

## Особенности оптической среды поверхности семян растений

С. И. Зиенко, М. В. Беляков

*Обнаружено, что покровная ткань семян растений обладает свойством усиления света люминесценции. Это явление проявляется как во временной, так и в частотной области. Коэффициент усиления (по мощности) в зависимости от типа семени меняется от 1,7 (фасоль) до 2,6 (рожь). Для его определения оптическую среду поверхности семян растений представляли в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Импульсную (временную) характеристику звена находили по кривой релаксации люминесценции. Зависимость коэффициента усиления от температуры выражается в том, что при уменьшении ее от 50 °С до -30 °С, коэффициент усиления увеличивается от 1,73 до 2,48. Данное явление можно объяснить тем, что на стадии релаксации люминесценции коэффициент поглощения оптической среды поверхности семени принимает отрицательное значение.*

*Ключевые слова:* поверхностная ткань, усиление фотолюминесценции, релаксация, оптические среды, температурная зависимость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-47-52

### Введение

Покровная ткань семян растений проявляет свойство твердого тела и предназначена для защиты зерна от внешних воздействий. Её можно рассматривать как мембрану, регулиющую процесс газо- и водо-обмена между внутренней частью семени и внешней средой. Исследование люминесценции семян растений приведено в ряде работ [1–3], кроме того люминесценция является инструментом исследования в биофизике. Резонансный перенос энергии флуоресценции в единичных молекулах фермента позволяет измерять многокомпонентные распределения расстояний в сложных биомолекулах [4], предложена экспериментальная система для записи в реаль-

ном времени эволюции любого параметра клетки, который можно оценить по флуоресценции [5]. Возможность флуоресцентного изображения шелковых матриц под микроскопом была бы полезна для дифференциации встроенных меченых клеток от фонового сигнала, что очень важно для исследования искусственных тканей на основе шелка [6]. Исследования в области разработки и использования флуоресцентной корреляционной спектроскопии и связанных с ними методов могут использоваться для мониторинга кинетики реакции, основанной на флуктуациях при термодинамическом равновесии [7]. Термоиндуцированное разворачивание белка исследовали с помощью спектроскопии дихроизма [8]. С помощью метода рефлектометрии во временной области были определены спектры комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов моносахаридов и дисахаридов в диапазоне частот от 10 МГц до 30 ГГц при различных концентрациях и температурах [9].

Целью данной работы является выявление особенностей оптической среды покровной ткани семян таких культур, как рожь, фасоль, ячмень, пшеница и кукуруза. Для решения этой проблемы оптическую среду

Зиенко Станислав Иванович<sup>1</sup>, профессор, д.т.н.

Беляков Михаил Владимирович<sup>2</sup>, в.н.с., д.т.н.

<sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. Россия, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1.

<sup>2</sup> ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Россия, 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5.

E-mail: bmw20100@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 октября 2021 г.

поверхностной ткани семян растений представляли для анализа в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Динамические характеристики такого звена находили экспериментально по кривой затухания люминесценции во времени. Затем проводили анализ звена во временной и частотной области. Установлено, что оптическая среда поверхности семян обладает свойствами оптического усиления света люминесценции.

Данный вопрос в литературе практически не рассматривается. Решение этой задачи полезно как с точки зрения фундаментальной науки, так и с позиции практического применения при разработке новых методов и средств неразрушающего контроля качества семян культурных растений.

### Измерение кинетики люминесценции семян растений

Измерение характеристик люминесценции проводили, с помощью спектрофлуори-

метра «Флюорат-02-Панорама» при комнатной температуре по методике и на основании результатов [10]. Измерения проводились на длинах волн (энергии) люминесценции и возбуждения, численные значения которых приведены в таблице 1.

Из данных табл. 1 можно видеть, что возбуждение люминесценции поверхности семян растений происходит на длинах волн в соответствующей коротковолновой части видимого света (380–460 нм).

Полученные результаты измерений проходили предварительную обработку. За начало отсчета времени принимали момент времени соответствующий максимуму кривой затухания люминесценции: проводили сглаживание экспериментальных кривых, выполняли нормирование амплитуды сигнала люминесценции на единицу. В последнем случае получали модуль импульсной (временной) характеристики люминесценции покровной ткани семян растений  $g(t)$ . Некоторые из них представлены на рис. 1.

Таблица 1

Параметры длин волн (энергии) возбуждения и люминесценции для различных семян

Культура	Люминесценция		Возбуждение	
	Длина волны, нм	Энергия, эВ	Длина волны, нм	Энергия, эВ
Кукуруза	459	2,70	386	3,21
Рожь	536	2,31	412	3,00
Ячмень	510	2,43	444	2,79
Пшеница	521	2,38	423	2,93
Фасоль	485	2,55	428	2,89

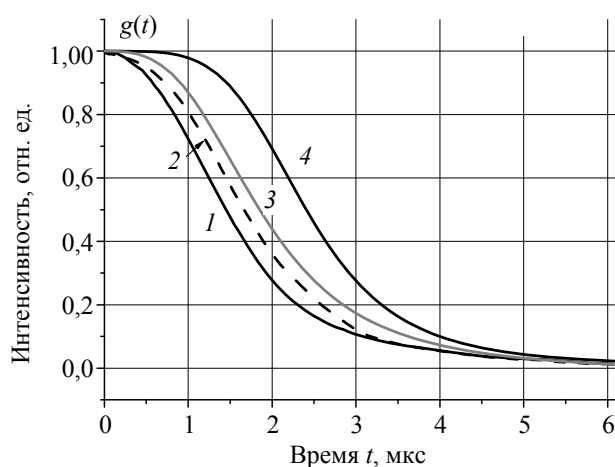


Рис. 1. Импульсные (временные) характеристики люминесценции семян растений: 1 – фасоль; 2 – ячмень; 3 – пшеница; 4 – рожь.

### Импульсные и переходные характеристики оптической среды

Как правило, для исследования инерционных свойств динамического звена используют сигналы в форме  $\delta$ -функции или единичной функции  $1(t)$ . Реакция звена на  $\delta$ -функцию называют импульсной (временной)  $g(t)$  характеристикой, а на единичную функцию  $1(t)$  переходной характеристикой  $h(t)$ . Функции  $g(t)$  и  $h(t)$  связаны между собой соотношением:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (1)$$

В результате численного интегрирования кривых, изображенных на рис. 1, получены переходные характеристики, времен-

ные зависимости которых представлены на рис. 2.

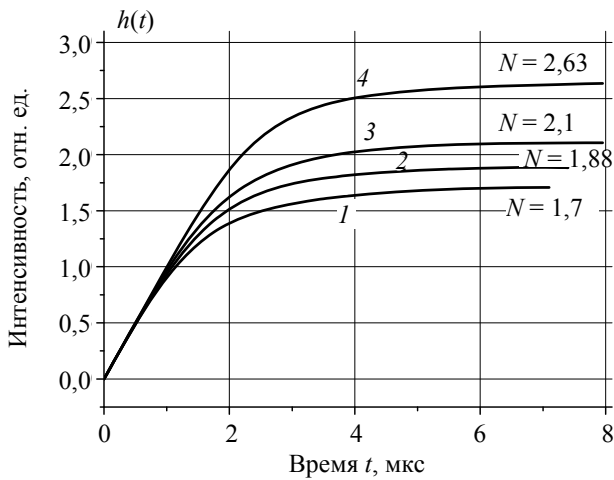


Рис. 2. Переходные характеристики оптической среды покровной ткани семян растений: 1 – фасоль; 2 – ячмень; 3 – пшеница; 4 – рожь.

При  $t \rightarrow \infty$  значение  $h(\infty)$ , в соответствии с (1), равно площади, ограниченной кривой  $g(t)$  на рис. 1. Функция  $g(t)$  имеет размерность: число излученных фотонов  $N$  в единицу времени. Поэтому  $h(\infty) = N$ . Коэффициент усиления (по мощности) динамического звена находится как

$$k = h(\infty)/1(t) = N. \quad (2)$$

Из данных, представленных на рис. 2, численное значение  $N$ , в зависимости от типа семени, принимает значения от 1,7 до 2,63. Следовательно, оптическая среда поверхности семян растений обладает свойством усиления света. Анализ полученных результатов показывает, что явление усиления света имеет место тогда, когда площадь, ограниченная кривой импульсной (временной) характеристики люминесценции по величине превышает единицу.

### Частотные характеристики

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе исследуемого динамического звена при подаче на вход гармонического воздействия. Частотные характеристики являются энергетическими характеристиками системы, которые устанавливают связь между спектрами входного и выходного сигналов, представляющих прямое преобразование Фурье от функции времени  $g(t)$ .

По известной зависимости  $g(t)$  вычисляли комплексную частотную характеристику  $k^*(f)$ . Для этого использовали формулу прямого преобразование Фурье:

$$k^*(f) = \int_0^{\infty} g(t) \exp(-2\pi jft) dt. \quad (3)$$

Частотная характеристика в показательной форме имеет вид:

$$k^*(f) = k \exp(-j\varphi(f)) \quad (4)$$

где  $k$  – модуль комплексной функции. Он представляет собой отношение амплитуды гармонического сигнала на выходе динамического звена в установившемся режиме к амплитуде гармонического сигнала на входе.

Функция  $k^*(f)$  содержит вещественную и мнимую части

$$k^*(f) = a(f) + jb(f). \quad (5)$$

Модуль этой функции вычисляли по формуле

$$k(f) = \sqrt{a^2(f) + b^2(f)}. \quad (6)$$

Величину фазового сдвига находили по формуле:

$$\varphi(f) = -\arctg \frac{b(f)}{a(f)}. \quad (7)$$

Решение интеграла (3) выполнено численным методом. Графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для различных семян приведены на рис. 3.

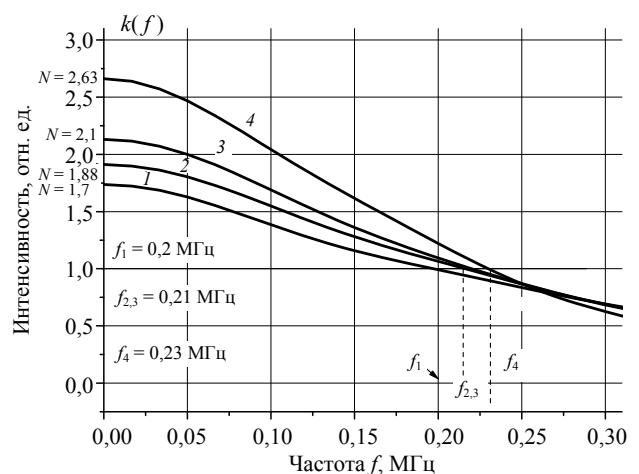


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики оптической среды покровной ткани семян растений: 1 – фасоль; 2 – ячмень; 3 – пшеница; 4 – рожь.

Начальное значение АЧХ находим из (3) полагая в нем частоту  $f=0$ . В этом случае

$$k^*(0) = \int_0^{\infty} g(t) dt$$

и численное значение  $k^*(0)$  равно площади, ограниченной кривой  $g(t)$  (рис. 1), что совпадает со значением  $h(\infty) = N$ . Следовательно, начальное значение АЧХ равно концентрации фотонов  $N$ . По существу кривые 1–4, изображенные на рис. 3, показывают зависимость концентрации фотонов от частоты. Модуль частотной характеристики в соотношении (4) превышает единицу и потому представляет собой коэффициент усиления оптической среды. Режим усиления света ограничен частотой единичного усиления. Для различных семян растений они на рис. 3 обозначены как  $f_1$ – $f_4$ . Характерно, что они по величине мало отличаются друг от друга.

### Зависимость коэффициента усиления от температуры

Импульсные и переходные характеристики семян кукурузы для разных температур приведены на рис. 4. Из данных, приведенных на рис. 4, можно видеть, что в начальные моменты времени переходные характеристики для различных температур сливаются между собой и касательной к ним в начале координат (кривая  $m$ , рис. 4). Последнее следует из того, что производная  $dh(t)/dt = g(0) = 1$ . Величина коэффициента усиления оптической среды зависит от температуры. При ее увеличении коэффициент  $k$  уменьшается.

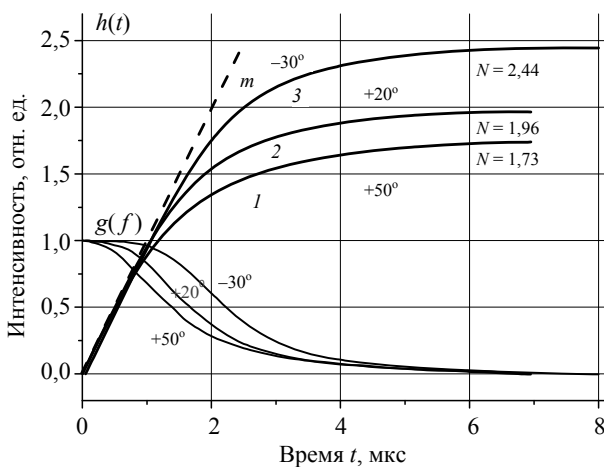


Рис. 4. Импульсные и переходные характеристики кукурузы.

Для объяснения этого явления воспользуемся диаграммой Блэка–Николса (рис. 5).

На таком графике частота выступает в качестве параметра кривой, фаза и амплитуда на заданной частоте представляется абсциссой и ординатой каждой точки характеристики. По существу данная диаграмма объединяет на одной плоскости амплитудную и фазо-частотную характеристики.

На рис. 5 показаны значения фазовых углов  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$ , соответствующих единичному усилению. Потери энергии в диэлектриках определяют по величине добротности  $Q$ . Ее значение связано с углом  $\varphi$  соотношением:

$$Q = \text{tg } \varphi. \tag{8}$$

Величина обратная добротности представляет собой тангенс угла диэлектрических потерь. Следовательно, с учетом (8) можно записать следующее выражение

$$|\text{tg } \delta| = 1 / \text{tg } \varphi. \tag{9}$$

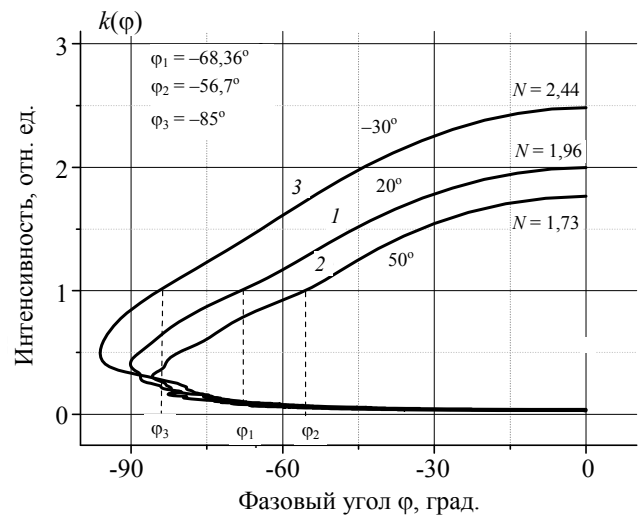


Рис. 5. Диаграмма Блэка–Николса оптической среды кукурузы для различных значений температуры.

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 5 следует, что с увеличением температуры фазовый угол уменьшается по величине, уменьшается также  $\text{tg } \varphi$ . Поэтому с ростом температуры происходит увеличение  $\text{tg } \delta$ . Для указанных на рис. 5 значениях  $\varphi$  величина  $\text{tg } \delta$  при 50 °С составляет  $\sim 0,65$ , для 20 °С  $\sim 0,4$  и -30 °С  $\sim 0,08$ .

### Обсуждение результатов

Основные параметры оптической среды поверхностной ткани семян растений представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры оптического усиления света для различных семян растений**

Культура	Температура, °С	Коэффициент усиления $k$	Частота усиления ( $k = 1$ ), МГц	Фазовый сдвиг ( $k = 1$ ) $\varphi$ , градус	$ \operatorname{tg} \delta $
Фасоль	20	1,71	0,19	-60,0	0,57
Ячмень	20	1,96	0,21	-70,3	0,35
Рожь	20	2,63	0,23	-91,6	0,028
Пшеница	20	2,1	0,21	-74,6	0,27
Кукуруза	20	1,96	0,21	-68,36	0,39
	50	1,73	0,17	-56,7	0,65
	-30	2,48	0,23	-85,0	0,08

В табл. 2 представлены дополнительные результаты исследования семян растений (фасоль, ячмень, рожь, пшеница) по фазовому сдвигу на единичной частоте усиления и соответствующие ему тангенс диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . Сравнение семян растений по частоте единичного усиления показывает, что они мало отличаются друг от друга. В среднем она имеет небольшую величину, равную ~200 кГц. В тоже время по величине фазового сдвига на единичной частоте усиления они разные. В этом плане аномальными свойствами обладают семена ржи. У них при комнатной температуре  $\varphi = -91,6^\circ$ , в результате чего  $|\operatorname{tg} \delta| = 0,028$ . Это меньше, чем у кукурузы (0,08) при температуре  $-30^\circ\text{C}$ . Сопоставление данных кукурузы по температуре показывает ее сильное влияние на потери энергии, например, при  $-30^\circ\text{C}$  значение  $|\operatorname{tg} \delta| = 0,08$  и  $50^\circ\text{C}$  его значение существенно возрастает и составляет ~0,65, т. е. увеличивается в ~8 раз.

По закону Бугера–Ламберта интенсивность света  $I_{\text{вых}}$  на выходе оптической среды, связано с интенсивностью света на ее входе  $I_{\text{вх}}$  соотношением:  $I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} \cdot \exp(-\alpha d)$ . Здесь  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $d$  – геометрическая длина оптической среды. Так как в нашем случае  $I_{\text{вых}} > I_{\text{вх}}$ , то показатель поглощения  $\alpha$  должен иметь отрицательные значения, следовательно, поверхностная ткань семян растений на этапе спада люминесценции во времени проявляет активные свойства.

**Заключение**

Выполнено исследование люминесценции семян растений (фасоль, ячмень, пшеница, рожь, кукуруза). Оптическую среду покров-

ной ткани семян растений представляли в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Его импульсную (временную) характеристику находили по кривой релаксации люминесценции. Установлено, что во временной области имеет место усиление света. Это явление проявляется и в частотной области. Коэффициент усиления в зависимости от типа семени меняется от 1,7 (фасоль) до 2,6 (рожь). Зависимость коэффициента усиления от температурная выражается в том, что при изменении ее от  $50^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$ , он меняется от 1,73 до 2,48. Данное явление можно объяснить тем, что на стадии релаксации люминесценции коэффициент поглощения оптической среды поверхности семени принимает отрицательное значение.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В.* // Научные технологии. 2017. № 8. С. 40.
2. *Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В.* // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 4.
3. *Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В.* // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 56.
4. *Burger M., Rein S., Weber S., Gräber P., Kacprzak S.* // Eur Biophys J. 2020. Vol. 49. P. 1.
5. *Tivig I., Savopol T., Kovacs E., Moisescu M. G.* // Eur Biophys J. 2020. Vol. 49. P. 105–111.
6. *Amirikia M., Shariatzadeh S. M. A., Jorsaraei S. G. A., Mehranjani M. S.* // Eur Biophys J. 2018. Vol. 47. P. 573.
7. *Rigler R., Widengren J.* // Eur Biophys J. 2018. Vol. 47. P. 479.
8. *Seelig J., Schönfeld H.* // Quarterly Reviews of Biophysics. 2016. № 4. P. E9.
9. *Hudge P. G., Lokhande M. P., Kumbharkhane A. C.* // Indian J Phys. 2012. Vol. 86. P. 813.
10. *Беляков М. В.* // Естественные и технические науки. 2015. № 11. С. 521.

## Features of the optical medium of the surface of plant seeds

*S. I. Zienko<sup>1</sup> and M. V. Belyakov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Educational Institution "MPEI" in Smolensk  
1 Energeticheskiy passage, Smolensk, 214013, Russia

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
5 1st Institutskiy proezd, Moscow, 109428, Russia  
E-mail:bmw20100@mail.ru

*Received October 13, 2021*

***It was found that the integumentary tissue of plant seeds has the property of enhancing luminescence light. This phenomenon manifests itself in both the time and frequency domain. The gain factor (in power), depending on the type of seed, varies from 1.7 (beans) to 2.6 (rye). To determine it, the optical medium of the plant seed surface was represented as a dynamic link having an input and output. The impulse (time) characteristic of the link was found by the relaxation curve of luminescence. The dependence of the gain on temperature is expressed in the fact that when it decreases from 50 °C to –30 °C, the gain increases from 1.73 to 2.48. This phenomenon can be explained by the fact that at the stage of relaxation of luminescence, the absorption coefficient of the optical medium of the seed surface takes a negative value.***

***Keywords:*** surface tissue, photoluminescence enhancement, relaxation, optical media, temperature dependence.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-47-52

### REFERENCES

1. S. I. Zienko, M. V. Belyakov, and V. V. Malyshkin, *Naukoemkie tekhnologii* **8**, 40 (2017).
2. S. I. Zienko, M. V. Belyakov, and V. V. Malyshkin, *Applied Physics*, No. 3, 4 (2018) [in Russian].
3. S. I. Zienko, M. V. Belyakov, and V. V. Malyshkin, *Usp. Prikl. Fiz.* **6**, 56 (2018).
4. M. Burger, S. Rein, S. Weber, P. Gräber, and S. Kacprzak, *Eur Biophys J.* **49**, 1 (2020).
5. I. Tivig, T. Savopol, E. Kovacs, and M. G. Moisescu, *Eur Biophys J.* **49**, 105 (2020).
6. M. Amirikia, S. M. A. Shariatzadeh, S. G. A. Jorsaraei, and M. S. Mehranjani, *Eur Biophys J.* **47**, 573 (2018).
7. R. Rigler and J. Widengren, *Eur Biophys J.* **47**, 479 (2018).
8. J. Seelig and H. Schönfeld, *Quarterly Reviews of Biophysics*, No. 4, E9 (2016).
9. P. G. Hudge, M. P. Lokhande, and A. C. Kumbharkhane, *Indian J Phys.* **86**, 813 (2012).
10. M. V. Belyakov, *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* **11**, 521 (2015).