

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2019-14-3-90-97>

УДК 544.51, 544.52

Хемилюминесцентные реакции люминола и *N*-октиллюминола с гипохлоритом в неионогенных поверхностно-активных веществах

Т.В. Янькова[@], П.В. Мельников, Н.А. Яштулов, Н.К. Зайцев

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: yankovatatyana@yandex.ru

Хемилюминесцентная реакция люминола широко используется в аналитических целях. В биохимических исследованиях и во многих реальных объектах анализа зачастую присутствуют поверхностно-активные компоненты биологических мембран, влияние которых на хемилюминесцентную реакцию люминола систематически не изучалось. Отсюда возникает необходимость исследовать указанную хемилюминесцентную реакцию в организованных молекулярных системах – мицеллярных, везикулярных и иных, моделирующих биологические мембраны. Следует отметить также, что мицеллярная среда обеспечивает дополнительную возможность управления хемилюминесцентными реакциями, прежде всего, для повышения их эффективности. В настоящей работе исследована кинетика хемилюминесцентной реакции окисления люминола и его гидрофобного аналога – *N*-октиллюминола с гипохлорит-ионом в водных растворах и в мицеллярных растворах неионогенного поверхностно-активного вещества (ПАВ) Тритона X-100. Показано, что нарастание и затухание хемилюминесценции люминола и *N*-октиллюминола удовлетворительно описывается двухэкспоненциальной зависимостью, причем эффективная скорость нарастания интенсивности хемилюминесценции прямо пропорциональна концентрации гипохлорит-иона. Определены зависимости скорости накопления и гибели промежуточного продукта от наличия и концентрации ПАВ в реакционной смеси. Результаты обсуждаются с точки зрения влияния локализации исходных веществ и промежуточных продуктов на интенсивность хемилюминесцентных реакций.

Ключевые слова: хемилюминесценция, мицеллярные системы, люминол, аналог люминола, гипохлорит-ион, поверхностно-активные вещества.

Chemiluminescent Reactions of Luminol and *N*-Octylluminol with a Hypochlorite in Non-ionic Surfactants

**Tatyana V. Yankova[@], Pavel V. Melnikov, Nikolay A. Yashtulov,
Nikolay K. Zaitsev**

MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

[@]Corresponding author e-mail: yankovatatyana@yandex.ru



The chemiluminescent reaction of luminol is widely used for analytical purposes. Surface-active components of biological membranes are often present in biochemical studies and in many real objects of analysis. Their influence on the chemiluminescent reaction of luminol has not been systematically studied. Therefore, it is necessary to investigate this chemiluminescent reaction in organized molecular systems – micellar, vesicular and other systems simulating biological membranes. Micellar medium may also provide an additional opportunity to control chemiluminescent reactions, primarily with the aim of increasing their efficiency. The kinetics of the chemiluminescent oxidation of luminol and its hydrophobic analogue N-octylluminol with a hypochlorite ion in aqueous solutions and micellar solutions of non-ionic surfactant Triton X-100 was studied in the present work. It was shown that the growth and fading of the luminol and N-octylluminol chemiluminescence is adequately described by a two-exponential dependence, and the effective rate of increase in the intensity of chemiluminescence is directly proportional to the concentration of the hypochlorite ion. The dependences of the rate of accumulation and consumption of the intermediate product on the presence and concentration of surfactants in the reaction mixture are determined. The results are discussed in terms of the effect of localization of the reagents and intermediate reaction products.

Keywords: chemiluminescence, micellar systems, luminol, luminol analogue, hypochlorite ion, surfactants.

Введение

Одним из основных применений хемилюминесцентных реакций является аналитическое определение веществ, способных катализировать подобные реакции [1–5]. Во многих реальных объектах анализа – от молока до компонентов крови – нередко присутствуют поверхностно-активные компоненты, влияние которых на кинетику хемилюминесцентных реакций до настоящего времени остается практически не изученным [6]. В связи с этим представляется целесообразным исследовать модельную хемилюминесцентную реакцию в типичных организованных молекулярных системах – мицеллярных, везикулярных и иных, моделирующих биологические мембраны. Следует отметить также, что мицеллярная среда обеспечивает дополнительную возможность управления хемилюминесцентными реакциями, преследующую, прежде всего, повышение их чувствительности и расширение круга применения.

Николавоураас с сотр. в своих многочисленных работах [7–19] систематически исследовали хемилюминесцентные реакции в организованных молекулярных системах, чтобы добиться повышения квантового выхода хемилюминесценции по сравнению с гомогенным раствором, повысить чувствительность хемилюминесцентных аналитических методик. Это было достигнуто исследователями на примере окисления люцигенина в ламеллярных и везикулярных агрегатах. Отмечено, что в ряде случаев переход к микрогетерогенной системе оказывает влияние на спектральные характеристики хемилюминесценции. При проведении реакции 10,10'-диметил-9,9'-

биакридиния нитрата со щелочью и пероксидом водорода в мицеллярной среде происходит не только повышение квантовой эффективности процесса, но и появление излучения от первичного эмиттера [8], что связывалось с эффектом компартиментализации и его влиянием на процессы передачи энергии в системе. Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) позволяет совмещать гидрофобные и гидрофильные реагенты. Так, использование мицеллярных растворов цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) дало возможность реализовать хемилюминесцентную реакцию в системе люминол–перманганат–L-тироксин [9], несмотря на плохую растворимость L-тироксина в воде. Николавоураас с сотр. провели также исследование химических выходов продуктов реакции для хемилюминесцентных систем, основанных на окислении люминола [10], лофина [11] и производных люцигенина [12], в присутствии поверхностно-активных веществ. Достигнутое за счет использования ПАВ повышение квантового выхода хемилюминесценции при окислении люцигенина способствовало усовершенствованию методик определения витаминов С и Р [13], никотина [14], эстрогена [15], холестерина [16] и фактора активации тромбоцитов [17]. В работе [18] для повышения квантового выхода хемилюминесцентной реакции окисления люминола в качестве акцептора энергии электронного возбуждения те же авторы использовали флуоресцеин. Перенос энергии к флуоресцеину приводил к десятикратному повышению интенсивности люминесценции в мицеллярных системах по сравнению с системами без флуоресцеина за счет концентрирования донора и акцептора энер-

гии в катионных мицеллах. С целью повышения эффективности переноса энергии между донором и акцептором путем их микроконцентрирования в мицеллах синтезированы гидрофобные аналоги изолюминола и флуоресцеина, заведомо локализованные исключительно в мицеллах, при этом квантовый выход хемилюминесценции увеличился в 12 раз [19].

Установлено [20], что при добавлении ПАВ к хемилюминесцентной системе люминол–пероксид водорода при критической концентрации мицеллообразования (ККМ) наблюдается аномальное повышение интенсивности хемилюминесценции. При подборе буферных растворов (отдельно для каждого ПАВ) авторам [20] удалось определить ККМ для ЦТАБ, бромид цетилпиридиния, додецилсульфата натрия, эфира додецилового спирта с полиоксиэтиленом. Причины наблюдаемого явления пока остаются неясными.

Несмотря на закономерный интерес к хемилюминесцентным реакциям в организованных молекулярных системах, анализ кинетики перехода к мицеллярным и другим организованным молекулярным системам в литературе отсутствует.

Цель настоящей работы – выявить влияние локализации реагентов в мицеллах на кинетику хемилюминесцентных реакций.

Для достижения поставленной цели была выбрана одна из наиболее изученных хемилюминесцентных реакций – окисление люминола и проведено сравнительное исследование кинетики хемилюминесцентной реакции люминола, локализуемого в водной фазе, и его гидрофобного аналога – *N*-октиллюминола, локализуемого в мицеллярной фазе, в неионогенных мицеллах Тритона X-100, с гипохлорит-ионом при различных концентрациях ПАВ.

Экспериментальная часть

Реагенты. В работе использовали гидразид 2-аминофталевой кислоты (люминол) $C_8H_7N_3O_2$, 98.8% (Applichem, США) без дополнительной очистки. *N*-Октиллюминол $C_{16}H_{23}N_3O_2$ синтезировали по методике, описанной в [21]. Прочие реагенты: натрия гидроксид NaOH, «хч» (ЛенРеактив, Россия), гипохлоран-3 NaClO, 3.25% (Omega dent, Россия), Тритон X-100 $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_{10}$, pure (Panreac) использовали без дополнительной очистки. Деионизированную воду получали пропусканием дистиллированной воды через стеклянную хроматографическую колонку, содержащую катионит КУ-2-8чС в водородной (H^+) форме и анионит АВ-17-8чС в гидроксильной (OH^-) форме в пропорции 1:1.3, соответственно. Качество

воды контролировали с помощью кондуктометра «Эксперт-002» (Эконикс-Эксперт, РФ) с датчиком наливного типа. Удельное сопротивление использованной деионизированной воды составляло не менее 18 МОм·см.

Методика измерения. Хемилюминесценцию измеряли на хемилюминиметре «Эконикс-Эксперт», РФ (экспериментальный образец), снабженном четырьмя датчиками, работающими в режиме счета числа квантов и расположенными в разных положениях относительно измерительной ячейки. При измерении их показания суммируются. Введение реагентов в ячейку производят после установления фоновой интенсивности света, не превышающей 100 квант/с.

0.25 мл гипохлорита ($4 \cdot 10^{-4}$ М для раствора *N*-октиллюминола и $5 \cdot 10^{-4}$ М для раствора люминола) помещали в ячейку, представляющую собою прозрачную стеклянную пробирку в фотоприемной камере хемилюминиметра, и одновременно с началом регистрации данных вносили щелочной раствор субстрата путем прокалывания резиновой мембраны шприцевой иглой. Состав водных растворов субстратов: для люминола – 0.001 М люминол, 0.1 М гидроксид натрия; для *N*-октиллюминола – 0.001 М *N*-октиллюминол, 0.1 М гидроксид натрия. При проведении экспериментов в мицеллярных растворах навеску ПАВ вносили в раствор люминола и *N*-октиллюминола, соответственно. Результат исследования регистрировали в виде кинетической кривой хемилюминесценции в координатах «интенсивность (в условных единицах) – время» с разрешением 0.2 с. Максимальное значение интенсивности определяется по высоте пика на кинетической кривой хемилюминесценции, интегральная интенсивность – путем интегрирования полученной кинетической зависимости.

Результаты и их обсуждение

Типичные экспериментальные кинетические зависимости для хемилюминесцентной реакции люминола с гипохлоритом и их полулогарифмическая анаморфоза приведены на рис. 1а, б, соответственно. Заметим, что для *N*-октиллюминола регистрируемые зависимости имеют аналогичный вид [21]. После введения в реакционную ячейку реагентов наблюдается возрастание интенсивности хемилюминесценции, регистрируемое всеми датчиками. По истечении первых пяти секунд зависимости интенсивности хемилюминесценции от времени, измеренные на всех четырех датчиках, становятся подобными, что свидетельствует о завершении процесса смешения реагентов.

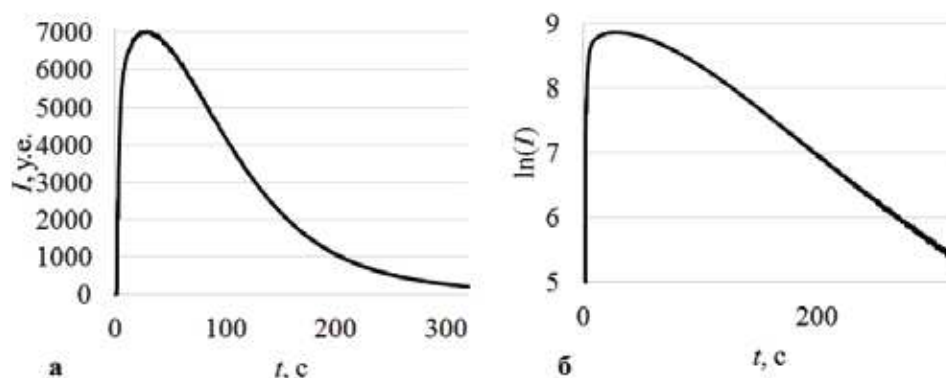
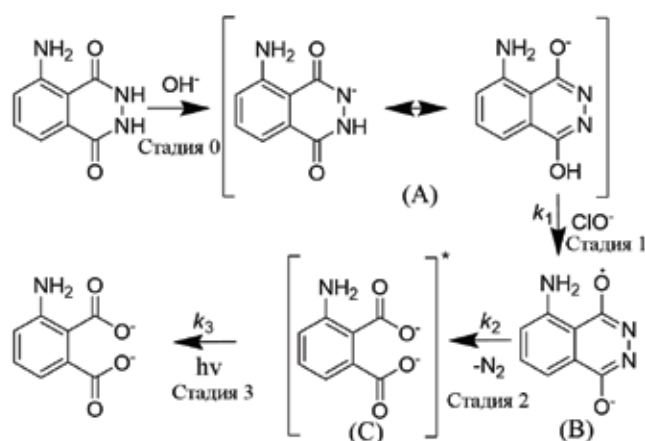


Рис. 1. Типичная кинетическая кривая хемилюминесценции в реакции люминола с гипохлоритом (а) и ее полулогарифмическая анаморфоза (б).

Из литературы известно [5], что окисление люминола в щелочной среде гипохлорит-ионом протекает по нижеприведенной брутто-схеме:



Хемилюминесценция, регистрируемая прибором, соответствует скорости протекания стадии 3. Поскольку спектр хемилюминесценции люминола соответствует спектру флуоресценции аминоталевой кислоты [22], стадия 3 протекает на несколько порядков быстрее остальных стадий сложной реакции. Поэтому в действительности мы видим не скорость протекания стадии 3, а скорость образования вещества С (дианиона аминоталевой кислоты в возбужденном состоянии). На скорость образования вещества С влияют стадии 1 и 2, поэтому косвенно мы их можем охарактеризовать, проанализировав полученную кинетическую кривую. Стадия 0 не влияет на хемилюминесцентную реакцию, так как депротонирование протекает вне опыта (за сутки до проведения эксперимента).

Форма кинетических кривых качественно соответствует появлению и гибели промежуточного продукта в последовательной реакции типа $A \rightarrow B \rightarrow C$ [23], где продукт В, скорее всего, соответствует окисленной форме люминола (анион-радикал на схеме).

В кинетическом анализе мы использовали двух-экспоненциальное приближение:

$$I(t) = A[\exp(-E_2 t) - \exp(-E_1 t)], \quad (1)$$

где $I(t)$ – наблюдаемая зависимость интенсивности хемилюминесценции от времени, усл. ед.;

A – масштабный коэффициент;

E_1 и E_2 – показатели экспонент.

Показатель экспоненты E_2 определяли по угловому коэффициенту линейного участка кинетической зависимости, спрямленной в полулогарифмических координатах (рис. 1б); показатель экспоненты E_1 рассчитывали по следующей формуле:

$$t_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)}{E_2 - E_1}, \quad (2)$$

где $t_{\max}$ – время выхода кривой на максимум $I_{\max}$.

За точку отсчета принимали время завершения процесса смешения реагентов.

Построенные по формуле (1) кинетические зависимости хорошо совпадают с экспериментальными кинетическими кривыми (рис. 2). Вторая половина модельной кинетической зависимости практически полностью совпадает с экспериментальными данными, поэтому, по нашему мнению, показатель экспоненты E_2 соответствует константе k_2 скорости гибели

промежуточного продукта В (схема). Мы полагаем, что E_1 соответствует константе скорости накопления промежуточного продукта k_1 . Однако отсутствие полного совпадения первой половины модельной кривой с экспериментальными данными требует дополнительного уточнения модели.

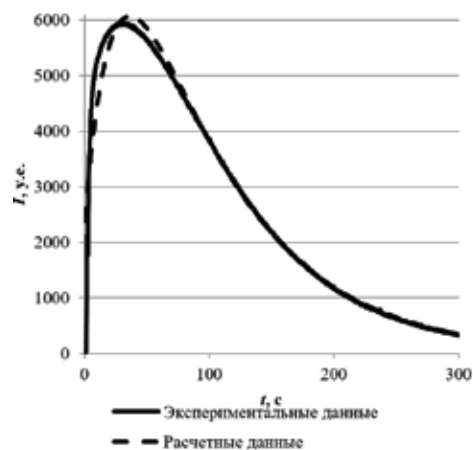


Рис. 2. Кинетическая зависимость, смоделированная разностью двух экспонент, и кинетическая кривая, полученная экспериментально.

Найденные значения k_1 и k_2 для реакций люминола и *N*-октиллюминола с гипохлоритом натрия в присутствии различных концентраций Тритона X-100 приведены на рис. 3а. В отсутствие неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ) величина k_1 для люминола значительно меньше соответствующего значения для *N*-октиллюминола. При увеличении концентрации НПАВ величина k_1 люминола проходит через два максимума: при $1 \cdot 10^{-4}$ М (ККМ Тритона X-100) и $5 \cdot 10^{-4}$ М. Для *N*-октиллюминола аналогичная зависимость также имеет два максимума, однако находящихся в областях меньших концентраций НПАВ. Различие в

положении максимумов на зависимостях интенсивности хемилюминесценции для люминола и *N*-октиллюминола может быть вызвано тем, что присутствие *N*-октиллюминола оказывает влияние на текущее значение ККМ за счет встраивания *N*-октиллюминола в мицеллу Тритон X-100, так как *N*-октиллюминол сам является поверхностно-активным веществом. Причина возрастания константы скорости окислительно-восстановительной реакции между люминолами и гипохлорит-ионом в области ККМ остаются пока неясными. Однако сопоставление зависимостей интенсивности хемилюминесценции и константы скорости k_1 от концентрации НПАВ показывает, что возрастание интенсивности хемилюминесценции вблизи ККМ ПАВ, наблюдавшееся ранее [10, 20], обусловлено увеличением константы скорости образования промежуточного продукта В (схема), являющегося в дальнейшем источником электронно-возбужденных молекул.

В хемилюминесцентных системах люминол – гипохлорит-ион и *N*-октиллюминол – гипохлорит-ион мы наблюдаем разный характер зависимости величин k_2 от концентрации НПАВ: для *N*-октиллюминола при отсутствии НПАВ величина k_2 имеет значительно меньшее значение (рис. 3б), которое возрастает с ростом концентрации Тритона X-100 и становится равным аналогичному значению для системы люминол – гипохлорит-ион при содержании НПАВ около $5 \cdot 10^{-4}$ М. Вероятно, при концентрации НПАВ менее $5 \cdot 10^{-4}$ М промежуточный продукт находится в разном окружении (внутри и вне мицелл, соответственно), однако при достижении концентрации $5 \cdot 10^{-4}$ М он практически полностью сольбилизуется в мицеллах, где микроокружение промежуточного продукта для изучаемых люминофоров становится близким, обуславливая близкие величины констант скорости гибели промежуточного продукта.

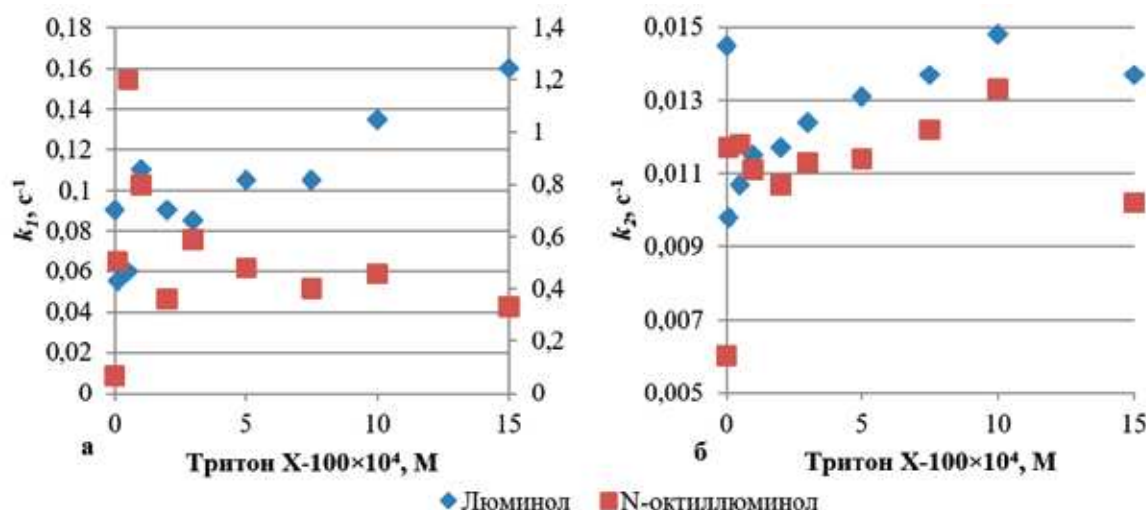


Рис. 3. Зависимость величин k_1 (а) и k_2 (б) от концентрации НПАВ для люминола и *N*-октиллюминола.

Выводы

Установлено, что кинетика окисления люминола и его гидрофобного аналога гипохлорит-ионом в водных растворах и в растворах неионогенных ПАВ описывается двухэкспоненциальной функцией. Константа скорости накопления промежуточного продукта окисления люминола, ответственного за излучение хемилюминесценции, k_1 немонотонно зависит от концентрации НПАВ. В случае люминола она проходит через два локальных максимума: при концентрациях НПАВ $1 \cdot 10^{-4}$ М и $5 \cdot 10^{-4}$ М. Скорее всего, это связано со специфической ассоциацией молекул и ионов в области ККМ, увеличивающей эффективную локальную концентрацию реагентов. При хемилюминесценции *N*-октиллюминола константа скорости k_1 также проходит два локальных максимума, но они сдвигаются в область меньших концентраций НПАВ, возможно, за счет встраивания *N*-октиллюминола в мицеллы Тритона X-100 с

соответствующим уменьшением эффективного значения ККМ НПАВ. Константа скорости гибели промежуточного продукта, ответственного за излучение хемилюминесценции k_2 , для люминола уменьшается, а для *N*-октиллюминола – возрастает при увеличении концентрации НПАВ, причем при концентрации НПАВ $5 \cdot 10^{-4}$ М они становятся приблизительно равными. Вероятно, при меньшей концентрации НПАВ промежуточные продукты окисления люминола и *N*-октиллюминола находятся в разных фазах: первый – в водной фазе, второй – внутри глобул собственных мицелл *N*-октиллюминола.

При достижении концентрации НПАВ $5 \cdot 10^{-4}$ М промежуточные продукты реакции окисления и люминола, и *N*-октиллюминола сольбилизируются в одни и те же мицеллы Тритона X-100, в результате чего их микроокружение становится близким, а константы скорости гибели промежуточного продукта реакции – приблизительно равными для обоих субстратов.

Список литературы:

1. Marquette Ch.A., Blum L.J. Applications of the luminol chemiluminescent reaction in analytical chemistry // *Anal. Bioanal. Chem.* 2006. V. 385. P. 546–554. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0439-9>
2. García-Campaña A.M., Baeyens W.R.G., Cuadros-Rodríguez L., Alés Barrero F., Bosque-Sendra J.M., Gámiz-Gracia L. Potential of chemiluminescence and bioluminescence in organic analysis // *Cur. Org. Chem.* 2002. V. 6. № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.2174/1385272023374625>
3. Tsaplev Yu.B. Chemiluminescence determination of hydrogen peroxide // *J. Anal. Chem.* 2012. V. 67. № 6. P. 506–514. <https://doi.org/10.1134/S1061934812040028>
4. Iranifam M. Revisiting flow-chemiluminescence techniques: Pharmaceutical analysis // *Luminescence.* 2013. V. 28. № 23. P. 798–820. <https://doi.org/10.1002/bio.2441>
5. Yamaguchi M., Yoshida H., Nohta H. Luminol-type chemiluminescence derivatization reagents for liquid chromatography and capillary electrophoresis // *J. Chromatogr. A.* 2002. V. 950. № 1-2. P. 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00004-3)
6. Meng L., Zi-Yue W., Chun-Yang Z. Recent advance in chemiluminescence assay and its biochemical applications // *Chin. J. Anal. Chem.* 2016. V. 44. № 12. P. 1934–1941. [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(16\)60981-7](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(16)60981-7)
7. Fannie S. Varveri, Anastasia E. Mantaka-Marketou, Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures. Chemiluminescence of lucigenin in the presence of $Mg(OH)_2$ and benzyl alcohol. Temperature effects // *Monatshefte für Chemie.* 1988. V. 119. № 6. P. 703–710. <https://doi.org/10.1007/BF00809684>
8. Paleos C. M., Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in oriented systems: Chemiluminescence of 10,10'-dimethyl 9,9'-biacridinylm nitrate in micellar media // *J. Photochem.* 1982. V. 18. № 4. P. 327–334. [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(82\)87022-6](https://doi.org/10.1016/0047-2670(82)87022-6)
9. Cao J., Wang H., Liu Y. Determination of L-thyroxine in pharmaceutical preparations by flow injection analysis with chemiluminescence detection based on the enhancement of the

References:

1. Marquette Ch.A., Blum L.J. Applications of the luminol chemiluminescent reaction in analytical chemistry. *Anal. Bioanal. Chem.* 2006; 385:546-554. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0439-9>
2. García-Campaña A.M., Baeyens W.R.G., Cuadros-Rodríguez L., Alés Barrero F., Bosque-Sendra J.M., Gámiz-Gracia L. Potential of chemiluminescence and bioluminescence in organic analysis. *Cur. Org. Chem.* 2002; 6(1):1-20. <https://doi.org/10.2174/1385272023374625>
3. Tsaplev Yu.B. Chemiluminescence determination of hydrogen peroxide. *J. Anal. Chem.* 2012; 67(6):506-514. <https://doi.org/10.1134/S1061934812040028>
4. Iranifam M. Revisiting flow-chemiluminescence techniques: Pharmaceutical analysis. *Luminescence.* 2013; 28(23):798-820. <https://doi.org/10.1002/bio.2441>
5. Yamaguchi M., Yoshida H., Nohta H. Luminol-type chemiluminescence derivatization reagents for liquid chromatography and capillary electrophoresis. *J. Chromatogr. A.* 2002; 950(1-2):1-19. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00004-3)
6. Meng L., Zi-Yue W., Chun-Yang Z. Recent advance in chemiluminescence assay and its biochemical applications. *Chin. J. Anal. Chem.* 2016; 44(12):1934-1941. [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(16\)60981-7](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(16)60981-7)
7. Fannie S. Varveri, Anastasia E. Mantaka-Marketou, Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures. Chemiluminescence of lucigenin in the presence of $Mg(OH)_2$ and benzyl alcohol. Temperature effects. *Monatshefte für Chemie.* 1988; 119(6):703-710. <https://doi.org/10.1007/BF00809684>
8. Paleos C. M., Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in oriented systems: Chemiluminescence of 10,10'-dimethyl 9,9'-biacridinylm nitrate in micellar media. *J. Photochem.* 1982; 18(4):327-334. [https://doi.org/10.1016/0047-2670\(82\)87022-6](https://doi.org/10.1016/0047-2670(82)87022-6)
9. Cao J., Wang H., Liu Y. Determination of L-thyroxine in pharmaceutical preparations by flow injection analysis with chemiluminescence detection based on the enhancement of the

- luminol–KMnO₄ reaction in a micellar medium // *Spectrochim. Acta. Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 2015. V. 140. P. 162–165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2014.12.105>
10. Hadjianestis J., Nikokavouras J. Luminol chemiluminescence in micellar media // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1992. V. 67. № 2. P. 237–243. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(92\)85232-J](https://doi.org/10.1016/1010-6030(92)85232-J)
11. Boyatzis S., Nikokavouras J. Lophines in micellar environments: Spectroscopic behaviour and chemiluminescence // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1993. V. 74. № 1. P. 65–73. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(93\)80152-Y](https://doi.org/10.1016/1010-6030(93)80152-Y)
12. Papadopoulos K., Spartalis S., Nikokavouras J. Chemiluminescence in organized molecular assemblies: Lucigenin derivatives containing long alkyl chains in micellar media // *Anal. Chim. Acta.* 1994. V. 290. № 1-2. P. 179–185. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(94\)80054-5](https://doi.org/10.1016/0003-2670(94)80054-5)
13. Nikokavouras J., Vassilopoulos G. Effect of vitamins C and P on the chemiluminescence of lucigenin in model membrane structures // *Monatshefte für Chemie.* 1983. V. 114. № 1-2. P. 255–258.
14. Nikokavouras J., Vassilopoulos G. Effect of nicotine on the chemiluminescence of lucigenin in model membrane structures // *Monatshefte für Chemie.* 1984. V. 115. № 4. P. 437–443.
15. Mantaka-Marketou A.E., Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures chemiluminescence of lucigenin in the presence of estrogens // *Monatshefte für Chemie.* 1985. V. 116. № 8-9. P. 973–978. <https://doi.org/10.1007/BF00809190>
16. Varveri F.S., Mantaka-Marketou A.E., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures. Chemiluminescence of lucigenin in DDAB aggregates in the presence of cholesterol // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1990. V. 187. P. 315–318.
17. Varveri F.S., Mantaka-Marketou A.E., Papadopoulos K., Nikokavouras J. Chemiluminescence in organized molecular assemblies. Chemiluminescence of lucigenin in lyso-PAF (C₁₆) // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1992. V. 66. № 1. P. 113–118. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(92\)85124-D](https://doi.org/10.1016/1010-6030(92)85124-D)
18. Nikokavouras J. Luminal chemiluminescence in micellar media II: Energy transfer to fluorescein // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1993. V. 69. № 3. P. 337–343. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(93\)85100-M](https://doi.org/10.1016/1010-6030(93)85100-M)
19. Papadopoulos K., Chantron A., Nikokavouras J., Hrbac J., Lasovsky J. Sensitized chemiluminescence with long alkyl chain energy donors and acceptors in micellar media // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1998. V. 116. № 2. P. 153–157. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(98\)00284-6](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(98)00284-6)
20. Yildiz G., Tasdoven U., Menek N. Electrochemical characterization of luminol and its determination in real samples // *Anal. Meth.* 2014. V. 6(19). P. 7809–7813. <https://doi.org/10.1039/C4AY01281J>
21. Ибрагимова Д.А., Камилъ О.М., Янькова Т.В., Яштулов Н.А., Зайцев Н.К. Влияние поверхностно-активных веществ на хемилюминесцентную реакцию люминол–пероксид водорода // *Тонкие химические технологии.* 2017. Т. 12. № 6. С. 71–76. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-6-71-76>
22. Васильев Р.Ф. Хемилюминесценция в растворах // *Успехи физических наук.* 1966. Т. 89. № 3. С. 409–436. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0089.196607c.0409>
23. Янькова Т.В., Мельников П.В., Зайцев Н.К. Хемилюминесцентные реакции люминола и *N*-октиллюминола с гипохлоритом в анионных поверхностно-активных веществах // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2019. Т. 60. № 3. С. 154–160.
- luminol–KMnO₄ reaction in a micellar medium. *Spectrochim. Acta. Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 2015; 140:162-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2014.12.105>
10. Hadjianestis J., Nikokavouras J. Luminol chemiluminescence in micellar media. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1992; 67(2):237-243. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(92\)85232-J](https://doi.org/10.1016/1010-6030(92)85232-J)
11. Boyatzis S., Nikokavouras J. Lophines in micellar environments: Spectroscopic behaviour and chemiluminescence. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1993; 74(1):65-73. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(93\)80152-Y](https://doi.org/10.1016/1010-6030(93)80152-Y)
12. Papadopoulos K., Spartalis S., Nikokavouras J. Chemiluminescence in organized molecular assemblies: lucigenin derivatives containing long alkyl chains in micellar media. *Anal. Chim. Acta.* 1994; 290(1-2):179-185. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(94\)80054-5](https://doi.org/10.1016/0003-2670(94)80054-5)
13. Nikokavouras J., Vassilopoulos G. Effect of vitamins C and P on the chemiluminescence of lucigenin in model membrane structures. *Monatshefte für Chemie.* 1983; 114(1-2):255-258.
14. Nikokavouras J., Vassilopoulos G. Effect of nicotine on the chemiluminescence of lucigenin in model membrane structures. *Monatshefte für Chemie.* 1984; 115(4):437-443.
15. Mantaka-Marketou A.E., Vassilopoulos G., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures chemiluminescence of lucigenin in the presence of estrogens. *Monatshefte für Chemie.* 1985; 116(8-9): 973-978. <https://doi.org/10.1007/BF00809190>
16. Varveri F.S., Mantaka-Marketou A.E., Nikokavouras J. Chemiluminescence in model membrane structures. Chemiluminescence of lucigenin in DDAB aggregates in the presence of cholesterol. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1990; 187:315-318.
17. Varveri F.S., Mantaka-Marketou A.E., Papadopoulos K., Nikokavouras J. Chemiluminescence in organized molecular assemblies. Chemiluminescence of lucigenin in lyso-PAF (C₁₆). *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1992; 66(1):113-118. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(92\)85124-D](https://doi.org/10.1016/1010-6030(92)85124-D)
18. Nikokavouras J. Luminal chemiluminescence in micellar media II: Energy transfer to fluorescein. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1993; 69(3):337-343. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(93\)85100-M](https://doi.org/10.1016/1010-6030(93)85100-M)
19. Papadopoulos K., Chantron A., Nikokavouras J., Hrbac J., Lasovsky J. Sensitized chemiluminescence with long alkyl chain energy donors and acceptors in micellar media. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 1998; 116(2):153-157. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(98\)00284-6](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(98)00284-6)
20. Yildiz G., Tasdoven U., Menek N. Electrochemical characterization of luminol and its determination in real samples. *Anal. Meth.* 2014; 6(19):7809-7813. DOI: 10.1039/C4AY01281J
21. Ibragimova D.A., Kamil O.M., Yankova T.V., Yashtulov N.A., Zaitsev N.K. The effect of surfactants on the chemiluminescent reaction of luminol with hydrogen peroxide. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies.* 2017; 12(6):71-76. (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-6-71-76>
22. Vasilev R.F. Chemiluminescence in solutions. *Sov. Phys. Usp.* 1967; 9:504-524. <https://doi.org/10.1070/PU1967v009n04ABEH003006>
23. Yankova T.V., Melnikov P.V., Zaitsev N.K. Chemiluminescent reactions of luminol and *N*-octylluminol with hypochlorite in anionic surfactants. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya (Moscow University Chemistry Bulletin).* 2019; 60(3):154-160. (in Russ.).

Об авторах:

Янькова Татьяна Вячеславовна, заведующий специализированной учебно-научной лабораторией водородной энергетики и возобновляемых источников энергии кафедры энергетических технологий, систем и установок Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). <https://orcid.org/0000-0001-7368-8246>

Мельников Павел Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической химии имени Я.К. Сыркина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). Scopus Author ID 18042368100, ResearcherID D-9773-2014, <https://orcid.org/0000-0001-8438-1952>

Яштулов Николай Андреевич, доктор химических наук, профессор кафедры энергетических технологий, систем и установок Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). Scopus Author ID 6507694451, <https://orcid.org/0000-0002-7709-4186>

Зайцев Николай Конкордиевич, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетических технологий, систем и установок Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). Scopus Author ID 57193485921, <https://orcid.org/0000-0003-4132-0097>

About the authors:

Tatyana V. Yankova, Head of the Specialized Educational Laboratory of Hydrogen Energy and Renewable Energy Sources of the Chair of Energy Technologies, Systems and Installations, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia). <https://orcid.org/0000-0001-7368-8246>

Pavel V. Melnikov, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Ya.K. Syrkin Chair of Physical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia). Scopus Author ID 18042368100, ResearcherID D-9773-2014, <https://orcid.org/0000-0001-8438-1952>

Nikolay A. Yashtulov, D.Sc. (Chemistry), Professor of the Chair of Energy Technologies, Systems and Installations, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia). Scopus Author ID 6507694451, <https://orcid.org/0000-0002-7709-4186>

Nikolay K. Zaitsev, D.Sc. (Chemistry), Docent, Head of the Chair of Energy Technologies, Systems and Installations, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow 119571, Russia). Scopus Author ID 57193485921, <https://orcid.org/0000-0003-4132-0097>

Для цитирования: Янькова Т.В., Мельников П.В., Яштулов Н.А., Зайцев Н.К. Хемилюминесцентные реакции люминола и *N*-октиллюминола с гипохлоритом в неионогенных поверхностно-активных веществах // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 3. С. 90–97. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-3-90-97

For citation: Yankova T.V., Melnikov P.V., Yashtulov N.A., Zaitsev N.K. Chemiluminescent reactions of luminol and *N*-octylluminol with a hypochlorite in non-ionic surfactants. *Tonkie Khim. Tekhnol. = Fine Chemical Technologies*. 2019; 14(3): 90-97. (in Russ.). DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-3-90-97