

07;12  
©1994

## ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ РАСТЕНИЙ В ЖИВОМ (IN VIVO) И НЕЖИВОМ (IN VITRO) СОСТОЯНИЯХ

*В.Х.Шпунт, Ю.В.Рудь, В.Ю.Рудь*

Продолжая тему, затронутую в [1,2], мы поставили цель — выявить особенности излучательной рекомбинации (ИР) в зеленых (живых) и сухих (неживых) листьях растений, и таким образом фактически проследить “затухание жизни” оптическим методом. На наш взгляд, эта работа должна, помимо огромной практической значимости, иметь и научную ценность, так как по ИР можно определить, например, энергетические уровни, ответственные за основные жизненно важные процессы живой ткани, включая клеточное дыхание [3].

Исследования ИР проводились на большом количестве разных видов растений в зависимости от их состояния (in vivo — in vitro), температуры, энергии и интенсивности возбуждения и т.д. ИР анализировалась решеточным спектрометром и детектировалась фотоэлектронным умножителем ФЭУ-62. Спектральное разрешение установки было не хуже 1 мэВ. Для возбуждения спектров ИР использовалось стационарное излучение аргонового и гелий-неонового лазеров с длинами волн ( $\lambda_B$ ): 458, 477, 488, 497, 515 и 630 нм. Спектральные зависимости стационарной ИР исследовались в температурном диапазоне от 77 до 300 К. Интенсивность возбуждения контролировалась в пределах от 1 до 100 мВт/см<sup>2</sup>.

Как видно из таблицы, на всех исследованных образцах наблюдалось изменение в соотношении интенсивностей составляющих спектров ИР  $I_2/I_1$  ( $I_2$  — интенсивность ИР при  $\hbar\omega_2$ ,  $I_1$  —  $\hbar\omega_1$ ) в достаточно широких пределах от 0.69 до 3.85. Эта особенность, по-видимому, отражает различия в биохимических процессах жизнеобеспечения изученных растений. Показано также, что изменение плотности потока возбуждающего излучения  $L$  не сказывается на спектральном контуре ИР растений (рис. 1, кривые 1 и 2). Интенсивность ИР при этом растет пропорционально  $L$  в области обеих компонент. Энергетическое положение максимумов ИР  $\hbar\omega_1$  и  $\hbar\omega_2$  живых листьев не зависит от энергии возбуждающих излучательную рекомбинацию фотонов. Наря-

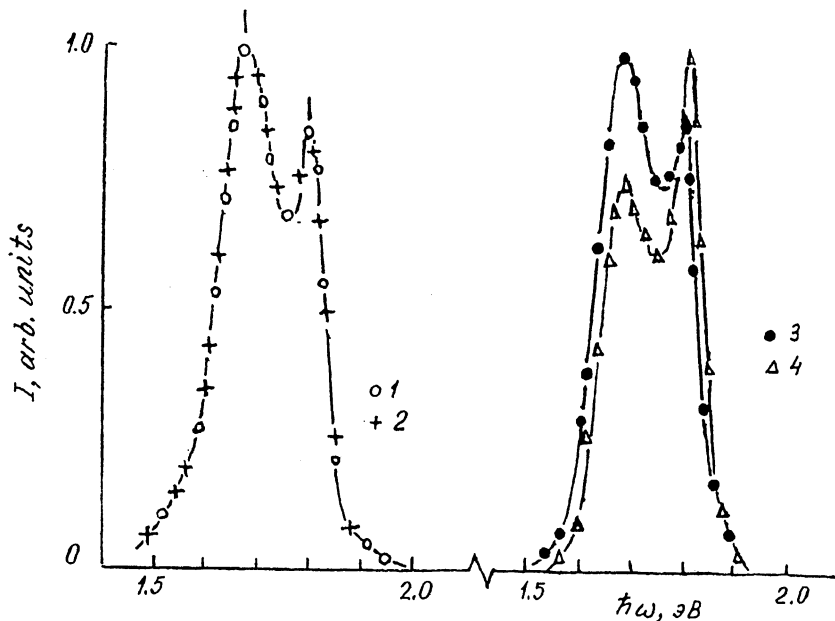


Рис. 1. Спектральная зависимость ИР зеленых листьев *Fragaria vesca* L при комнатной температуре (плотность возбуждения  $L$ , отн. ед.: 1, 3, 4 —  $L_0 = 10$  мВт/см<sup>2</sup>; 2 —  $0.07 L_0$ ;  $L_0$  — исходная плотность возбуждения. Геометрия возбуждения: 1-3 — верхняя часть листа, 4 — нижняя часть листа;  $\lambda_B = 630$  нм).

ду с этим было установлено, что для всех исследованных образцов живых объектов характерна эффективная, видимая глазом, ИР в красной области спектра (см. таблицу и рис. 1). Спектральная характеристика ИР включает две перекрывающиеся полосы, энергетическое положение максимумов которых  $\hbar\omega_1$  и  $\hbar\omega_2$ , и соответствующие им полуширины  $\delta_1^{ДВ}$  и  $\delta_2^{КВ}$  практически не изменяются от образца к образцу и, по-видимому, являются типичными для зеленых листьев всех растений (рис. 1).

Для зеленых листьев была обнаружена также зависимость спектров ИР от того, с какой стороны листа возбуждается люминесценция. При переходе от возбуждения ИР с верхней к нижней поверхности всех изученных листьев всегда наблюдается усиление вклада коротковолновой компоненты  $\hbar\omega_2$ . Это обстоятельство, по-видимому, свидетельствует о том, что регистрируемое из люминесценции протекание биохимических процессов по толщине листа неравномерное.

Люминесцентные свойства живых растений (верхняя часть) при  $T = 300$  К

№	Вид растения	$h\omega_1$ , эВ	$\delta_1^{ДВ}$ , мэВ	$h\omega_2$ , эВ	$\delta_2^{КВ}$ , мэВ	$I_2/I_1$
1	<i>Vaccinium-vitisidaed</i> L	1.680.	62	1.802	38	0.69
2	<i>Pinus</i>	1.682	58	1.801	40	1.14
	<i>silvestris</i> L	1.682	58	1.801	40	1.14
3	<i>Driopteris</i>	1.675	57	1.800	42	0.85
	<i>filix-max</i> Schott L					
4	<i>Fragaria</i>	1.678	55	1.800	35	0.88
	<i>vesca</i> L					
5	<i>Lucopersicon</i> <i>esculentum</i> L	1.680	35	1.800	40	1.10
6	<i>Petroselinum</i> L	1.680	58	1.800	30	1.64
7	<i>Calendula</i> <i>officinalis</i> L	1.674	50	1.800	25	0.72
8	<i>Brassica</i> <i>sylvestris</i> L	1.672	45	1.810	30	3.85

Весьма интересными оказались результаты исследования зависимости ИР от температуры листьев. Измерения проводились в широком температурном диапазоне, захватывающем несвойственные живым растениям низкие температуры (300–77 К). Было показано, что при понижении температуры возгоралась длинноволновая компонента спектра ИР (рис. 2, кривая 3). При этом интенсивность коротковолновой компоненты в указанном диапазоне температур возрастала намного слабее. В температурной зависимости интенсивности длинноволновой компоненты спектры от 300 до 150 К наблюдался выраженный экспоненциальный участок с энергией активации  $\simeq 50$  мэВ. При  $T < 150$  К рост интенсивности ИР в области максимума  $h\omega_1$  практически прекращается. Такое поведение спектра ИР при изменении температуры оказалось типичным для всех исследуемых образцов (in vivo). Все результаты были хорошо воспроизводимы при многократном термоциклировании образцов в диапазоне 300–77 К и удивительно стабильны как по всей поверхности образцов, так и от образца к образцу. Характерное поведение ИР от температуры для коротковолновой составляющей спектра  $h\omega_2$  отличалось от аналогич-

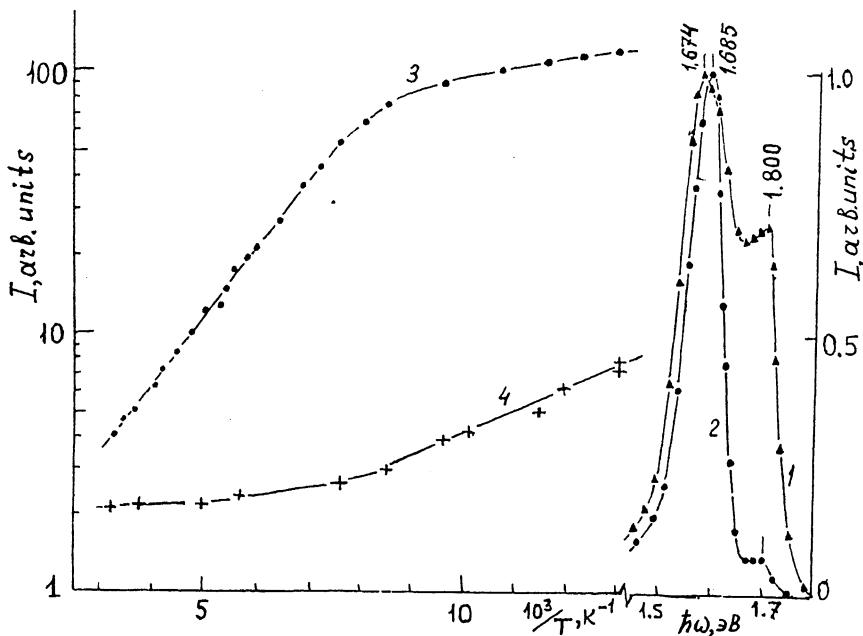


Рис. 2. Влияние температуры на спектральные зависимости (1 —  $T = 300$  К, 2 —  $T = 77$  К) и интенсивность ИР листьев *Calendula officinalis* L. (3 —  $\hbar\omega_1$ , 4 —  $\hbar\omega_2$ ).

ной зависимости для длинноволновой составляющей (рис. 2, кривые 3 и 4).

Энергетическое положение максимума длинноволновой составляющей ИР зеленых растений с понижением температуры смещалось в коротковолновую область с коэффициентом  $\alpha \simeq 5 \cdot 10^{-5}$  эВ/К (рис. , кривые 1 и 2), а сама полоса сужалась. В то же время, как это видно из рис. 2, изменение температуры практически не влияло на положение максимума  $\hbar\omega_2$ , что свидетельствует о различии в ответственных за длинноволновую и коротковолновую составляющие механизмах ИР.

Сушка и наступающее за ней отмирание растений вызывает тушение ИР и, в первую очередь, ее длинноволновой компоненты (рис. 3). При этом спектр излучения смещается в коротковолновую спектральную область с  $\hbar\omega > 2$  эВ. И, наконец, в полностью высушенном листе (рис. 3, кривая 3) характерная для живых растений дублетная структура исчезает и происходит возгорание ИР в области энергий фотонов 2.1–2.3 эВ.

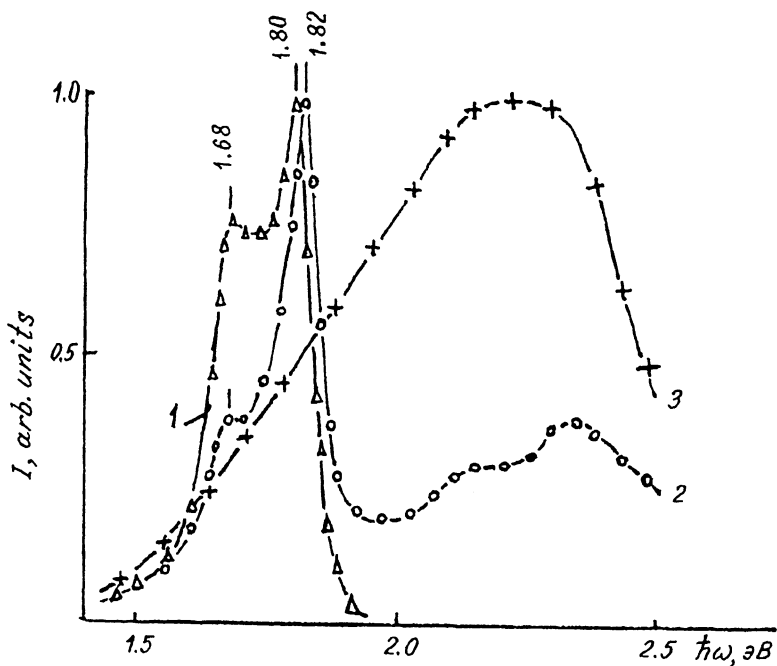


Рис. 3. Спектральные зависимости ИР листа *Lucopersicon esculentum* L при комнатной температуре (1 — зеленый лист, 2 — вялый, 3 — высушенный лист).

Спектр ИР для растений (*in vitro*) во многом напоминает спектр люминесценции кожи человека [2]. Это кажется удивительным, хотя хорошо известно, что, например, молекула хлорофилла состоит из атомов углерода и азота, соединенных в сложное кольцо; она очень близка по построению к гему красного пигмента — гемоглобина, содержащегося в эритроцитах, но в отличие от гема содержит в центре кольца вместо атома железа атом магния, связанный с двумя или четырьмя атомами азота [4].

В предыдущей работе мы попытались по спектрам ИР выявить отличительные черты кожи *in vivo* от кожи *in vitro*. Однако каких-либо различий в полученных спектрах ИР кожи найти не удалось. Это значит, что на тончайшем слое кожи человека ( $d \approx 1$  мкм) никакие биохимические реакции, ответственные за жизнедеятельность человека, не происходят. Хочется подчеркнуть, что в данном случае речь не идет о более глубоких слоях кожи. Совершенно другую картину мы имеем в растениях. Как видно из результатов данной работы, характерный спектральный контур ИР для

находящихся в живом состоянии растений резко отличается от излучательной рекомбинации, свойственной мертвым тканям этих же растений. Это обстоятельство может быть основой для дальнейшего прогресса в исследованиях биологических объектов физическими методами.

### Список литературы

- [1] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 56.
- [2] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 50.
- [3] Медицинская биофизика. / Под редакцией В.О.Самойлова. Л., 1986. С. 103.
- [4] Вилли К., Детье В. Биология. М., 1975. С. 92.

Физико-технический  
институт им.А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
3 июня 1994 г.

