УДК 535.379:546.295

ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДИФТОРИДА КСЕНОНА НА ПОВЕРХНОСТИ СИЛИКАГЕЛЯ

© А. В. Мамыкин, Г. А. Масыгутова*, С. С. Остахов, С. Л. Хурсан

Уфимский институт химии УФИЦ РАН

Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 71.

Тел.: +7 (347) 235 61 11.

*Email: chemlum@anrb.ru

Исследована хемилюминесценция (ХЛ), возникающая при взаимодействии дифторида ксенона с поверхностью силикагеля. Установлено, что в роли эмиттеров ХЛ выступают: элементарный ксенон (467 нм), интермедиат первой стадии восстановления $\text{XeF}_2 - \text{Xe}^+$ (418, 541, 590 нм) и синглетный кислород $^1\text{O}_2$ (1270 нм). Спектрофотометрически обнаружен озон в газообразных продуктах восстановления XeF_2 . Предложен механизм образования электронно-возбужденных продуктов восстановления XeF_2 на поверхности силикагеля.

Ключевые слова: хемилюминесценция, дифторид ксенона, силикагель, синглетный кислород, электронно-возбужденные состояния.

Введение

Дифторид ксенона является относительно мягким реагентом для проведения реакций окислительного фторирования [1–3], поэтому часто используется при проведении фторирования (или окисления в водных растворах) как органических, так и неорганических соединений. Его активность как окислителя значительно возрастает в присутствии акцепторов фторид-иона – кислот Льюиса, что является следствием образования высокоактивных интермедиатов [4]. Термодинамические характеристики радикальных и ион-радикальных частиц, образующихся в ходе разложения XeF_2 изучены в [5], при этом найдено, что интермедиаты распада дифторида ксенона обладают большой избыточной энергией. Высокая активность интермедиатов и, как следствие, высокая экзотермичность стадий приводят к тому, что некоторые реакции восстановления XeF_2 сопровождаются хемилюминесценцией (ХЛ). Например, обнаруженная и исследованная ранее [6–7] хемилюминесцентная реакция окисления соединений урана(IV) дифторидом ксенона в водных растворах протекает с высоким квантовым выходом. Единственной излучающей частицей в реакции является возбужденный ион уранила, который надежно зарегистрирован по характерному для него спектру излучения. Результаты экспериментов существенно изменяются, если реакции окисления проводить в твердой фазе. Так, при взаимодействии порошков $\text{UO}_2\text{HPO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и XeF_2 [8] в спектре ХЛ, наряду с линиями излучения основного эмиттера – уранила UO_2^{2+} , появляется ряд линий излучения, которые имеют другую природу. При твердофазном взаимодействии $\text{Tb}_2(\text{SO}_4)_3$ с XeF_2 [9] в спектре ХЛ также присутствуют интервалы излучения, помимо излучения возбужденного Tb(III)^* , в то время как при проведении этой же реакции в водном растворе ХЛ не наблюдается. Особенностью спектров ХЛ упомянутых выше реакций является то обстоятельство,

что при соизмеримой интенсивности сигналов часть из них накладывается на область излучения основного эмиттера (UO_2^{2+} , Tb^{3+}), что создает сложности в интерпретации результатов эксперимента. Поскольку положение максимумов этих полос излучения в спектре ХЛ было одинаковым и в первой и во второй реакции, было предположено, что они относятся к продуктам восстановления XeF_2 . Такое предположение нуждается в экспериментальной проверке.

В связи с этим в настоящей работе была поставлена цель – идентифицировать возможные эмиттеры излучения при восстановлении ксенона из состояния окисления Xe(II) до элементарного ксенона Xe(0) в отсутствие ионов металлов – активаторов ХЛ. В качестве модельной реакции мы выбрали обнаруженную ранее реакцию гидролитического восстановления XeF_2 на поверхности стеклянного реакционного сосуда, которая сопровождается ХЛ [7]. Увеличение площади поверхности кюветы приводило к пропорциональному увеличению интенсивности ХЛ. Поэтому можно было ожидать, что разложение XeF_2 не на стенке реактора, а на силикагеле, также содержащего в структуре группу Si-O , но имеющего гораздо более развитую поверхность, позволит увеличить интенсивность ХЛ до уровня, достаточного для надежной идентификации эмиттеров ХЛ при восстановлении XeF_2 на этой поверхности.

Методика эксперимента

Навески кристаллических силикагеля (80 мг) и XeF_2 (9 мг) смешивались тefлоновой палочкой в кварцевой кювете в течение ~5 секунд, смесь герметично закрывалась и помещалась в установку для регистрации свечения. Время от начала смешивания до регистрации ХЛ не превышало 10–15 секунд.

Измерение интенсивности ХЛ в видимой области спектра проводили на установке, состоящей

из светонепроницаемой камеры и детектора – фотоэлектронного умножителя ФЭУ-119, чувствительного в диапазоне длин волн $\lambda = 330\div 700$ нм. В качестве светоприемника в инфракрасной области применяли охлаждаемый парами жидкого азота ФЭУ-83 (в комбинации со светофильтром ИКС-7 спектральная чувствительность $\lambda = 1000\div 1300$ нм). Спектры ХЛ регистрировали методом граничных светофильтров (спектральное разрешение $\Delta\lambda = 20$ нм) [10]. Спектры поглощения газообразных продуктов взаимодействия кристаллических XeF_2 и силикагеля (на тефлоновой пленке) регистрировали в герметичной кварцевой кювете ($l = 10$ см) на спектрофотометре SpecordM-40. Измерение температуры смеси XeF_2 с силикагелем проводили с помощью термопреобразователя ТРМ-101 (платиновое сопротивление). Дифторид ксенона синтезировали согласно методике [11] действием электрического разряда на смесь ксенона со фтором. В работе использовали силикагель с удельной площадью поверхности $600 \text{ м}^2/\text{г}$ и размером частиц $0.125\div 0.160$ мм или 7.5 мкм (Silipor производства фирмы Lachema). Термическую активацию проводили при температуре 200°C в течение 3 часов.

Результаты и их обсуждение

После смешивания порошков дифторида ксенона с силикагелем ($0.125\div 0.160$ мм) возникает

хемилуминесценция, интенсивность которой меняется во времени сложным образом (рис. 1, зависимость 1).

В течение первых 20 минут происходит плавный рост интенсивности ХЛ, который сменяется плавным уменьшением интенсивности в последующие 40 минут. Взаимодействие сопровождается повышением температуры смеси на $4\div 6^\circ\text{C}$, что свидетельствует об экзотермичности процесса. Можно предположить, что рост интенсивности ХЛ на начальном участке является следствием адсорбции XeF_2 (XeF_2 обладает высокой летучестью) на активных центрах силикагеля до равновесного значения, адсорбция сопровождается химическим взаимодействием дифторида ксенона с активными группами силикагеля, что приводит к уменьшению концентраций обоих участников реакции и, следовательно, к снижению интенсивности ХЛ.

Достаточно высокие интенсивность и продолжительность свечения позволили зарегистрировать спектр ХЛ, который представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, максимумы интенсивности ХЛ в видимой области находятся при 415, 460, 540 и 590 нм. Максимумы ХЛ спектра сведены в табл. 1, где проведено его соотнесение с возможными эмиттерами ХЛ.

Рис.1. Зависимость интенсивности ХЛ от времени при разложении XeF_2 на поверхности силикагеля с размером зерен $0.125\div 0.160$ мм – (1) и 7.5 мкм – (2); 294 K , масса навески XeF_2 – 9 мг , силикагель – 80 мг .

Рис.2. Спектр ХЛ при разложении XeF_2 на поверхности силикагеля (масса навесок: XeF_2 – 9 мг, силикагель– 80 мг, 294 К).

Таблица 1.

Отнесение наблюдаемых эмиттеров ХЛ

λ , нм ^a	415	460	540	590
Предполагаемый эмиттер	Xe^{+*}	Xe^*	Xe^{+*}	Xe^{+*}
Лит. данные [12–13]				
λ , нм ^b	418, 419, 423	462, 467	529, 531, 534, 542	598, 605, 610
Σ_i , отн. ед. ^c	2000	3000	4800	2000

^aМаксимумы спектра ХЛ (рис. 2).

^bМаксимумы спектра излучения Xe^{+*} и Xe^* по данным [13], соответствующие переходам $\text{Xe(II)} \rightarrow \text{Xe(I)}$ для Xe^{+*} и $\text{Xe(I)} \rightarrow \text{Xe(0)}$ для Xe^* .

^c Σ_i – сумма относительных интенсивностей максимумов, приведенных в [12–13].

Отнесение излучения указанных в таблице диапазонов к конкретным эмиттерам мы произвели путем сопоставления спектра ХЛ с известными аналитическими линиями ксенона, используемыми при эмиссионном спектральном анализе [12–13] и выполненных нами ранее работ по изучению ХЛ реакций с участием дифторида ксенона [8–9]. Наиболее интенсивные линии эмиссии атомарного ксенона в видимой части спектра располагаются в области 450–467 нм [12–13]. Спектр состоит из ряда близкорасположенных линий (450.0, 462.4, 467.1 нм), которые в условиях нашего эксперимента разрешить не удастся, и они регистрируются в виде одной полосы с максимумом 460 нм. Их суммарная интенсивность составляет 3000 относительных единиц (по 1000-бальной шкале для нейтральных и однократно ионизированных атомов [13]). Именно к атомарному ксенону можно отнести излучение ХЛ в этом интервале. В интервалах с максимумами 415, 490, 540 нм у атомарного ксенона нет интенсивных линий эмиссии. В то же время, для перехода $\text{Xe(II)} \rightarrow \text{Xe(I)}$ известны интенсивные линии эмиссии в этих интервалах: 418–423, 520–560 и 597–605 нм.

Несмотря на то, что по стехиометрии полного восстановления ($\text{XeF}_2 + 2e \rightarrow \text{Xe} + 2\text{F}^-$) дифторид ксенона является двухэлектронным окислителем, его восстановление происходит последовательно, с образованием в первой стадии производных Xe(I) – радикала XeF катиона $\text{Xe}^+[4]$. Эти два обстоятельства – стадийность восстановления XeF_2 , в ходе которой образуется Xe^+ , и наличие в спектре ХЛ тех же линий эмиссии, что и у однократно ионизированного ксенона, – позволяют допустить образование в ходе реакции возбужденного интермедиата Xe^{+*} . Корректность такого отнесения подтверждается и результатами исследований реакций дифторида ксенона с соединениями тербия [9], уранила [8], где наряду с излучением ионов металлов-активаторов Tb^{3+} и UO_2^{2+} , зарегистрированы также полосы с максимумами 415, 590 нм, не относящихся к ионам металлов. Излучение Xe^+ и Xe^0 в этих же диапазонах обнаружено и при других, нехимических способах его возбуждения, например, трибо- и сонолюминесценции [14–15].

В инфракрасной области также обнаружено свечение, но положение максимума $I_{\text{ХЛ}}$ определить не удастся, поскольку возможность регистрации ограничивается длинноволновой границей (менее

1300 нм) чувствительности фотодетектора ФЭУ-83. В этой области спектра у Xe^+ и Xe нет интенсивных линий эмиссии. Если принять во внимание, что одним из продуктов реакции является озон (он обнаружен в газообразных продуктах реакции по характерному для него поглощению в ультрафиолетовой части спектра с $\lambda_{\text{max}} = 257$ нм, известному как полоса Хартли), то можно прийти к выводу, что эмиттером фотонов в ближней инфракрасной области является синглетный кислород, образующийся при распаде озона на поверхности силикагеля, как было ранее установлено в работе [16].

Проанализируем химические превращения, возможные для наших экспериментальных условий. Для большей доказательности рассуждений произведена оценка энергетики анализируемых процессов с использованием известных термодинамических данных. При этом теплоту адсорбции участников реакции не учитывали, поэтому наши оценки носят полуколичественный характер.

Дифторид ксенона в отсутствие активаторов разложения термически стабилен:

Здесь и далее термодинамические величины выражены в кДж/моль, для XeF_2 и интермедиатов его распада заимствованы из [5], остальные значения брали из базы данных [17]. Можно предположить, что при адсорбции XeF_2 на силикагеле возможна индукция его разложения силанольными группами:

Прочность О-Н связи принимали равной 435 кДж/моль как в спиртах. Действительно, из теплового эффекта реакции (2) видно, что распад XeF_2 значительно облегчается в присутствии доноров О-Н групп. Возможность протекания реакции по такому пути согласуется с литературными данными. Например, авторы работы [18] пришли к выводу об образовании высокоактивной частицы при взаимодействии XeF_2 с поверхностью стекла на том основании, что состав продуктов фторирования в стеклянном реакторе коренным образом отличался от состава продуктов, полученных в реакторе из фторопласта, а растворы XeF_2 в 100 ÷ 150 раз устойчивее в сосудах из фторопласта, чем в стеклянных. Кроме того, нами показано, что если поверхность силикагеля предварительно профторировать другим известным способом, например, обработкой смесью концентрированной серной кислоты и фторида щелочного металла (с последующими операциями промывки и термической активации), то интенсивность ХЛ и светосумма в реакции уменьшаются по сравнению с немодифицированной поверхностью почти в два раза. Это наблюдение подтверждает, что именно силанольные группы играют определяющую роль в ХЛ реакции восстановления дифторида ксенона на поверхности силикагеля.

Образующийся в реакциях (1) и (2) радикал $\text{XeF}^\bullet$ термически нестабилен:

Следовательно, либо атом фтора, либо моnofторид ксенона, адсорбированный на поверхности, может эффективно фторировать силикагель. Движущей силой этого процесса является тот факт, что связь Si-F примерно на 120 кДж/моль прочнее связи Si-O [19]. Можно предположить, что более активный атом фтора будет вытеснять атом О из окружения атома кремния:

Здесь $\sim\text{SiF}(\text{O}:)$ означает атомарный кислород, адсорбированный на поверхности силикагеля. В атмосфере O_2 он может превращаться в озон, зафиксированный нами экспериментально:

Последующее разложение озона на силикагеле сопровождается ХЛ в ИК-области [16]. Однако, только гомолитические процессы не могут объяснить весь спектр продуктов и эмиттеров, в частности, появление Xe^+ в исследуемой системе. Известно [4], что дифторид ксенона является донором фторид-иона и в присутствии кислот Льюиса легко отдает его, образуя катион XeF^+ . В условиях исследуемой реакции роль электрофильной частицы может выполнять поверхностный катион кремния или протон, входящий в состав силанольных групп $\sim\text{SiOH}$ поверхности силикагеля [20]. Мы предполагаем образование XeF^+ в реакциях (7) и (8):

Тепловые эффекты реакций (7) и (8) оценены из гетеролитических энергий диссоциации связей Н-Ф и Si-F (на примере процесса $\text{SiF}_4 \rightarrow \text{F}_3\text{Si}^+ + \text{F}^-$), все необходимые данные взяты из базы данных [17]. По-видимому, оценка $\Delta H(8)$ несколько завышена, поскольку в расчете не учтена энергия адсорбции катионных центров. Однако, принципиальная возможность образования XeF^+ , на наш взгляд, вполне реальна. Далее образование Xe^+ возможно в результате фторирования силикагеля:

Катионы Xe^+ и XeF^+ обладают огромным сродством к электрону – 12.13 и 10.3 эВ, соответственно, поэтому весьма вероятны сильно экзотермические процессы переноса электрона на катион, что объясняет образование электронно-возбужденного ксенона. В качестве донора электрона может выступать, например, силикагель. Действительно, потенциал ионизации стекловидного SiO_2 (кварц) составляет всего 2.1 эВ [17], очевидно для силикагеля величина потенциала ионизации не должна сильно отличаться.

Таким образом, восстановление дифторида ксенона в твердофазных реакциях, в отличие от водных растворов, сопровождается мультиэмит-

терной ХЛ, обусловленной образованием электронно-возбужденного атомарного ксенона *Xe , интермедиата первой стадии его восстановления $^*Xe^+$ и синглетного кислорода 1O_2 .

Выводы

Обнаружена и исследована мультиэмиттерная хемилюминесценция, возникающая при взаимодействии дифторида ксенона с поверхностью силикагеля. Выявлено, что восстановление ксенона(II) происходит за счет атома кислорода в составе силанольных групп силикагеля. Установлено, что в роли эмиттеров ХЛ выступают: элементарный ксенон (467 нм), интермедиат первой стадии восстановления $XeF_2 - Xe^+$ (418, 541, 590 нм) и синглетный кислород 1O_2 (1270 нм). Предложена схема образования электронно-возбужденных продуктов восстановления XeF_2 на поверхности силикагеля, включающая последовательно-параллельные реакции: инициирование разложения XeF_2 силанольными группами с образованием высокореакционных частиц XeF^+ , XeF^* , Xe^+ и их дальнейшее восстановление до атомарного ксенона.

Спектры записаны на оборудовании ЦКП «Химия» УфИХ РАН.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Экспериментальное изучение и теоретическое моделирование закономерностей образования, трансформации и проявления биологической активности N,O гетероциклических интермедиатов в фото- и биохимических процессах» АААА-А17-117011910028-7 (порядковый № в ГЗ 0246-2018-0018).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartlett N., Sladky F. O. Xenon difluoride as an oxidative fluorinator // Chem. Commun. (London). 1968. No.17. P. 1046–1047.
2. Sladky F. O., Bulliner P. A., Bartlett N. Xenon difluoride as a fluoride ion donor. Evidence for the salts $[Xe_2F_3]^+[MF_6]^-$, $[XeF]^+[MF_6]^-$ and $[XeF]^+[M_2F_{11}]^-$ // Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, and Theoretical Chemistry. 1969. P. 2179–2188.
3. Brock D. S., Schrobilgen G. J., Žemva B. Noble-Gas Chemistry // Comprehensive Inorganic Chemistry (Second Edition) / Ed. J. Reedijk, K. Poeppelmeier, Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 755–822.
4. Tramišek M., Žemva B. Synthesis, properties and chemistry of xenon (II) fluoride // Acta Chimica Slovenica. 2006. Vol. 53. No. 2. P. 105–116.
5. Ovchinnikov M. Y., Masyagutova G. A., Khursan S. L. High level ab initio thermochemistry of XeF radical // J. Fluorine Chem. 2018. Vol. 209. P. 1–5.
6. Казаков В. П. Хемилюминесценция уранила, лантаноидов и d-элементов. М.: Наука, 1980. С. 176.
7. Казаков В. П., Паршин Г. С., Гусев Ю. К., Лотник С. В., Земсков С. В. Хемилюминесценция ярких реакций в замороженных растворах // Доклады АН СССР. 1978. Т. 239. №6. С. 1397–1400.
8. Ostakhov S. S., Masyagutova G. A., Mamykin A. V., Khursan S. L. Multi-emitter chemiluminescence in the solid-phase interaction of xenon difluoride with uranyl hydrogen phosphate // Mend. Commun. 2016. Vol. 26. No.5. P. 405–406.
9. Мамыкин А. В., Масыгутова Г. А., Хурсан С. Л. Хемилюминесценция при твердофазном разложении сульфата тербия (III) с дифторидом ксенона // Химия высоких энергий. 2016. Т. 50. №6. С. 463–466.
10. Васильев Р. Ф. Хемилюминесценция в растворах // Оптика и спектроскопия. 1965. Т. 18. №2. С. 236–244.
11. Gróz P., Kiss I., Révész A., Sipos T. On the preparation of XeF_2 // J. Inorg. Nucl. Chem. 1966. Vol. 28. No. 3. P. 909–910.
12. Saloman E. B. Energy Levels and Observed Spectral Lines of Xenon, XeI through XeLIV // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2004. Vol. 33. No. 3. P. 765–921.
13. Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизированных атомов. М.: Атомиздат, 1966. С. 896.
14. Тухбатуллин А. А., Шарипов Г. Л., Абдрахманов А. М., Муфтахутдинов М. Р. Механолуминесценция сульфатов тербия и церия в атмосфере благородных газов // Оптика и спектроскопия. Т. 116. №5. С. 747–750.
15. Flannigan D. J., Suslick K. S. Plasma Line Emission during Single - Bubble Gaviation // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 044301-1 – 044301-4.
16. Волошин А. И., Шарипов Г. Л., Казаков В. П., Толстиков Г. А. Генерация синглетного кислорода при адсорбции и распаде озона на силикагеле // Изв. АН СССР Сер. хим. 1986. №11. С. 2613–2615.
17. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
18. Shaw M. M., Smith R. G., Ramsden C. A. ^{19}F NMR and UV Studies of Xenon Difluoride Solution-Vessel Stability and its Relevance to the Fluorination of Organic Substrates // Arkivoc. 2011. Vol. 2011. No.10. P. 221–228.
19. CRC Handbook of Chemistry and Physics 73rd ed / Ed. D. R. Lide, Florida: CRC Press: Boca Raton, 1992–1993. P. 4–80.
20. Айлер Р. Химия кремнезема. Растворимость, полимеризация, коллоидные свойства, биохимия. Т.2. М.: Мир, 1982. С. 712.

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

FORMATION OF ELECTRON-EXCITED STATES IN THE REDUCTION OF XENON DIFLUORIDE ON THE SILICA GEL SURFACE

© A. V. Mamykin, G. A. Masyagutova*, S. S. Ostakhov, S. L. Khursan

*Ufa Institute of Chemistry, Ufa Federal Research Center, RAS
71 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 235 61 11.

**Email: chemlum@anrb.ru*

The authors of the article has discovered and studied the multi-emitter chemiluminescence (CL), which occurs when xenon difluoride interacts with the surface of silica gel. The elementary xenon (467 nm) Xe, the intermediate of the first stage of reduction of $\text{XeF}_2 - \text{Xe}^+$ cation (418, 541, 590 nm) and singlet oxygen $^1\text{O}_2$ (1270 nm) were identified as CL emitters. A scheme was proposed for the formation of electronically excited XeF_2 reduction products on a silica gel surface, including a series of consecutive and parallel homo- and heterolytic processes with the formation of highly reactive units ($\text{XeF}^\bullet$, XeF^+ , Xe^+). The presence of silanol groups on the surface of the silica gel causes the homolytic induced decomposition of xenon difluoride $\sim\text{SiOH} + \text{XeF}_2 \rightarrow \sim\text{SiO}^\bullet + \text{XeF}^\bullet + \text{HF}$ (1), while the heterolytic reaction channel is triggered by the cationic centers $\sim\text{Si}^+ + \text{XeF}_2 \rightarrow \sim\text{SiF} + \text{XeF}^+$ (2); $\text{H}^+ + \text{XeF}_2 \rightarrow \text{HF} + \text{XeF}^+$ (3). The possibility of the reaction 1–3 is consistent with the literature data and is confirmed by thermodynamic calculations. The formation of Xe^+ is possible as a result of the fluorination of silica gel: $\sim\text{SiO}^\bullet + \text{XeF}^+ \rightarrow \sim\text{SiF}(\text{O}:) + \text{Xe}^+$ (4). Here, $\sim\text{SiF}(\text{O}:)$ means atomic oxygen adsorbed on the surface of silica gel. The Xe^+ and XeF^+ cations have a high electron affinity – 12.13 and 10.3 eV, respectively. It makes strongly exothermic processes of electron transfer to the cation to be possible, which explains the formation of electronically excited xenon atom. Silica gel can serve as an electron donor. The adsorbed atomic oxygen recombines with molecular oxygen of the air with the formation of ozone $\sim\text{SiF}(\text{O}:) + \text{O}_2 \rightarrow \sim\text{SiF} + \text{O}_3$. The accumulation of ozone during the reaction was recorded experimentally by characteristic absorption in the UV region (Hartley band). Further, catalyzed ozone decay occurs on the surface of silica gel, which, as is known from the literature, is accompanied by radiation in the IR region due to the generation of singlet oxygen.

Keywords: chemiluminescence, xenon difluoride, silica gel, singlet oxygen, electronically excited states.

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

REFERENCES

1. Bartlett N., Sladky F. O. Chem. Commun. (London). 1968. No. 17. Pp. 1046–1047.
2. Sladky F. O., Bulliner P. A., Bartlett N. Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, and Theoretical Chemistry. 1969. Pp. 2179–2188.
3. Brock D. S., Schrobilgen G. J., Žemva B. Comprehensive Inorganic Chemistry (Second Edition). Ed. J. Reedijk, K. Poeppelmeier, Amsterdam: Elsevier, 2013. Pp. 755–822.
4. Tramšek M., Žemva B. Acta Chimica Slovenica. 2006. Vol. 53. No. 2. Pp. 105–116.
5. Ovchinnikov M. Y., Masyagutova G. A., Khursan S. L. J. Fluorine Chem. 2018. Vol. 209. Pp. 1–5.
6. Kazakov V. P. Khemilyuminestsentsiya uranila, lantanoidov i d-elementov [Chemiluminescence of uranyl, lanthanides, and d-elements]. Moscow: Nauka, 1980. Pp. 176.
7. Kazakov V. P., Parshin G. S., Gusev Yu. K., Lotnik S. V., Zemskov S. V. Doklady AN SSSR. 1978. Vol. 239. No. 6. Pp. 1397–1400.
8. Ostakhov S. S., Masyagutova G. A., Mamykin A. V., Khursan S. L. Mend. Commun. 2016. Vol. 26. No. 5. Pp. 405–406.
9. Mamykin A. V., Masyagutova G. A., Khursan S. L. Khimiya vysokikh energii. 2016. Vol. 50. No. 6. Pp. 463–466.
10. Vasil'ev R. F. Optika i spektroskopiya. 1965. Vol. 18. No. 2. Pp. 236–244.
11. Gróz P., Kiss I., Révész A., Sipos T. J. Inorg. Nucl. Chem. 1966. Vol. 28. No. 3. Pp. 909–910.
12. Saloman E. B. J. Phys. Chem. Ref. Data. 2004. Vol. 33. No. 3. Pp. 765–921.
13. Striganov A. R., Sventitskii N. S. Tablitsy spektral'nykh linii neutral'nykh i ionizirovannykh atomov [Tables of the spectral lines of neutral and ionized atoms]. Moscow: Atomizdat, 1966. Pp. 896.
14. Tukhbatullin A. A., Sharipov G. L., Abdrakhmanov A. M. Optika i spektroskopiya. Vol. 116. No. 5. Pp. 747–750.

15. Flannigan D. J., Suslick K. S. *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 95. Pp. 044301-1 – 044301-4.
16. Voloshin A. I., Sharipov G. L., Kazakov V. P., Tolstikov G. A. *Izv. AN SSSR Ser. khim.* 1986. No. 11. Pp. 2613–2615.
17. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
18. Shaw M. M., Smith R. G., Ramsden C. A. *Arkivoc.* 2011. Vol. 2011. No. 10. Pp. 221–228.
19. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* 73rd ed. Ed. D. R. Lide, Florida: CRC Press: Boca Raton, 1992–1993. Pp. 4–80.
20. Iler R. *Khimiya kremnezema. Rastvorimost', polimerizatsiya, kolloidnye svoistva, biokhimiya.* Vol. 2 [The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. Vol. 2]. Moscow: Mir, 1982. Pp. 712.

Received 14.05.2018.