

УДК 546.65:541.49:543.426

**А. В. Егорова, И. И. Леоненко, Д. И. Александрова, Ю. В. Скрипинец,
В. П. Антонович**

Физико-химический институт им. А. В. Богатского НАН Украины,
Люстдорфская дорога, 86, Одесса, 65080, Украина

БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ОТ КОМПЛЕКСА Sm(III) НА ЦИАНИНОВЫЙ КРАСИТЕЛЬ Cy5

Установлены оптимальные условия образования нового хелатного комплекса Sm(III) с производным оксохинолинкарбоновой кислоты (L) и определены его спектрально-люминесцентные характеристики (максимумы длин волн люминесценции, возбуждения и время жизни люминесценции). Обнаружен эффект тушения цианиновым красителем Cy5 (флуоресцентная метка протеинов и других биологических молекул) люминесценции комплекса Sm(III)–L. Тушение хелатного комплекса обусловлено ферстеровским резонансным переносом энергии электронного возбуждения (FRET) с донора (Sm(III)–L) на акцептор (Cy5). При этом интенсивность люминесценции красителя Cy5 в присутствии Sm(III)–L возрастает в 6 раз.

Значения ферстеровского радиуса ($R_{0(Sm-L)} = 41 \text{ \AA}$) и интеграла перекрытия спектра люминесценции донора энергии со спектром поглощения акцептора ($J_{Sm-L} = 1.87 \times 10^{12} \text{ M}^{-1} \text{ см}^{-1} \text{ нм}^4$), рассчитанные из распределения квантовой интенсивности люминесценции донора, спектра и молярного коэффициента поглощения акцептора, позволяют характеризовать краситель Cy5 как эффективный тушитель люминесценции ионов Sm(III). Хелатный комплекс Sm(III)–L впервые предложен в качестве FRET–донора.

Ключевые слова: люминесценция, комплекс Sm(III), цианиновый краситель.

Ферстеровский резонансный перенос энергии электронного возбуждения (Förster Resonance Energy Transfer, FRET) – это перенос энергии возбужденного состояния от донора к акцептору. Он происходит без промежуточного испускания фотонов и является, в основном, результатом диполь-дипольных взаимодействий между донором и акцептором. Скорость переноса энергии зависит от степени перекрытия спектра испускания донора со спектром поглощения акцептора, относительной ориентации дипольных моментов переходов и расстояния между молекулами. Зависимость флуоресцентного переноса энергии от всех перечисленных факторов обеспечивает значительные возможности использования метода для биохимических исследований [1-4]. Для проведения анализа донор и акцептор ковалентно привязывают к одной или разным биологическим молекулам и измеряют изменение эффективности FRET, из которого делают заключение об изменении расстояния между донором и акцептором. При сближении донора и акцептора происходит увеличение эффективности FRET, которое оценивают по уменьшению интенсивности или времени жизни люминесценции донора или по увеличению интенсивности люминесценции акцептора.

В качестве доноров и акцепторов в FRET–парах широко используют органические красители [5, 6]. Их недостатком является короткое время жизни люминесценции, обычно не превышающее нескольких наносекунд, что сужает динамический диапазон изменений времен жизни в процессе анализа. Поэтому в качестве FRET–доноров часто применяют лантанидные комплексы, обладающие суще-

ственно большими временами жизни (порядка 10-3000 мкс) [7-10], а в качестве акцепторов — органические люминесцентные или нелюминесцентные красители, обладающие высокими молярными коэффициентами поглощения и позволяющими, поэтому, увеличить детектируемые расстояния между донором и акцептором.

Для увеличения расстояний, детектируемых методом FRET, необходим тщательный подбор доноров и акцепторов с тем, чтобы достичь наиболее высоких значений эффективности переноса энергии. Поэтому подбор эффективной донорно-акцепторной пары с лантанидным донором сводится к выбору органического красителя, спектр поглощения которого наилучшим образом перекрывается со спектром люминесценции лантанидного комплекса.

Так, в работе [11] описан подбор эффективных акцепторов для тушения европиевого хелатного комплекса. С использованием подобранных красителей-акцепторов QSY21 и Alexa 680 выполнен гомогенный анализ гаптен на основе биотин-стрептоvidoинового взаимодействия с пределом обнаружения 17 пг/мл. Эти донорно-акцепторные пары предложены для гомогенного определения 17 β -эстрадиола с пределом обнаружения 18 пмоль/л [12].

Красители Alexa 680 и Alexa 488 оказались эффективными акцепторами люминесценции хелата тербия и успешно применены для определения эстрадиола [13], свободного и общего простатаспецифического антигена [14].

Наиболее широко используемыми акцепторами в методе FRET являются цианиновые красители Cy3, Cy5, Alexa 647, Alexa 680 [15-18].

В этой работе изучены спектрально-люминесцентные свойства комплекса самария (III) с производным оксохинолинкарбоновой кислоты (L), выяснена возможность применения этого хелата в качестве донора безызлучательного переноса энергии на цианиновый краситель-акцептор Cy5, применяемый в качестве флуоресцентной метки протеинов, антител, олигонуклеотидов, пептидов и других биологических молекул.

Материалы и методы

В работе использовали реактивы квалификации не ниже ч.д.а. и дистиллированную воду.

Стандартный раствор хлорида самария (0.1 моль/л) готовили растворением его оксида Sm₂O₃ высокой чистоты, который предварительно прокаливали в муфельной печи в течение 1 часа при 650–700 °С, в концентрированной соляной кислоте с последующим выпариванием ее избытка на водяной бане. Сухой остаток растворяли в дистиллированной воде и разбавляли до необходимого объема. Концентрацию полученного раствора SmCl₃ контролировали комплексонометрически с индикатором арсенazo I в уротропиновом буферном растворе при pH 7.0±0.2. Рабочий раствор (1×10⁻³ моль/л) готовили соответствующим разбавлением исходного раствора водой.

Использованный реагент-сенсibilизатор — (4-метил-пиридин-2-ил)-амид 1-этил-4-гидрокси-2-оксо-1,2-дигидрохинолин-3-карбоновой кислоты (L) — синтезировали, очищали и идентифицировали по методикам [19]. Исходный раствор L с концентрацией 1×10⁻³ моль/л получали растворением его точной навески в диметилформамиде (ДМФА).

Раствор (1×10⁻⁶ моль/л) красителя Cy5 (Life Technologies) готовили растворением навески в воде с последующим установлением точной концентрации по молярному коэффициенту поглощения ($\epsilon = 250000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

Значение pH растворов создавали с помощью 40%-ного водного раствора уротропина.

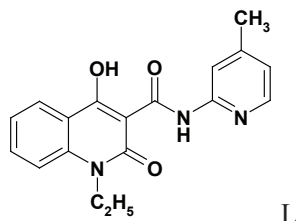
Электронные спектры поглощения записывали на спектрофотометре UV-2401 PC (Shimadzu, Япония). Спектры люминесценции, возбуждения и времена жизни люминесценции измеряли на спектрофлуориметре Cary Eclipse (Varian, Австралия). Спектры люминесценции самария (III) регистрировали в области 550–750 нм с $\lambda_{\text{макс}} = 598$ и 647 нм (переходы ${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$ и ${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ соответственно). Все спектральные измерения проводили в стандартных 1-см кварцевых кюветках. Значения времен жизни люминесценции лантанидных комплексов вычисляли с использованием программного обеспечения Cary Eclipse.

Значения pH растворов измеряли с помощью pH-метра Lab 850 (Schott Instruments GmbH, Германия) со стеклянным электродом, калибровку которого проводили с помощью стандартных буферных растворов.

Все измерения проводили при комнатной температуре (21–23°C).

Результаты и их обсуждение

В качестве комплексообразователя использовали производное оксохинолин-карбоновой кислоты: (4-метил-пиридин-2-ил)-амид 1-этил-4-гидрокси-2-оксо-1,2-дигидрохинолин-3-карбоновой кислоты (L), которое представляет собой кристаллическое вещество с четкой температурой плавления, хорошо растворимое в ДМФА. Структурная формула комплексообразователя:



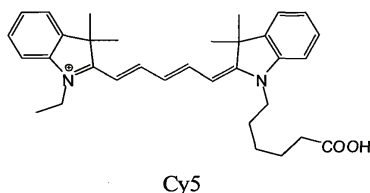
Спектр поглощения L в водно-диметилформамидном растворе (50/50 об/об) характеризуется наличием высокоинтенсивной полосы в УФ-области с $\lambda_{\text{макс}} = 313$ нм с молярным коэффициентом поглощения $\varepsilon = 24900$ л·моль⁻¹·см⁻¹. Энергия триплетного уровня (T) комплексообразователя L (более 22200 см⁻¹) значительно выше энергии уровня первого возбужденного состояния иона самария Sm(III) (17900 см⁻¹). Это позволяет предположить, что в комплексе Sm(III) с L может осуществляться эффективный перенос энергии от органической части молекулы комплекса к иону лантанида.

Максимумы полос возбуждения ($\lambda_{\text{возб}}$) изученного комплекса находятся в УФ-области спектра при 260 нм и 320 нм. Наиболее интенсивной в спектре люминесценции комплекса Sm(III)–L является полоса, соответствующая сверхчувствительному переходу ${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ с максимумом 647 нм.

Кинетика затухания люминесценции для полосы с максимумом при 647 нм для Sm(III) является моноэкспоненциальной и может быть охарактеризована временем жизни (τ), которое составляет 42 мкс.

Взаимодействие Sm(III) с L и люминесцентные свойства двойного комплекса Sm(III)–L были изучены нами ранее. Данный комплекс впервые предложен в качестве FRET-донора в паре со скварайновым красителем Seta-632.

В этой работе нами изучен безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения между комплексным соединением Sm(III)-L и цианиновым красителем Cy5:



Как известно, ионы лантанидов и их хелатные комплексы обладают интенсивной узкополосной люминесценцией в разных областях спектра и могут выступать как донорами, так и акцепторами энергии. Поиск донорно-акцепторных пар «лантанидный комплекс — органический краситель» является актуальной задачей для расширения возможностей одновременного использования нескольких люминесцентных маркеров с различными спектрами излучения.

Полосы флуоресценции комплекса Sm(III)-L находятся при 562 нм, 598 нм и 647 нм. В то же время спектр поглощения водного раствора красителя Cy5 характеризуется наличием полосы в области 647 нм (рис. 1а) с высоким молярным коэффициентом поглощения: $\epsilon_{647} = 250000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

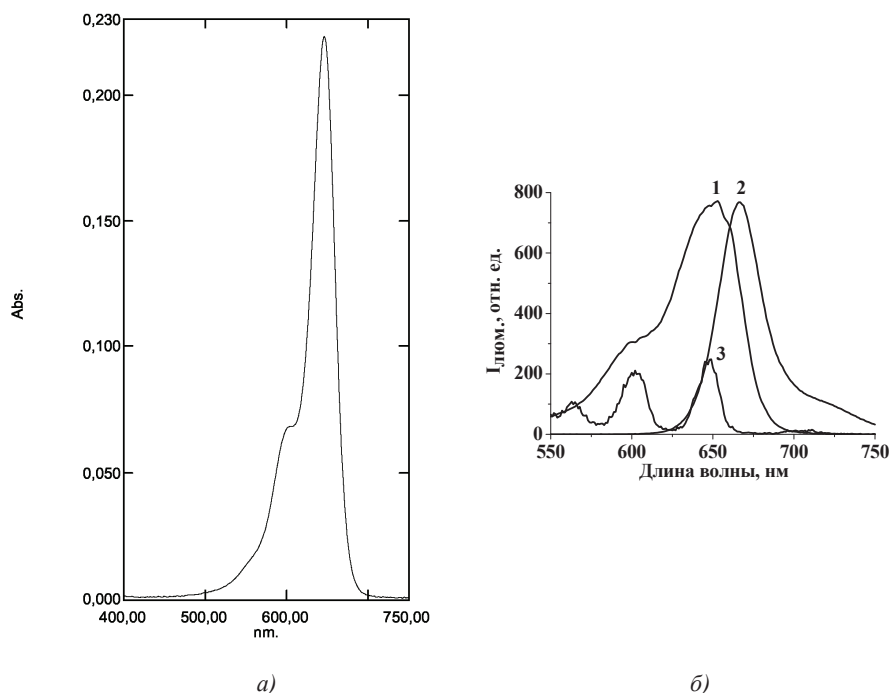


Рис. 1. Спектр поглощения раствора красителя Cy5 (а), спектры возбуждения (1) и люминесценции (2) растворов красителя Cy5 и люминесценции раствора комплекса Sm(III)-L (3) ($C_{\text{Sm(III)}} = 1 \times 10^{-4}$ моль/л, $C_L = 3 \times 10^{-5}$ моль/л, $C_{\text{Cy5}} = 1 \times 10^{-6}$ моль/л) (б).

Из рис. 1б видно, что эта полоса хорошо перекрывается со всеми полосами люминесценции Sm(III). Из этого следует, что краситель Су5 потенциально может выступать эффективным тушителем люминесценции комплекса Sm(III)–L.

Установлено, что при переносе энергии от комплексов Sm(III)–L (донор энергии) на Су5 (акцептор), интенсивность люминесценции ($I_{\text{люм}}$) красителя возрастает в присутствии Sm(III)–L в 6 раз.

При постоянных концентрациях Су5 (5×10^{-7} моль/л) и L (3×10^{-5} моль/л) изучены зависимости $I_{\text{люм}}$ от концентрации Sm(III) для систем Sm(III)–L–Су5. При постоянных концентрациях Су5 (5×10^{-7} моль/л) и Sm(III) (1×10^{-4} моль/л) изучены зависимости $I_{\text{люм}}$ от концентрации L для систем Sm(III)–L–Су5. Установлено, что оптимальной являются следующие концентрации: $C_{\text{Sm(III)}} = 1 \times 10^{-4}$ моль/л, $C_L = 3 \times 10^{-5}$ моль/л.

На рис. 2а представлены спектры люминесценции растворов красителя Су5 при различных концентрациях в присутствии комплекса Sm(III)–L. Как видно из рисунка, происходит тушение люминесценции комплекса Sm(III)–L, которое оценивали по изменению $I_{\text{люм}}$ при 598 нм, и одновременное увеличение интенсивности люминесценции красителя Су5 ($\lambda_{\text{макс}} = 667$ нм), что указывает на эффективный перенос энергии возбуждения от комплекса к красителю.

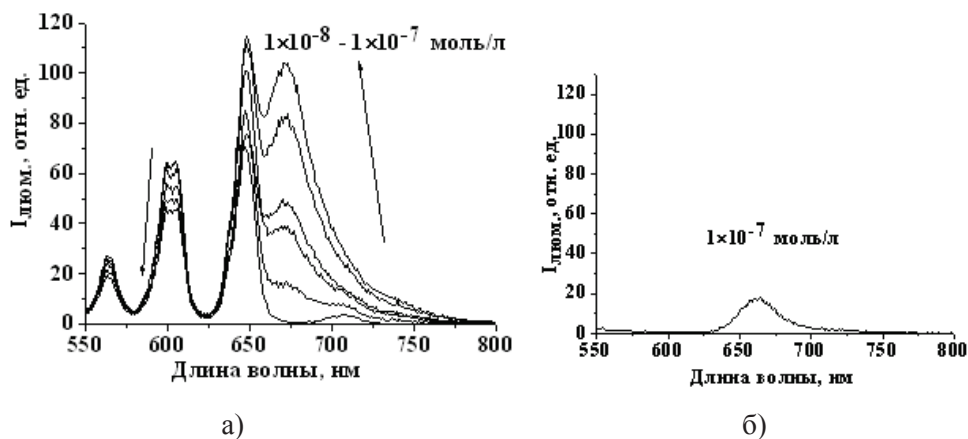


Рис. 2. Спектры люминесценции растворов красителя Су5 различных концентраций в присутствии комплекса Sm(III)–L (а) ($C_{\text{Sm(III)}} = 1 \times 10^{-4}$ моль/л, $C_L = 3 \times 10^{-5}$ моль/л, $\lambda_{\text{возб}} = 317$ нм) и спектр люминесценции раствора красителя Су5 (б) (щели монохроматоров 5-5; усиление 690).

При определении интенсивности люминесценции красителя при переносе энергии электронного возбуждения от донора (Sm(III)–L) вводили поправку, учитывающую собственную люминесценцию красителя, обусловленную поглощением возбуждающего света (рис. 2, б).

Значения ферстеровского радиуса (R_0) и интеграла перекрывания (J) спектра люминесценции Sm(III)–L со спектром поглощения Су5 (рис. 3) рассчитаны с учетом распределения квантовой интенсивности излучения в спектре люминесценции донора, спектра и молярного коэффициента поглощения акцептора (таблица).

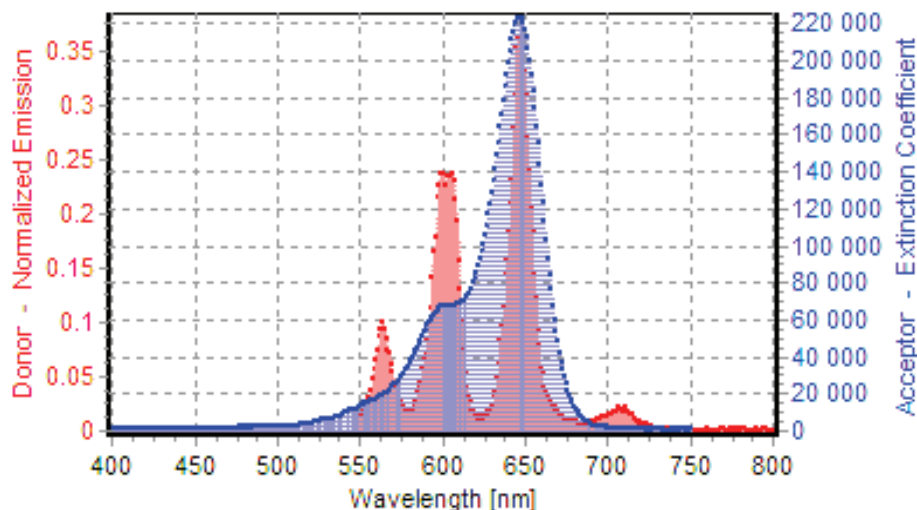


Рис. 3. Перекрытие спектров люминесценции комплекса Sm(III)-L ($C_{Sm(III)} = 1 \times 10^{-4}$ моль/л, $C_L = 3 \times 10^{-5}$ моль/л, $\lambda_{возб} = 317$ нм) со спектром поглощения Cy5 ($C_{Cy5} = 1 \times 10^{-6}$ моль/л).

Таблица

Тушение комплекса Sm(III)-L цианиновым красителем Cy5

Комплекс	[Cy5], моль·л ⁻¹	$\tau_{\text{комплекс}}$, мкс	$J \cdot 10^{12}$, М ⁻¹ см ⁻¹ нм ⁴	R_0 , Å
Sm(III)-L	$10^{-8} \div 10^{-7}$	42	1.87	41

Полученные интеграл перекрытия и ферстеровский радиус позволяют характеризовать цианиновый краситель Cy5 как эффективный тушитель люминесценции ионов Sm(III).

Выводы

Обнаружен эффективный перенос энергии от комплекса самария (III) с производным оксохиолинкарбоновой кислоты на цианиновый краситель Cy5, что сопровождается тушением люминесценции хелата. Рассчитаны интегралы перекрытия ($J = 1.87 \times 10^{12} \text{ М}^{-1}\text{см}^{-1}\text{нм}^4$) спектра люминесценции комплекса-донора со спектром поглощения красителя-акцептора Cy5 и ферстеровский радиус ($R_0 = 41 \text{ Å}$). Изученный комплекс может быть использован как эффективный донор энергии в FRET-парах с цианиновым красителем Cy5 при проведении медико-биологических исследований.

Литература

1. Selvin P.R. The renaissance of fluorescence resonance energy transfer // Nature structural biology. – 2000. – Vol. 7, No 9. – P. 730-734. <http://doi:10.1038/78948>
2. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос электронного возбуждения в конденсированных средах. – М.: Наука, 1978. – 383 с.

3. Ермолаев В.Л., Бодунов Е.Н., Свешникова Е.В., Шахвердов Т.А. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. – Л.: Наука, 1977. – 311 с.
4. Dudar S., Sveshnikova E., Ermolaev V. Energy transfer from Eu(III) and Tb(III) complexes to dyes in their mixed nanostructures. I // Optics and Spectroscopy. – 2008. – Vol. 104, No 2. – P. 225-234. <http://doi:10.1134/S0030400X08020136>
5. Marras S.A., Kramer F.R., Tyagi S. Efficiencies of fluorescence resonance energy transfer and contact-mediated quenching in oligonucleotide probes // Nucleic Acids Res. – 2002. – Vol. 30. – P. e122-e128.
6. Krishnaveni R., Ramamurthy P. Förster resonance energy transfer between acridinediones and selected fluorophores—Medium dependence // J. Luminescence. – 2013. – Vol. 138. – P. 242-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.01.025>
7. Weibel N., Charbonnière L.J., Guardigli M., Roda A., Ziessel R. Engineering of highly luminescent lanthanide tags suitable for protein labeling and time-resolved luminescence imaging // J. Am. Chem. Soc. – 2004. – Vol. 126, No 15. – P. 4888-4896. <http://doi:10.1021/ja031886k>
8. Laitala V., Hemmilä I. Homogeneous Assay Based on Anti-Stokes' Shift Time-Resolved Fluorescence Resonance Energy-Transfer Measurement // Anal. Chem. – 2005. – Vol. 77. – P. 1483-1487. <http://doi:10.1021/ac048414o>
9. Xiao M., Selvin P.R. Quantum yields of luminescent lanthanide chelates and far-red dyes measured by resonance energy transfer // J. Am. Chem. Soc. – 2001. – Vol. 123, No 29. – P. 7067-7073. <http://doi:10.1021/ja0031669>
10. Heyduk T., Heyduk E. Luminescence energy transfer with lanthanide chelates: interpretation of sensitized acceptor decay amplitudes // Anal. Biochem. – 2001. – Vol. 289. – P. 60-67. <http://dx.doi.org/10.1006/abio.2000.4925>
11. Kokko T., Kokko L., Soukka T., Lövgren T. Homogeneous non-competitive bioaffinity assay based on fluorescence resonance energy transfer // Anal. Chim. Acta. – 2007. – Vol. 585. – P. 120-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2006.12.021>
12. Kokko T., Kokko L., Lövgren T., Soukka T. Homogeneous noncompetitive immunoassay for 17 β -estradiol based on fluorescence resonance energy transfer // Anal. Chem. – 2007. – Vol. 79. – P. 5935-5940. <http://doi:10.1021/ac070417o>
13. Kokko T., Kokko L., Soukka T. Terbium (III) chelate as an efficient donor for multiple-wavelength fluorescent acceptors // J. Fluorescence. – 2009. – Vol. 19. – P. 159-164. <http://doi:10.1007/s10895-008-0397-z>
14. Kokko T., Liljenbäck T., Peltola M.T., Kokko L., Soukka T. Homogeneous dual-parameter assay for prostate-specific antigen based on fluorescence resonance energy transfer // Anal. Chem. – 2008. – Vol. 80. – P. 9763-9768. <http://doi:10.1021/ac801875a>
15. Jones S., Lee D., Wright J., Jones C., Teear M., Gregory S., Burns D. Improvements in the sensitivity of time resolved fluorescence energy transfer assays // J. Fluorescence. – 2001. – Vol. 11, No 1. – P. 13-21. <http://doi:10.1023/A:1016691414432>
16. Wang G., Hai J., Matsumoto K. Homogeneous time-resolved fluoroimmunoassay of 3,5,3'-triiodo-L-thyronine in human serum by using europium fluorescence energy transfer // Talanta. – 2006. – Vol. 70, No 1. – P. 133-138. <http://doi:10.1016/j.talanta.2005.11.052>
17. Wang G., Yuan J., Matsumoto K., Hu Z. Homogeneous time-resolved fluoroimmunoassay of bensulfuron-methyl by using terbium fluorescence energy transfer // Talanta. – 2001. – Vol. 55, No 6. – P. 1119-1125. [http://dx.doi.org/10.1016/S0039-9140\(01\)00526-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0039-9140(01)00526-4)
18. Kokko L., Sandberg K., Lövgren T., Soukka T. Europium(III) chelate-dyed nanoparticles as donors in a homogeneous proximity-based immunoassay for estradiol // Anal. Chim. Acta. – 2004. – Vol. 503. – P. 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2003.10.025>
19. Українець І.В., Ель Каяль С.А., Горохова О.В., Сидоренко Л.В. Синтез та протитуберкульозна активність метилзаміщених піридил-2-амідів 1-R-2-оксо-4-гідроксипіридин-3-карбонових кислот // Фарм. журн. – 2004. – № 4. – С. 47-53.
20. Егорова А.В., Леоненко И.И., Александрова Д.И., Скрипинец Ю.В., Антонович В.П., Обухова Е.Н., Паценкер Л.Д. Новые комплексы Sm(III) в качестве доноров электронного возбуждения скваринаового красителя Seta-632 // Оптика и спектроскопия. – 2015. –Т. 119, № 1. – С. 62-68.

Стаття надійшла до редакції 22.07.15

**А. В. Єгорова, І. І. Леоненко, Д. І. Александрова, Ю. В. Скрипинець,
В. П. Антонович**

Фізико-хімічний інститут ім. О. В. Богатського НАН України,
Люстдорфська дорога, 86, Одеса, 65080, Україна

БЕЗВИПРОМІНЮВАЛЬНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ЗБУДЖЕННЯ ВІД КОМПЛЕКСУ Sm(III) НА ЦІАНІНОВИЙ БАРВНИК Cy5

Встановлено оптимальні умови утворення нового хелатного комплексу Sm(III) з похідним оксохінолінкарбонової кислоти (L) та визначено його спектрально-люмінесцентні характеристики (максимуми довжин хвиль люмінесценції, збудження та час життя люмінесценції). Виявлено ефект гасіння ціаніновим барвником Cy5 (флуоресцентна мітка протеїнів та інших біологічних молекул) люмінесценції комплексу Sm(III)-L. Гасіння хелатного комплексу обумовлено ферстеровським резонансним переносом енергії електронного збудження (FRET) з донору (Sm(III)-L) на акцептор (Cy5). При цьому інтенсивність люмінесценції барвника Cy5 у присутності Sm(III)-L зростає в 6 разів.

Значення ферстеровського радіусу ($R_{0(Sm-L)} = 41 \text{ \AA}$) та інтеграл перекривання спектру люмінесценції донору енергії зі спектром поглинання акцептору ($J_{Sm-L} = 1.87 \times 10^{12}$, $M^{-1}cm^{-1}nm^4$), розраховані з розподілу квантової інтенсивності люмінесценції донору, спектру та молярного коефіцієнту поглинання акцептору, дозволяють характеризувати барвник Cy5 як ефективний гасник люмінесценції іонів Sm(III). Хелатний комплекс Sm(III)-L вперше запропонований в якості FRET-донору.

Ключові слова: люмінесценція, комплекс Sm(III), ціаніновий барвник.

**A. V. Yegorova, I. I. Leonenko, D. I. Aleksandrova, Yu. V. Skrypynets,
V. P. Antonovich**

A. V. Bogatsky Physico-Chemical Institute of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Lustdorfskaya doroga, 86, Odessa, 65080, Ukraine

NON-RADIATIVE ENERGY TRANSFER FROM SM(III) COMPLEX ON CYANINE DYE CY5

The optimal conditions for the formation of new chelate Sm(III) with oxyquinoline carboxylic acid derivative (L) and spectral-luminescent characteristics (the maximum wavelength of luminescence, luminescence excitation and lifetime) were determined. The quenching effect on the luminescence Sm(III)-L complex by cyanine dye Cy5 (fluorescent label of proteins and other biological molecules) was detected. The quenching of chelate complex due to Forster resonance energy transfer of electronic excitation (FRET) from the donor (Sm(III)-L) to the acceptor (Cy5). The intensity of the luminescence of the dye Cy5 in the presence of Sm(III)-L increased in 6 times.

The values of the Forster radius ($R_{0(Sm-L)} = 41 \text{ \AA}$) and the overlap integral of the luminescence energy of the donor with the absorption spectrum of the acceptor ($J_{Sm-L} = 1.87 \times 10^{12}$, $M^{-1}cm^{-1}nm^4$) calculated from the distribution of the quantum luminescence intensity of the donor, the spectrum and the molar absorption coefficient of the acceptor dye Cy5 possible to characterize as an efficient quencher of luminescence of Sm(III) ions. Sm(III)-L chelate complex is proposed as FRET-donor at first.

Key words: luminescence, Sm(III) complex, cyanine dye.

REFERENCES

1. Selvin P.R. *The renaissance of fluorescence resonance energy transfer*. Nature structural biology, 2000, vol. 7, no 9, pp. 730-734. <http://doi:10.1038/78948>
2. Agranovich V.M., Galanin M.D. *Perenos elektronnoho vzbuzhdeniya v kondensirovannykh sredax* [The transfer of electronic excitation in condensed media] Moscow: Nauka, 1978, 383 p.
3. Ermolaev V.L., Bodunov E.N., Sveshnikova E.V., Shaxverdov T.A. *Bezyzluchatelnyj perenos energii elektronnoho vzbuzhdeniya* [Radiationless transfer of electronic excitation energy] Leningrad: Nauka, 1977. – 311 p.
4. Dudar S., Sveshnikova E., Ermolaev V. *Energy transfer from Eu(III) and Tb(III) complexes to dyes in their mixed nanostructures*. I. Optics and Spectroscopy, 2008, vol. 104, no 2, pp. 225-234. <http://doi:10.1134/S0030400X08020136>
5. Marras S.A., Kramer F.R., Tyagi S. *Efficiencies of fluorescence resonance energy transfer and contact-mediated quenching in oligonucleotide probes*. Nucleic Acids Res., 2002, vol. 30, pp. e122-e128.
6. Krishnaveni R., Ramamurthy P. *Förster resonance energy transfer between acridinediones and selected fluorophores—Medium dependence*. J. Luminescence, 2013, vol. 138, pp. 242-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.01.025>
7. Weibel N., Charbonnière L.J., Guardigli M., Roda A., Ziessel R. *Engineering of highly luminescent lanthanide tags suitable for protein labeling and time-resolved luminescence imaging*. J. Am. Chem. Soc., 2004, vol. 126, no 15, pp. 4888-4896. <http://doi:10.1021/ja031886k>
8. Laitala V., Hemmilä I. *Homogeneous Assay Based on Anti-Stokes' Shift Time-Resolved Fluorescence Resonance Energy-Transfer Measurement*. Anal. Chem., 2005, vol. 77, pp. 1483-1487. <http://doi:10.1021/ac048414o>
9. Xiao M., Selvin P.R. *Quantum yields of luminescent lanthanide chelates and far-red dyes measured by resonance energy transfer*. J. Am. Chem. Soc., 2001, vol. 123, no 29, pp. 7067-7073. <http://doi:10.1021/ja0031669>
10. Heyduk T., Heyduk E. *Luminescence energy transfer with lanthanide chelates: interpretation of sensitized acceptor decay amplitudes*. Anal. Biochem., 2001, vol. 289, pp. 60-67. <http://dx.doi.org/10.1006/abio.2000.4925>
11. Kokko T., Kokko L., Soukka T., Lövgren T. *Homogeneous non-competitive bioaffinity assay based on fluorescence resonance energy transfer*. Anal. Chim. Acta, 2007, vol. 585, pp. 120-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2006.12.021>
12. Kokko T., Kokko L., Lövgren T., Soukka T. *Homogeneous noncompetitive immunoassay for 17 β -estradiol based on fluorescence resonance energy transfer*. Anal. Chem., 2007, vol. 79, pp. 5935-5940. <http://doi:10.1021/ac070417o>
13. Kokko T., Kokko L., Soukka T. *Terbium (III) chelate as an efficient donor for multiple-wavelength fluorescent acceptors*. J. Fluorescence, 2009, vol. 19, pp. 159-164. <http://doi:10.1007/s10895-008-0397-z>
14. Kokko T., Liljenbäck T., Peltola M.T., Kokko L., Soukka T. *Homogeneous dual-parameter assay for prostate-specific antigen based on fluorescence resonance energy transfer*. Anal. Chem., 2008, vol. 80, pp. 9763-9768. <http://doi:10.1021/ac801875a>
15. Jones S., Lee D., Wright J., Jones C., Tear M., Gregory S., Burns D. *Improvements in the sensitivity of time resolved fluorescence energy transfer assays*. J. Fluorescence, 2001, vol. 11, no 1, pp. 13-21. <http://doi:10.1023/A:1016691414432>
16. Wang G., Hai J., Matsumoto K. *Homogeneous time-resolved fluoroimmunoassay of 3,5,3'-triiodo-L-thyronine in human serum by using europium fluorescence energy transfer*. Talanta, 2006, vol. 70, no 1, pp. 133-138. <http://doi:10.1016/j.talanta.2005.11.052>
17. Wang G., Yuan J., Matsumoto K., Hu Z. *Homogeneous time-resolved fluoroimmunoassay of bensulfuron-methyl by using terbium fluorescence energy transfer*. Talanta, 2001, vol. 55, no 6, pp. 1119-1125. [http://dx.doi.org/10.1016/S0039-9140\(01\)00526-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0039-9140(01)00526-4)
18. Kokko L., Sandberg K., Lövgren T., Soukka T. *Europium(III) chelate-dyed nanoparticles as donors in a homogeneous proximity-based immunoassay for estradiol*. Anal. Chim. Acta, 2004, vol. 503, pp. 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2003.10.025>
19. Ukrainec I.V., El Kayal S.A., Goroxova O.V., Sidorenko L.V. *Cintez ta protituberkulozna aktivnost metilzamishhenix piridil-2-amidiv 1-R-2-okso-4-gidroksixinolin-3-karbonovix kislot* [Synthesis and antituberculosis activity metylzamischenyh-2-pyridyl amides 1-R-2-oxo-4-hydroxyquinoline-3-carboxylic acids] *Farmaceutichnij Zhurnal*, 2004, no 4, pp. 47-53.
20. Egorova A.V., Leonenko I.I., Aleksandrova D.I., Skripinec Ju.V., Antonovich V.P., Obuhova E.N., Pacenker L.D. *Novye komplekxy Sm(III) v kachestve donorov jelektronnoho vzbuzhdenija skvarainovogo krasitelja Seta-632*. *Optika i spektroskopija*, 2015, vol. 119, no 1, pp. 62-68. <http://dx.doi.org/10.1134/s0030400x15070073>