

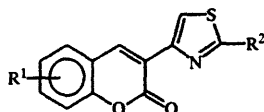
А. О. Дорошенко, Е. А. Посохов, Я. В. Белоконь,
С. Н. Коваленко, В. В. Иванов, О. А. Пономарев

АНСАМБЛИ ЦИКЛОВ С КУМАРИНОВЫМ ЗВЕНОМ

2*. СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В МОЛЕКУЛАХ 3-(2-R-ТИАЗОЛИЛ-4)- И 3-(4-R-ТИАЗОЛИЛ-2)КУМАРИНОВ

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства 3-(2-R-тиазолил-4)кумаринов ($R = \text{CH}_3, \text{CH}_2\text{CN}, \text{Ar}$) и некоторых изомерных 3-(4-R-тиазолил-2)кумаринов ($R = \text{Ar}$) с заместителями различной электронной природы как в кумариновом, так и в арильном фрагментах. Получены оценки констант скорости первичных фотофизических процессов — испускания флуоресценции и безызлучательной деградации энергии электронного возбуждения. Рассчитаны матричные элементы оператора спин-орбитального взаимодействия, а на их основе — константы скорости интеркомбинационной конверсии. Показано, что ухудшение флуоресцентных свойств исследуемых тиазолилпроизводных кумарина при введении в тиазольный цикл π -сопряженных фрагментов определяется усилением спин-орбитального взаимодействия в системе уровней π, π^* -типа.

Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства бискумариновых люминофоров, в которых основные хромофорные фрагменты соединены через положения 2 и 4 тиазольного цикла и, следовательно, не находятся в прямом полярном сопряжении, в последние годы достаточно интенсивно исследовались [2—5]. Большое внимание при этом уделялось изучению активных сред лазеров на основе этих соединений, а также процессу внутримолекулярного переноса энергии между слабосвязанными хромофорными группировками бискумарина, особенно важному с точки зрения более эффективного сбора полихроматического света возбуждения в лазерах на красителях с ламповой накачкой. Однако в упомянутых исследованиях отсутствовал систематический подход к решению проблемы влияния на спектрально-люминесцентные свойства 3-тиазолилкумаринов расширения π -электронной сопряженной системы молекулы при введении ароматических фрагментов, в том числе содержащих выраженные электронодонорные заместители, в тиазольный цикл.

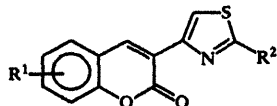


В настоящем сообщении приведены результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств производных 3-(2-R-тиазолил-4)кумарина, содержащих электронодонорные заместители как в кумариновом фрагменте, так и в положении 2 тиазольного цикла (см. табл. 1).

В табл. 2 приведены спектральные характеристики некоторых изомерных соединений, у которых кумариновый хромофор присоединен по положению 2 тиазольного цикла. Из сопоставления характеристик соединений, содержащих идентичные заместители в кумариновом хромофоре, может быть сделано заключение, что тиазольный цикл, присоединяемый к

* Сообщение 1 см. [1].

Спектрально-люминесцентные характеристики 3-(2-R-тиазолил-4)кумаринов в пропанол-2



R ¹	R ²	ν_a , см ⁻¹	ν_f , см ⁻¹	$\Delta \nu_{ST}$, см ⁻¹	φ_f	τ_f , нс	k_f , с ⁻¹	k_d , с ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9
H	CH ₃	29660	24200	5180	0,223	1,226	$1,82 \cdot 10^8$	$6,34 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	29700	24380	5320	0,141	0,651	$2,17 \cdot 10^8$	$1,32 \cdot 10^9$
	C ₆ H ₅	29040	23720	5320	0,130	0,607	$2,14 \cdot 10^8$	$1,43 \cdot 10^9$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	28340	21260	7080	0,0802	0,670	$1,20 \cdot 10^8$	$1,37 \cdot 10^9$
	4-ClC ₆ H ₄	28500	23760	4740	0,104	0,633	$1,64 \cdot 10^8$	$1,42 \cdot 10^9$
6-CH ₃ O	CH ₃	28100	23940	4160	0,0252	0,474	$5,3 \cdot 10^7$	$2,06 \cdot 10^9$
	C ₆ H ₅	27180	23200	3980	0,0589	0,557	$1,06 \cdot 10^8$	$1,69 \cdot 10^9$
5,6-Бензо	CH ₃	26640	23080	3560	0,527	2,885	$1,83 \cdot 10^8$	$1,64 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	26640	23180	3460	0,579	3,058	$1,89 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	26280	22620	3660	0,185	1,107	$1,67 \cdot 10^8$	$7,36 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	26080	21080	5000	0,108	0,850	$1,27 \cdot 10^8$	$1,05 \cdot 10^9$
	4-ClC ₆ H ₄	26240	22700	3540	0,178	1,086	$1,64 \cdot 10^8$	$7,57 \cdot 10^8$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7-OH	CH ₃	27760	23520	4220	0,514	3,062	$1,68 \cdot 10^8$	$1,59 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	27920	22860	5060	0,553	2,712	$2,04 \cdot 10^8$	$1,65 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	28280	23040	4240	0,234	1,021	$2,29 \cdot 10^8$	$7,50 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	27380	21920	5460	0,177	0,917	$1,93 \cdot 10^8$	$8,98 \cdot 10^8$
7-OH, 6-н-C ₆ H ₁₃	CH ₃	27320	23200	4120	0,615	3,045	$2,02 \cdot 10^8$	$1,26 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	27260	23120	4140	0,610	2,894	$2,11 \cdot 10^8$	$1,35 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	27040	22900	4140	0,231	1,065	$2,17 \cdot 10^8$	$7,22 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	26800	22600	4600	0,225	0,995	$2,26 \cdot 10^8$	$7,79 \cdot 10^8$
7-N(C ₂ H ₅) ₂	CH ₃	24540	21440	3100	0,565	3,145	$1,80 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	24340	21100	3240	0,351	1,795	$1,96 \cdot 10^8$	$3,62 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	24540	21300	3240	0,238	1,704	$1,40 \cdot 10^8$	$4,47 \cdot 10^8$
	4-(CH ₃) ₂ NC ₆ H ₄	24260	20420	3840	0,0334	0,362	$9,2 \cdot 10^7$	$2,67 \cdot 10^8$
7-O ⁻	CH ₃	23880	21320	2560	0,387	3,846	$1,01 \cdot 10^8$	$1,59 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	23960	21060	2900	0,455	3,345	$1,36 \cdot 10^8$	$1,63 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	23600	20920	2680	0,163	1,351	$1,21 \cdot 10^8$	$6,20 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	23580	20840	2740	0,156	1,619	$9,6 \cdot 10^7$	$5,21 \cdot 10^8$
7-O ⁻ , 6-н-C ₆ H ₁₃	CH ₃	23140	20780	2360	0,482	3,901	$1,24 \cdot 10^8$	$1,33 \cdot 10^8$
	CH ₂ CN	22940	20780	2160	0,279	3,025	$9,2 \cdot 10^7$	$2,38 \cdot 10^8$
	C ₆ H ₅	22680	20760	1920	0,124	0,977	$1,27 \cdot 10^8$	$8,97 \cdot 10^8$
	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	22820	20740	2080	0,206	1,603	$1,29 \cdot 10^8$	$4,95 \cdot 10^8$

* ν_a и ν_f — положения максимумов полос поглощения и флуоресценции;

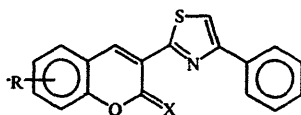
$\Delta \nu_{ST}$, φ_f и τ_f — Стоксов сдвиг, квантовый выход и время жизни флуоресценции;

k_f и k_d — экспериментально оцененные значения констант скорости испускания флуоресценции и безызлучательной деградации энергии электронного возбуждения.

хромофорной системе по своему положению 2, проявляет более выраженные электроноакцепторные свойства, чем в случае присоединения по положению 4, поскольку в первом случае длинноволновый переход в спектрах поглощения расположен ниже по энергии приблизительно на $2000...3000\text{ см}^{-1}$. Таким образом, тиазольные хромофоры в молекулах большинства исследуемых соединений оказывают существенно меньшее влияние на характеристики основных кумариновых хромофорных фрагментов, чем в случае изомерных соединений, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Спектрально-люминесцентные характеристики 3-(4-фенилтиазолил-2)-кумаринов и их 2-иминоаналогов в пропанол-2



R	X	ν_a , см^{-1}	ν_f , см^{-1}	$\Delta\nu_{ST}$, см^{-1}	φ_f	τ_f , нс	k_f , с^{-1}	k_d , с^{-1}
H	O	26700	20420	6280	0,529	4,390	$1,21 \cdot 10^8$	$1,07 \cdot 10^8$
	NH	26580	21580	5000	0,0137	0,723	$1,90 \cdot 10^7$	$1,36 \cdot 10^9$
6-CH ₃ O	O	25760	20400	5360	0,191	1,847	$1,03 \cdot 10^8$	$4,38 \cdot 10^8$
	NH	25620	20800	4820	0,0431	1,545	$2,79 \cdot 10^7$	$6,19 \cdot 10^8$
5,6-Бензо	O	24620	20000	4620	0,397	3,527	$1,13 \cdot 10^8$	$1,71 \cdot 10^8$

Из данных табл. 2 следует еще одно интересное заключение. Так, достаточно большое число исследователей связывают низкую эффективность испускания незамещенного кумарина с неблагоприятным влиянием процесса интеркомбинационной конверсии с нижнего возбужденного синглетного состояния этой молекулы, имеющего π, π -природу, на триплетный π, π -уровень, локализованный на карбонильной группе. Замена атома кислорода карбонильной группы на атом азота в этом случае должна была бы приводить к существенному улучшению флуоресцентных характеристик, поскольку π, π -уровни группы C=N расположены по энергии значительно выше π, π -уровней карбонильной группы. Однако в действительности у 2-иминокумаринов не только не наблюдается увеличения эффективности флуоресценции, а, напротив, происходит снижение квантового выхода более чем на порядок. Снижение эффективности флуоресценции при переходе от кумарина к соответствующему 2-иминоаналогу требует отдельного изучения, причем процесс интеркомбинационной конверсии с участием π, π -уровней карбонильной группы кумарина, если и имеет место в рассматриваемых молекулах, то, по крайней мере, не оказывает определяющего влияния на их люминесцентные характеристики.

С другой стороны, некоторой обособленности кумаринового и тиазольного фрагментов у исследуемых соединений способствует неплоское строение их молекул. Так, расчеты по методу молекулярной механики (ММР2) [6] с оптимизацией геометрии тиазолилкумаринов для различных возможных ориентаций гетероциклов относительно друг друга показали, что для менее полярных конформеров ($\mu \sim 2,5D$) с антиориентацией атомов водорода в положении 4 кумаринового фрагмента и атомов водорода в положении 5 тиазольного цикла угол между плоскостями гетероциклических фрагментов составляет $\sim 25^\circ$, а для более полярных *син*-конформеров ($\mu \sim 3,8D$) указанный угол составляет $\sim 35^\circ$. Бензольное кольцо, введенное в положение 2 тиазольного цикла, у обоих возможных конформеров не выходит из плоскости последнего. Таким образом,

Расчет спин-орбитального взаимодействия в молекулах модельных 3-(2-R-тиазолил-4)кумаринов

R	X	$E(S)/J$	L_K	L_T	L_X	$E(T)/\beta u$	L_K	L_T	L_X	$KD(i)$	$\varphi (k_F, k_D)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H	H	30775/0,770	85,5	14,5	—	12886/0,0008	85,5	14,5	—	$7 \cdot 10^3$	0,204 ($4,86 \cdot 10^8$, $1,90 \cdot 10^9$)
						19363/0,0128	94,6	5,4	—	$6,6 \cdot 10^6$	
						21272/0,0122	51,4	48,6	—	$8,8 \cdot 10^6$	
						24887/0,0048	46,2	53,8	—	$2,8 \cdot 10^6$	
						27976/0,0911	95,5	4,5	—	$1,87 \cdot 10^9$	
						29893/0,0047	40,9	59,1	—	$7,3 \cdot 10^6$	
H	C ₆ H ₅	30067/0,794	68,6	26,6	4,8	13624/0,0004	85,8	13,7	0,5	$2 \cdot 10^3$	0,197 ($4,79 \cdot 10^8$, $1,95 \cdot 10^9$)
						19933/0,0072	38,2	37,8	23,9	$2,7 \cdot 10^6$	
						21013/0,0094	53,8	16,3	29,8	$5,7 \cdot 10^6$	
						23933/0,0060	63,5	21,9	14,6	$4,2 \cdot 10^6$	
						26596/0,0081	36,4	28,7	34,9	$1,3 \cdot 10^7$	
						28080/0,0843	95,2	3,6	1,2	$1,89 \cdot 10^9$	
						29505/0,0102	32,1	41,3	26,6	$3,7 \cdot 10^7$	
H	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	29747/0,777	66,4	27,8	5,7	14375/0,0084	83,2	16,2	0,6	$1,3 \cdot 10^6$	0,176 ($4,58 \cdot 10^8$, $2,15 \cdot 10^9$)
						19826/0,0103	23,7	34,3	42,0	$5,8 \cdot 10^6$	
						20816/0,0112	65,8	10,3	24,0	$8,3 \cdot 10^6$	
						23802/0,0093	58,3	27,5	14,2	$1,0 \cdot 10^7$	
						26553/0,0097	42,0	31,7	26,3	$2,0 \cdot 10^7$	
						28069/0,0802	4,8	5,1	90,1	$1,82 \cdot 10^9$	
						28117/0,0280	90,0	4,2	5,8	$2,2 \cdot 10^8$	
						29339/0,0132	32,5	30,8	36,6	$6,3 \cdot 10^7$	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H	4-(CH ₃) ₂ NC ₆ H ₄	28282/0,621	55,3	27,9	16,8	14126/0,0264 16735/0,0227 20938/0,0124 21655/0,0098 23462/0,0194 26197/0,0212 27475/0,0092 28171/0,0697	82,0 1,9 82,2 0,2 58,6 34,5 4,6 89,0	17,1 15,3 14,8 2,5 33,8 43,2 4,3 7,7	0,9 82,8 3,0 97,3 7,6 22,3 91,1 3,3	1,6 · 10 ⁷ 2,0 · 10 ⁷ 1,4 · 10 ⁷ 1,0 · 10 ⁷ 5,7 · 10 ⁷ 1,2 · 10 ⁸ 2,8 · 10 ⁷ 1,88 · 10 ⁹	0,134 (3,31 · 10 ⁸ , 2,14 · 10 ⁹)
7-CH ₃ O	H	30216/0,852	83,4	16,6	—	—	—	—	—	1,87 · 10 ⁹	0,217
7-CH ₃ O	C ₆ H ₅	29702/0,879	74,8	21,2	4,0	—	—	—	—	1,90 · 10 ⁹	0,214
7-CH ₃ O	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	29541/0,875	73,2	22,3	4,1	—	—	—	—	2,02 · 10 ⁹	0,201
7-CH ₃ O	4-(CH ₃) ₂ NC ₆ H ₄	28964/0,829	61,4	25,1	13,5	—	—	—	—	2,10 · 10 ⁹	0,178
7-N(CH ₃) ₂	H	27224/0,890	91,7	8,3	—	—	—	—	—	1,65 · 10 ⁹	0,210
7-N(CH ₃) ₂	C ₆ H ₅	27004/0,933	88,2	10,2	1,6	—	—	—	—	2,24 · 10 ⁹	0,168
7-N(CH ₃) ₂	4-CH ₃ OC ₆ H ₄	27082/0,945	87,7	10,6	1,7	—	—	—	—	2,17 · 10 ⁹	0,175
7-N(CH ₃) ₂	4-(CH ₃) ₂ NC ₆ H ₄	26944/0,969	83,4	12,7	3,9	—	—	—	—	2,10 · 10 ⁹	0,183

* R¹ и R² — заместители (см. табл. 1);

$E(S^1)$ — энергия нижнего возбужденного синглетного состояния (см⁻¹);

$E(T^1)$ — энергия триплетных состояний (см⁻¹);

f — сила осциллятора перехода S₀→S₁;

β_{II} — матричный элемент оператора спин-орбитального взаимодействия состояний S₁ и T₁ (см⁻¹);

L_k, L_t, L_x — числа локализации электронного возбуждения соответственно на кумариновом, тиазольном фрагментах и на заместителе X;

kF и kD — константы скорости испускания флуоресценции и интеркомбинационной конверсии (для соединений с R¹ = H в столбце 11 даны парциальные константы интеркомбинационной конверсии из нижнего синглетного состояния на конкретный триплетный уровень, в столбце 12 — суммарная константа; данные для остальных соединений приведены в сокращенной форме);

ϕ — квантовый выход флуоресценции, рассчитанный исходя из полученных величин kF и суммарной kD .

сопряжение между кумариновым и тиазольным хромофорными фрагментами в молекулах 3-тиазолилкумаринов оказывается в некоторой степени ослабленным по сравнению с гипотетической плоской структурой.

При рассмотрении данных, приведенных в табл. 1, следует прежде всего отметить малое влияние структурных изменений в тиазольном фрагменте на энергию нижнего возбужденного синглетного состояния исследуемых соединений. Отсутствует сколько-нибудь существенное влияние как в рамках чисто индукционного эффекта (переход от CH_3 к CH_2CN -замещенным), так и в рамках эффекта сопряжения (ряд C_6H_5 , 4- $\text{CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4$, 4- $(\text{CH}_3)_2\text{NC}_6\text{H}_4$). Следовательно, при расширении сопряженной системы тиазолсодержащего хромофора природа флуоресцентного состояния соответствующего тиазолилкумарина остается неизменной. Проведенные квантово-химические расчеты также свидетельствуют, что электронное возбуждение в S_1 -состоянии в изучаемых системах локализовано, главным образом, на кумариновом фрагменте.

При расширении π -системы тиазолсодержащего хромофора в случае присоединения арильного фрагмента по положению 2 гетероцикла наблюдается тенденция к уменьшению эффективности флуоресценции, проявляющаяся еще более отчетливо при введении в упомянутый арильный фрагмент электронодонорных заместителей.

Анализ оцененных исходя из экспериментально измеренных квантового выхода и времени жизни испускания констант скорости испускания флуоресценции и безызлучательной деградации свидетельствует о включении дополнительного канала безызлучательного рассеивания энергии возбуждения при структурных изменениях в тиазольном фрагменте исследуемых 3-тиазолилкумаринов.

При практической неизменности энергии флуоресцентного $\pi\pi$ -состояния (а тем более энергии локализованных на карбонильной группе синглетного и триплетного π,π -состояний, вообще мало чувствительных к изменениям в структуре молекулы) вероятной причиной ухудшения флуоресцентных характеристик может быть усиление эффективности интеркомбинационной конверсии внутри системы синглетных и триплетных уровней π,π -типа. Для проверки выдвинутого предположения нами были проведены оценки матричных элементов оператора спин-орбитального взаимодействия соответствующих возбужденных состояний, на основании которых затем рассчитывались константы интерконверсии в молекулах исследуемых тиазолилкумаринов (табл. 3).

Проведенные нами расчеты являются приближенными, тем не менее на их основании могут быть сделаны определенные заключения. Так, введение бензольного кольца в положение 2 тиазольного цикла молекулы тиазолилкумарина, а затем электронодонорных заместителей в указанное бензольное кольцо не приводит к существенному изменению природы и положения нижних синглетных и триплетных состояний. В то же время, энергия ряда высоколежащих возбужденных триплетных уровней снижается, некоторые из них даже опускаются ниже S_1 -состояния. Особое влияние на спектрально-люминесцентные свойства оказывает понижение энергии высоковозбужденных триплетных уровней, характеризующихся более существенной спин-орбитальной связью с флуоресцентным S_1 -состоянием. И хотя рассчитанные матричные элементы оператора спин-орбитального взаимодействия относительно невелики и составляют $0,01...0,09 \text{ см}^{-1}$ (что и следовало ожидать при рассмотрении взаимодействия уровней одинаковой орбитальной природы), малые энергетические интервалы между S_1 -уровнем и упомянутым выше T_1 -термами приводят к заметному увеличению эффективности интеркомбинационной конверсии, что, в свою очередь, и обуславливает уменьшение квантового выхода флуоресценции.

Таким образом, ухудшение флуоресцентных свойств исследуемых тиазолилпроизводных кумарина при введении в тиазольный цикл π -сопряженных фрагментов, в том числе содержащих выраженные электронодонорные заместители, определяется увеличением спин-орбитального взаимодействия в системе уровней π,π -типа.

определяется увеличением спин-орбитального взаимодействия в системе уровней $\pi\pi$ -типа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследованные соединения были синтезированы согласно [1, 7]. Спектры поглощения измерены на спектрофотометре Specord M-40, спектры флуоресценции — на спектрофлуориметре Hitachi F4010. Квантовые выходы флуоресценции определяли относительно бисульфата хирина в 1 н. серной кислоте ($\varphi=0,55$, [8]) с введением квадратичной поправки на различие в показателях преломления эталонного и измеряемого растворов. Оптические плотности растворов при определении квантовых выходов не превышали 0,2 при толщине поглощающего слоя 1 см. Кинетика флуоресценции изучалась на установке, работающей в режиме счета одиночных фотонов в наносекундном диапазоне [9]. Математическая обработка кривых затухания производилась методом наименьших квадратов [10, 11]. Квантово-химические расчеты методом ППП ССП КВ с учетом до 100 однократно возбужденных конфигураций проводились с набором параметров [12, 13]. Матричные элементы оператора спин-орбитального взаимодействия $\pi\pi$ -состояний рассчитывались в соответствии с данными [14—19], оценки констант скоростей первичных фотофизических процессов получены аналогично [17—19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белокоп Я. В., Коваленко С. Н., Силин А. В., Никитченко В. М. // ХГС. — 1997. — № 10. — С. 1345.
2. Asimov M. M., Nikitchenko V. M., Novikov A. I., Rubinov A. N. // Chem. Phys. Lett. — 1988. — Vol. 149. — P. 140.
3. Асимов М. М., Гавриленко В. Н., Козма Л., Никитченко В. М., Новиков А. И., Коваленко С. Н., Рубинов А. Н. // Оптика и спектроскопия. — 1991. — Т. 70. — С. 384.
4. Асимов М. М., Гавриленко В. Н., Никитченко В. М., Новиков А. И., Коваленко С. Н., Рубинов А. Н. // Весці АН Беларусі. — 1992. — № 1. — С. 44.
5. Асимов М. М., Гавриленко В. Н., Никитченко В. М., Коваленко С. Н., Рубинов А. Н. Спектрально-люминесцентные свойства новых кумариновых бифлуорофорных молекул [Препринт № 691]. — Минск: Ин-т физики АН Беларуси, 1994. — 22 с.
6. Sprague J. T., Tai J. C., Yuh Y., Allinger N. L. // J. Comput. Chem. — 1987. — Vol. 8. — P. 581.
7. Коваленко С. Н., Черных В. П., Белокоп Я. В., Орленко И. В., Журавель И. А., Никитченко В. М., Силин А. В. // Казанский медицинский журнал. — 1995. — Т. 76. — С. 189.
8. Melhuish W. A. // J. Phys. Chem. — 1961. — Vol. 65. — P. 229.
9. Пономарев О. А., Дорошенко А. О., Митина В. Г. // Хим. физика. — 1989. — Т. 8. — С. 1369.
10. Ware W. R., Doemeny J. J., Nemzek T. L. // J. Phys. Chem. — 1973. — Vol. 77. — P. 2038.
11. Башарин С. К., Гачко Г. А., Кивач Л. Н., Маскевич С. Л., Маскевич А. А., Удовыденко В. Р. // Журн. прикл. спектроскопии. — 1990. — Т. 52, № 1. — С. 48.
12. Griffiths J. // Dyes and Pigments. — 1982. — Vol. 3. — P. 211.
13. Minkin V. I., Simkin B. Ya., Olekhovitch L. P. // Int. J. Sulfur Chem. — 1973. — Vol. 8. — P. 249.
14. Бабич Е. Н., Лузанов А. В., Педаш Ю. Ф., Пономарев О. А. // Теор. и эксперим. химия. — 1990. — № 1. — С. 17.
15. Педаш Ю. Ф., Бабич Е. Н., Пономарев О. А., Лузанов А. В. // Оптика и спектроскопия. — 1990. — Т. 69. — С. 313.
16. Педаш Ю. Ф., Бабич Е. Н., Пономарев О. А., Лузанов А. В. // Оптика и спектроскопия. — 1990. — Т. 69. — С. 550.
17. Пономарев О. А., Педаш Ю. Ф., Преждо О. В. // Ж. физ. химии. — 1991. — Т. 65. — С. 1846.
18. Мак-Глинн С., Адзуми Т., Киносита М. Молекулярная спектроскопия триплетного состояния. — М.: Мир, 1972. — 448 с.
19. Мулдаметов З. М., Минаев Б. Ф., Кедре Г. А. Оптические и магнитные свойства триплетного состояния. — Алма-Ата: Наука, 1983. — 263 с.