

Член-корреспондент АН СССР Г. А. ТИХОВ

СПЕКТР САМОИЗЛУЧЕНИЯ (ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ) РАСТЕНИЙ В КРАСНЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧАХ

В моих статьях (¹) воспроизведены снимки зелени и цветов растений, полученные в их собственном излучении красных и инфракрасных лучей. Следующим шагом в изучении этого явления было получение спектра флуоресценции растений. Для этого, как и в 1948 г., растение закрывалось флуоресцентным ящиком, описанным в указанных статьях. Напомню вкратце его устройство. Это — деревянный ящик без дна, но с глухой крышкой. Одна из стенок ящика сделана наклонной, и в нее вставлен наливной фильтр с водным раствором медного купороса такой концентрации, чтобы он полностью поглощал крайние красные и инфракрасные лучи.

В крышку ящика герметически вставлен коллиматор светосильного спектрографа, заряженного пластинкой, чувствительной к красным и инфракрасным лучам. Изучаемое растение накрывается ящиком, который ориентируется так, чтобы наливной фильтр был обращен к солнцу. Таким образом, растение облучается более коротковолновыми лучами солнца, но совершенно не получает лучей красных и инфракрасных. Следовательно, растение может дать спектр в красных и инфракрасных лучах только за счет самоизлучения. Для контроля в тех же условиях фотографируется спектр гипсовой пластинки. Для этих снимков применяется широкая щель и выдержка в несколько секунд для гипса и в несколько минут для растения.

До или после этих снимков наливной фильтр убирают, щель сужают и снимают спектры гипсовой пластинки и исследуемого растения со сравнительно малыми выдержками. Эти спектры гипса служат для фотометрической обработки как спектра флуоресценции, так и спектров отражения растения. На рис. 1 представлен увеличенный позитивный отпечаток с одного из негативов. Спектры 1, 2, 3 относятся к гипсу при полном солнечном освещении; спектры 10, 11, 12 — к канадской ели при полном солнечном освещении. Спектры 4—9 сняты при вставленном наливном фильтре, причем спектры 4, 5 и 6 относятся к гипсу, а спектры 7, 8 и 9 — к канадской ели. Ширина щели для спектров 1—3 и 10—12 равнялась 0,06 мм, а для спектров 4—9 0,10 мм.

При больших выдержках синие и фиолетовые лучи (левая сторона спектров на рисунке) выходят сильно передержанными и дают большие ореолы, замыающие красные и инфракрасные лучи. Для избежания этого при фотографировании всего негатива перед щелью помещается светофильтр, очень слабо окрашенный аураминоом. Эта краска сильно ослабляет лучи синие и фиолетовые, но немного пропускает область кальциевых линий солнечного спектра *H* и *K*, что весьма полезно, так как дает опору для определения длины волны флуоресценции. Спектры 1—3 и 10—12 доходят (справа) до крайних красных лучей ($\lambda = 760 \text{ м}\mu$). На спектрах гипса 4—6 эти лучи полностью отсутствуют, чего и надо было ожидать, так как они совершенно поглощены наливным фильтром. В спектрах же ели 7—9, снятых также через наливной фильтр, видна светлая полоса в крайних красных лучах. Это и есть полоса самоизлучения ели.

Для характеристики самоизлучения надо найти длину волны его полос и выразить их энергию по отношению к энергии какого-нибудь определенного участка солнечного спектра.

Определение длины волны полос самоизлучения

Применявшийся нами спектрограф имеет очень небольшую дисперсию: длина спектра на фотопластинке между ливнями K (393,4 мμ) и A (759,4 мμ) равна всего 5,80 мм. Благодаря присутствию на спектрах самоизлучения (7—9 на рис. 1) линий K и H (396,8 мμ) можно войти в дисперсионную кривую и снять длину волны полос самоизлучения. Следующим шагом в наших работах был переход к спектрографу с дисперсией в 3 раза большей, и первые опыты с ним показали, что хорошие спектры можно получить в несколько минут, не подвергая, таким образом, растение опасности задохнуться во флуоресцентном ящике. К тому же в ящике имеется вентиляционная труба, не пропускающая света.

Определение энергетической отдачи полос самоизлучения

За эталон сравнения я выбрал энергию солнечного света, облучающего растение, т. е. энергию солнечного света после его прохождения через наливной фильтр. Следовательно, наша задача сводится к нахождению отношения энергии самоизлучения к энергии солнечного света, прошедшего через наливной медно-купоросный светофильтр.

Вернемся еще раз к рис. 1. Пользуясь спектрами 1—3 как фотометрической шкалой, мы можем найти в единицах этой шкалы энергетический поток e_λ полос самоизлучения спектров 7—9, учтя, конечно, различие выдержек и различие в ширине щели. Если мы обозначим энергетический поток для спектров 1—3, полученных после рассеяния солнечного света гипсом, через \mathcal{E}'_λ , а после полного рассеяния, например, баритом, через \mathcal{E}_λ , то имеем приближенно

$$\mathcal{E}'_\lambda = 0,90 \mathcal{E}_\lambda. \quad (1)$$

Измеряя полосы самоизлучения спектров 7—9 по шкале спектров 1—3, находим

$$\frac{e_\lambda}{\mathcal{E}_\lambda} = 0,90 \left(\frac{e_\lambda}{\mathcal{E}'_\lambda} \right), \quad (2)$$

где $e_\lambda / \mathcal{E}_\lambda$ есть энергетический поток самоизлучения в единице энергетического потока солнечного света в длине волны λ . Энергетический поток E от всей полосы самоизлучения, заключенной в пределах длин волны λ_1 и λ_2 , имеет выражение

$$E = 0,90 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{e_\lambda}{\mathcal{E}'_\lambda} \right) \mathcal{E}_\lambda d\lambda. \quad (3)$$

Далее, энергетический поток \mathcal{E} солнечного света, прошедшего через наливной купоросный фильтр, имеет выражение

$$\mathcal{E} = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} p_\lambda \mathcal{E}_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

где p_λ есть коэффициент прозрачности наливного фильтра в длине волны λ , а λ_3 и λ_4 — пределы пропускаемости этого фильтра. Энергетическая отдача самоизлучения η представляется отношением E / \mathcal{E} .

Если в промежутке от λ_1 до λ_2 отношение $(e_\lambda/\mathcal{E}'_\lambda)$ можно считать постоянным, то

$$\eta = \frac{0,90 \left(\frac{e_\lambda}{\mathcal{E}'_\lambda} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{E}_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} p_\lambda \mathcal{E}_\lambda d\lambda}, \quad (5)$$

или, при замене интегрирования механической квадратурой,

$$\eta = \frac{0,90 \left(\frac{e_\lambda}{\mathcal{E}'_\lambda} \right) \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathcal{E}_\lambda}{\sum_{\lambda_3}^{\lambda_4} p_\lambda \mathcal{E}_\lambda}. \quad (6)$$

Выражения (5) или приблизительно (6) и представляют решение нашей задачи. Заметим, что \mathcal{E}_λ в числителе и знаменателе могут быть выражены в произвольных единицах, так как нам требуется только их отношение.

Значения \mathcal{E}_λ взяты мною из смитсоновских физических таблиц (Smithsonian Physical Tables) для атмосферной массы 1,5 на горе

Таблица 1

λ мμ	\mathcal{E}_λ	p_λ	$p_\lambda \mathcal{E}_\lambda$	λ мμ	\mathcal{E}_λ
370	166	0,000	—	675	372
375	174	,250	44	685	365
385	189	,415	84	695	357
395	209	,515	108	705	350
405	234	,552	129	715	341
415	266	,572	152	725	334
425	307	,580	178	735	326
435	349	,580	202	745	318
445	390	,580	226	755	310
455	416	,580	241	765	303
465	427	,580	248	775	296
475	435	,580	252	785	288
485	436	,575	251	795	281
495	437	,560	245	805	274
505	436	,533	232	815	266
515	435	,500	218	825	260
525	434	,462	200	835	254
535	432	,420	181	845	248
545	431	,373	161	855	242
555	429	,323	139	865	236
565	426	,265	113	875	232
575	423	,220	93	880	230
585	420	,170	71	890	225
595	416	,125	52	900	220
605	412	,085	35	910	216
615	407	,058	24	920	212
625	402	,035	14	930	207
635	396	,020	8	940	203
645	390	,012	5	950	198
655	385	,005	2	960	194
665	378	,002	1	970	190
671	374	,001	0	980	186
672	373	,000	—	990	182
				1000	178

$$\sum p_\lambda \mathcal{E}_\lambda = 3909$$

Таблица 2

№ негатива	Растение	Дата	Сорт пластинки	Ширина щели в мм		Выдержка	
				для шкалы	для раст.	для шкалы	для раст.
23	Люцерна (листья) .	1949 г. авг. 12	НИКФИ панин-фрахром тип II	0,06	0,10	0,8 сек.	2,4 и 8 мин.
24	То же	То же	инфрахром, чувствит. 40	0,06	0,40	3,2	6 и 12 »
27	Шалфей (листья) .	1949 г. авг. 23	панинфрахром, тип II	0,06	0,10	0,8	1, 2 и 4 »
35	Ель канадская . . .	сент. 1	То же	0,06	0,10	0,8	4, 6 и 8 »

Таблица 3

№ негатива	Полоса самосвечения	λ_1 мц	λ_2 мц	Средняя λ мц	$0,90 \left(\frac{e_\lambda}{e'_\lambda} \right)$	$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_\lambda$	$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} e'_\lambda : \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} p_\lambda e_\lambda$	η
23	1-я	680	692	686	0,00043	436	0,111	0,00005
	Средняя	692	715	704	,00046	806	,206	,00009
24	2-я	715	762	738	,00147	1519	,388	,00057
	1-я	734	774	754	0,00160	1245	0,318	0,00051
27	2-я	797	830	814	,00035	883	,226	,00008
	1-я	676	690	683	0,00050	513	0,131	0,00006
35	Средняя	690	716	703	,00068	911	,233	,00016
	2-я	716	752	734	,00159	1176	,301	,00048
35	1-я	670	728	699	0,00057	2052	0,525	0,00030
	2-я	728	754	741	,00096	835	,214	,00021

Вильсон (высота 1675 м), что соответствует 1,35 атмосферной массы на обсерватории в Алма-Ата (высота 850 м) или зенитному расстоянию солнца 42°, при котором обычно производились наблюдения.

В табл. 1 приведены соответствующие значения солнечной энергии в произвольных единицах, через 10 мц или чаще, для алма-атинской массы 1,35 и рядом — значения p_λ по нашим определениям, а также произведения $p_\lambda e_\lambda$.

Сумма $\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} p_\lambda e_\lambda$ одинакова для всех исследованных нами негативов.

Что касается числителя формулы (6), то он различен для разных растений.

Многу измерены и обработаны 4 негатива, снятых К. А. Севриным по такой же программе, как его же негатив № 35 (рис. 1). В табл. 2 и 3 собраны основные данные, относящиеся к изученным негативам.

Как видно из табл. 3, средняя полоса на негативах 23 и 27 представляет непрерывный переход от полосы 1-й ко 2-й. (Видимое на негативе разделение на 2 полосы происходит оттого, что между ними лежит минимум чувствительности пластинки). Во всяком случае, при малой дисперсии применявшегося спектрографа все три полосы сливаются в одну широкую.

При выполнении настоящей работы, кроме К. А. Севрина, снявшего негативы, помощь съемкой вспомогательных негативов и их обработкой оказали мне К. И. Козлова, Н. И. Кучеров и К. Т. Стоянова. Увеличенный отпечаток негатива сделал М. К. Джунусов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Г. А. Тихов, ДАН, 62, № 5 (1948); Вестн. АН Каз. ССР, № 11 (44) (1948).