

УДК 621.315.4/61

## СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ МИЦЕЛИИ ПЛЕСНЕВЫХ ГРИБОВ РОДА *PENICILLIUM*

Т.А. ПУЛКО, Н.В. НАСОНОВА, Л.М. ЛЫНЬКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 17 сентября 2010*

Приведены спектрально-поляризационные характеристики композиционных материалов, содержащих в своём составе колонии микроорганизмов рода *Penicillium*. Показано влияние развития плесневых грибов на спектральные характеристики влагосодержащих материалов в оптическом диапазоне длин волн  $\lambda=440\dots940$  нм. Отличительной особенностью влагосодержащих материалов, содержащих микроорганизмы рода *Penicillium*, является корреляция их спектрально-поляризационных характеристик с соответствующими характеристиками элементов растительности, что позволяет использовать искусственно синтезируемые материалы для получения спектральных портретов растительности в оптическом диапазоне длин волн.

*Ключевые слова:* электромагнитное излучение, оптические исследования, спектральные характеристики, спектральная яркость, плесневые грибы, композиционные материалы.

### Введение

Анализ результатов оптических исследований различных объектов как естественного [1–4], так и искусственного происхождения [5, 6], свидетельствует о значительном влиянии на их спектральные характеристики структуры поверхности и наличия микро- и наноразмерных неоднородностей на ней, присутствия в составе объектов пигментов (таких как хлорофилл, каротиноиды, хромопласты, меланин, фитохром, антоцианы и др.).

Учитывая постоянное присутствие микроорганизмов в объеме и на поверхности объектов природного и искусственного происхождения [7], необходимо иметь в виду, что их развитие может приводить к изменению оптических характеристик этих объектов. Свойства различных видов микроорганизмов в оптическом диапазоне чаще всего используются для их идентификации по отклику на различные длины волн. Особый интерес представляет изучение спектральных характеристик плесневых грибов рода *Penicillium* из-за их широкого распространения в природе и высокой активности при возникновении благоприятных климатических условий.

### Цель исследований

Целью настоящей работы являлось получение спектрально-поляризационных характеристик композиционных материалов, содержащих на поверхности и в объеме колонии микроорганизмов рода *Penicillium* в частности получение характеристик светорассеяния в оптическом диапазоне длин волн с  $\lambda=440\dots940$  нм, и последующее выявление зависимости спектрального коэффициента яркости и степени поляризации от структурных особенностей, пигментации и состава исследуемых композиционных материалов, сравнение полученных характеристик с характеристиками растительных объектов для установления возможности синтеза материалов, аналогичных им по оптическим свойствам.

## Теоретическая часть

Безводные материалы всегда содержат значительное количество жизнеспособных микроорганизмов (в частности, плесневых грибов), быстро развивающихся в условиях повышенной влажности и температуры. Жизнедеятельность микроорганизмов выражается в биотрансформации сред, выработке продуктов метаболизма, ферментов микробного происхождения, образованием органических рекомбинантных продуктов, пигментов (липохром) [8]. Особый интерес представляют собой различные по химическому составу и свойствам пигменты, которые являются окрашивающими веществами и образуются в процессе обмена веществ бактерий и грибов под воздействием света при достаточном доступе кислорода и определенном составе питательной среды, что аналогично процессу пигментообразования у растительности. Цветовые пигменты различных видов культур микроорганизмов определяют значения коэффициента яркости содержащих их материалов в различных участках спектра.

Спектральная яркость растительных объектов (травяных покровов, леса различных видов, почв) в оптическом диапазоне длин волн во многом определяется составом пигментов, структурой клеток и листьев, содержанием воды и жизнедеятельностью микроорганизмов в периоды их вегетации и разложения. Так, спектральные характеристики растительности содержат несколько характерных полос поглощения электромагнитного излучения. Из-за присутствия каротиноидов и хлорофилла происходит снижение отражательной способности на длинах волн 540 нм и 640 нм соответственно, вследствие наличия молекул воды — вблизи 1,45, 1,95 и 2,6 мкм [9]. Отражательная способность влагосодержащих поверхностей в видимой части спектра в 2,7 раза понижается по сравнению с безводными поверхностями, а спектральная яркость сухого сфагнумового мха в среднем в 2,5 раза выше влажного [10]. Высокая отражающая способность элементов растительности (листва) в диапазоне длин волн 700...940 нм обуславливается структурой поверхности листовенной растительности и отражением от верхнего слоя — кутикулы. Степень поляризации света, отраженного от живого листа, имеет максимум при длине волны 535 нм и минимум при длине волны 580 нм вследствие прозрачности пигментов листа в этом диапазоне.

## Эксперимент

Для исследований был выбран доступный и непатогенный вид микроорганизмов — плесневый гриб рода *Penicillium*, являющийся представителем низших одноклеточных организмов, широко распространенных в природе.

В качестве подложки для выращивания микроорганизмов использовалась гибкая капиллярно-пористая трикотажная матрица, большая удельная пористость которой позволяет дольше удерживать влагу. В качестве питательной среды для микроорганизмов использовался влагосодержащий органический растительный материал на основе клетчатки. Для экспериментальных исследований были созданы две группы образцов, отличающихся типами используемых питательных сред для микроорганизмов и способом их выращивания.

Развитие микроорганизмов происходило в течение 7 дней. В результате общая толщина образцов составила 15 мм, при этом толщина плесени составила 5 мм над уровнем клетчатки и 10 мм в составе клетчатки. Оптические микрофотографии колоний плесневых грибов показали, что поверхность всех образцов покрыта разросшимися многоядерными клетками, формирующими разветвленные нитевидные образования — мицелии, размер которых в среднем составляет 0,5 мм. Полученные мицелии микрогрибков образцов двух групп различаются цветом пигментов.

Спектрально-поляризационные свойства влагосодержащих композиционных материалов с мицелием плесени исследовались в диапазоне длин волн 470...940 нм на гониометрической установке со спектрополяриметром "Гемма МС-09" с поляризационной насадкой, позволяющей регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образца при различных положениях оси поляроида [11]. Для исследования степени поляризации отражённого света использовался диапазон 540...790 нм из-за особенностей используемой измерительной установки.

В качестве источника света применялась галогеновая лампа КГМ-250, имеющая максимум СПЭЯ на длине волны порядка 1,0 мкм (световая температура  $\approx 30000$  К). Питание осветительной лампы КГМ-250 стабилизировалось и контролировалось, поэтому яркость источника освещения не изменялась в процессе измерений. Угол падения коллимированного пучка света на исследуемый объект ( $\gamma$ ) составлял  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ . Использовались три положения оси поляроида относительно вертикальной плоскости:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$  с точностью  $0,5^\circ$ . Углы наблюдения ( $\beta$ ) были выбраны фиксированные:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  и  $70^\circ$ . Углы наблюдения и падения отсчитывались от нормали к плоскости исследуемого объекта.

Для описания состояния отраженного света были рассчитаны параметры Стокса (Stokes), для чего спектральные характеристики исследуемого материала регистрировались при трех различных ориентациях оси поляризационного фильтра ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ ) по отношению к вертикали, таким образом были получены следующие первичные параметры:  $I_0$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{90}$  — СПЭЯ для соответствующих ориентаций оси поляроида.

Вычисления параметров Стокса  $\{L, Q, U, V=0\}$  [12] выполнялись с использованием следующих математических выражений:

$$L = I_0 + I_{90}, \quad (1)$$

$$Q = I_{90} - I_0, \quad (2)$$

$$U = I_0 + I_{90} - 2I_{45}. \quad (3)$$

На основе параметров Стокса была рассчитана степень поляризации ( $P$ ) для исследуемых образцов материалов:

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / L \quad (4)$$

Полученные данные использовались для вычисления спектрального коэффициента яркости (СКЯ) и степени линейной поляризации отраженного излучения. Спектральный коэффициент яркости вычислялся как отношение СПЭЯ исследуемого материала к СПЭЯ тестового образца с равномерной индикатрисой рассеяния.

### Обсуждение результатов

Были получены характеристики спектрального коэффициента яркости двух групп образцов при различных углах падения и наблюдения падающего излучения с разной степенью поляризации. Полученные зависимости сравнивались с моделью растительного объекта, в качестве которой был выбран живой лист герани [12], поскольку спектральные характеристики данной модели соответствуют типовым характеристикам массивов лиственных деревьев [13].

При падении коллимированного пучка света на исследуемые образцы ( $\gamma=40^\circ$ ) наблюдаются различия в спектральных характеристиках двух образцов в зависимости от угла визирования, что можно объяснить неровностью поверхности исследуемых образцов и их окраской. Образцы группы 1 имеют монотонно растущую спектральную характеристику яркости в пределах от 0,1 до 0,7, наибольшая отражательная способность наблюдается на крайней границе ближнего инфракрасного диапазона 940 нм (рис. 1,а). В зелёной области спектра (550 нм) СКЯ находится в пределах 0,17...0,47, что сравнимо со значениями СКЯ листа герани в этой области спектра (0,07–0,4), что определяется составом пигментов и содержанием молекул воды на поверхности плесени [14]. Изменение угла наблюдения в пределах от 0 до  $70^\circ$  при исследовании образцов группы 1 сказывается на результатах при сравнении их со спектральной характеристикой растительности. При углах наблюдения от 0 до  $50^\circ$  значения СКЯ приближены к характеристикам живого листа, при увеличении угла до  $70^\circ$  различия между характеристиками значительно увеличивается, что означает большую контрастность данного образца на фоне растительности в зелёной области спектра. Это можно объяснить неоднородностью поверхности материала, которое при данном угле наблюдения превышает длину волны падающего света, за счет чего значение СКЯ уменьшается. Характеристика СКЯ монотонно увеличивается с ростом

длины волны излучения, по мере изменения поглощающей способности пигментов плесени. В ближнем диапазоне инфракрасного излучения (740–940 нм) проникающая способность излучения достигает минимума по причине отсутствия полос поглощения пигментами плесени, что объясняет максимальный всплеск СКЯ в этом диапазоне.

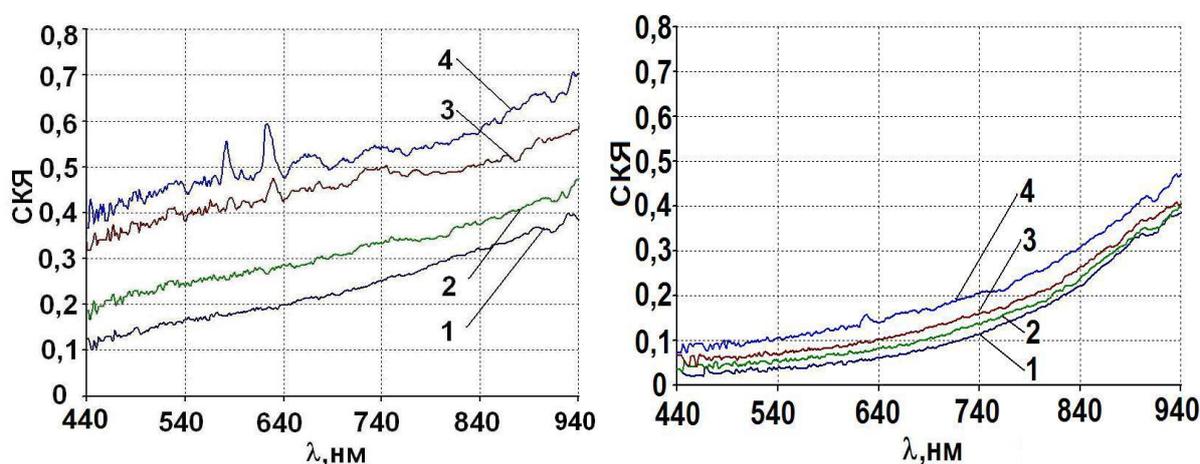


Рис. 1. Типичные характеристики спектрального коэффициента яркости образца группы 1 (а) и образца группы 2 (б) при угле падения  $40^\circ$  и углах наблюдения: 1 —  $\beta=0^\circ$ , 2 —  $\beta=30^\circ$ , 3 —  $\beta=50^\circ$ , 4 —  $\beta=70^\circ$

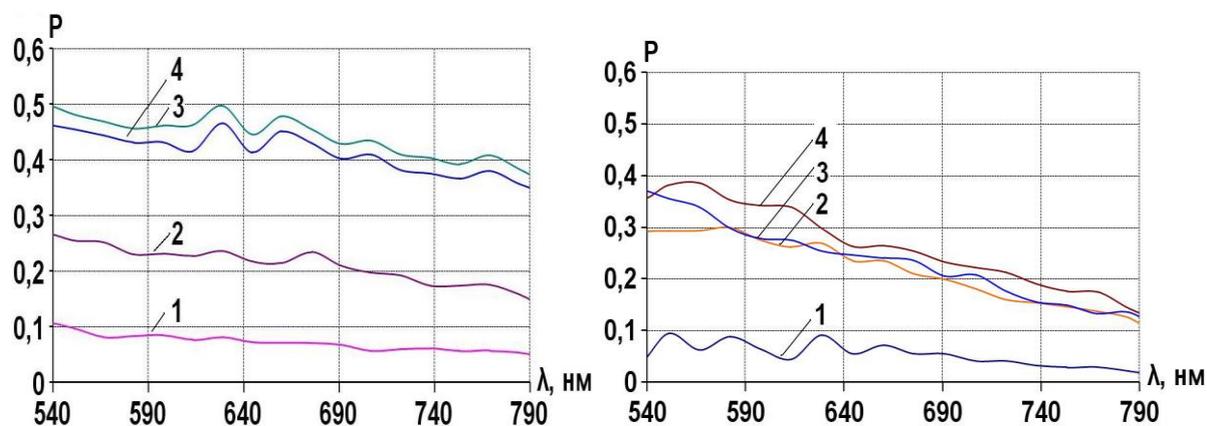


Рис. 2. Степень линейной поляризации отраженного излучения образцами группы 1 (а) и группы 2 (б) при угле падения  $40^\circ$  и углах наблюдения: 1 —  $\beta=0^\circ$ , 2 —  $\beta=30^\circ$ , 3 —  $\beta=50^\circ$ , 4 —  $\beta=70^\circ$

Уровень характеристик СКЯ образцов второй группы ниже по сравнению с первой группой и составляет 0,04...0,48 (рис. 1,б) вследствие различия окраски и структурных особенностей поверхности мицелий плесени. В видимой части спектра СКЯ медленно возрастает (0,02...0,15) из-за наличия тёмных пигментов на поверхности образцов, которые увеличивают полосу поглощения излучения на этих длинах волн. В зеленой области спектра (550 нм) значения СКЯ образцов второй группы находятся в пределах 0,04...0,11, что значительно ниже значений СКЯ зеленого листа в связи с наличием тёмных пигментов плесени увеличивающих поглощение света [15]. В ближнем инфракрасном диапазоне (640...940 нм) наблюдается резкое возрастание значений СКЯ до 0,4 на длине волны 940 нм, что свидетельствует об уменьшении полосы поглощения излучения в данном диапазоне. На уровень отраженного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне также оказывает влияние разветвлённая микроструктура плесени.

Степень поляризации отраженного излучения, соответственно для каждой группы образцов, зависит от угла наблюдения (рис. 2), при этом минимальное значение поляризации составляет менее 0,1 при угле наблюдения  $\beta=0^\circ$  из-за сформированной равномерной поверхности мицелий плесени. По мере увеличения угла наблюдения (до  $\beta=70^\circ$ ) поляризация отраженного света повышается до 0,45 (первая группа образцов) и 0,39 (вторая группа образцов), что свиде-

тельствует о влиянии микроразмерных элементов поверхности с включениями воды на процессы отражения/рассеяния падающего излучения при увеличении угла наблюдения. Снижение значения поляризации оптического излучения можно объяснить отсутствием слоя кутикулы (в отличие от живого листа) на поверхности исследуемых образцов, в результате чего в отражённом излучении преобладает диффузная компонента и значение степени поляризации поверхности плесени меньше, чем у листа и в целом не превышает 0,35...0,4 даже при увеличении угла визирования.

Увеличение угла падения излучения (с 40° до 45° и 50°) не приводит к видимым изменениям спектральных и поляризационных характеристик образцов. Для образцов группы 1 характеристика СКЯ находится в пределах 0,1...0,7 и повторяет вид, показанный на рис. 1,а. Для образцов группы 2 значение спектрального коэффициента яркости изменяется в пределах 0,05...0,45 при различных углах наблюдения.

Анализ степени поляризации отраженного света для образцов двух групп при углах падения света 45° и 50° показывает, что поляризованность излучения прямо пропорциональна углу наблюдения и обратно пропорциональна углу падения. При этом действует зависимость Умова, согласно которой чем темнее поверхность материала, тем сильнее поляризован отраженный от нее свет. Поэтому более темные мицелии плесени образцов группы 2 поляризуют отражаемое оптическое излучение сильнее, чем поверхность образцов группы 1.

### Заключение

В результате проведенной работы получены спектрально-поляризационные характеристики композиционных материалов в оптическом диапазоне длин волн 440...940 нм, содержащих на поверхности микроорганизмы рода *Penicillium*. Показано, что характеристика СКЯ определяется присутствием и видом пигментов, неоднородной структурой поверхности материала с включениями молекул воды и находится в диапазоне 0,01...0,71. Степень поляризации изменяется от 0 до 0,95 вследствие диффузного отражения направленного луча света к исследуемой неоднородной поверхности мицелия плесени и зависит от угла падения и наблюдения образцов.

Показано, что синтез образцов с различным цветом пигментов позволяет получать характеристики СКЯ, коррелирующие с характеристиками лиственной растительности в диапазоне длин волн видимого света.

## SPECTRAL-POLARIZATION CHARACTERISTICS OF MATERIALS CONTAINING MYCELIUM OF PENICILLIUM MOLDS

PULKO T.A., NASONOVA N.V., LYNKOV L.M.

### Abstract

Spectral-polarization characteristics of the composite materials containing in the structure of a colony of microorganisms of sort *Penicillium* are resulted. Development influence mold fungi on spectral characteristics liquid-containing materials in optical and near IR-ranges of lengths of waves with  $\lambda=440...1040$  nm is shown. Distinctive feature liquid-containing materials in the conditions of development of microorganisms is correlation of their spectral polarizing characteristics with corresponding characteristics of elements of vegetation that allows to use the identical is artificial synthesized materials for reception of spectral portraits of vegetation in an optical range of frequencies.

### Литература

1. Борботько Т.В., Хай Нгуен Ван // Докл. БГУИР. 2007. Т. 5, № 2. С. 95–100.
2. Valodis V., Kolodynski A. et al. // Proc. Int. Seminar on effects of EMF on the living Environment. Ismaning, 2000. P. 174–177.
3. Голант М.Б., Брюхова А.К., Двадцатова Е.А. и др. // Биофизика, 1986, т. 31 1 139-177.

4. Пат. №2287014RU, МПК C12N 13/00. Способ изменения биологической активности микроорганизмов / Вызулин С. А., Вызулина В.И. — №2004137407/13; Заявл. 21.12.2004.; Оpubл. 10.11.2006 // Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный университет.
5. *Бецкий О.В., Лебедева Н.Н., Катровская Т.И.* // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. № 10. С. 42–48.
6. *Вандербилт В.С.* // ТИИЭР. 1985. № 6. С. 72–85.
7. *Красильников А.П.* Микробиологический словарь-справочник. Минск, 1986.
8. *Ленгелер Й., Дреус Г., Шлегель У.* Современная микробиология, 2005.
9. *Ишанов М.Х., Юшин В.И., Гаязова А.К., Малашенкова Г.Н.* // Исследование Земли из космоса. 1985. № 1. С. 39–46.
10. *Волков А.М.* Определение спектральных характеристик природных объектов на полигонах и вопросы эффективности космических систем. Минск, 1985.
11. *Беляев Б.И., Катковский Л.В.* Оптическое дистанционное зондирование. Минск, 2006.
12. *Жумарь А.Ю.* // Журнал прикладной спектроскопии. 2001. Т. 68. С. 617–620.
13. *Борботько Т.В., Беляев Ю.В.* // Журн. прикл. спектр. 2008. Т. 75. № 3. С. 419–421.
14. *Батурицкая Н.В., Фенчук Т.Д.* // Ботаника. 2000. № 2. С. 67–72.
15. *Мурахверы В.* // Наука и жизнь. 2002. № 12 С. 286–271.