—— ФОТОХИМИЯ ——

УДК 535.71

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ФОТОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОИЗВОДНЫХ ГИДРИРОВАННЫХ ФУРО- И ТИЕНОХИНОЛИНОВ

© 2021 г. В. В. Шахматов<sup>а</sup>, Е. Н. Ходот<sup>ь</sup>, Т. Д. Некипелова<sup>а, \*</sup>, В. А. Кузьмин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, ул. Косыгина, 4, Москва, 119334 Россия <sup>b</sup>Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Ленинский просп., 47, Москва, 119991 Россия

\**E-mail: nekip@sky.chph.ras.ru* Поступила в редакцию 10.06.2021 г. После доработки 01.07.2021 г. Принята к публикации 06.07.2021 г.

Синтезированы новые производные гидрированных фуро- и тиенохинолинов и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства и фотохимические превращения. С использованием метода импульсного фотолиза доказана триплетная природа короткоживущих состояний при фотовозбуждении и получены спектрально-кинетические характеристики триплетных состояний синтезированных фурогидрохинолинов и образующихся аминильных радикалов. Процессы с участием триплетного состояния исследованных соединений являются важными для использования исследуемых соединений в фотодерматологии.

Ключевые слова: фуро- и тиенодигидрохинолины, фуротетрагидрохинолины, спектры поглощения и флуоресценции, триплетные состояния, стационарный фотолиз, импульсный фотолиз **DOI:** 10.31857/S0023119321060139

В последнее время гетероциклические соединения с аннелированной фурогруппой привлекают пристальное внимание в связи с потенциальной возможностью их использования в качестве биологически активных веществ и лекарственных препаратов [1, 2]. Фурокумарины или псоралены широко используются в фотодерматологии при лечении кожных заболеваний [3]. Лечебный эффект фурокумаринов обусловлен образованием триплетного состояния при поглошении света УФА диапазона с последующим взаимодействием их триплетного состояния с тиминовым основанием ДНК с образованием циклобутанового цикла между двойной связью фуранового кольца и связью С(5)=С(6) тимина. Псоралены используются в фотодерматологии более 60 лет, и за это время проявились побочные отрицательные последствия терапевтического применения этих соединений, а именно: образование кросс-сшивок в молекуле ДНК за счет возможности протекания реакции не только по двойной связи фуранового кольца, но и по двойной связи кумарина, что может приводить к развитию локальных злокачественных образований. В этой связи, поиск новых соединений, способных образовывать моноаддукты с тиминовым основанием ДНК и не способных образовывать диаддукты, представляется актуальной задачей. Для замены фурокумаринов в фотодерматологии было предложено использовать фурохинолоны [4, 5] в качестве потенциальной замены псораленам при аналогичном механизме терапевтического действия.

В современной фармакологической и агрохимической индустрии широко и интенсивно используются производные хинолинов [6]. Хинолины представляют интерес в качестве исходных структур для синтеза на их основе новых соединений путем введения в их структуру фуранового цикла, что приводит к увеличению электронного сопряжения в молекуле и способствует получению соединений удовлетворяющим требованиям PUVA-терапии.

Соединения, которые активны в фотодерматологии, должны удовлетворять следующим требованиям: быть нетоксичными без облучения, образовывать при фотовозбуждении с высоким квантовым выходом триплетные состояния, вступать в реакции с тиминовым основанием ДНК, образуя при этом моноалдукты, и не обра-1,2-Дигидрохинолины зовывать диаддукты. (ДГХ) хорошо известны как эффективные нетоксичные антиоксиданты [7], их фотохимические и фотофизические свойства в зависимости от заместителей в гетероцикле и ароматическом кольце, а также от природы растворителя детально исследованы [8-13]. Известно, что выход триплетного состояния у этих соединений невелик [8]. Ранее на примере 7,7,9-триметил-6,7-дигидрофуро[3,2-*f*]хинолина было показано, что введение фуранового кольца в структуру дигидрохинолина увеличивает выход триплетного состояния с сохранением антиоксидантных свойств этих соединений и их низкой токсичности [14–18]. В данной работе продолжено исследование спектрально-люминесцентных и фотохимических свойств новых производных гидрированных хинолинов с аннелированой фуро- или тиено-группой: ацетамидного производного фуродигидрохинолина (1), тиенодигидрохинолина (2) и фуротетрагидрохинолинов (3) и (4).



# МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез*N*-(6,8,8-триметил-8,9-дигидрофуро[3,2h]хинолин-5-ил)ацетамида (**1**) описан в [19]. <sup>1</sup>Н ЯМР (DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta$ , м.д.: 9.40 (1H), 7.90 (d, *J* 8 Hz, 1H), 6.78 (d, *J* 8 Hz, 1H), 6.60 (s, 1H), 6.04 (s, 1H), 5.23 (s, 1H), 2.03 (s, 3H), 1.97 (s, 3H), 1.24 (s, 6H). Принципиальная схема синтеза 7,7,9-триметил-6,7-дигидротиено[3,2-*f*]хинолина (**2**) включает 4 стадии (схема 1). Исходный 1-бензотиофен-5-амин (7) для синтеза (**2**) по реакции Скраупа был получен по описанной методике [20].



Соединение **2** было выделено в виде стеклообразной массы, выход 30%; <sup>1</sup>Н ЯМР (CDCl<sub>3</sub>) δ, м.д: 7.65 (уш.с., 1Н), 7.53 (д, *J* 8 Hz, 1Н), 7.40 (д, *J* 8, Hz, 1Н), 6.69 (уш.с., 1Н), 5.42 (уш.с., 1Н), 4.32 (уш.с., 1Н), 2.37 (с, 3Н), 1.31 (с, 6Н); MCBP: (*M* + H<sup>+</sup>)/*z* 230.0996.

7,7,9-триметил-6,7,8,9-тетрагидрофуро[3,2*f*]хинолин (**3**) получали восстановлением 7,7,9триметил-6,7-дигидрофуро[3,2-*f*]хинолина (**8**), синтез которого был описан ранее [14], с использованием Pd/C катализатора (схема 2).



#### Uxema 2.

Целевой продукт (**3**) получали в виде зеленоватых кристаллов, Выход 25%. <sup>1</sup>Н ЯМР (CDCl<sub>3</sub>) δ, м.д: 7.55 (д, *J* 2.1 Hz, 1H), 7.17 (дд, *J* 8.7, 1.0 Hz, 1H), 6.79 (дд, *J* 2.1, 1.0 Hz, 1H), 6.51 (д, *J* 8.7 Hz, 1H),

3.27 уш.с., 1Н), 3.22 (м, 1Н), 1.94 (м, 1Н), 1.51 (м, 1Н), 1.47 (д, *J* 8 Hz, 3Н), 1.29 (с, 3Н), 1.17 (с, 3Н).

Синтез 6,8,8-триметил-6,7,8,9-тетрагидрофуро[3,2-*h*]хинолина (**4**) проводили аналогично восстановлением соответствующего фуродигидрохинолина. Однако этот синтез осложняется тем, что соответствующий фуродигидрохинолин подвергается самопроизвольной олигомеризации. Это приводит к тому, что выход целевого продукта не превышает 16%.

В качестве растворителей использовали метанол (Merck, for spectrophotometry), этанол, гексан, ацетонитрил (Компонент Реактив, для ВЭЖХ).

Спектры поглощения и флуоресценции регистрировали на спектрофотометре "Shimadzu UV-3101 PC" в области 200-500 нм и спектрофлуориметре "Shimadzu RF-5301 PC" в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см. Квантовые выходы флуоресценции ( $\phi^{fl}$ ) измеряли методом сравнения со стандартом [20], в качестве которого использовали 1,4-ди-[2-(5-фенилоксазолил)]-бензол (РОРОР) с квантовым выходом флуоресценции в гексане 0.97, максимумы поглощения и испускания которого близки к соответствующим максимумам анализируемых веществ. Квантовые выходы флуоресценции (Ф<sup>fl</sup>) вычисляли по уравнению (1), которое учитывает изменение свойств растворителя через соотношение их показателей преломления [21].

$$\varphi_1^{\text{fl}} = \varphi_2^{\text{fl}} n_1^2 I_1 A_2 / n_2^2 I_2 A_1, \qquad (1)$$

где I — относительная интенсивность флуоресценции, равная площади под спектром флуоресценции; A — поглощение на длине волны возбуждения, которое не превышало 0.08; n — показатель преломления растворителя; индексы 1 и 2 относятся к одному из анализируемых соединений и РОРОР соответственно. Ошибка в определении квантовых выходов составляет 10%.

Стационарный фотолиз соединений **1** и **2** проводили в растворе спирта и ацетонитрила при облучении светодиодным источником ( $\lambda_{ex} = (365 \pm 10)$  нм), а соединений **3** и **4** при облучении ртутной лампой ДРШ-1000. Для исследования методом стационарного фотолиза использовали кварцевые кюветы с длиной оптического пути 1 см, эксперименты проводили на воздухе или после продувки аргоном в течение 15 мин, для удаления следов кислорода.

Импульсный фотолиз соединений **1** и **3** осуществляли в кварцевой кювете с длиной оптического пути 20 см с использованием Хе лампы (75 Дж, 20 мкс) на установке импульсного фотолиза, описанной ранее [16]. Изменения в поглощении после импульса света измеряли в диапазоне 400–720 нм системой, состоящей из лампы накаливания (75 вт), монохроматора ЗМР-3, фотоумножителя ФЭУ-38 и осциллографа на базе PCI Bordo 211. Удаление кислорода в экспериментах по импульсному фотолизу проводили путем вакуумирования. Концентрация фурогидрохинолинов **1** и **3** в ацетонитриле составляла 4 ×  $10^{-4}$  мол/л. Обработку экспериментальных данных импульсного фотолиза проводили методом глобального анализа путем аппроксимации экспериментальных кривых гибели промежуточного поглощения мультиэкспоненциальным уравнением (2).

$$\Delta A^{\lambda} = \Sigma \Delta A_i^{\lambda} \exp(-k_i t) + \Delta A_{\rm res}^{\lambda}, \qquad (2)$$

где  $\Delta A^{\lambda}$  — суммарное поглощение на длине волны  $\lambda$ ,  $\Delta A_i^{\lambda}$  — поглощение *i*-го интермедиата на длине волны  $\lambda$ ,  $\Delta A_{res}^{\lambda}$  — суммарное поглощение на длине волны  $\lambda$  при  $t \rightarrow \infty$  и  $k_i$  — константа скорости гибели *i*-го интермедиата.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Спектрально-люминесцентные свойства соединений 1–4

Спектры поглощения соединений 1 и 2 на основе дигидрохинолинов имеют три полосы поглощения в УФ-области спектра с максимумом длинноволновой полосы в области 340-370 нм (рис. 1 спектры 1 и 2, табл. 1). Спектры поглощения соединений 3 и 4 на основе тетрагидрохинолина сдвинуты в коротковолновую область и имеют длинноволновый максимум поглощения около 300 нм (рис. 1 спектры 3 и 4, табл. 1). Длинноволновые и коротковолновые максимумы поглощения этих соединений близки к соответствующим максимумам исходных гидрированных хинолинов. В случае соединения 4 длинноволновая полоса поглощения имеет вид плеча полосы поглощения в области 250-300 нм. Коротковолновый сдвиг этой полосы, по-видимому, обусловлен водородной связью между кислородом фуранового цикла и водородом группы NH. Максимумы поглощения в области 250-300 нм являются характерными для соединений с аннелированными фурогруппами [16, 18].

На рис. 2 представлены нормированные спектры поглощения и флуоресценции. Квантовые выходы флуоресценции для соединений 1–3 (табл. 1) близки к полученным ранее для других фуродигидрохинолинов [16, 18] и дигидрохинолинов [22]. Для соединения 4 квантовый выход флуоресценции несколько ниже, при этом наблюдается относительно большой Стоксов сдвиг, что, видимо, также обусловлено особенностями его строения.



**Рис. 1.** Нормированные по коротковолновой полосе спектры поглощения соединений: 1 - 1 (сплошная линия), 2 - 2 (пунктир), 3 - 3 (пунктир-точка), 4 - 4 (точки); растворитель: MeOH (1, 2), EtOH (3, 4).

### Стационарный фотолиз

Фотохимические превращения соединения 1 существенным образом зависят от растворителя (рис. 3). При фотовозбуждении 1 в протонных растворителях в нерелаксированном возбужден-

ном состоянии  $\mathbf{S}_1^{\text{FC}}$  происходит перенос протона через растворитель от группы NH к атому C3 с последующим образованием карбкатиона и продукта присоединения ROH (схема 3, последовательность реакций (II)), как это происходит в случае дигидрохинолинов [11, 13]). Действительно, характер изменений спектров поглощения при сташионарном фотолизе 1 в метаноле в присутствии кислорода показывает, что основным процессом является образование продукта присоединения метанола к двойной связи дигидрохинолинового фрагмента. В атмосфере аргона скорость фотолиза незначительно увеличивается (рис. 3б), что связано с процессом образования аминильных радикалов из триплетного состояния фуродигидрохинолинов (схема 3, реакция (III)) с последующей их димеризацией. В ацетонитриле в атмосфере аргона фотолиз 1 происходит существенно медленнее, чем в метаноле (рис. 3в), и основным процессом является образование димерных пролуктов из аминильных радикалов (схема 3 реакция (III)). Данные MALDI TOF MC анализа фотолизатов 1 подтверждают, что при его фотолизе в МеОН образуется продукт присоединения спирта (M/z = 302) и димерные продукты из аминильных радикалов в небольших количествах (M/z = 538).

Таблица 1. Спектрально-люминесцентные свойства соединений 1-4

Вещество	Растворитель	$\lambda_{\text{макс}},$ нм	$\epsilon, M^{-1} cm^{-1}$	$\lambda_{\phi\pi}$ , нм	$\phi^{\rm fl}$	Стоксов сдвиг, см <sup>-1</sup> (нм)
1	МеОН	342	2440			
		288	3260			
		247	22370	417	0.18	5344 (76)
	EtOH	341	3100			
		288	4250			
		248	29200			
	MeCN	343	3550			
		289	4250			
		249	27700			
2		368	2500	436	0.20	
	МеОН	275	11700			4240 (68)
		229	16500			
3	EtOH	315	2430	380	0.18	5430 (76)
		220	21760			
4	EtOH	295	2180	411	0.12	9570 (116)
		262	8125			
		225	26240			



**Рис. 2.** Нормированные спектры флуоресценции (пунктирные линии) и спектры поглощения (сплошные линии) (а) соединений **1** (1, 1') и **2** (2, 2') в MeOH и (б) соединений **3** (3, 3') и **4** (4, 4') в EtOH.



Схема 3.



Рис. 3. Изменения спектров поглощения при фотолизе 1 в МеОН в атмосфере воздуха (а), время (мин): 0 (1), 2 (2), 4 (3) 6 (4), 8 (5), 10 (6), и в MeCN в атмосфере аргона (б) время (мин): 0 (1), 1 (2), 4 (3), 10 (4), 20 (5), 35 (6), 55 (7), 80 (8), 110 (9).

При стационарном фотолизе соединений 3 и 4 наблюдали небольшие изменения спектров поглощения (рис. 4), которые выражаются в сдвиге максимумов поглощения на 1-2 нм и небольшом падении оптической плотности, что свидетельствует об образовании димерного продукта, спектр которого не должен сильно отличаться от спектров исследуемых веществ, так как структура димера состоит из двух фрагментов исходного вещества. В случае тетрагидрохинолинов реакция присоединения протонного растворителя не имеет места, поэтому при фотовозбуждении генерируется только аминильный радикал из триплетного состояния аналогично реакциям (I) и (III) в схеме 3 для соединения 1.

## Импульсный фотолиз фурогидрохинолинов 1 и 3

Соединения 1-4 являются потенциальными препаратами для фотодерматологии, поэтому образование триплетных состояний, способных реагировать с тиминовыми основаниями ДНК при фотовозбуждении светом в ближней УФ-области, является необходимым условием для проявления их лечебного действия. В данной работе проведено сопоставление интермедиатов, образующихся при импульсном фотолизе соединений 1 и 3 в отсутствие О2 и на воздухе в растворе в ацетонитриле, и исследованы их спектрально-кинетические характеристики. Дифференциальные спектры поглощения интермедиатов различаются в зависимости от наличия кислорода в растворе (рис. 5). Кроме появления поглощения в области 500-

700 нм в отсутствие O<sub>2</sub>, которое может быть связано с образованием триплетов, в вакууме увеличивается поглощения в области около 400 нм, которое мы относим к поглощению аминильного радикала, и около 480 нм. Очевидно также различие в спектрах этих соединений в длинноволновой области в отсутствие О2: для 1 наблюдается постепенное уменьшение поглощения при  $\lambda > 500$  нм (рис. 5а), вставка, спектр 1), а для 3 поглощение отсутствует в области  $550 > \lambda > 500$  нм, далее увеличивается, достигая максимума при  $\lambda_{\text{max}} = 600$  нм, после чего спадает до 0 при  $\lambda = 720$  нм (рис. 56), вставка, спектр *I*)).

Кинетика гибели интермедиатов, поглощающих в области 400 нм, подчиняется уравнению 2-го порядка (рис. 6), что является подтверждением их радикальной природы. Увеличение концентрации аминильных радикалов при фотолизе в отсутствие О2 может свидетельствовать об их образовании из триплетного состояния. Преимущественное образование аминильных радикалов из соответствующих триплетных состояний аминов давно обсуждается в литературе. Следует отметить, что в случае соединения 3 гибель радикальных интермедиатов происходит с близкими константами скорости как на воздухе, так и в вакуумированном растворе (рис. 6б), вставка), в то время как для соединения 1 константа скорости гибели интермедиата, образовавшегося в отсутствие О2, примерно в 6 раз ниже (рис. 6а), вставка). Это вероятно свидетельствует об изменении структуры радикала для 1, в котором ацетамидная



**Рис. 4.** Спектры поглощения **3** (а) и **4** (б) в EtOH ( $1.0 \times 10^{-4}$  мол/л) при стационарном фотолизе в начальный момент времени (спектр *I*) и через 60 мин (спектр *2*) после облучения УФ-светом.



**Рис. 5.** Дифференциальные спектры поглощения после импульса света, (а) соединение **1** и (б) соединение **3**, (*1*) – в отсутствие  $O_2$ , (*2*) – на воздухе. Вставки. Изменения дифференциальных спектров поглощения во времени в диапазоне  $550 < \lambda < 720$  нм, (а) время регистрации, с: 0.00015 (*1*), 0.0002 (*2*), 0.0003 (*3*), 0.0005 (*4*), 0.001 (*5*), 0.002 (*6*). (б), с: 0.0008 (*1*), 0.0015 (*2*), 0.002 (*3*), 0.005 (*4*), 0.02 (*5*).

группа может играть особую роль в реакциях триплетного состояния. Этот вопрос требует более детального исследования и выходит за рамки данной работы.

Изменения спектров дифференциального поглощения во времени в отсутствие О<sub>2</sub> в длинноволновой области (рис. 5, вставки) показывает, что скорость этих изменений различна на разных длинах волн. Действительно, кинетические кривые гибели отчетливо демонстрируют наличие по крайней мере двух процессов, происходящих с разными константами скорости. Аппроксимация





**Рис. 6.** (а) Кинетика гибели дифференциального поглощения, образующегося при фотовозбуждении раствора соединения **1**: (I) – в отсутствие O<sub>2</sub>, (2) – на воздухе,  $\lambda_{per} = 400$  нм; вставка: зависимость  $1/\Delta A$  от времени. (б) Кинетика гибели дифференциального поглощения, образующегося при фотовозбуждении раствора соединения **3**: (I) – в отсутствие O<sub>2</sub>, (2) – на воздухе,  $\lambda_{per} = 420$  нм.

экспериментальных данных методом глобального анализа по уравнению (2) при *i* = 2 позволила определить константы скорости гибели и спектры поглощения для промежуточных частиц (рис. 7). Для соединения **1**  $k_1 = (5.5 \pm 0.5) \times 10^3 \text{ c}^{-1} (\lambda_{\text{max}} = 630 \text{ нм})$  и  $k_2 = (1.0 \pm 0.1) \times 10^3 \text{ c}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{max}} \le 550 \text{ нм}$ ), а для соединения **3**  $k_1 = (1.5 \pm 0.2) \times 10^3 \text{ c}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{max}} = 630 \text{ нм}$ ) и  $k_2 = (2.2 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ c}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{max}} = 590 \text{ нм}$ ). Экспериментальные результаты позволяют сделать предположение, что два короткоживущих интер-



**Рис.** 7. Экспериментальная кинетика и аппроксимирующие кривые гибели дифференциального поглощения в отсутствие  $O_2$ , (a) соединение 1,  $\lambda_{per}$ , нм: 550 (*I*), 620 (*2*) и 720 (*3*); (б) соединение 3,  $\lambda_{per}$ , нм: 600 (*I*), 630 (*2*) и 720 (*3*). Вставки: рассчитанные спектры поглощения интермедиатов с константами гибели,  $c^{-1}$ : (a) 5.5 × 10<sup>3</sup> (*I*) и 1.0 × 10<sup>3</sup> (*2*), (б) 1.5 × × 10<sup>3</sup> (*I*) и 2.2 × 10<sup>2</sup> (*2*), (*3*) спектр поглощения при  $t \rightarrow \infty$ .

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ том 55 № 6 2021

медиата образуются независимо из синглетного возбужденного состояния фурогидрохинолина.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были синтезированы новые фуро- и тиенодигидрохинолины и фуротетрагидрохинолины и исследованы их спектрально-люминесцентные и спектрально-кинетические свойства. Показано, что состав продуктов стационарного и импульсного фотолиза зависит от наличия кислорода, что указывает на участие триплетного состояния исследуемых соединений в фотохимических процессах в отсутствие кислорода. Образование триплетных состояний исследуемых соединений с высоким выходом указывает на перспективность их дальнейшего исследования с целью применения в фотодерматологии.s

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Измерения спектров поглощения, флуоресценции и ЯМР, а также методом импульсного фотолиза выполнены в Центре коллективного пользования ИБХФ РАН "Новые материалы и технологии".

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Гос. задания ИБХФ РАН, тема № 1201253303.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Llano J., Raber J., Eriksson L.A. // J. Photochem. Photobiol A: Chemistry. 2003. V. 154. P. 235.
- Ando K., Akai Y., Kunimoto J., Yokomizo T., Nakajima H., Takeuchi T., Yamashita M., Ohta S., Ohishi T., Ohishi Y. // Org. Biomol. Chem. 2007. V. 5. P. 655.
- Bethea D., Fullmer B., Syed S, Seltzer G., Tiano J., Rischko C., Gillespie L., Brown D., Gasparro F.P. // J. Dermatol. Sci. 1999.V. 19. P. 78.
- Via L.D., Mammi S., Uriarte E., Santana L., Lampronti I., Gambari R., Gia O. // J. Med. Chem. 2006. V. 49, 4317.
- Marzano C., Chilin A., Bordin F., Baccichetti F., Guiotto A. // Bioorg. Med. Chem. 2002. V. 10. P. 2835.

- Muthukrishnan I., Sridharan V., Menéndez J. C. // Chem. Rev. 2019. V. 119. P. 5057–5191; https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00567
- 7. *Некипелова Т.Д., Гагарина А.Б. //* Нефтехимия. 1982. Т. 22. С. 278.
- 8. *Некипелова Т.Д., Малкин Я.Н., Кузьмин В.А. //* Изв. Акад. наук СССР, Сер. хим. 1980. № 1. С. 80.
- Malkin Ya.N., Pirogov N.O., Kuzmin V.A. // J. Photochemistry. 1984. V. 26. P. 193.
- Некипелова Т.Д., Кузьмин В.А., Шишков В.С. // Химия высоких энергий. 2002. Т. 36. С. 212.
- Nekipelova T., Gostev F., Kuzmin V., Sarkisov O. // Photochem. Photobiol. Sci. 2006. V. 5. P. 815.
- 12. Лыго О.Н., Некипелова Т.Д., Ходот Е.Н. // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. С. 431.
- 13. *Некипелова Т.Д., Кузьмин В.А. //* Успехи химии. 2012. Т. 81. С. 983.
- Кузьмин В.А., Мазалецкая Л.И., Некипелова Т.Д., Ходот Е.Н. // Изв. Акад. наук. Сер. хим. 2008. № 11. С. 2356.
- Некипелова Т.Д., Лыго О.Н., Ходот Е.Н., Кузьмин В.А., Шахматов В.В., Варгин В.В., Белякова А.В., Зылькова М.В. // Химия высоких энергий. 2012. Т. 46. С. 211.
- Лыго О.Н., Некипелова Т.Д., Ходот Е.Н., Кузьмин В.А., Шахматов В.В., Волнухин В.А., Варгин В.В., Шевелев А.Б., Шибаева А.В. // Химия высоких энергий. 2012. Т. 46. С. 216.
- 17. Лыго О.Н., Некипелова Т.Д., Ходот Е.Н., Шахматов В.В., Кононихин А.С., Николаев Е.Н., Кузьмин В.А. // Химия высоких энергий. 2012. Т. 46. С. 452.
- Кузьмин В.А., Волнухин В.А., Егоров А.Е., Климович О.Н., Костюков А.А., Некипелова Т.Д., Ходот Е.Н., Шахматов В.В., Шевелев А.Б., Шибаева А.В., Штиль А.А. // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 12. С. 3.
- 19. Патент (19)RU(11)2 686 692(13) С1
- 20. Zambias R.A., Hammond M.L. // Synthetic Communications. 1991. V. 21. № 7. P. 959.
- 21. *Паркер С.* // Фотолюминесценция растворов. М.: Мир. 1972. С. 247.
- 22. *Некипелова Т.Д., Кузьмин В.А. //* Химия высоких энергий. 2005. Т. 39. С. 449.