

07;12
©1994

ОСОБЕННОСТИ В КИНЕТИКЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЙ ОТТОРГНУТЫХ ЛИСТЬЕВ

В.Х.Шпунт, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь

Как было установлено в [1], при фотовозбуждении зеленых листьев оптическим излучением с энергией фотонов $\hbar\omega > 1.96$ эВ возникает интенсивная красная фотолюминесценция, состоящая из двух перекрывающихся полос. В настоящей работе, являющейся логическим развитием исследований растительного мира с помощью объективных физических методов в плане установления закономерностей перехода *in vivo* \rightarrow *in vitro*, представлены результаты изучения кинетики фотолюминесценции (ФЛ) отторгнутых зеленых листьев, в которых в условиях комнатной температуры возникают процессы "затухания" биологических процессов.

В качестве объектов исследований были взяты листья различных растений. При этом было установлено, что все рассматриваемые ниже на примере листьев земляники (*Fragaria vesca* L) закономерности ФЛ оказываются одинаковыми для изученных объектов разной биологической природы. Фотолюминесценция возбуждалась излучением гелийнеонового или аргонового лазеров, спектральные зависимости с разрешением не ниже 1 мэВ исследовались при комнатной температуре непосредственно с момента отторжения зеленых листьев от растения в зависимости от времени их выдержки.

На рис. 1 представлены типичные спектральные зависимости интенсивности стационарной фотолюминесценции листа земляники еще связанного с растением ($t = 0$) и в последующий период времени (до 30 суток) после его отторжения. Главная закономерность заключается в том, что спектральный контур красной ФЛ оказывается практически нечувствительным к процессу усыхания листьев. Действительно, спектральное положение максимумов длинноволновой $\hbar\omega_1 = 1.67$ эВ и коротковолновой $\hbar\omega_2 = 1.80$ эВ полос и их полуширины на полувысоте ($\delta_1 \simeq 50-55$ мэВ и $\delta_2 \simeq 20-25$ мэВ) остаются практически неизменными при изотермическом процессе сушки листьев в условиях комнатной температуры и временах до 30 суток. Следовательно, как в зеленых листьях, находящихся в биологическом кон-

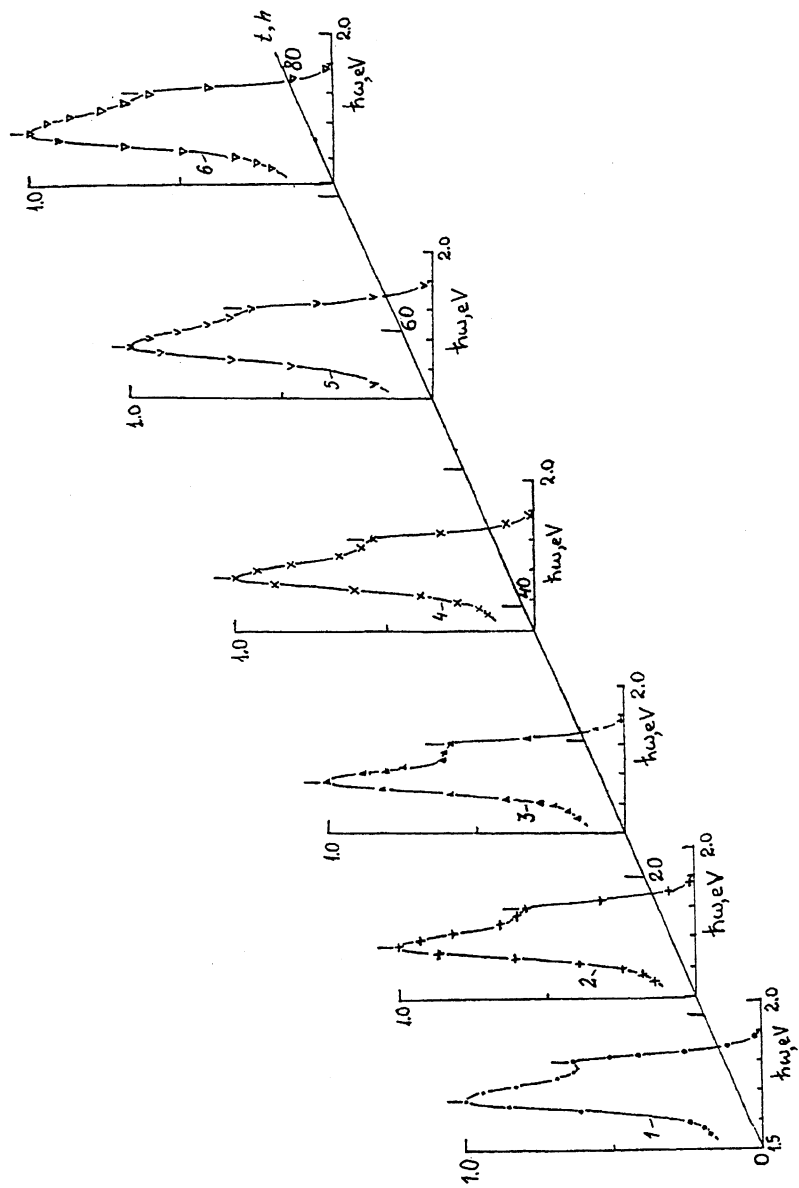


Рис. 1. Спектральные зависимости стационарной ФЛ листьев *Phragaria vesca* L. В зависимости от времени их выдержки при $T = 300$ К.
 t, ч: 1 — 0, 2 — 11.5, 3 — 23.4, 4 — 38.2, 5 — 55, 6 — 71.

также со своим растением, так и в высушенном состоянии, спектральный контур красной ФЛ сохраняется. Наличие "красной" компоненты ФЛ в сухом листе позволяет также сделать вывод о том, что ответственный за нее излучательный процесс сохраняется при переходе *in vivo* → *in vitro*.

Соотношение интенсивностей ФЛ в области максимумов I_2/I_1 со временем выдержки листьев t (как видно из рис. 2, кривая 4) сохраняется практически постоянным, а коротковолновый максимум $\hbar\omega_2$ с увеличением t становится спектрально менее выделенным от доминирующей длинноволновой компоненты $\hbar\omega_1$ (рис. 1).

На рис. 2 представлены также временные зависимости интенсивностей I_2 и I_1 при фиксированной температуре листьев. Сходный характер этих зависимостей является следствием сохранения во времени их соотношения. На основании изотермических зависимостей $I_1(t)$ и $I_2(t)$ можно заключить, что переход *vivo* → *vitro* в плане закономерностей ФЛ сложный и включает как минимум две различные стадии. Первая стадия сопровождается возгоранием ФЛ и длится около 23 ч. При этом интенсивность стационарной ФЛ увеличивается почти вдвое (рис. 2). В диапазоне времени выдержки от 1.5 до 12 ч была обнаружена сложная кинетика установления стационарных значений I_1 и I_2 после включения возбуждающего люминесценцию излучения. Состояла она в том, что после включения возбуждающего излучения интенсивность фотолюминесценции I_1 и I_2 падала так, что ее стационарное значение I_∞ устанавливалось за времена $t_{ex} \sim 30-400$ с, причем время достижения стационарных значений с ростом времени выдержки листа $t > 1.5$ ч вначале увеличивалось, проходило через максимум вблизи $t \simeq 6-8$ ч, а затем понижалось настолько, что в области $t > 12-15$ ч стационарное значение интенсивности ФЛ устанавливалось практически мгновенно, т.е. кинетика уже не наблюдалась. Пример кинетических зависимостей ФЛ приведен на рис. 3, из которого следует, что процесс спада интенсивности следует экспоненциальному закону

$$I_{1,2} = I_0 \exp(-t_{ex}/\tau_1),$$

где I_0 — значение интенсивности ФЛ в момент включения возбуждающего излучения, а τ_1 — время релаксации. При временах выдержки $t \simeq 6$ ч величина $\tau_1 = 30$ с, при $t \simeq 8$ ч происходило ее увеличение до $\tau_1 \simeq 100$ с, а при $t \simeq 9$ ч снова значение τ_1 понижалось, так что при достижении $t \simeq 12$ ч кинетика ФЛ после включения возбуждающего излучения уже не обнаруживалась. В области проявления кинетики в спаде ФЛ на кривых $I_1(t)$ и $I_2(t)$ возникает "провал" (рис. 2, кривые 1-3), когда интенсивность излучения спадает с характерным временем τ_1 . Эта особенность может быть про-

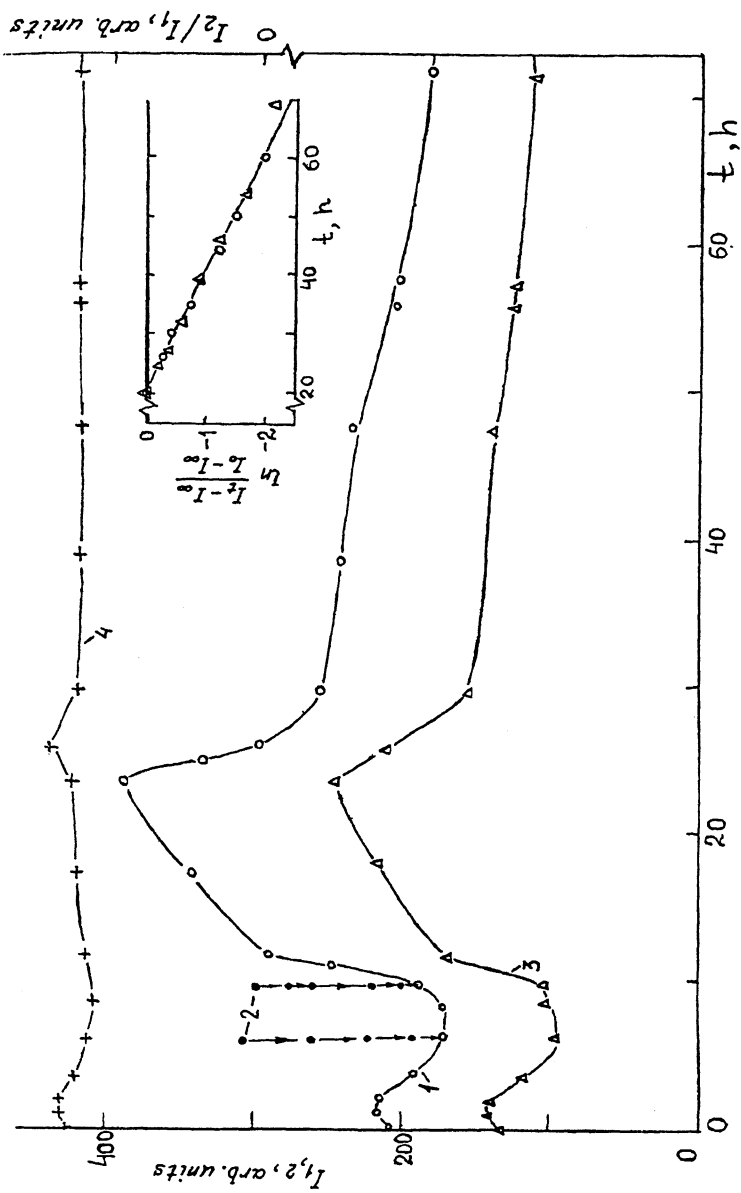


Рис. 2. Зависимости интенсивности ФЛ I_1 (1 — стационарные и 2 — нестационарные значения) и I_2 (3 — стационарные значения), а также соотношения I_2/I_1 (4) для листьев *Fragaria vesca* L. от времени их выдержки. На вставке дана зависимость $\ln \frac{I_2 - I_\infty}{I_0 - I_\infty}$ от t , где I_0 , I_t — значения интенсивности ФЛ в начале спада ($t_0 \approx 23$ ч) и в последующие моменты времени $t > t_0$, I_∞ — стационарное значение интенсивностей I_1 и I_2 при $t \geq 700$ ч.

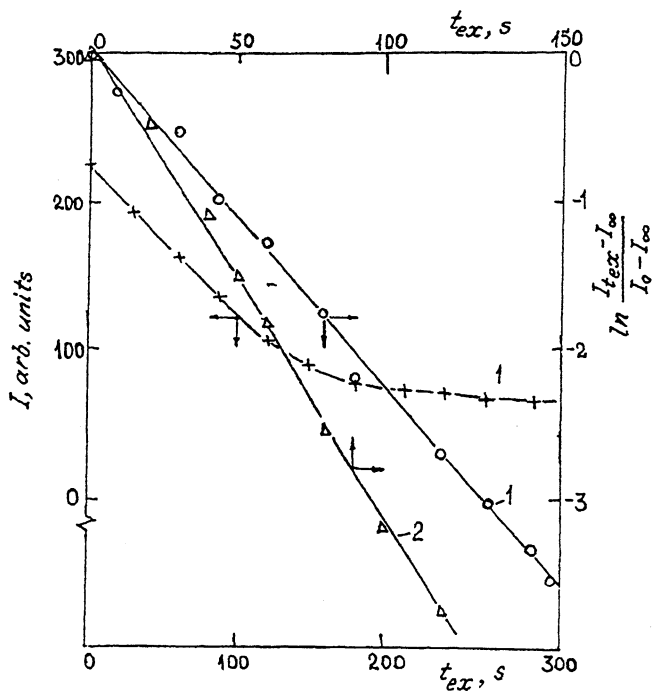


Рис. 3. Зависимости интенсивности ФЛ от времени действия возбуждающего излучения t_{ex} на отторгнутый лист *Fragaria vesca* L., где I_0 — интенсивность при включении возбуждения $t_{ex} = 0$, I_t — в момент времени t_{ex} и I_∞ — стационарное значение интенсивности ФЛ при $T = 300$ К.

t , ч: 1 — 8, 2 — 6.

явлением усиления безызлучательного канала рекомбинации вследствие процесса угасания жизни. Примечательно, что при $t > 12$ ч этот эффект исчезает.

С ростом времени выдержки листьев $t > 25$ ч интенсивности излучательных переходов в области $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$, пройдя через максимум, обнаруживают плавное снижение до значений, характерных для зеленых листьев в исходном состоянии. Как видно из рис. 2, спад I_1 и I_2 с ростом t также описывается экспоненциальным законом

$$I_{1,2} = I \exp(-t/\tau_2),$$

где τ_2 — время релаксации интенсивности ФЛ с ростом t . Следует подчеркнуть, что величины τ_2 одинаковы для обоих излучательных переходов $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ и достигают $\approx 7 \cdot 10^4$ с. На этой стадии термообработки ($t > 30$ ч) кинетика изменения интенсивности фотолюминесценции уже

всецело определяется биологической средой и не зависит от возбуждающего фотолюминесцентного излучения.

Таким образом, в отторгнутых от растений листьях при фотовозбуждении существует яркая красная фотолюминесценция, временная зависимость интенсивности которой включает две стадии: вначале интенсивность ФЛ возрастает, а затем спадает, однако в течение длительного пребывания в условиях комнатной температуры не падает ниже исходного значения, характерного для живого растения. Этот факт может стимулировать расширение изучения возможностей практического использования люминесцентных свойств растительности.

Список литературы

- [1] Шпунт В.Х., Рудь Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 13. С. 56–59.

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

Поступило в Редакцию
7 июля 1994 г.
