УДК 544.542 + 535.376 + 535.379

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.4.22

О ВОЗМОЖНОСТИ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЙ РЕДОКС-РЕАКЦИИ ИОНА Tb^{3+} , ИНИЦИИРОВАННЫЕ РАДИОЛИЗОМ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

© А. М. Абдрахманов*, Л. Р. Якшембетова, Г. Л. Шарипов

Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 141.

Тел.: +7 (347) 231 27 50.

*Email: ink@anrb.ru

Рассмотрена возможность генерации возбужденного иона Tb^{3+} в реакциях с участием гидратированного электрона (e_{aq}^-) и сульфат иона, инициируемых при радиолизе водных растворов хлорида тербия с добавками $(NH_4)_2SO_4$. Из сравнения фото- и радиolumинесценции этих растворов сделан вывод, что увеличение интенсивности свечения Tb^{3+} с ростом концентрации сульфат-иона в обоих случаях обусловлено образованием внутрисферного комплекса $[Tb^{3+}(H_2O)_x(SO_4^{2-})_y]^{(3-y)+}$, обладающего более высоким квантовым выходом люминесценции, чем акваион $[Tb^{3+}(H_2O)_x]^{3+}$. Возможная в случае радиационного воздействия на раствор хемилюминесценция при восстановлении e_{aq}^- иона Tb^{4+} , образованного вследствие окисления Tb^{3+} радиолитически генерированным ион-радикалом $SO_4^{\cdot-}$, не реализуется. Дополнительное увеличение интенсивности радиolumинесценции тербия наблюдается при присутствии в растворе селективного акцептора гидратированного электрона – H^+ , что связано с захватом протоном e_{aq}^- , эффективного тушителя $*Tb^{3+}$. Данный факт также исключает существование хемилюминесценции $Tb^{4+} + e_{aq}^- \rightarrow *Tb^{3+}$, в противном случае наблюдалось бы тушение радиolumинесценции иона тербия в присутствии H^+ . Сделан вывод, что хемилюминесцентный механизм свечения иона Tb^{3+} при радиолизе не реализуется, а основным источником его радиolumинесценции является прямое действие ионизирующего излучения на этот ион.

Ключевые слова: хемилюминесценция, радиolumинесценция, хлорид тербия, гидратированный электрон.

Введение

Участие соединений ионов металлов в окислительно-восстановительных реакциях может сопровождаться образованием их возбужденных состояний и последующей люминесценцией. Так, известны достаточно яркие хемилюминесцентные (ХЛ) реакции восстановления соединений $Ru(bpy)_3^{3+}$, Mn^{3+} и Ce^{4+} , на основе которых разработаны методы количественного определения различных веществ [1–5]. Среди таких реакций наибольший интерес вызывают реакции с участием восстановителя e_{aq}^- , гидратированного (сольватированного в неводных растворителях) электрона, обладающего большим восстановительным потенциалом. Это свойство e_{aq}^- обеспечивает высокую экзотермичность реакций восстановления и возможность генерации в них возбужденных продуктов. Например, известна ХЛ реакция образования комплексного иона $*Ru(bpy)_3^{2+}$ при непосредственном восстановлении e_{aq}^- трехвалентного комплекса $Ru(bpy)_3^{3+}$ при импульсном радиолизе [1] и однопустырьковом сонолизе [6] водных растворов. Недавно обнаружены новые ХЛ реакции, сопровождающиеся образованием $*Ce^{3+}$ и $*Eu^{2+}$ при восстановлении Ce^{4+} гидратированным электроном в воде, а также Ce^{4+} и Eu^{3+} сольватированным электроном (e_s^-) в этиленгликоле при однопустырьковом сонолизе [7–8].

Реакция восстановления иона Tb^{4+} гидратированным электроном также была постулирована

как основной источник радиolumинесценции (РЛ) водных растворов Tb^{3+} малой концентрации (10^{-2} моль/л и менее) [9]. Авторы этой работы предложили следующую схему реакций РЛ ионов тербия в растворах $TbCl_3$, интенсивность которой сильно увеличивалась в присутствии ионов SO_4^{2-} :

При прямом действии ионизирующего излучения на воду (реакции (1a, 1b)) образуются основные первичные продукты сонолиза молекул воды: e_{aq}^- , H, OH [10]. При прямом действии излучения на ион Tb^{3+} также образуется $*Tb^{3+}$ [11]. Однако авторы работы [9] полагали, что данная реакция возбуждения (2) так же, как и возможная реакция переноса энергии от весьма короткоживущих (менее 10^{-12} с) молекул H_2O^* (3), при малых концентрациях люминофора Tb^{3+} несущественны, и основной вклад в его возбуждение вносят реакции (4)–(7) с ключевой ХЛ стадией (7). Возможность реализации этих реакций была оценена авторами на основании

расчетов их экзотермичности (отрицательных значений изменения свободной энергии реакций, найденных по разности стандартных потенциалов окислительно-восстановительных пар $E^0(D^+/D)$ для донора (D) и $E^0(A/A^-)$ для акцептора (A) электрона) в соответствии с известным уравнением Веллера [12].

Реакции окисления (4)–(6) очевидны, поскольку стандартные потенциалы пар H_2O^+/H_2O , $SO_4^{\cdot-}/SO_4^{2-}$ и Tb^{4+}/Tb^{3+} составляют соответственно +4.6, +3.4 и +3.1 В [13–15]. В то же время ион Tb^{3+} не может быть окислен гидроксильным радикалом (реакция на схеме не показана) из-за низкого стандартного потенциала пары OH/OH^- (+1.9 В). Оценка изменения свободной энергии в реакции (7) с учетом потенциалов пары Tb^{4+}/Tb^{3+} и e_{aq}^- : +3.1 В и –2.9 В [15] показывает, что энергия, выделяемая при этой реакции, больше энергии, необходимой для возбуждения ионов Tb^{3+} в его низшее возбужденное состояние 5D_4 (2.54 эВ) [16].

Кулмала с соавторами [9] исследовали влияние на интенсивность РЛ Tb^{3+} в водных растворах $TbCl_3$ добавок сульфатов натрия и аммония и зафиксировали увеличение интенсивности его свечения при высоких концентрациях SO_4^{2-} . Они объяснили это тем, что время жизни анион-радикала $SO_4^{\cdot-}$ в водных растворах намного больше, чем время жизни H_2O^+ . В отсутствие $SO_4^{\cdot-}$ окислять Tb^{3+} могут только ионы H_2O^+ , образуемые из молекул воды, находящихся в первой координационной сфере иона тербия (вероятность реакции Tb^{3+} с ионами, возникающими вне этой сферы мала вследствие короткого ($\leq 10^{-12}$ с) времени жизни H_2O^+). Большое время жизни сульфатных анион-радикалов, возникающих при высокой концентрации SO_4^{2-} в растворе по реакции (5), может обеспечить их диффузию и взаимодействие с ионами Tb^{3+} во всем объеме раствора, и соответственно увеличение выхода ионов Tb^{4+} с последующим образованием $^*Tb^{3+}$ и люминесценцией в реакциях (7) и (8). Таким образом, именно активирующее влияние SO_4^{2-} на РЛ тербия послужило основанием для постулирования хемилюминесцентного механизма этого свечения.

Данный факт заинтересовал нас, т.к. подобный механизм может обеспечить свечение тербия и при воздействии на растворы других физических полей (излучений), например, при однопузырьковом сонолизе водных растворов ионов Tb^{3+} малой концентрации. Однако в работе [9] не было данных о влиянии сульфат-иона на фотолюминесценцию (ФЛ) ионов тербия, хотя известно, что комплексообразование SO_4^{2-} с Tb^{3+} может приводить к увеличению квантового выхода люминесценции этих ионов [16]. Такой эффект может объяснить активацию РЛ тербия в присутствии SO_4^{2-} без привлечения ХЛ механизма возбуждения. В связи с этим целью на-

стоящей работы стало сравнительное исследование влияния добавок SO_4^{2-} на радио- и фотолюминесценцию Tb^{3+} .

Экспериментальная часть

Для приготовления растворов использовали бидистиллированную воду, соляную кислоту, соли $TbCl_3 \cdot 6H_2O$, $(NH_4)_2SO_4$ марки «хч». Радиолюминесценцию возбуждали в заполненной раствором тонкостенной полиэтиленовой кювете ($V = 2$ мл) с помощью коллимированного пучка излучения от микрофокусной рентгеновской трубки БСМ-1 с медным зеркалом анода под напряжением 45 кВ и током 450 мкА. Спектры РЛ регистрировали с помощью сканирующего монохроматора МДР-23, снабженного счетчиком фотонов PCU-100. Спектры ФЛ растворов и время жизни ионов $^*Tb^{3+}$ регистрировали на спектрофлуориметре Fluorolog-3, спектры поглощения – на спектрофотометре Shimadzu 1 800.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости радио- и фотолюминесценции Tb^{3+} от концентрации сульфата аммония. Как видно из рис. 1, данные зависимости (совпадают в пределах погрешностей измерений 5%). Это свидетельствует о том, что увеличение интенсивности свечения в обоих случаях связано идентично с комплексообразованием. Большинство авторов считают, что ионы лантанидов с SO_4^{2-} образуют преимущественно комплексы с внутренней сферой (внешнесферными комплексами называют соединения иона-комплексообразователя и лигандов, взаимодействие между которыми осуществляется через разделяющую их гидратную оболочку. Внутрисферные комплексы – соединения, в которых взаимодействие центрального атома с лигандами происходит непосредственно, без разделяющей гидратной оболочки [17]), описаны комплексы вида $LnSO_4^+$ и $Ln(SO_4)_2^-$ [17]. Комплексы типа $LnCl_2^+$ относят к внешнесферным [17], и поэтому присутствие аниона Cl^- в растворе не сказывается на люминесценции ионов Tb^{3+} .

Рис. 1. Зависимость РЛ – 1 и ФЛ – 2 иона Tb^{3+} (на длине волны 546 нм) в водном растворе от концентрации сульфата аммония. $[TbCl_3] = 10^{-2}$ моль/л, $\lambda_{возб} = 262$ нм.

Таким образом, активация как ФЛ, так и РЛ связана с образованием внутрисферного комплекса $[\text{Tb}^{3+}(\text{H}_2\text{O})_x(\text{SO}_4^{2-})_y]^{(3-y)+}$, обладающим более высоким квантовым выходом люминесценции, чем комплекс $[\text{Tb}^{3+}(\text{H}_2\text{O})_x]^{3+}$. Измеренное нами время жизни люминесцентного состояния (τ) $^5\text{D}_4$ иона $^*\text{Tb}^{3+}$ в данных растворах увеличивается с 410 мкс в воде до 580 мкс в 3 М растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Увеличение квантового выхода ФЛ и τ связано со снижением вероятности безизлучательного индуктивно-резонансного переноса энергии электронного возбуждения на обертоны высокочастотных колебаний молекул растворителя в связи с заменой молекул H_2O на SO_4^{2-} в первой координационной сфере ионов Tb^{3+} [18]. Очевидно, то же самое имеет место и при РЛ, возникающей по механизму прямого возбуждающего действия ионизирующего излучения на ион тербия и нет необходимости привлекать особый механизм его ХЛ возбуждения в окислительно-восстановительных реакциях с продуктами радиолиза воды, в т.ч. с участием e_{aq}^- .

Между тем гидратированный электрон способен не только инициировать ХЛ реакции, но является эффективным тушителем возбужденных состояний ионов лантанидов. Отметим, что большинство этих ионов имеют довольно большое τ в растворе (более 400 мкс в воде для Tb^{3+}). Это обстоятельство повышает вероятность взаимодействия возбужденных ионов и радикальных частиц, возникающих совместно в треках ионизирующих частиц в растворе, и, например, при РЛ Tb^{3+} , возникающей вследствие прямого действия излучения, может иметь место следующая реакция восстановительного тушения возбужденных ионов:

Стандартный окислительно-восстановительный потенциал пары $\text{Tb}^{3+}/\text{Tb}^{2+}$ весьма низок (-3.7 В [15]), но для возбужденного состояния акцептора электрона ($^*\text{Tb}^{3+}$) он повышается на величину энергии его возбужденного состояния [12]. Согласно уравнению Веллера, с учетом потенциала e_{aq}^- экзотермичность реакции (9) составляет не менее 28.8 ккал/моль, и эта реакция должна иметь место с высокой константой скорости.

Тушение гидратированным электроном люминесценции иона Tb^{3+} при радиолизе действительно было обнаружено и описано в работе [11]. Недавно существование подобного тушения показано и для люминесценции тербия при генерирующем e_{aq}^- однопузырьковом сонолизе водных растворов [19]. Выявить тушение в обоих случаях удалось применением селективных акцепторов гидратированного электрона: H^+ , Cd^{2+} . Добавление этих акцепторов в раствор в виде HCl и CdCl_2 приводило к увеличению интенсивности люминесценции Tb^{3+} , т.к. тушитель e_{aq}^- ликвидировался акцептором. Если бы ХЛ реакция (7) была основным источником возбуждения Tb^{3+} , то применение акцептора e_{aq}^- в рассматриваемом нами случае РЛ в растворах с большой концентрацией SO_4^{2-} должно было привести не к увеличению, а к снижению интенсивности РЛ

тербия. Подобное тушение ХЛ процесса акцептором e_{aq}^- действительно имело место для случая аналогичной (7) реакции (10) восстановления комплекса металла гидратированным электроном при однопузырьковом сонолизе [6]:

Данная реакция подавлялась акцептором в конкурентной реакции (11):

В отличие от такого тушения, оказалось, что интенсивность РЛ растворов 10^{-3} моль/л TbCl_3 в растворах 1 моль/л HCl (H^+) как в присутствии 3 моль/л сульфата аммония, так и без его добавки выше интенсивности РЛ аналогичных растворов в воде (рис. 2). Причем на интенсивность ФЛ тербия ионы H^+ , как и ионы Cl^- (внешнесферный комплексообразователь), не оказали никакого влияния (рис. 3). Эти факты являются дополнительным подтверждением отсутствия вклада ХЛ реакции с участием e_{aq}^- в возбуждение иона Tb^{3+} . Сам по себе рост интенсивности РЛ, возбуждаемой только прямым действием излучения, в присутствии H^+ связан с подавлением реакции тушения (9) конкурентной ей реакцией акцептирования e_{aq}^- (11).

Рис. 2. Спектры РЛ раствора 10^{-3} моль/л TbCl_3 :

- 1 – в воде, 2 – в растворе 1 моль/л HCl ,
- 3 – в растворе 3 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,
- 4 – в растворе 3 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 1 моль/л HCl .

Рис. 3. Спектры ФЛ раствора 10^{-3} моль/л TbCl_3 :

- 1 – в воде, 2 – в растворе 1 моль/л HCl ,
- 3 – в растворе 3 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,
- 4 – в растворе 3 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 1 моль/л HCl . $\lambda_{\text{возб}} = 369$ нм.

Следует, однако, отметить, что отсутствие хемилюминесцентной компоненты в радиолуминесценции Tb^{3+} не является основанием для отрицания реакции (7). Напротив, оценка изменения свободной энергии этой реакции и доказанные примеры хемилюминесценции, инициируемой в аналогичных реакциях ионов других металлов $Me^{n+} + e_{aq}^-(e_s^-) \rightarrow *Me^{(n-1)+}$ [1–8], свидетельствуют о несомненном ее существовании. Проблема отсутствия этой реакции при РЛ заключается, очевидно, в неэффективности предшествующих ей реакций образования Tb^{4+} из Tb^{3+} , требующих больших затрат энергии.

Таким образом, показано, что хемилюминесцентный механизм возбуждения ионов Tb^{3+} при радиолизе водных растворов хлорида тербия малой концентрации (10^{-3} – 10^{-2} моль/л) в отсутствии и в присутствии ионов SO_4^{2-} не реализуется. Радиолуминесценция Tb^{3+} в рассмотренных условиях, как и в растворах с большей концентрацией (0.1 моль/л и более), возбуждается в результате прямого действия ионизирующего излучения на эти ионы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института нефтехимии и катализа УФИЦ РАН (тема №АААА-А19-119022290005-5).

ЛИТЕРАТУРА

- Martin J., Hart E., Adamson A., Gafney H., and Halpern J. Chemiluminescence from the Reaction of the Hydrated Electron with Tris(bipyridyl)ruthenium(III) // J. Am. Chem. Soc. 1972. Vol. 94. Pp. 9238–9240.
- Tsaplev Y. B., Vasil'ev R. F., Trofimov A. V., Chemiluminescence in reactions of manganese(III) reduction by lactic acid: two-electron mechanism of chemiexcitation // High Energy Chem. 2015. Vol. 49. Pp. 316–321.
- Bulgakov R. G., Gazeeva D. R., Galimov D. I. Chemiluminescence of the Ce^{3+} ions and the 1O_2 and $(^1O_2)_2$ molecular species of oxygen induced by active surface of the $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ crystals at reduction of Ce^{4+} to Ce^{3+} by water in heterogeneous system « $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6$ - C_6H_6 - H_2O » // J. Lumin. 2017. Vol. 193. Pp. 159–165.
- Hindson B. J., Barnett N. W. Analytical applications of acidic potassium permanganate as a chemiluminescence reagent // Anal. Chim. Acta. 2001. Vol. 445. Pp. 1–19.
- Kaczmarek M. Energy transfer processes of chemiluminescence reaction systems with cerium(IV) ions and their analytical application: a review // J. Fluoresc. 2015. Vol. 25. Pp. 419–431.
- Sharipov G. L., Yakshembetova L. R., Abdrakhmanov A. M., Gareev B. M. Sonochemiluminescence of $Ru(bpy)_3^{3+}$ in aqueous solutions. Evidence of the formation of hydrated electrons during the single-bubble sonolysis in a neutral aqueous medium // Ultrason. Sonochem. 2019. Vol. 58. P. 104674.
- Sharipov G. L., Gareev B. M., Vasilyuk K. S., Galimov D. I., Abdrakhmanov A. M. New sonochemiluminescence involving solvated electron in $Ce(III)/Ce(IV)$ solutions // Ultrason. Sonochem. 2021. Vol. 70. 105313.
- Gareev B. M., Vasilyuk K. S., Galimov D. I., Sharipov G. L., Dzhemilev U. M. Chemiluminescence of lanthanide ions $Ln^{(n-1)+}$ during reduction of Ln^{n+} with a solvated electron // Dokl. Phys. Chem. 2020. Vol. 494. Pp. 147–150.
- Kulmala S., Hakanen A., Laine E., Haapakka K. X-ray irradiation-induced optical luminescence of terbium(III) chelates in aqueous solutions // J. Alloys and Compounds. 1995. Vol. 225. Pp. 279–283.
- Пикаев А. К. Современная радиационная химия. Радиолиз газов и жидкостей. М.: Наука, 1986. 440 с.
- Казаков В. П., Шарипов Г. Л. Радиолуминесценция водных растворов. М.: Наука, 1986. 136 с.
- Kavarnos G. J., Turro N. J. Photosensitization by reversible electron transfer: theories, experimental evidence, and examples // Chem. Rev. 1986. Vol. 86. Pp. 401–449.
- Watanabe T., Gerischer H. Photoelectrochemical studies on gold electrodes with surface oxide layers: Part II. Discrimination between the surface photoprocess and photohole emission // J. Electroanal. Chem. 1981. Vol. 122. Pp. 73–91.
- Memming R. Mechanism of the Electrochemical Reduction of Persulfates and Hydrogen Peroxide // J. Electrochem. Soc. 1969. Vol. 116. Pp. 785–790.
- Пикаев А. К., Шилов В. П., Спицын В. И. Радиолиз водных растворов лантанидов и актинидов. М.: Наука, 1983. 240 с.
- Полуэктов Н. С., Кононенко Л. И., Ефрюшина Н. П., Бельтюкова С. В. Спектрофотометрические и люминесцентные методы определения лантанидов. Киев: Наук. Думка, 1989. 256 с.
- Wood S. A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium // Chemical Geology. 1990. Vol. 82. Pp. 159–186.
- Ермолаев В. Л., Свешникова Е. Б. Применение люминесцентно-кинетических методов для изучения комплексообразования ионов лантаноидов в растворах // Успехи химии. 1994. Т. 63. №11. С. 962–980.
- Sharipov G. L., Gareev B. M., Abdrakhmanov A. M. Confirmation of hydrated electrons formation during the moving single-bubble sonolysis: Activation of Tb^{3+} ion sonoluminescence by e_{aq}^- acceptors in an aqueous solution // J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2020. Vol. 402. P. 112800.

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.4.22

**ON THE POSSIBILITY OF CHEMILUMINESCENCE
ACCOMPANING THE Tb³⁺ ION REDOX-REACTIONS
INITIATED BY THE RADIOLYSIS OF AQUEOUS SOLUTIONS**

© A. M. Abdrakhmanov*, L. R. Yakshembetova, G. L. Sharipov

*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS
141 Oktyabrya Avenue, 450075 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 231 27 50.

**Email: ink@anrb.ru*

The possibility of generating excited Tb³⁺ ion in reactions involving a hydrated electron (e_{aq}⁻) and sulfate ion, initiated by radiolysis of terbium chloride aqueous solutions with (NH₄)₂SO₄ additives is considered. From a comparison of the photo- and radioluminescence of these solutions, it was concluded that an increase in the Tb³⁺ luminescence intensity with an increase in the sulfate ion concentration in both cases is due to the formation of the inner-sphere complex [Tb³⁺(H₂O)_x(SO₄²⁻)_y]^{(3-y)+}, which has a higher quantum yield of luminescence than the aquaion [Tb³⁺(H₂O)_x]³⁺. The chemiluminescence that is possible in the case of the solution radioirradiation during the reduction by e_{aq}⁻ of the Tb⁴⁺ ion formed as a result of the Tb³⁺ oxidation by the radiolytically generated radical ion SO₄^{•-} is not realized. An additional increase in the intensity of terbium radioluminescence is observed in the presence of e_{aq}⁻ selective acceptor, H⁺, in the solution, which is associated with the capture by the proton e_{aq}⁻, which is an effective quencher of *Tb³⁺. This fact also excludes the existence of chemiluminescence Tb⁴⁺ + e_{aq}⁻ → *Tb³⁺, otherwise the quenching of the radioluminescence of the terbium ion in the presence of H⁺ would be observed. It is concluded that the chemiluminescence mechanism of the Tb³⁺ ion luminescence during radiolysis is not realized, and the main source of its radioluminescence is the direct action of ionizing radiation on this ion.

Keywords: chemiluminescence, radioluminescence, terbium chloride, hydrated electron.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Martin J., Hart E., Adamson A., Gafney H., and Halpern J. J. Am. Chem. Soc. 1972. Vol. 94. Pp. 9238–9240.
2. Tsaplev Y. B., Vasil'ev R. F., Trofimov A. V. High Energy Chem. 2015. Vol. 49. Pp. 316–321.
3. Bulgakov R. G., Gazeeva D. R., Galimov D. I. J. Lumin. 2017. Vol. 193. Pp. 159–165.
4. Hindson B. J., Barnett N. W. Anal. Chim. Acta. 2001. Vol. 445. Pp. 1–19.
5. Kaczmarek M. J. Fluoresc. 2015. Vol. 25. Pp. 419–431.
6. Sharipov G. L., Yakshembetova L. R., Abdrakhmanov A. M., Gareev B. M. Ultrason. Sonochem. 2019. Vol. 58. Pp. 104674.
7. Sharipov G. L., Gareev B. M., Vasilyuk K. S., Galimov D. I., Abdrakhmanov A. M. Ultrason. Sonochem. 2021. Vol. 70. 105313.
8. Gareev B. M., Vasilyuk K. S., Galimov D. I., Sharipov G. L., Dzhemilev U. M. Dokl. Phys. Chem. 2020. Vol. 494. Pp. 147–150.
9. Kulmala S., Hakanen A., Laine E., Haapakka K. J. Alloys and Compounds. 1995. Vol. 225. Pp. 279–283.
10. Pikaev A. K. Sovremennaya radiatsionnaya khimiya. Radioliz gazov i zhidkosti [Modern radiation chemistry. Radiolysis of gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1986.
11. Kazakov V. P., Sharipov G. L. Radioluminescentiya vodnykh rastvorov [Radioluminescence of aqueous solutions]. Moscow: Nauka, 1986.
12. Kavaros G. J., Turro N. J. Chem. Rev. 1986. Vol. 86. Pp. 401–449.
13. Watanabe T., Gerischer H. J. Electroanal. Chem. 1981. Vol. 122. Pp. 73–91.
14. Memming R. J. Electrochem. Soc. 1969. Vol. 116. Pp. 785–790.
15. Pikaev A. K., Shilov V. P., Spitsyn V. I. Radioliz vodnykh rastvorov lantanidov i aktinidov [Radiolysis of aqueous solutions of lanthanides and actinides]. Moscow: Nauka, 1983.
16. Poluektov N. S., Kononenko L. I., Efryushina N. P., Bel'tyukova S. V. Spektrofotometricheskie i lyumines-tsentnye metody opredeleniya lantanidov [Spectrophotometric and luminescent methods of determination of lanthanides]. Kiev: Nauk. Dumka, 1989.
17. Wood S. A. Chemical Geology. 1990. Vol. 82. Pp. 159–186.
18. Ermolaev V. L., Sveshnikova E. B. Uspekhi khimii. 1994. Vol. 63. No. 11. Pp. 962–980.
19. Sharipov G. L., Gareev B. M., Abdrakhmanov A. M. J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2020. Vol. 402. Pp. 112800.

Received 21.07.2021.