——— ФОТОНИКА —

УДК 541.14+543.42

## ФОТОПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНА В СИСТЕМЕ ЭОЗИН–ЕВРОПИЙ– КУКУРБИТ[6–8]УРИЛЫ В ВОДЕ

© 2019 г. Т. В. Федотова<sup>*a*, *b*</sup>, Г. В. Захарова<sup>*a*, \*</sup>, В. Н. Гутров<sup>*a*</sup>, А. К. Чибисов<sup>*a*, *b*, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Центр фотохимии РАН, Федеральное государственное учреждение "Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук", Москва, 119421 Россия

<sup>b</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Московская обл., 141701 Россия

\*E-mail: gvzakharova@gmail.com \*\*E-mail: alexander.chibisov@gmail.com Поступила в редакцию 15.05.2019 г. После доработки 05.06.2019 г. Принята к публикации 19.06.2019 г.

Исследовали тушение триплетного состояния эозина европием(III) в воде в отсутствие и в присутствии кукурбит[6–8]урилов по данным фосфоресценции и триплет-триплетного поглощения в водном обескислороженном растворе при комнатной температуре. Тушение обусловлено фотопереносом электрона с эозина на европий, а также на его комплексы с кукурбит[6–8]урилами. Значение константы скорости тушения фосфоресценции эозина европием в отсутствие кавитандов составляет  $1.9 \times 10^6$  л моль<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>, а в присутствии КБ6, КБ7 и КБ8 значения констант скорости возрастает до 2.1, 2.2 и  $2.6 \times 10^6$  л моль<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup> соответственно. Одновременно с уменьшением времени жизни молекулы эозина в триплетном состоянии наблюдали увеличение выхода полуокисленной формы эозина, как продукта фотопереноса электрона. Было также показано, что при увеличении концентрации КБ7 и КБ8 константа скорости тушения возрастает в 2 раза. Различие в значениях констант скорости тушения может быть обусловлено тем, что выступающий в качестве тушителя европий присутствует в виде комплексов с кукурбит[6–8]урилами различного состава.

*Ключевые слова:* эозин, европий (III), кукурбит[6–8]урилы, триплетное состояние, перенос электрона, лазерный фотолиз, фосфоресценция **DOI:** 10.1134/S0023119319060056

Ионы металлов часто выступают в качестве реагентов окислительно-восстановительных фотореакций, а также в качестве доноров и акцепторов энергии. Так, ранее нами было показано, что аква-ионы  $UO_2^{2+}$ ,  $Cu^{1+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ce^{+3}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ , а также цианидные комплексы  $Fe^{2+}$ ,  $Ru^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Co^{3+}$ ,  $Mo^{4+}$ ,  $W^{4+}$  вступают в реакцию переноса электрона с молекулой эозина в триплетном состоянии [1-6]. В последнее время значительное внимание уделяется изучению процессов молекулярной фотоники комплексов красителей с кавитандами и в частности с кукурбит[6-8]урилами [7, 8]. Особенностью кукурбит[6-8]урилов является их способность образовывать комплексы "гостьхозяин". Формирование комплексов включения органических флуорофоров с кукурбитурилами обычно проявляется в значительном усилении флуоресценции [7, 9–15], а также сказывается на скорости темновой реакции *цис* → *транс* изомеризации [15] и реакции переноса электрона [16]. Кроме того, комплексообразование с кукурбитурилами повышает фотостабильность красителей, что является существенным при их использовании в качестве активных лазерных сред [17, 18]. Влияние кукурбитурилов проявляется также в увеличении времени жизни фотоизомеров тиакарбоцианина и индолениновых красителей [19-21]. Особенностью кукурбитурилов является их стимулирующее действие на процесс димеризации красителей. Было показано, что димеры 3,3'-диметил- и 3,3'-диэтилтиакарбоцианины образуют с кукурбит[8]урилом комплексы состава 2:1, способные к термически-активированной замедленной флуоресценции [22, 23]. Димеры 3,3'-диэтилтиакарбоцианина в триплетном состоянии, присутствующие в комплексе с кукурбит[8]урилом, вступают в реакцию переноса электрона с *n*-нитроацетофеноном [19, 22] с образованием катионрадикала димера. Наряду с переносом электрона комплексы полиметинов с кукурбит[7]урилом проявляют способность к триплет-триплетному переносу энергии. Так, комплекс тионина с ку-

курбит[7, 8]урилами выступает в качестве акцептора при переносе энергии от триплетной молекулы эозина [24]. Образование комплексов имеет место также для ионов щелочных, щелочноземельных металлов, а также лантаноидов с кукурбит[6, 7]урилами [25, 26]. Аквакомплексы щелочных и щелочноземельных металлов связываются с атомами кислорода карбонильных групп порталов кукурбит[6]урила, тогда как аквакомплексы лантаноидов связываются с макроциклом за счет прямой координации металла атомами кислорода, а также за счет водородных связей. Образование комплексов включения с кукурбитурилами оказывает влияние на окислительно-восстановительные свойства производных ферроцена и виологена [27, 28]. Следует отметить, что в литературе практически отсутствуют сведения о влиянии кукурбитурилов на реакцию фотопереноса электрона между красителями и аква-ионами металлов.

В настоящей работе приведены результаты сравнительного спектрально-кинетического изучения реакции одноэлектронного окисления европием(III) молекулы эозина в триплетном состоянии в воде как в отсутствие, так и в присутствии кукурбит[6–8]урилов. Выбор европия как представителя группы лантаноидов был обусловлен его способностью к образованию внешнесферных комплексов различного строения с кукурбит[6, 7]урилами, выступающими в качестве макролигандов [25, 26].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использовали Эозин Н, (динатриевая соль 2,4,5,7-тетрабромфлуоресцеин), нитрат европия Eu(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · *x*H<sub>2</sub>O, кукурбит[6-8]урилы и гликолурил фирмы Aldrich. Измерения спектров поглощения и кинетики превращения промежуточных продуктов лазерного возбуждения эозина проводили на установке наносекундного лазерного фотолиза [20]. Тушение триплетного состояния эозина наблюдали как по сокращению времени фосфоресценции, так и по убыли полосы триплет-триплетного поглощения красителя при  $\lambda = 600$  нм. Продукты одноэлектронного окисления и восстановления эозина регистрировали по спектрам поглощения при  $\lambda = 454$  и  $\lambda = 410$  нм соответственно. Спектры поглощения эозина в основном состоянии регистрировали на спектрофотометре Agilent 8453, спектры фосфоресценции измеряли на спектрофлуориметре Varian Cary Eclips. В качестве растворителя использовали воду, очищенную с помощью системы Direct-Q3 Millipore. Все измерения проводили с обескислороженными растворами при комнатной температуре. Удаление

кислорода воздуха осуществляли путем продувки раствора аргоном. Концентрации красителя составляла  $(0.2 - 1) \times 10^{-5}$  моль/л, концентрация ку-курбит[6–8]урилов –  $1 \times 10^{-5}$ – $1 \times 10^{-4}$  моль/л, концентрация гликоурила –  $1 \times 10^{-4}$  моль/л, концентрация европия –  $(1-6) \times 10^{-3}$  моль/л.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью эозина (дианион,  $\exists o^{2-}$ ) является его способность вступать в реакцию фотопереноса электрона с образованием полуокисленной и полувосстановленной форм в отсутствие экзогенных доноров и акцепторов электрона [29], а также способность к фосфоресценции в водных обескислороженных растворах при комнатной температуре [24]. В настоящей работе исследование фотопереноса электрона между эозином и европием проводили как по кинетике дезактивации триплетного состояния  $\exists o^{2-}$ , так и по кинетике тушения фосфоресценции красителя.

На первом этапе исследовали реакцию фотоокисления эозина аква-ионами европия. Известно, что молекула эозина способна к интеркомбинационному переходу в триплетное состояние с квантовым выходом  $\phi_{\rm T} = 0.7$  [29]. Эозин в триплетном состоянии (<sup>3</sup>Эо<sup>2-</sup>) образует полуокисленную (Эо<sup>--</sup>, моноанион-радикал) и полувосстановленную (Эо<sup>3--</sup>, трианион-радикал) формы в отсутствие экзогенных доноров и акцепторов электрона в результате реакции дисмутации (1) и концентрационного тушения (2) [29]

$$\Im o^{2-} + {}^{3} \Im o^{2-} \rightarrow \Im o^{3-} + \Im o^{-}, \qquad (1)$$

$$^{3}\operatorname{Go}^{2-}+^{1}\operatorname{Go}^{2-}\rightarrow\operatorname{Go}^{3-}+\operatorname{Go}^{-}.$$
 (2)

На рис. 1 приведены кинетические кривые образования полуокисленной (а) и полувосстановленной (б) форм эозина. Из рис. 1 следует, что форма кинетической кривой достижения максимума поглощения полуокисленной формы (1а) отличается от формы кривой достижения максимума поглощения полувосстановленной формы (1б). В последнем случае кривая состоит из двух компонентов, включающих первоначальный скачкообразный рост  $\Delta A$  с последующим плавным увеличением значения  $\Delta A$ , и является результатом наложения кинетических кривых триплет-триплетного поглощения и поглощения полувосстановленной формы (16).

Перенос электрона с образованием полуокисленной формы эозина имеет место также между эозином в триплетном состоянии и гидратированным ионом европия (Eu<sup>3+</sup>). На рис. 2 приведе-



**Рис. 1.** Кинетические кривые образования полуокисленной (а) и полувосстановленной (б) форм эозина  $(1 \times 10^{-5} \text{ моль/л}).$ 

ны кинетические кривые изменения оптической плотности эозина в присутствии Eu<sup>3+</sup> в воде.

Из рис. 2а следует, что добавление Eu<sup>3+</sup> к раствору эозина приводит как к росту величины  $\Delta A$ , являющейся мерой относительного квантового выхода интеркомбинационного перехода в триплетное состояние  $\phi_{ST}$ , так и к сокращению времени жизни триплетного состояния эозина. Полученный результат может быть следствием двух причин. Согласно первой увеличение выхода триплетных молекул эозина имеет место в результате интеркомбинационной конверсии синглетной ион-радикальрной пары <sup>1</sup>[Эо<sup>-</sup>...Еи<sup>2+</sup>], образующейся при тушении флуоресценции, в триплетную ион-радикальныую пару  ${}^{3}$ [Эо<sup>-•</sup>...Eu<sup>2+</sup>], с ее последующей диссоциацией на Эо- · и Еи<sup>2+</sup>. Подобный механизм был рассмотрен в работе [30] для реакции фотоокисления ароматических углеводородов ионом европия в ацетонитриле. Однако данный механизм для системы Эо<sup>2-</sup>-Еи<sup>3+</sup> является маловероятным ввиду того, что тушение флуоресценции эозина ионом европия не наблюдали в области концентраций  $1 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-3}$  моль/л. Другой причи-



**Рис. 2.** Кинетические кривые дезактивации триплетного состояния эозина ( $1 \times 10^{-5}$  моль/л) (а) в отсутствие (1) и в присутствии (2) Eu<sup>3+</sup> ( $6 \times 10^{-3}$  моль/л). Кинетика образования и гибели полуокисленной формы эозина (б) в присутствии Eu<sup>3+</sup> ( $6 \times 10^{-3}$  моль/л).

ной возрастания выхода триплетных молекул эозина является влияние спин-орбитального взаимодействия на интеркомбинационный переход ("внешний эффект тяжелого атома") в молекуле эозина, находящегося в комплексе с европием. Параметром спин-орбитального взаимодействия является константа ξ спин-орбитального взаимодействия, равная  $\xi = 1469 \text{ см}^{-1}$  для европия [31]. Отметим, что для Br как тяжелого атома значение константы спин-орбитального взаимодействия составляет  $\xi = 2460$  см<sup>-1</sup> [31]. Известно [29] что атомы брома, входящие в состав молекулы эозина, обуславливают существенное увеличение  $\phi_{ST}$ по сравнению с  $\phi_{ST}$  для флуоресцеина, молекула которого не содержит атомов брома. Наблюдаемое сокращение времени триплетного состояния эозина в присутствии Eu<sup>3+</sup> обусловлено переносом электрона на ион Eu<sup>3+</sup> (3) с образованием Eu<sup>2+</sup> и моно анион-радикала <sup>2</sup>Эо<sup>-•</sup> (полуокисленная форма эозина):



Рис. 3. Нормированные спектры фосфоресценции обескислороженного раствора эозина в отсутствие (1) и в присутствии КБ6 (2), КБ7 (3), КБ8 (4) в концентрации 1 × 10<sup>-5</sup> моль/л.

$${}^{3} \Im o^{2-} + E u^{3+} \rightarrow \Im o^{-} + E u^{2+}.$$
 (3)

На рис. 26 приведена кинетическая кривая образования полуокисленной формы эозина в присутствии Eu<sup>3+</sup>. Увеличение выхода Эо<sup>--</sup> является полтверждением фотопереноса электрона между красителем и аква-ионом металла. Константа скорости тушения триплетного состояния эозина в воде равна  $1.9 \times 10^6$  л моль<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Следует отметить, что перенос энергии между триплетным состоянием эозина и ионом европия является маловероятным ввиду эндотермичности процесса: положение энергетического уровня  $Eu^{3+}$  (17300 см<sup>-1</sup>). [32]) превышает положение триплетного уровня эозина (14730 см<sup>-1</sup>, [29]) на 2570 см<sup>-1</sup>.

На втором этапе исследовали влияние кукурбит[6-8]урилов на спектрально-люминесцентные и спектрально-кинетические свойства эозина. Ранее нами было показано [24], что в присут-

Таблица 1. Значения константы скорости тушения фосфоресценции  $k_a$  зозина ионом Eu<sup>3+</sup> в отсутствие и в присутствии гликоурила, КБ6, КБ7 и КБ8

 $k_a, M^{-1} c^{-1}$ 

вода	гликоурил*	КБ6**	КБ7**	КБ8**
1.9 × 10 <sup>6</sup>	$2.0 \times 10^{6}$	$2.6 \times 10^{6}$	$2.2 \times 10^{6}$	$2.1 \times 10^{6}$

\* Концентрация 1 × 10<sup>-4</sup> моль/л. \*\* Концентрация 1 × 10<sup>-5</sup> моль/л.

ствии КБ7 и кукурбит[8]урила (КБ8) происходит падение выхода фосфоресценции Эо<sup>2-</sup> при неизменном времени жизни, что указывает на статическое тушение фосфоресценции. В настоящей работе наблюдали статическое тушение фосфоресценции Эо<sup>2-</sup> также в присутствии кукурбит[6]урила (КБ6) при неизменном времени жизни. Статическое тушение фосфоресценции являобразования ется следствием неактивно поглощающих комплексов между эозином и кукурбит[6-8]урилами: Эо<sup>2-</sup>@КБ6, Эо<sup>2-</sup>@КБ7 и Эо<sup>2-</sup>@КБ8. На рис. 3 приведены спектры фосфоресценции обескислороженного раствора эозина в отсутствие и в присутствии КБ6, КБ7 и КБ8 в воде. Наиболее значительное падение фосфоресценции имеет место для КБ8, что указывает на более эффективное образование неактивно поглощающего комплекса Эо<sup>2-</sup>@КБ8. Добавление к раствору эозина гликолурила в концентрации 10<sup>-4</sup> моль/л не приводит к изменению выхода фосфоресценции.

Следует отметить, что кукурбитурилы в концентрации до 1  $\times$  10<sup>-5</sup> моль/л не оказывают влияния ни на спектр поглощения, ни на спектр флуоресценции эозина. Используя уравнение Штерна-Фольмера, были найдены константы статического тушения фосфоресценции эозина, обусловленного образованием комплексов Эо<sup>2-</sup>@КБ6, Эо<sup>2-</sup>@КБ7 и  $Эо^{2-}$ @КБ8, значения которых составляют  $1.3 \times 10^{4}$ .  $2.3 \times 10^4 \text{ M} 3.1 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$  соответственно.

Молекулы эозина в комплексе Эо<sup>2-</sup>@КБ6. Эо<sup>2-</sup>@КБ7 и Эо<sup>2-</sup>@КБ8 также проявляют способность к интеркомбинационному переходу в триплетное состояние, при этом спектр триплет-триплетного (Т-Т) поглощения эозина в комплексе сходен со спектром Т-Т поглощения свободного Эо<sup>2-</sup>. Сходство спектров указывает на отсутствие заметного влияния кукурбитурилов на электронную конфигурацию (структуру) молекулы эозина и на положение уровней энергии. Для комплексов Эо<sup>2-</sup> с кукурбит[7]урилом имеет место образование полуокисленной Эо- • @КБ7 и полувосстановленной Эо<sup>3-•</sup>@КБ7 форм, сопровождающееся ростом величины изменения оптической плотности,  $\Delta A$ . На рис. 4 приведены кинетические кривые образования полуокисленной и полувосстановленной форм Эо<sup>2-</sup> в присутствии КБ7. Обращает внимание тот факт, что величина  $\Delta A$ для Эо<sup>-•</sup>@КБ7 и Эо<sup>3-•</sup> @КБ7 превышает величину  $\Delta A$  для  $\Im o^{-}$  и  $\Im o^{3-}$ . Из рис. 4 следует, что кинетические кривые состоят из трех участков. На первом участке (<1 мкс) происходит скачкообразное увеличение Т-Т поглощения, на втором участке (5–100 мкс) наблюдается рост  $\Delta A$  с после-



**Рис. 4.** Кинетические кривые образования полуокисленной (а) и полувосстановленной (б) форм эозина  $(1 \times 10^{-5} \text{ моль/л})$  в присутствии КБ7 ( $1 \times 10^{-4} \text{ моль/л}$ ).

дующим ее падением через 150–200 мкс, обусловленным превращением полуокисленной и полувосстановленной форм. Образование полуокисленной и полувосстановленной форм Эо<sup>2–</sup> в комплексе происходит в результате реакции дисмутации

На третьем этапе исследовали тушение Eu<sup>3+</sup> триплетного состояния эозина в присутствии KБ6, KБ7 и KБ8. Концентрация кукурбитурилов составляла  $1 \times 10^{-5}$  моль/л, что лимитировалось предельной растворимостью KБ6 в воде. В табл. 1 приведены значения константы скорости тушения триплетного состояния Эо<sup>2-</sup> ионом Eu<sup>3+</sup> в присутствии гликоурила и кукурбит[6–8]урилов.

Из табл. 1 видно, что добавление КБ6, КБ7 и КБ8, а также гликоурила в концентрации 1  $\times$   $\times$  10<sup>-4</sup> моль/л приводит к увеличению константы



**Рис. 5.** Кинетические кривые дезактивации триплетного состояния эозина  $(1 \times 10^{-5} \text{ моль/л})$  (а) и образования полуокисленной формы эозина (б) в присутствии КБ6  $(1 \times 10^{-5} \text{ моль/л})$ . (*I*) – в отсутствие Eu<sup>2+</sup> (*2*) – в присутствии Eu<sup>2+</sup> (6 × 10<sup>-3</sup> моль/л).

скорости тушения фосфоресценции эозина. При этом наибольший эффект наблюдается в присутствии КБ6. На рис. 5 приведены кинетические кривые дезактивации триплетного состояния и образования полуокисленной формы эозина в присутствии КБ6 в отсутствие и в присутствии  $Eu^{3+}$ . Из рисунка следует, что выход полуокисленной формы эозина,  $\Delta A$ , в присутствии  $Eu^{3+}$ возрастает на 0.008. В присутствии KБ7 и KБ8 увеличение выхода полуокисленной формы составляет 0.009 и 0.004 соответственно.

На примере КБ8 и КБ7 исследовали влияние концентрации КБ на фотоперенос электрона между эозином и европием. Рис. 6 иллюстрирует влияние КБ8 на эффективность тушения фосфоресценции. Зависимость константы скорости затухания фосфоресценции эозина от концентрации Еи состоит из двух участков (I и II), отражающих различную эффективность тушения. Значения констант скорости тушения на участках I и II различаются в 10 раз. По-видимому, наблюдаемое различие в константах скорости тушения обуслов-



**Рис. 6.** Зависимость константы скорости затухания фосфоресценции эозина ( $k_{\phi}$ ) от концентрации европия ((0.5 – 6) × 10<sup>-3</sup> моль/л) в присутствии КБ8 в концентрации 1 × 10<sup>-5</sup> моль/л (*1*), 3 × 10<sup>-5</sup> моль/л (*2*) и 5 × 10<sup>-5</sup> моль/л (*3*).

лено различным состоянием ионов европия в растворе. Известно [25], что ионы переходных металлов и, в частности, лантаноидов способны образовывать комплексы с кукурбитурилами. Добавление КБ8 смещает равновесие в сторону закомплексованных ионов, что приводит к увеличению эффективности тушения. Установлено, что при увеличении концентрации КБ8 с 1 ×  $\times 10^{-5}$  до 5  $\times 10^{-5}$  моль/л константа скорости тушения возрастает до  $4.7 \times 10^6$  л · моль<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>. Аналогично, увеличение концентрации КБ7 в 10 раз приводит к возрастанию константы скорости тушения в два раза ( $4.8 \times 10^6$  л · моль<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>). Возможной причиной различий в значениях  $k_a$  является способность Eu<sup>3+</sup> образовывать комплексы разного состава с кукурбитурилом.

Таким образом, образование комплексов эозина с кукурбит[6—8]урилами влияет на величину константы скорости реакции фотоокисления эозина ионами европия, способствуя протеканию фотоокисления эозина.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН в части проведения спектрально-люминесцентных измерений эозина в присутствии кукурбит[6-8]урилов и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-03-00183) в части кинетических измерений реакции фотопереноса электрона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Захарова Г.В., Лифанов Ю.И., Чибисов А.К. // Химия высоких энергий. 1981. Т. 15. № 1. С. 68.
- 2. Захарова Г.В., Коробов В.Е., Чибисов А.К. // Теорет. экспер. хим. 1982. № 3. С. 343.
- 3. Захарова Г.В., Кнолль Х., Хенниг Х., Чибисов А.К. // Изв. АН СССР сер. хим. 1987. № 3. С. 539.
- 4. *Чибисов А.К., Захарова Г.В.* // J. I nf. Rec. Mater. 1987. V. 15. № 6. С. 395.
- 5. *Чибисов А.К., Захарова Г.В.* // Успехи научн. фотографии. 1989. Т. 25. С. 114.
- 6. Захарова Г.В., Чибисов А.К. // Химическая физика. 1990. Т. 9. № 10. С. 1311.
- Dsouza R.N., Pichel U., Nau W.M. // Chem. Rev. 2011.
  V. 111. № 12. P. 7941.
- Koner A.L., Nau W.M. // Supramol. Chem. 2007. V. 19. № 1–2. P. 55.
- Liu Y., Li C., Guo D. et al. // Supramol. Chem. 2007. V. 19. № 7. P. 517.
- 10. *Bhasikuttan A.C., Mahanty J., Nau W.M., Pal H.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. V. 46. № 22. P. 4120.
- 11. *Petrov N.Kh., Ivanov D.A., Golubkov D.V. et al.* // Chem. Phys. Lett. 2009. V. 480. № 1–3. P. 96.
- 12. Захарова Г.В., Жижимов Д.А., Авакян В.Г. и др. // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48. № 2. С. 104.
- Zakharova G.V., Zhizhimov D.A., Sazonov S.K. et al. // J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 2015. V. 302. P. 69.
- Atabekyan L.S., Vedernikov A.I., Avakyan V.G. et al. // J. Photochem. Phobiol. A: Chem. 2013. V. 253. P. 52.
- 15. Атабекян Л.С., Кулемин Н.А., Авакян В.Г., Чибисов А.К. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 4. С. 966.
- Yuan L., Macartney D.H. // J. Phys. Chem. B. 2007. V. 111. № 24. P. 6949.
- 17. *Mohanty J., Pal H., Ray A.K. et al.* // Chem. Phys. Chem. 2007. V. 8. № 1. P. 54.
- Mahanty J., Nau W.M. // Angew. Chem. Int. Ed. 2005. V. 44. № 24. P. 3750.
- 19. Атабекян Л.С., Авакян В.Г., Чибисов А.К. // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 2. С. 152.
- 20. Захарова Г.В., Авакян В.Г., Маркелов В.П. // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 6. С. 451.
- 21. Чибисов А.К., Алфимов М.В., Захарова Г.В. и др. // Химия высоких энергий. 2017. Т. 51. № 6. С. 480.
- 22. Захарова Г.В., Чибисов А.К. // Химия высоких энергий. 2016. Т. 50. № 5. С. 388.
- 23. Захарова Г.В., Авакян В.Г., Чибисов А.К., Алфимов М.В. // Химия высоких энергий. 2017. Т. 51. № 3. С. 210.
- 24. Федотова Т.В., Гутров В.Н., Захарова Г.В. и др. // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. № 1. С. 24.
- 25. *Герасько О.А., Самсоненко Д.Г., Федин В.П.* // Успехи химии. 2002. Т. 71. № 9. С. 842.
- Liang L.L., Ni X.L., Zhao Y. et al. // Inorg. Chem. 2013.
  V. 52. № 4. P. 1909.

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ том 53 № 6 2019

- 27. *Gadde S., Kaifer A.E.* // Current Organic Chemistry. 2011. V. 15. № 1. P. 27.
- 28. Qiu Y., Kaifer A.E. // Isr. J. Chem. 2011. V. 51. № 7. P. 830.
- 29. Коробов В.Е., Чибисов А.К. // Успехи химии. 1983. Т. 52. № 1. С. 43.
- 30. Sabbatini N., Indolfi M.T., Gandolfi M.T., BaIzani V. // J. phys. Chem. 1982. V. 86. № 18. P. 3585.
- Montalti M., Credi A., Prodi L., Gandolfi M.T. // Handbook of photochemistry. New York: CRC Press. 2006. P. 633.
- 32. Полуэктов Н.С., Кононенко Л.И., Ефрюшина Н.П., Бельтюкова С.В. Спектрофотометрические и люминесцентные методы определения лантаноидов. Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.