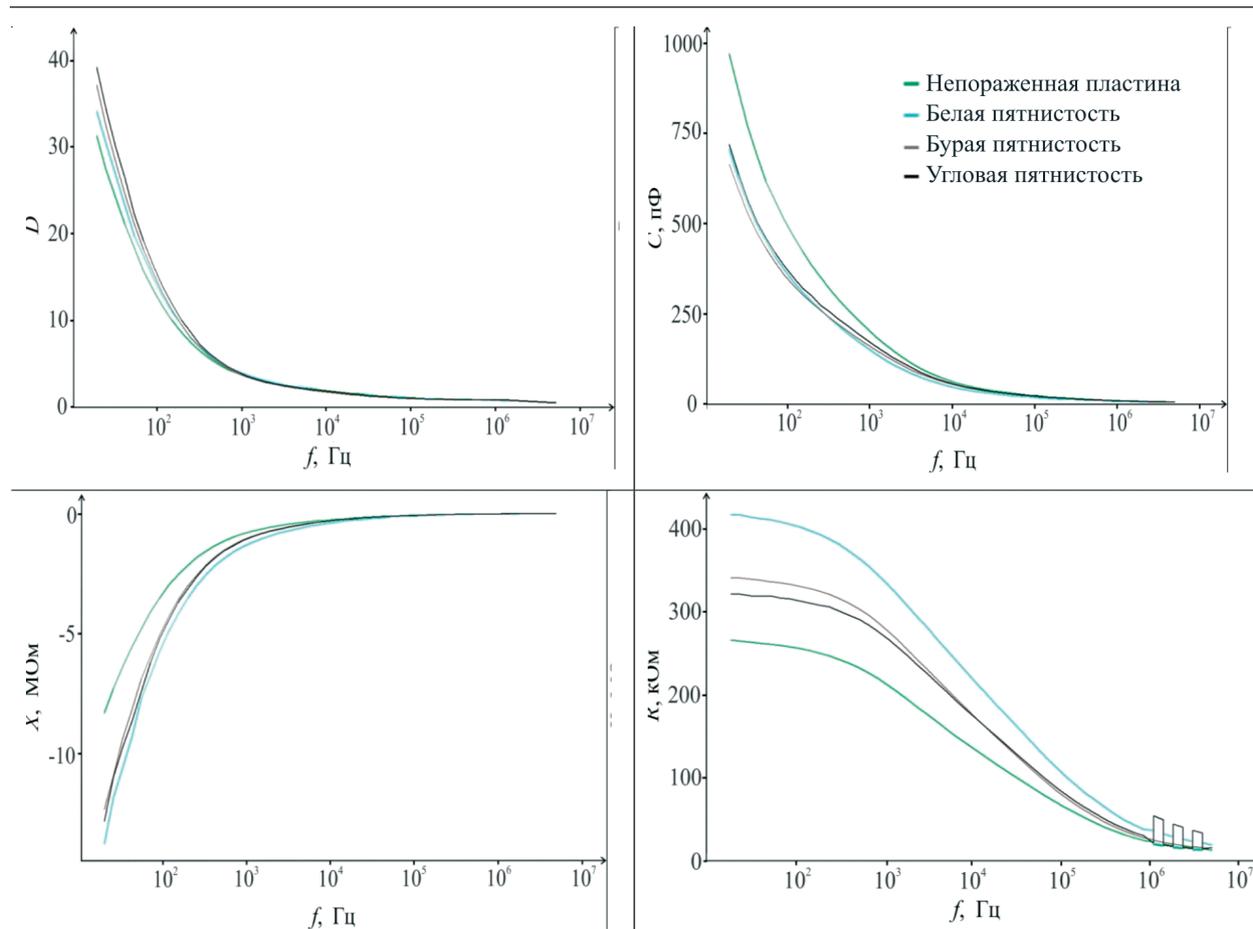
В области низких частот (от 20 до 100 Гц) замечен колебательный процесс изменения средних значений активного  $R$  и реактивного сопротивления  $X$  при последовательной схеме электрической модели объекта исследований и, следовательно, связанных с ними фазового сдвига  $\theta$  и модуля полного электрического сопротивления  $Z$  (см. рис. 2).

Учитывая большое количество полученных зависимостей параметров импеданса, выбор информативного параметра проведен из шести параметров биоимпеданса. Параметр фазового сдвига  $\theta$  и добротность  $D$  исключены ввиду низкой информативности и сложности процедуры их измерения. Проведен двухфакторный дисперсионный анализ средних значений на фиксированных частото-



**Рис. 2.** Зависимости усредненных значений параметров импеданса от частоты по видам болезней (последовательная схема модели)

**Fig. 2.** Dependences of the average values of impedance parameters on frequency by types of disease (series circuit model)



**Рис. 3.** Зависимости усредненных значений параметров импеданса от частоты по видам болезней (параллельная схема модели)

**Fig. 3.** Dependences of the average values of impedance parameters on frequency by types of disease (parallel circuit model)

тах, определяемых максимальной дисперсией параметров. В качестве факторов рассмотрены вид болезни и сорт исследуемого растения. Для проверки значимости парных различий средних значений параметров между видами болезней использовали критерий Тьюки. Типовые примеры такого ана-

лиза на фиксированных частотах 118, 1158 и 5303 Гц приведены в табл. 1–6.

Данные, приведенные в табл. 1–6, и анализ характера зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, позволяют утверждать, что наиболее информативным параметром для обнаружения болезней листовой пластины

**Табл. 1.** Результаты дисперсионного анализа для электрической емкости  $C$  на частоте  $f = 118$  Гц

**Table 1.** Results of analysis of variance for electrical capacitance  $C$  at frequency  $f = 118$  Hz

Фактор	Степень свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	$F$ -критерий	$p$
Болезнь	3	338 542	112 847	17,129	< 0,00***
Сорт	2	224 737	112 368	17,056	< 0,00***
Болезнь × сорт	4	30850	7713	1,171	0,328
Ошибка	101	665 398	6588		

Здесь и в табл. 2–6:  
\*0,05,  
\*\*0,01,  
\*\*\*0,001.

**Табл. 2.** Критерий Тьюки значимости парных различий средних значений электрической емкости  $C$  на частоте  $f = 118$  Гц

**Table 2.** Tukey criterion for the significance of pairwise differences in the average values of electric capacitance  $C$  at frequency  $f = 118$  Hz

Пары групп	Разность	$p$
1–0	–126,439	< 0,001***
2–0	–136,757	< 0,001***
3–0	–114,551	0,004***

Здесь и в табл. 4, 6 – код заболеваний: 0 – здоровая; 1 – белая пятнистость; 2 – бурая пятнистость; 3 – угловатая пятнистость.

**Табл. 3.** Результаты дисперсионного анализа для модуля полного электрического сопротивления  $Z$  на частоте  $f = 1158$  Гц

**Table 3.** The results of analysis of variance for the module of the total electrical resistance  $Z$  at frequency  $f = 1158$  Hz

Фактор	Степень свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	$F$ -критерий	$p$
Болезнь	3	74359	24 786	17,221	<0,001***
Сорт	2	61436	30 718	21,343	<0,001***
Болезнь × сорт	4	21 598	5400	3,752	0,007***
Ошибка	104	149 684	1439		

**Табл. 4.** Критерий Тьюки значимости парных различий средних значений модуля полного электрического сопротивления  $Z$  на частоте  $f = 1158$  Гц

**Table 4.** Tukey criterion for the significance of pairwise differences in the average values of electric capacitance  $C$  at frequency  $f = 1158$  Hz

Пары групп	Разность	$p$
1–0	76,221	< 0,001***
2–0	50,897	< 0,001***
3–0	20,62	0,632

является реактивное электрическое сопротивление  $X$  при последовательной модели объекта измерения.

Анализ экспериментальных данных показал возможность ранней диагностики белой, бурой и угловатой пятнистостей земляники садовой на основе одновременно полу-

**Табл. 5.** Результаты дисперсионного анализа для реактивного сопротивления  $X$  (при последовательной модели) на частоте  $f = 5,303$  кГц

**Table 5.** The results of analysis of variance for reactance  $X$  (with a serial model) at frequency  $f = 5.303$  kHz

Фактор	Степень свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	$F$ -критерий	$p$
Болезнь	3	7604	2535	18,236	<0,001***
Сорт	2	9593	4797	34,511	<0001***
Болезнь × сорт	4	1222	306	2,199	0,074**
Ошибка	101	14038	139		

**Табл. 6.** Критерий Тьюки значимости парных различий средних значений реактивного сопротивления  $X$  (при последовательной модели) на частоте  $f = 5,303$  кГц

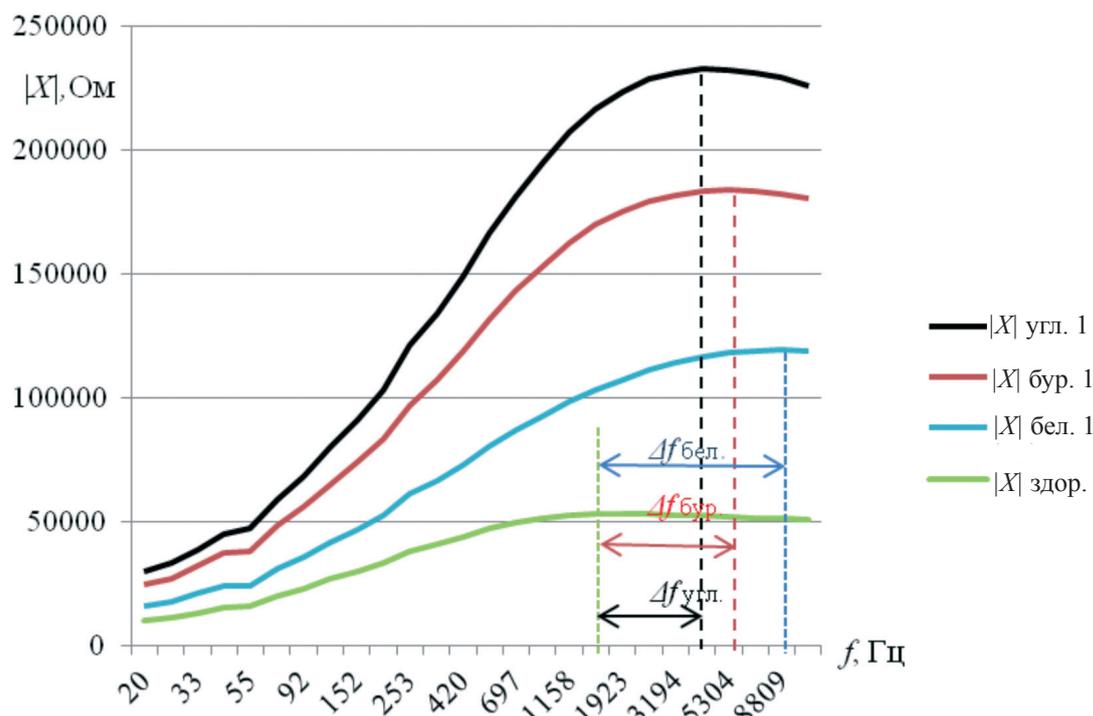
**Table 6.** Tukey criterion for the significance of pairwise differences in the average values of reactance  $X$  (with a serial model) at frequency  $f = 5.303$  kHz

Пары групп	Разность	$p$
1–0	–19,623	0,002**
2–0	–19,193	< 0,001***
3–0	–16,011	0,068

ченной разности реактивных электрических сопротивлений, измеренных на пораженной грибом-возбудителем и здоровой пластинках листа земляники садовой (см. рис. 4).

Из анализа кривых, представленных на рис. 4, видно, что экстремумы пораженных грибными болезнями пластинок земляники садовой смещены по оси  $f$  относительно экстремума здоровых пластинок земляники садовой на различные значения друг от друга:  $\Delta f_{\text{бел.}}$ ,  $\Delta f_{\text{бур.}}$ ,  $\Delta f_{\text{угл.}}$ . Значения кривых по оси  $X$  также имеют существенные различия, что позволит проводить раннюю неинвазивную диагностику грибных болезней земляники садовой.

Установленная тенденция смещения реактивных сопротивлений здоровых и пораженных болезнями пластинок земляники садовой дает возможность дальнейших исследова-



**Рис.4.** Зависимости значений модуля реактивного электрического сопротивления  $|X|$  от частоты  $f$  здоровой и пораженных тремя грибами-возбудителями (степень поражения 1 балл) листовых пластинок земляники садовой сорта Танюша (4.08.2019)

**Fig. 4.** Dependences of the values of reactive electrical resistance module  $|X|$  on frequency  $f$  of healthy leaves and the ones affected by three fungi pathogens (degree of damage 1 point) of Tanyusha garden strawberry variety (08/04/2019)

дований по определению преобладающей (по площади распространения) болезни земляники садовой из трех рассматриваемых в данной работе пятнистостей.

Задача быстрой дифференциальной диагностики болезней у растений чрезвычайно сложна и не решена в мировой практике [5–11]. Это объясняется, например, вероятностью одновременного присутствия нескольких болезней многообразных видов с различной степенью поражения, вызывающих появление схожих симптомов на одном исследуемом растении, и другими причинами.

## ВЫВОДЫ

1. Для обнаружения грибных болезней земляники садовой в качестве информативного параметра биоимпеданса предложено использовать реактивное сопротивление  $X$  при последовательной схеме электрической модели объекта, измеренное в низкочастотной области  $\alpha$ -дисперсии, при которой проявляются экстремумы изменения реактив-

ного сопротивления для здоровых и пораженных грибными болезнями листовых пластинок земляники садовой.

2. Проведен двухфакторный (вид болезни и сорт) дисперсионный анализ, который выявил значимость влияния вида заболеваний на показатель последовательного реактивного сопротивления при частотах 118, 1158, 5303 Гц.

3. Получены существенные различия значений реактивных сопротивлений здоровых и пораженных грибами-возбудителями белой, бурой и угловатой пятнистостей листовых пластинок земляники садовой сортов Элиани, Танюша и Даренка при степени поражения указанных болезней, равной 1 баллу.

4. Результаты исследований будут использованы для создания портативного прибора и при разработке методики ранней неинвазивной диагностики белой, бурой и угловатой пятнистости земляники садовой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шорников Д.Г., Горелов П.И. Современные молекулярные методы диагностики болезней плодовых культур // Аналитика. 2015. № 4. С. 64–71.
2. Алейников А.Ф., Минеев В.В. Изменение флуоресценции хлорофилла земляники садовой при воздействии гриба *Ramularia tulasnei* Sacc // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019. Т. 49. № 2. С. 94–102. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-2-12.
3. Dashuai G., Jianhui L., Jiangbin Y., Yurui S., Schulze P. Correction of leaf area measurement based on Android smartphone orientation sensor // International Agricultural Engineering Journal. 2017. Vol. 26 (1). P. 186–192.
4. Алейников А. Ф. Метод неинвазивного определения грибных болезней земляники садовой // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48. № 3. С. 71-83. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-3-105.
5. Lin C.M., Chen L.H., Chen T.M. The development and application of an electrical impedance spectroscopy measurement system for plant tissues // Computers and Electronics in Agriculture, 2012. Vol. 82. P. 96–99.
6. Hamed K. B., Zorrig W., Hamzaoui A.H. Electrical impedance spectroscopy: A tool to investigate the responses of one halophyte to different growth and stress conditions // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 123. P. 376–383.
7. Meiqing L., Jinyang L., Hanping M., Yanyou W. Diagnosis and detection of phosphorus nutrition level for *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance spectroscopy // Biosystems Engineering. 2016. Vol. 143. P. 108–118.
8. Jinyang L., Meiqing L., Hanping M., Wenjing Z. Diagnosis of potassium nutrition level in *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance // Biosystems Engineering. 2016. Vol. 147. P. 130–138.
9. Neto A. F., Olivier N. C., Cordeiro E. R. Helinando Pequeno de Oliveira Determination of mango ripening degree by electrical impedance spectroscopy // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. Vol. 143. P. 222–226.
10. Wang Y.Q., Zhao P.F., Fan L.F., Zhou Q., Wang Z.Y. Determination of water content and characteristic analysis in substrate root zone by electrical impedance spectroscopy // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 56. P. 243–253.

11. Говорова Г.Ф., Говоров Д.Н. Грибные болезни земляники и клубники: монография. М.: Проспект, 2016. 142 с.
12. Куликов И.М. Производство и сертификация посадочного материала плодовых, ягодных культур и винограда в России. Контроль качества. Часть 1. Ягодные культуры / под общ. ред. акад. РАСХН И.М. Куликова. М.: ВСТИСП, 2009. 164 с

## REFERENCES

1. Shornikov D.G., Gorelov P.I. Sovremennye molekulyarnye metody diagnostiki boleznei plodovykh kul'tur [Horticultural crops disease advanced molecular diagnostics methods]. *Analitika* [Analytics], 2015, no. 4, pp. 64–71. (In Russian).
2. Aleinikov A.F., Mineev V.V. Izmenenie fluorestsentsii khlorofilla zemlyaniki sado-voi pri vozdeistvii griba *Ramularia tulasnei* Sacc [Effect of the fungus of *Ramularia tulasnei* Sacc on chlorophyll fluorescence in garden strawberry]. *Sibirskij vestnik sel'skoxozyajstvennoj nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2019, vol. 49, no. 2, pp. 94–102. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-2-12. (In Russian).
3. Dashuai G., Jianhui L., Jiangbin Y., Yurui S., Schulze P. Correction of leaf area measurement based on Android smartphone orientation sensor. *International Agricultural Engineering Journal*, 2017, vol. 26 (1), pp. 186–192.
4. Aleinikov A. F. Metod neinvazivnogo opredele-niya gribnykh boleznei sadovoi zemlya-niki sado-voi [Method of non-invasive determination of fungal diseases of common garden strawberry]. *Sibirskij vestnik sel'skoxozyajstvennoj nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2018, vol. 48, no. 3, pp. 71-83. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-3-105.
5. Lin C.M., Chen L.H., Chen T.M. The development and application of an electrical impedance spectroscopy measurement system for plant tissues. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, vol. 82, pp. 96–99.
6. Hamed K. B., Zorrig W., Hamzaoui A.H. Electrical impedance spectroscopy: A tool to investigate the responses of one halophyte to different growth and stress conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, vol. 123, pp. 376–383.
7. Meiqing L., Jinyang L., Hanping M., Yanyou W. Diagnosis and detection of phospho-

- rus nu-trition level for *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance spectroscopy. *Bio-systems Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 108–118.
8. Jinyang L., Meiqing L., Hanping M., Wenjing Z. Diagnosis of potassium nutrition level in *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance. *Bio-systems Engineering*, 2016, vol. 147, pp. 130–138.
  9. Neto A. F., Olivier N. C., Cordeiro E. R., Helinando Pequeno de Oliveira Determination of mango ripening degree by electrical impedance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, vol. 143, pp. 222–226.
  10. Wang Y.Q., Zhao P.F., Fan L.F., Zhou Q., Wang Z.Y. Determination of water content and characteristic analysis in substrate root zone by electrical impedance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, vol. 156, pp. 243–253.
  11. Govorova G.F., Govorov D.N. Gribnye bolezni zemlyaniki i klubniki [Fungi diseases of wild strawberries and garden strawberries]. M.: Prospekt Publ., 2016. 142 p. (In Russian).
  12. Kulikov I.M. *Proizvodstvo i sertifikatsiya posadochnogo materiala plodovykh, yagodnykh kul'tur i vinograda v Rossii. Kontrol' kachestva. Chast' 1. Yagodnye kul'tury* [Production and certification of planting material of fruit, berry crops and grapes in Russia. Quality control. Part 1. Berry crops]. / pod obshh. red. akad. RASXN I.M. Kulikova. M.: VSTISP Publ., 2009. 164 p. (In Russian).

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана бюджетным проектом СФНЦА РАН № 0778-2020-0001.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Алейников А.Ф.**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, СФНЦА РАН, а/я 463; e-mail: fti2009@yandex.ru

**Минеев В.В.**, старший научный сотрудник

**Чешкова А.Ф.**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

**Беляев А.А.**, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой

## AUTHOR INFORMATION

✉ **Aleynikov A.F.**, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head Researcher; **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: fti2009@yandex.ru

**Mineev V.V.**, Senior Researcher

**Cheshkova A.F.**, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Lead Researcher

**Belyaev A.A.**, Doctor of Science in Agriculture, Assistant Professor, Head of the Department

Дата поступления статьи 18.12.2019  
Received by the editors 18.12.2019