

УДК 543.4(045)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ СПЕКТРА ДЕЙСТВИЯ ФОТОСИНТЕЗА

© 2023 г. С.И. Зиенко\*, В.Л. Жбанова\*.\*

\*Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в Смоленске,  
Энергетический проезд, 1, Смоленск, 214013, Россия

#E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принята к публикации 02.08.2023 г.

Проведено математическое исследование флуоресценции спектра действия фотосинтеза: выполнен расчет типовых спектров фотосинтеза по шкале частот для красного и синего света, осуществлен переход спектра действия фотосинтеза от длин волн к шкале частот, в результате обратного Фурье-преобразования численным методом получена кривая релаксации импульсной (временной) характеристики флуоресценции. Оказалось, что радиус-вектор модуля импульсной характеристики в полярных координатах совершает один полуоборот или половину периода колебаний света во времени. Установлено: оптическая среда растения за время релаксации имеет отрицательный объемный заряд электронов, обладает инверсными свойствами и свойствами когерентного излучения. Условие нейтральности материальной среды не выполняется. Выявлено, что коэффициент отношения переменной флуоресценции хлорофилла для красного и синего света имеет практически одно и то же значение. Анализ зависимости добротности спектра хлорофилла от частоты показывает, что потери энергии флуоресценции в синем свете существенно превышают потери энергии в красном свете. Предложенный метод может найти применение для экспресс-анализа интенсивности фотосинтеза. Также сделан вывод, что растения могут испускать сверхширокополосные сигналы. Время релаксации флуоресценции хлорофилла меньше длительности релаксации электронной поляризации в атомах (молекулах). В результате этого в оптической среде хлорофилла создается инверсия населенностей – на верхнем энергетическом уровне находится больше атомов, чем на нижнем. За счет этого происходит вынужденное испускание и усиление света излучательной рекомбинации. При этом излучение света флуоресценции становится когерентным. Все эти свойства растений рассмотрены впервые и не описаны ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.

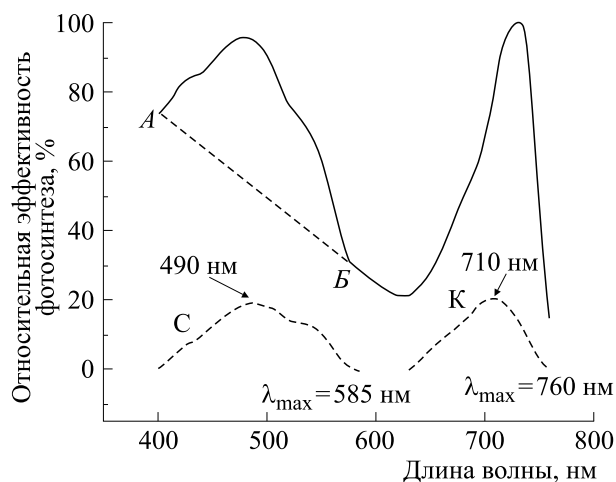
*Ключевые слова:* фотосинтез, преобразование Фурье, флуоресценция, когерентное излучение, кривая релаксации.

DOI: 10.31857/S0006302923060078, EDN: ROOPPB

Фотосинтез – преобразование зелеными растениями и некоторыми бактериями энергии света в энергию химических связей органических веществ. Он является основным механизмом в растениях, который определяет характер и степень их роста и развития, а также является комплексным показателем физиологического состояния растений. Для характеристики фотосинтетической деятельности растений используют понятие интенсивности фотосинтеза.

Известно большое количество методов позволяющих исследовать растительные организмы. Существуют электрохимические, оптические, лазерные, радиационные и другие методы исследования состояния фотосинтеза [1–4]. Одним из наиболее эффективных является метод индукци-

рованной флуоресценции [5–7]. Эффективность данного метода характеризуется высокой чувствительностью, оперативностью, кроме того, флуоресцентные измерения не причиняют вреда исследуемым организмам и способны осуществлять неразрушающий контроль. Для этого находят интенсивность флуоресценции хлорофилла при закрытых и открытых реакционных центрах ( $F_m$  и  $F_0$  соответственно). Затем определяют переменную флуоресценции ( $F_v = F_m - F_0$ ) хлорофилла в клетках. На практике оценивают отношение  $F_v/F_m$ , величина которого тесно связана с первичной продуктивностью в фотосинтезе. Параметры  $F_v$  и  $F_m$  находят по результатам измерений индукционной кривой затухания флуоресценции [5–7].



**Рис. 1.** Спектр относительной эффективности фотосинтеза (жирная линия). Прямая *АВ* – постоянная и линейная составляющая. Кривые *С* и *К* имеют по оси ординат произвольные значения.

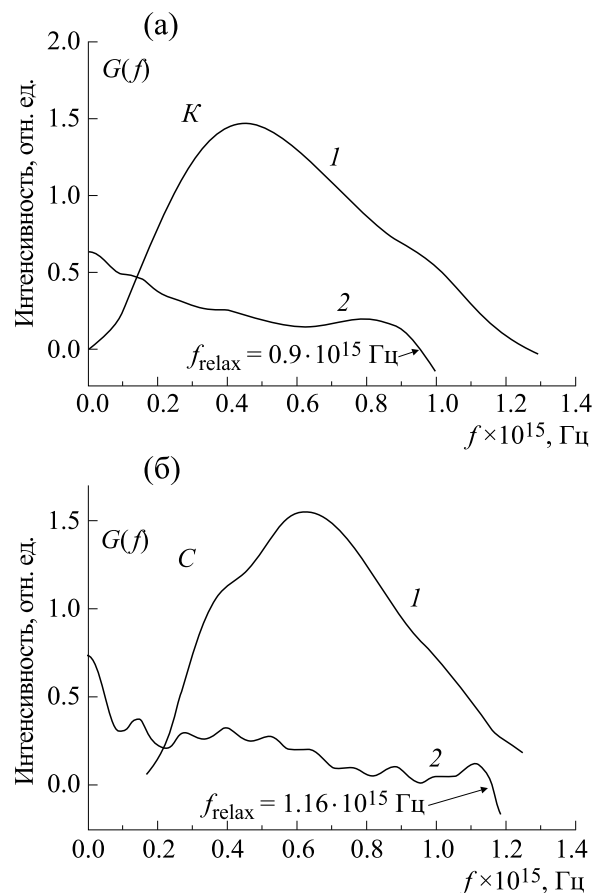
В данной работе, в отличие от известных публикаций [1–7], параметры флуоресценции определяют численным методом по спектру действия фотосинтеза, что заметно упрощает процедуру их определения. Под спектром действия фотосинтеза понимают зависимость интенсивности фотосинтеза от длины волны падающего света. Эта зависимость показывает при какой длине волны света наиболее эффективно протекают фотохимические реакции фотосинтеза. Спектр действия фотосинтеза по форме повторяет суммированные спектры поглощения его основных и вспомогательных пигментов [8].

Цель работы заключается в математическом исследовании флуоресценции спектра действия фотосинтеза.

В рамках цели поставлены следующие задачи:

- построение типовой кривой спектра действия по шкале частот;
- получение с помощью обратного преобразования Фурье временной зависимости релаксации флуоресценции во времени;
- расчет внешнего и внутреннего квантового выхода флуоресценции;
- аппроксимация зависимости скорости рекомбинации оптических электронов от их концентрации;
- расчет спада концентрации оптических электронов во времени и условий их перехода из возбужденного состояния в основное.

Данные вопросы в литературе практически не рассматривались. Между тем их решение имеет большое научное и практическое значение.



**Рис. 2.** Дифференциальные функции распределения (кривые *1*) спектра действия фотосинтеза для красного (а) и синего света (б) в диапазоне частот.

## ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРА ДЕЙСТВИЯ ФОТОСИНТЕЗА ПО ШКАЛЕ ЧАСТОТ

Хлорофилл гораздо более эффективно поглощает красную и синюю части спектра, которые наиболее эффективны для осуществления фотосинтеза. Поэтому на графике (рис. 1) типового спектра действия присутствуют два пика в красной и синей областях [8].

Для упрощения анализа спектра из жирной кривой, изображенной на рис. 1, вычитали постоянную и линейную составляющую (прямая *АВ*) фона [9]. Затем из спектра выделяли его компоненты красного (кривая *К*) и синего (кривая *С*) света.

Анализ данных проводили по шкале энергии:  $E = 1240/\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$  – наибольшее значение длины волны (рис. 1),  $E$  – в эВ. Вначале рассмотрим построение оси частот для кривой *К* (рис. 2а). Здесь  $\lambda_{\max} = 760$  нм. Начальное значение шкалы энергии находили из соотношения:  $E_0 = (1240/760) = 1.63$  эВ. Частоту находили следующим образом. Из шкалы энергии  $E$  вычитали энергию  $E_0$ , в

Таблица 1. Параметры спектральных кривых

Свет	Площадь, отн. ед.	$f_0$ , Гц $\times 10^{15}$	$\Delta f$ , Гц $\times 10^{15}$	$H$ , отн. ед.	$\mu$
Красный (К)	1.0	0.461	0.693	1.455	1.50
Синий (С)	1.0	0.623	0.675	1.565	1.08

результате получали шкалу локальной энергии  $E - E_0$ . Затем учитывали переход от энергии  $E$  к энергии  $(E - E_0)$  с помощью коэффициента  $m = E_{\pi}/(E_{\pi} - E_0)$ , где  $E_{\pi} = 1.74$  эВ – энергия, соответствующая пику спектральной кривой. После этого находили соотношение для расчета частоты  $f = mv$ , где  $v = (E - E_0)/h$ . Здесь  $h = 4.1 \cdot 10^{-15}$  эВ – постоянная Планка. Окончательно имеем  $f = (m/4.1) \cdot (E - E_0) 10^{15}$  Гц.

В расчете за единицу частоты принимали величину равную  $10^{15}$  Гц. В нашем случае  $m = 3.8$ . Аналогично строили ось частот для синего света С (рис. 2б). Здесь  $\lambda_{\max} = 585$  нм,  $m = 1.1$ ,  $E_0 = 1.96$  эВ,  $E_{\pi} = 2.53$  эВ. Спектральные кривые  $I$  (рис. 2а,б) нормировали по площади, равной единице, т.е. выполнялось условие нормировки спектра:

$$\int_0^{\infty} G(f) df = 1, \quad (1)$$

где  $G(f)$  – дифференциальная функция распределения спектра действия фотосинтеза.

Функция  $G(f)$  как для красного (К), так и синего света (С) имеет сложную форму (рис. 2а,б), Разложение  $G(f)$  с помощью программы Origin на элементарные составляющие в форме кривых Гаусса показывает трехкомпонентный характер поглощения света. Поэтому аналитическое описание функции  $G(f)$  не представляется возможным. Параметры спектральных кривых приведены в табл. 1.

Особенностью спектра действия фотосинтеза (в частотной области) является то, что его ширина на полувысоте по величине сопоставима с пиковой (несущей) частотой. Подобным свойством обладают технические средства, предназначенные для передачи, приема и обработки информации с помощью сверхширокополосных сигналов. Основным параметром сверхширокополосного сигнала является показатель широкополосности, который определяется из соотношения [10, 11]:

$$\mu = \frac{\Delta f}{f_r} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{(f_{\max} + f_{\min}) / 2}, \quad (2)$$

где  $f_r$ ,  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  – средняя, минимальная и максимальная частоты энергетического спектра соответственно;  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  – ширина полосы частот сигнала на его полувысоте.

Сигналы с показателем  $0.2 \leq \mu \leq 2.0$  называют сверхширокополосными, в английской аббревиатуре – UWB (Ultra Wideband) сигналами. При этом сверхширокополосные сигналы с  $\mu = 2$  относятся к видеосигналам, с  $0.1 \leq \mu \leq 0.2$  – к широкополосным и  $\mu \leq 0.001$  – к узкополосным.

Основное их преимущество перед традиционными узкополосными и широкополосными сигналами – это то, что сверхширокополосные сигналы переносят в  $\mu/\mu_n$  раз большее количество информации (здесь  $\mu$  и  $\mu_n$  – показатели широкополосности сверхширокополосного и узкополосного сигналов), а также обладают более высокой разрешающей способностью. В нашем случае (табл. 1), красный свет имеет  $\mu = 1.5$  и синий –  $\mu = 1.08$ . Следовательно, согласно принятой классификации, спектр действия фотосинтеза обладает сверхширокополосными свойствами.

## ОСОБЕННОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В ВИДИМОМ СВЕТЕ

Особенностью видимого диапазона света, в котором имеет место флуоресценция в растениях, являются его малые временные процессы. Например, для волны 600 нм, период колебаний равен  $\sim 2$  фс, что соответствует фемтосекундному масштабу времени. Это отражает фактически полную реализацию возможностей оптических сигналов. Один полупериод оптического колебания – представляет собой минимальную длительность оптического импульса и один период колебаний предельную «скорость» оптического отклика материальной среды [12, 13]. Эти особенности видимого света проявляются и во временных характеристиках флуоресценции, которые протекают в фемтосекундном диапазоне времени.

Импульсную (временную) характеристику флуоресценции на этапе поглощения света находим по формуле обратного преобразование Фурье:

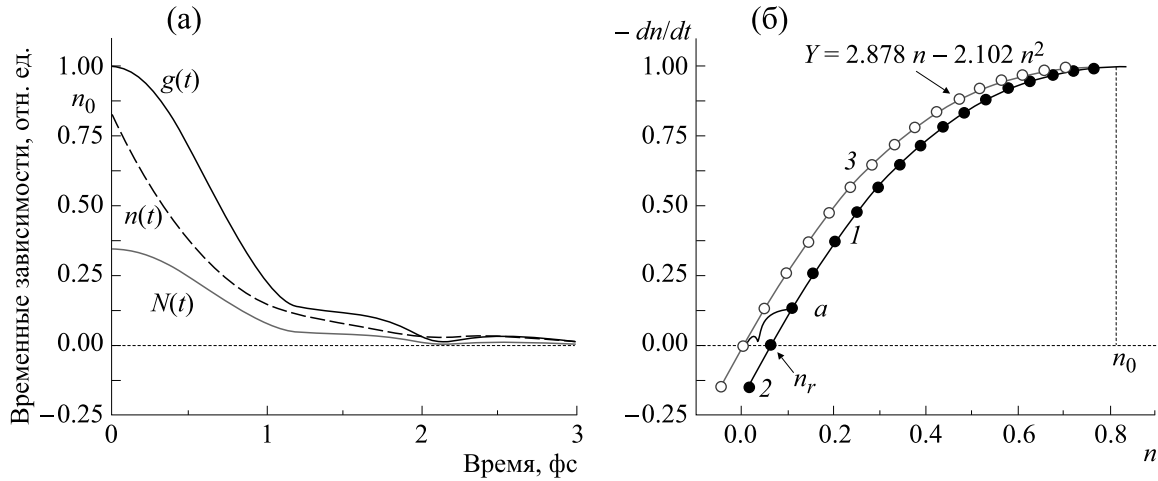


Рис. 3. (а) – Временные зависимости  $n(t)$ ,  $g(t)$  и  $N(t)$  для красного света; (б) – зависимость  $-dn/dt$  от концентрации электронов (1 – эксперимент, 2 – первая аппроксимация, 3 – вторая аппроксимация полиномом второй степени).

$$g^*(t) = \int_0^{\infty} G(f) \exp(-2\pi ft) df. \quad (3)$$

При  $t = 0$  интеграл (3) в соответствии с условием (1) равен единице, следовательно, амплитуда флуоресценции  $g^*(0) = 1$ . Соотношение (3) представим в следующем виде:  $g^*(t) = a + jb$ .

Модуль импульсной (временной) характеристики и фазовый угол  $\varphi$  находятся из соотношений:

$$g(t) = (a^2 + b^2)^{1/2}, \varphi = -\arctg(a/b). \quad (4)$$

Численное решение уравнения (3), с учетом графических зависимостей  $G(f)$ , изображенных на рис. 2а,б, представлено для красного (К) света в виде графиков модуля импульсной (временной) характеристики  $g(t)$ , на рис. 3а.

Подобную зависимость  $g(t)$  имеет флуоресценция синего света. Длительность спада интенсивности флуоресценции в обоих случаях составляет  $\sim 2$  фс. Фемтосекундный диапазон времени характерен для оптических систем видимого диапазона [14–17].

Для представления о длительности переходного процесса по числу периодов колебаний света выполняли решением интеграла (3) в полярной системе координат. График функции  $g(\varphi)$  представлен на рис. 4. Можно видеть, что годографы для красного (К) и синего (С) света по форме практически совпадают друг с другом.

Анализ годографов (рис. 4) показывает, что неоднозначное соответствие между длиной радиус-вектора  $g(\varphi)$  и углом  $\varphi$  имеет место в окрестности начала координат, размер которой не превышает 7% от начального значения вектора равного единице. При пренебрежении этим участком ра-

диус-вектор  $g(\varphi)$  в полярной системе координат совершает один полуоборот. Во временном масштабе это соответствует половине периода колебаний света. За это время оптическая среда хлорофилла переходит из закрытого состояния в открытое.

Интенсивность флуоресценции пропорциональна числу актов рекомбинации в секунду  $\sim -(dn/dt)r$ , где  $n$  – концентрация электронов, захваченных ловушками оптически активных центров [18]. В этом случае  $g(t) = -dn/dt$ . Отсюда находим соотношение для временного изменения концентрации оптических электронов от времени:

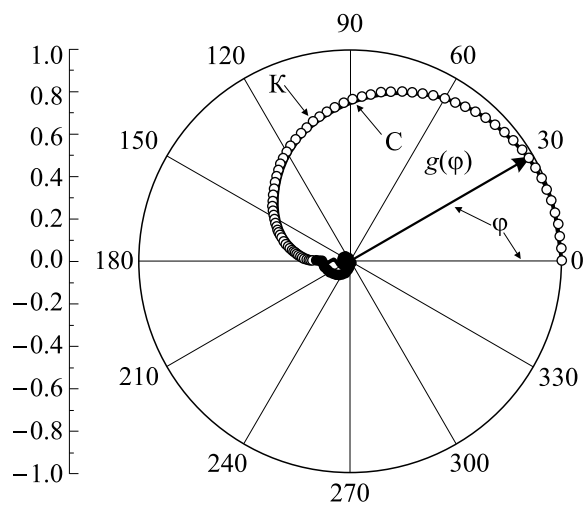


Рис. 4. Годограф импульсной (временной) характеристики флуоресценции в полярной системе координат.

Таблица 2. Параметры аппроксимации

Свет	$a$ , 1/fs	$b$ , 1/fs	$n_0$ , отн. ед.	$K_n$	$\tau_n$ , фс
Красный (К)	2.878	2.102	0.747	0.747	0.347
Синий (С)	1.970	0.887	0.895	0.895	0.365

$$n(t) = n_0 - \int_0^t g(t) dt, \quad (5)$$

где  $n_0$  – концентрация оптических электронов

при  $t = 0$ :  $n_0 = \int_0^{\infty} g(t) dt$ . Численные значения  $n_0$  для красного (К) и синего (С) света приведены в табл. 2.

График функции (5) полученный для красного света численным методом, представлен на рис. 3а, в виде пунктирной линии. Затем исключая время из рассмотрения строили график зависимости  $g(t) = -dn/dt$  от концентрации электронов  $n$ . На рис. 3б это кривая 1 (сплошная линия). Для устранения неоднородности на участке кривой 1 ниже точки «а» использовали аппроксимацию с помощью кривой 2 (жирные точки). Затем кривую 2 по оси абсцисс сдвигали на величину равную  $n_r = 0.06$  фс (рис. 3б). После этого полученную кривую 3 аппроксимировали полиномом второй степени (светлые кружки):

$$g(t) = -(dn/dt) = a_n - b \cdot n^2. \quad (6)$$

Точно такая же форма (рис. 3б) имеет место и для синего света (С). Численные значения параметров  $a$  и  $b$  для этих двух случаев представлены в табл. 2.

Левую и правую часть соотношения (6) разделим на коэффициент  $a$ , в результате можно записать соотношение:

$$-\tau_n(dn/dn) = n - (b/a)n^2. \quad (7)$$

Здесь левая часть уравнения  $-\tau_n(dn/dt)$  определяет число оптических электронов, участвующих в излучательной рекомбинации с испусканием кванта света. Они определяют концентрацию атомов на основном (равновесном) уровне  $N(t)$ . Оптическим электронам соответствует концентрация атомов на верхнем энергетическом уровне испускания  $n(t)$ . Следовательно, уравнение (7) можно представить так:

$$n(t) - N(t) = (b/a)n^2(t). \quad (8)$$

в формуле (8) правая часть равенства всегда имеет положительное значение, так как  $n(t) \geq n(t)$  (кривая  $n(t)$  всегда выше кривой линии  $n(t)$ , см. рис. 3а). поэтому оптическая среда растения имеет отрицательный объемный заряд электронов. условие нейтральности материальной среды не выполняется, что характерно для фемтосекундного диапазона времени. следовательно, время релаксации флуоресценции хлорофилла меньше длительности релаксации электронной поляризации в атомах (молекулах). в результате этого в оптической среде хлорофилла создается инверсия населенностей. здесь на верхнем энергетическом уровне находится больше атомов, чем на нижнем уровне. за счет вынужденного испускания происходит усиление света излучательной рекомбинации электронов и дырок флуоресценции. при этом излучение света флуоресценции становится когерентным.

#### ПАРАМЕТРЫ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НА ЭТАПЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА

Оптическую среду зеленого растения удобно представить для анализа в виде динамического звена, имеющего вход и выход. Во временной области для исследования инерционных свойств такого звена выполняют путем подачи на его вход сигналов в форме  $\delta$ -функции или единичной функции  $I(t)$ .

Реакция звена на  $\delta$ -функцию называют импульсной (временной)  $g(t)$  характеристикой, а на единичную функцию  $I(t)$  переходной характеристикой  $h(t)$ . Функции  $g(t)$  и  $h(t)$  связаны между собой соотношением:

$$h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (9)$$

Численно величина  $h(t)$  равна площади, ограниченной кривой  $g(t)$  (рис. 5). Импульсная характеристика имеет размерность – число фотонов в единицу времени. Поэтому  $h(\infty)$  определяет полное число поглощенных фотонов. Численное ре-

шение (9) для красного (К) и синего (С) света представлено в виде графиков  $h(t)$  на рис. 5. Коэффициент передачи динамического звена находится из соотношения:  $K_{\Pi} = h(\infty)$  [19]. Амплитуда флуоресценции в оптической активной среде

$$F_0 = \eta_0 \cdot I(0), \quad (10)$$

где внешний квантовый выход  $\eta_0 = 1/K_{\Pi} = h(\infty)$ .

Численные значения внешнего квантового выхода  $\eta_0$  для красного (К) и синего (С) цвета приведены в табл. 3.

### ПАРАМЕТРЫ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ

Внутренний квантовый выход вторичного излучения находили как:  $\eta_{\text{вн}} = g_r(n)/g(n)$ , где  $g_r(n)$  – рекомбинационная компонента излучения. С учетом соотношения (7) находим связь  $\eta_{\text{вн}}$  с концентрацией электронов  $n$ :

$$\eta_{\text{вн}} = an/(an - bn^2). \quad (11)$$

Когда  $t \cong 0$ , величина  $n = n_0$ , численное значение знаменателя в соотношении (11) равно 1 и, поэтому,  $\eta_{\text{вн}} = an_0$ . Следовательно,

$$F_m = \eta_{\text{вн}} I(0). \quad (12)$$

Численные значения  $\eta_{\text{вн}}$  и  $F_m$  для красного (К) и синего (С) света приведены в табл. 3. Из данных табл. 3 видно, что коэффициент отношения переменной флуоресценции хлорофилла  $(F_m - F_0)/F_m$  для красного и синего света имеет одну и ту же величину и, следовательно, не зависит от частоты света. Это можно объяснить тем, что природа фотофизического этапа фотосинтеза в том и другом случае имеет один и тот же характер.

### ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

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

$$r^*(f) = \int_0^{\infty} g(t) \exp(-2\pi jft) dt. \quad (13)$$

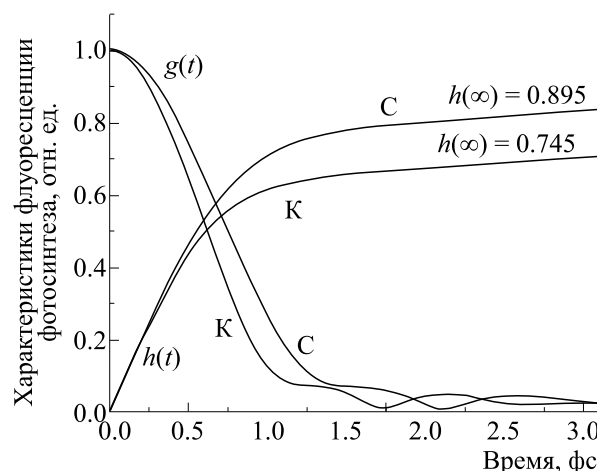


Рис. 5. Импульсные  $g(t)$  и переходные  $h(t)$  характеристики флуоресценции фотосинтеза.

Частотная характеристика имеет вид:

$$r^*(f) = A + j \cdot B. \quad (14)$$

Фазовый угол:

$$\phi = -\arctg(B/A).$$

Инерционные свойства люминесценции оценивали по зависимости группового времени задержки от частоты. В общем случае групповое время задержки определяется первой производной фазового спектра со знаком «минус» [20]:

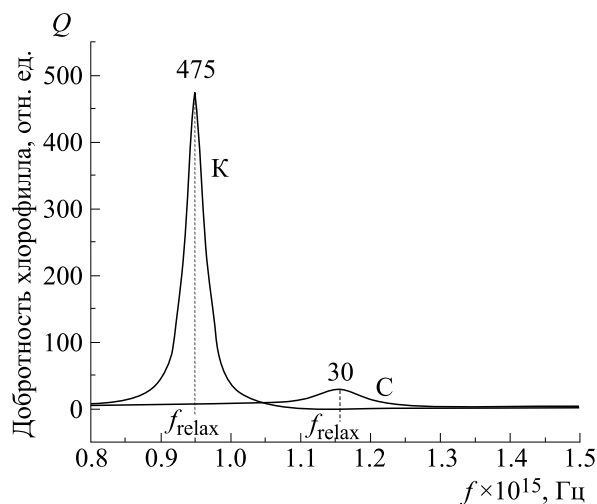
$$\tau(f) = -\frac{1}{360} \frac{d\phi}{df} \quad (15)$$

Здесь фазовый угол  $\phi(f)$  измеряется в угловых градусах, нормирующий множитель имеет величину  $360^\circ$ .

Графики группового времени задержки для красного (К) и синего (С) света в виде кривой 2 приведены на рис. 2а,б. Здесь можно наблюдать, что, с ростом частоты групповое время задержки по величине уменьшается и принимает нулевое значение, когда частота сигнала равна частоте релаксации  $f_{\text{relax}}$  (точка пересечения кривой 2 с осью абсцисс). Нулевая временная задержка означает отсутствие взаимодействия света с материальной средой растения. Это означает, что при частоте света, когда она превышает по величине частоту релаксации, электронная поляри-

Таблица 3. Значения квантового выхода и переменных флуоресценции

Свет	$\eta_0$	$\eta_{\text{вн}}$	$F_0$ , ф/с	$F_m$ , ф/с	$F_v = F_m - F_0$ , ф/с	$F_v/F_m$
К	1.347	2.135	1.347	2.135	0.788	0,369
С	1.127	1.763	1.127	1.763	0.636	0.359



**Рис. 6.** Зависимость добротности хлорофилла от частоты для красного (кривая К) и синего (кривая С) света.

зация хлорофилла теряет свой отклик. На частоте релаксации заметно уменьшаются активные потери. Для сравнения красного (К) и синего (С) света по этому параметру воспользуемся понятием добротности диэлектрика  $Q = B/A$ . Графическая зависимость добротности  $Q$  от частоты представлена на рис. 6.

Из графика (рис. 6) видно, что пиковое значение добротности красного света превышает добротность синего света в  $\sim 15.8$  раз. На такую же величину потери энергии в синем свете превышают потери энергии в красном свете.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен расчет типовых спектров фотосинтеза по шкале частот для красного и синего света. Показатель широкополосности у них составляет 1.5 и 1.08 соответственно, и поэтому они обладают свойством сверхширокополосных сигналов.

2. Годографы импульсной (временной) характеристики для красного и синего света в полярной системе координат по форме совпадают друг с другом, и совершают всего один полуоборот. Во времени это соответствует половине периода световых колебаний.

3. Получены соотношения для расчета минимальной переменной флуоресценции  $F_0$ , на этапе поглощения света и максимальной величины  $F_m$  в активной среде хлорофилла. Установлено, что коэффициент отношения переменной флуоресценции хлорофилла  $(F_m - F_0)/F_m$  для красного и синего света имеет одну и ту же величину.

4. Анализ зависимости добротности хлорофилла от частоты показывает, что потери энергии флуоресценции в синем свете существенно превышают потери энергии в красном свете.

В результате пришли к выводу, что растения могут испускать сверхширокополосные сигналы. При этом установлено, что оптическая среда растения имеет отрицательный объемный заряд электронов. Условие нейтральности материальной среды не выполняется. Здесь на верхнем энергетическом уровне находится больше атомов, чем на нижнем уровне. За счет этого происходит вынужденное испускание и усиление света излучательной рекомбинации. При этом излучение света флуоресценции становится когерентным.

Анализ зависимости добротности хлорофилла от частоты показывает, что потери энергии флуоресценции в синем свете существенно превышают потери энергии в красном свете, что требует дальнейшего исследования этого явления.

Все эти свойства растений рассмотрены впервые и не имеют аналогов ни в отечественной, ни в зарубежной литературе.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит экспериментов с использованием людей и животных в качестве объектов исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Rubin, Photochem. Photobiol., **28** (6), 1021 (2008). DOI: 10.1111/j.1751-1097.1978.tb07741.x
2. Д. И. Орехов, Г. А. Калабин и Л. М. Макальский, Вестн. РУДН, № 1. 24 (2015).
3. J. H. C. Goedheer, Annu. Rev. Plant Physiol., **23** (1), 87 (2003). DOI: 10.1146/annurev.pp.23.060172.000511
4. M. Seibert and R. R. Alfano, Biophys. J., **14** (4), 269 (1974). DOI: 10.1016/S0006-3495(74)85915-1
5. А. Б. Рубин, Соросовский образоват. журн., № 4, 7 (2000).
6. А. Б. Рубин и Т. Е. Кренделева, Успехи биол. химии, **43**, 225 (2003).
7. Е. С. Соломонова, автореферат дисс. ... канд. биол. наук (Севастополь, 2021).
8. Р. А. Карначук и И. Ф. Головацкая, Физиология растений, **45** (6), 925 (1998).
9. О. А. Букин, М. С. Пермяков, А. Ю. Майор и др., Оптика атмосферы и океана, **14** (3), 223 (2001).

10. О. В. Лазоренко и Л. В. Черногор, Радиофизика и радиоастрономия, **13** (2), 166 (2008).
11. *Ultra-wideband Radar Technology*, Ed. by J. D. Taylor (Boca Raton, CRC Press, 2000). <https://doi.org/10.1201/9781420037296>.
12. В. Г. Беспалов, С. А. Козлов, Н. В. Петров и др., *Фемтосекундная оптика и фемтотехнология* (Университет ИТМО, СПб., 2018).
13. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, А. А. Шимко и др., Письма в ЖЭТФ, **110** (1), 9 (2019).
14. С. И. Зиенко и В. Л. Жбанова, Автометрия, **58** (2), 24 (2022). DOI: 10.15372/AUT20220204
15. S. I. Zienko and V. L. Zhbanova, J. Commun. Technol. Electronics, **67** (3), 335 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-39-46
16. С. И. Зиенко и В. Л. Жбанова, Биофизика, **68** (1), 98 (2023). DOI: 10.31857/S0006302923010106
17. С. И. Зиенко, В. Л. Жбанова и И. В. Якименко, Прикладная информатика, **18** (3), 61 (2023). DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-3-61-71
18. К. В. Шалимова, *Физика полупроводников* (Энергия, М., 1971).
19. М. П. Туманов, *Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: Учебное пособие* (МГИЭМ, М., 2005).
20. С. И. Баскаков, *Радиотехнические цепи и сигналы* (Высшая школа, М., 2000).

## Exploring the Fluorescence Action Spectrum of Photosynthesis

S.I. Zienko\* and V.L. Zhbanova\*

*\*Smolensk Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Energeticheskii proezd 1, Smolensk, 214013 Russia*

The mathematical study of the fluorescence action spectrum of photosynthesis was performed. The calculation of typical spectra for photosynthesis was done for the red and blue frequencies. The transition of the action spectrum of photosynthesis from wavelengths to the frequency scale was completed. A numerical method based on the use of the inverse Fourier transform approach was used to obtain a relaxation curve for the impulse (time) characteristic of fluorescence. It turned out that the radius vector of the module of impulse response in polar coordinates makes one half-turn or half of the period of light oscillations in time. It was established that the optical medium of a plant during the relaxation time has a negative space charge of electrons, inverse properties and properties of the coherent radiation. The condition of neutrality of the material environment is not met. It was found that the ratio of the variable chlorophyll fluorescence for red and blue light has almost the same value. An analysis of the dependence of the quality factor of the chlorophyll spectrum on frequency shows that the fluorescence energy loss in blue light significantly exceeds the energy loss in red light. The proposed method can be used for express analysis of the intensity of photosynthesis. It was also concluded that plants can emit ultra-wideband signals. The relaxation time of chlorophyll fluorescence is shorter than the relaxation time of electronic polarization in atoms (molecules). As a result, a population inversion is created in the optical medium of chlorophyll - there are more atoms in the upper energy level than in the lower level. Due to this, stimulated emission and amplification of light of the radiative recombination occur. In this case, the emission of fluorescence light becomes coherent. All these properties of plants are considered for the first time and have not been described either in domestic or in foreign articles.

*Keywords: photosynthesis, Fourier transform, fluorescence, coherent radiation, relaxation curve*