

УДК 543.42+541.14:546.791.1

## ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСТВОРАХ ПЕРХЛОРАТА УРАНИЛА В АЦЕТОНЕ С УЧАСТИЕМ АТМОСФЕРНОГО КИСЛОРОДА

А. И. КОМЯК<sup>1)</sup>, Н. П. ВИЛЕЙШИКОВА<sup>1)</sup>, Е. Н. КОМЯК<sup>2)</sup>, А. П. ЗАЖОГИН<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2)</sup>Минский государственный колледж электроники, ул. Казинца, 91, 220108, г. Минск, Республика Беларусь

Методами электронного и ИК-поглощения исследованы процессы фотохимического образования нанокластеров комплексов четырех- и пентавалентного урана с органическими лигандами при облучении растворов  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  с различным соотношением  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  и урана при светодиодном облучении (430–450 нм) систем с доступом и без доступа кислорода воздуха. Установлено, что в системах  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  в ацетоне с добавлением нитрата кальция в ацетоне при облучении их в герметичных кюветах происходит фотополимеризация ацетона, а катализатором процесса являются возбужденные комплексы уранила. В реакциях такого типа возбужденные светом ионы уранила окисляют одну часть органической молекулы, а затем снова окисляются другой ее частью до U(VI). Таким образом, ионы уранила выступают как катализаторы дисмутации, активируемой светом. Реакции обоих типов могут проходить в отсутствие кислорода. В спектрах тех же образцов растворов, облученных в кюветах с доступом кислорода воздуха, наблюдается появление полос, принадлежащих комплексам четырех- и пентавалентного урана, т. е. в присутствии кислорода становится возможной реакция третьего типа – сенсibilizированное автоокисление органического восстановителя и сопутствующее восстановление U(VI) до U(V) и U(IV).

**Ключевые слова:** перхлорат уранила; ацетон; спектры электронного поглощения; спектры ИК-поглощения; фотохимические процессы; комплексы четырехвалентного урана; комплексы пентавалентного урана; нанокластеры.

---

### Образец цитирования:

Комяк А. И., Вилейшикова Н. П., Комяк Е. Н., Зажогин А. П. Фотохимические процессы в растворах перхлората уранила в ацетоне с участием атмосферного кислорода // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 21–27.

### For citation:

Komyak A. I., Vilejshikova N. P., Komyak E. N., Zajogin A. P. Photochemical processes in solutions of uranyl perchlorate in acetone with participation of atmospheric oxygen. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 21–27 (in Russ.).

---

### Авторы:

**Анатолий Иванович Комяк** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Наталья Павловна Вилейшикова** – инженер кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Елена Николаевна Комяк** – преподаватель.

**Анатолий Павлович Зажогин** – доктор физико-математических наук; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

### Authors:

**Anatolij Komyak**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

**Nataliya Vilejshikova**, engineer at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

*vilejsh@bsu.by*

**Elena Komyak**, lecturer.

**Anatolij Zajogin**, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

*zajogin\_an@mail.ru*

## PHOTOCHEMICAL PROCESSES IN SOLUTIONS OF URANYL PERCHLORATE IN ACETONE WITH PARTICIPATION OF ATMOSPHERIC OXYGEN

A. I. KOMYAK<sup>a</sup>, N. P. VILEJSHIKOVA<sup>a</sup>, E. N. KOMYAK<sup>b</sup>, A. P. ZAJOGIN<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus  
<sup>b</sup>Minsk State College of Electronics, Kazintsa street, 91, 220108, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: zajogin\_an@mail.ru

The photochemical formation processes of the nanoclusters of tetra- and pentavalent uranium with organic ligands have been studied by the methods of electron and IR absorption under light-emitting diode irradiation (430–450 nm) of  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  solutions having different proportions of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  and uranium in the presence and in the absence of oxygen. It has been found that in the systems  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  in acetone, with the addition of calcium nitrate in acetone, their irradiation in sealed cells leads to photopolymerization of acetone, the excited uranyl complexes being catalysts of the process. During such reactions the photoexcited ions of uranyl are oxidizing one part of the organic molecule and then are oxidized by its other part up to U(VI). In this way the uranyl ions are catalysts of the light activated dismutation reaction. The reactions of both types may take place in the absence of oxygen as well. Spectra of the same samples irradiated in the cells with the access of atmospheric oxygen reveal the bands attributed to the tetra- and pentavalent uranium complexes, i. e. in the presence of oxygen there is a possibility for the reaction of the third type – sensibilized autooxidation of the organic reducing agent and the accompanying reduction of U(VI) up to U(V) and U(IV).

**Key words:** uranyl perchlorate; acetone; electron absorption spectra; IR absorption spectra; photochemical processes; tetravalent uranium complexes; pentavalent uranium complexes; nanoclusters.

### Введение

Уран, как тяжелый радиоактивный элемент, широко используется в атомной энергетике. При работе атомных реакторов образуется достаточно большое количество радиоактивных отходов, которые подлежат переработке и утилизации. Основную часть составляют жидкие радиоактивные отходы низкого и среднего уровня активности, поэтому их необходимо переводить в твердое состояние, в котором легче утилизировать путем битумирования, остеклования либо цементирования.

Одним из перспективных способов обезвреживания жидких радиоактивных отходов с органикой (ЖРОО) является их каталитическое окисление до твердых соединений [1; 2], которое отличается простотой, высокой производительностью и использованием сравнительно дешевого и компактного оборудования.

Из разнообразных радио- и физико-химических методов анализа радиоактивных отходов, широко применяемых на практике, наиболее распространенными являются рентгеноструктурный, флуоресцентный, спектрально-эмиссионный и абсорбционный. Оптические методы отличаются простотой и доступностью, обладая при этом высокой точностью и чувствительностью. Проведенные нами исследования подтвердили это на примере изучения процессов образования оксидов и комплексов урана переменной валентности [3–6]. Речь идет о кинетике фотохимических реакций с участием солей уранила в присутствии различных растворителей и фоновых примесей типа ионов металлов 1-й и 2-й групп Периодической системы элементов Д. И. Менделеева и неорганических анионов различных солей (нитраты, фосфаты, перхлораты и др.).

Для разработки экстракционной теории извлечения урана из руд и отработанного ядерного топлива необходимо исследование фотохимических процессов, происходящих в комплексных соединениях урана под воздействием световых потоков различной интенсивности.

Цель настоящей работы – изучение процессов фотополимеризации ацетона и фотохимического образования наноккомплексов урана переменной валентности при облучении чистых растворов  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  в ацетоне и с добавлением фонового электролита  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  с доступом и без доступа кислорода воздуха при светодиодном облучении (430–450 нм) систем.

### Выбор объектов и методы исследования

Препаратами для облучения ультрафиолетовой радиацией служили растворы солей перхлората уранила  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  в ацетоне. Внутренняя координационная сфера иона  $\text{UO}_2^{2+}$  менее прочно связана с ацидолигандами  $\text{ClO}_4^-$  и может замещаться другими молекулярными группами, в частности ацетоном  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ , поэтому были выбраны растворы перхлоратных солей урана в ацетоне. В качестве фоновых добавок применялись нитратные соли кальция. Ионы  $\text{NO}_3^-$  также могут входить в координационную

сферу иона  $\text{UO}_2^{2+}$ . Последние использовались в основном для стабилизации наноккомплексов, образующихся в растворе ацетона. В качестве объектов исследования были взяты растворы уранилперхлората в ацетоне (УПХА) с добавлением нитрата кальция (2,5 мл УПХА в концентрации 0,45 моль/л + (500, 250 и 125 мкл) раствора  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (2,0 моль/л) в ацетоне).

Влияние кислорода воздуха и физико-химических свойств растворов на процессы фотохимического образования комплексов урана изучалось методами колебательной спектроскопии, в частности с помощью ИК-спектров поглощения, а также электронной спектроскопии.

Спектры электронного поглощения регистрировались в области 335–1000 нм с помощью автоматического спектрофотометра PV 1251 С (изготовитель – СП «Солар ТИИ», г. Минск, Беларусь), спектры ИК-поглощения фиксировались на фурье-спектрометре VERTEX 70.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для ионов урана различных степеней валентности в [7] приведена схема потенциалов окисления молярного раствора  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)$  в воде при комнатной температуре. Ни один из уровней потенциала, соответствующих окислительно-восстановительному процессу, не расположен выше уровня кислорода. В связи с этим среди ионов урана нет сильных окислителей, которые могли бы разлагать воду с выделением кислорода. Самый высокий потенциал пары  $\text{UO}_2^+/ \text{U}^{4+}$  составляет +0,58 В, который в водном растворе не реализуется ввиду неустойчивости  $\text{U}^{5+}$ . Более устойчивой в водном растворе является пара  $\text{UO}_2^{2+}/ \text{U}^{4+}$ , так как ее потенциал равен +0,32 В. Системы, имеющие более высокий окислительный потенциал, могут окислять  $\text{U}(4+)$  до  $\text{U}(6+)$ .

Для сравнения приведем окислительный потенциал системы  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ , равный 1,23 В. Естественно, что указанные соотношения справедливы только в растворе хлорной кислоты в воде концентрацией 1 моль/л, а в общем они будут зависеть от концентрации водородных ионов (рН) в системе. Низкий окислительный потенциал пары  $\text{UO}_2^+/ \text{U}^{4+}$  приводит к тому, что  $\text{U}^{4+}$  восстанавливается только под действием сильных восстановителей типа ионов водорода, металлов II группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева либо отдельных соединений сернистой кислоты, потенциалы которых имеют отрицательное значение.

Отсутствие заметных окислительных свойств у ионов уранила  $\text{UO}_2^{2+}$  приводит к тому, что они представляют собой наиболее устойчивую валентную форму  $\text{U}(6+)$ .

Если рассмотреть потенциалы двух пар ионов,  $\text{UO}_2^+/ \text{U}^{4+}$  и  $\text{UO}_2^+/ \text{UO}_2^{2+}$ , то в первой паре ион  $\text{UO}_2^+$  является окислителем, а во второй – восстановителем. При этом уровень потенциала пары  $\text{UO}_2^+/ \text{U}^{4+}$  значительно выше, чем у  $\text{UO}_2^{2+}/ \text{U}^{4+}$ . Это означает, что пентавалентный уран способен окислять самого себя, если следовать схеме  $\text{UO}_2^+/ \text{U}^{4+}$ , где он ведет себя как восстановитель. Значит, ион  $\text{UO}_2^+$  способен к самоокислению или самовосстановлению, т. е. диспропорционированию (дисмутации). Реакция диспропорционирования  $\text{U}^{5+}$  может быть выражена следующим уравнением:



Диспропорционирование  $\text{U}^{4+}$  невозможно, поскольку  $\text{U}^{4+}$  как окислитель на схеме уровней  $\text{U}^{4+}/ \text{U}^{3+}$  находится ниже, чем уран  $\text{U}^{4+}$  как восстановитель. При этом происходит не реакция диспропорционирования, а обратная ей реакция сопропорционирования:



Областью, наиболее устойчивой для иона  $\text{U}^{5+}$ , являются растворы с низким значением рН, равным 2,0–2,5. Однако, несмотря на свою термодинамическую неустойчивость, ионы  $\text{U}^{5+}$  могут играть важную роль в механизме протекания окислительно-восстановительных процессов в ионах  $\text{U}^{4+}$  и  $\text{UO}_2^{2+}$ .

Анализ спектров электронного поглощения основан на регистрации и изменении полос, наиболее существенных для иона уранила, и отдельных полос простых ионов  $\text{U}^{4+}$  и  $\text{U}^{5+}$ .

Характерные полосы в электронном спектре поглощения перхлората уранила в растворе ацетона (область 350–500 нм), а также участок спектра поглощения иона  $\text{U}^{4+}$  в комплексах хлорида четырехвалентного урана с диметилсульфоксидом (ДМСО) приведены на рис. 1. Здесь следует отметить характерные полосы в области 620–650 нм.

В области 890–910 нм расположены полосы, соответствующие  $\text{U}(3+)$ . По величине коэффициента поглощения в этих областях можно судить о присутствии указанных ионов в комплексных системах, в которых, как правило, реализуется наиболее устойчивая форма иона уранила  $\text{UO}_2^{2+}$ , где уран имеет валентность, равную шести.

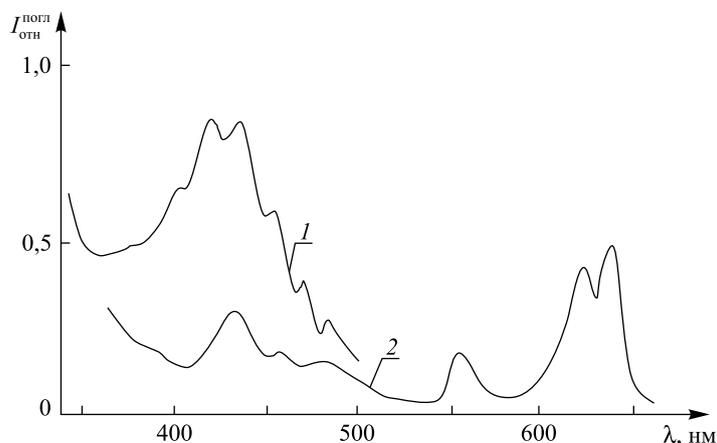


Рис. 1. Электронные спектры поглощения нанокластеров  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (1) и  $\text{UCl}_4 \cdot 2\text{DMSO}$  (2)  
Fig. 1. Electron absorption spectra of  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (1) and  $\text{UCl}_4 \cdot 2\text{DMSO}$  (2) nanoclusters

Спектры ИК-поглощения растворов уранила перхлората (УПХ) с примесью  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , которые получены при облучении смеси растворов без доступа воздуха, приведены на рис. 2. Заметные изменения в ИК-спектре происходят в областях  $520\text{--}540\text{ см}^{-1}$  и  $940\text{--}960\text{ см}^{-1}$ . Первая область характерна для либрационных колебаний молекул воды, координированных к иону уранила, а вторая – для антисимметричных колебаний группы  $\text{UO}_2^{2+}$ . С уменьшением фоновой концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  происходят заметные изменения в колебаниях молекул воды, входящих в координационную сферу иона уранила.

С помощью флуоресцентных методов анализа в работе [8] показано, что в растворах карбоновых кислот, содержащих ионы уранила, даже при воздействии тепловой энергии  $353\text{ К}$  наблюдается интенсивное образование гидроксильных радикалов, причем этот процесс имеет зависимость от концентрации, близкую к экспоненциальной. Таким образом, отмечены прооксидантные свойства малых концентраций ионов уранила.

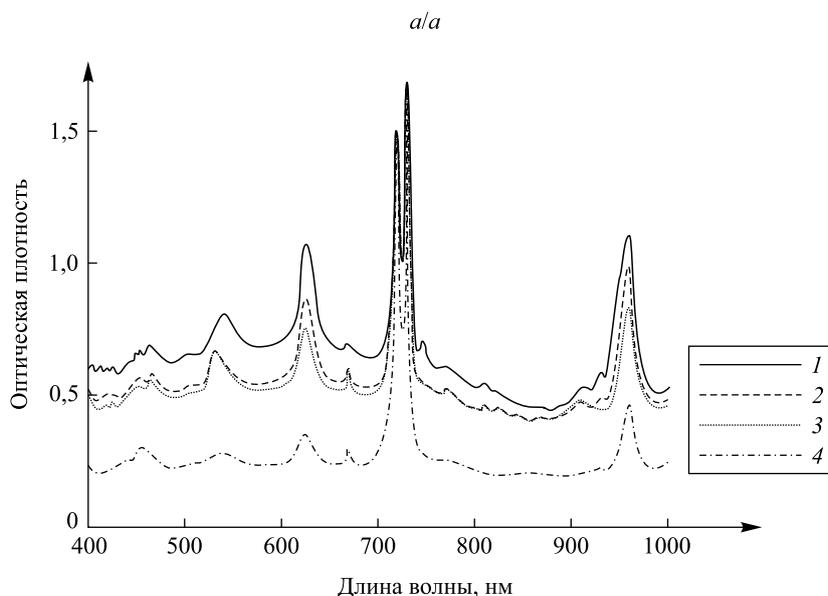


Рис. 2. Спектры ИК-поглощения образцов, облученных в герметичных кюветах (время облучения 90 мин):  
а – спектр ИК-поглощения образцов УПХ с примесью  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (область  $400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ );  
1 – 2,5 мл УПХ + 0,5 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 2 – 2,5 мл УПХ + 0,25 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  
3 – 2,5 мл УПХ + 0,125 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 4 – УПХ (окончание см. на с. 25)

Fig. 2. IR absorption spectra of the samples irradiated in the sealed cells (irradiation time 90 minutes):  
а – IR absorption spectrum of the samples containing uranyl perchlorate with the addition of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$   
(in the region  $400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ ); 1 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.5 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  
2 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.25 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  
3 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.125 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  
4 – uranyl perchlorate (ending see on the p. 25)

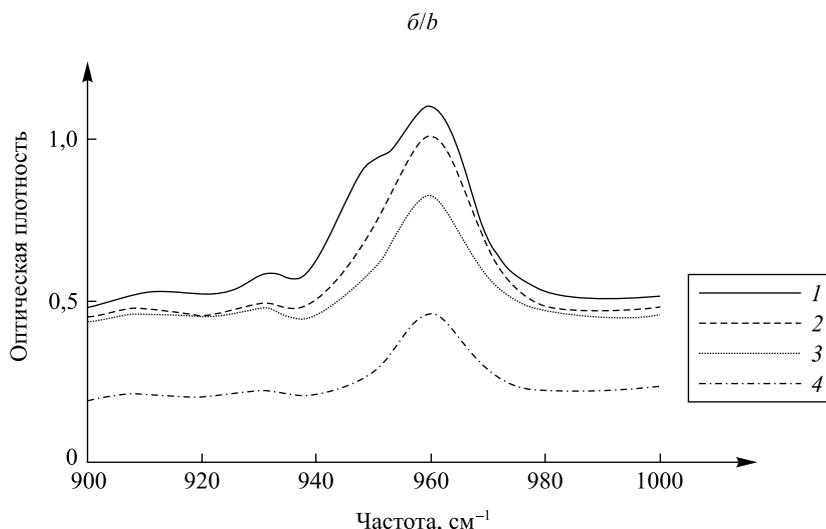


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 24):

*b* – фрагмент спектра ИК-поглощения образцов в области антисимметричных колебаний группы  $\text{UO}_2^{2+}$ ;  
1 – 2,5 мл УПХ + 0,5 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 2 – 2,5 мл УПХ + 0,25 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 3 – 2,5 мл УПХ + 0,125 мл  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 4 – УПХ

Fig. 2. Ending (beginning see on the p. 24):

*b* – fragment of an IR absorption spectrum for the samples in the region of antisymmetric vibrations of the group  $\text{UO}_2^{2+}$ ;  
1 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.5 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 2 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.25 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ;  
3 – 2.5 ml of uranyl perchlorate + 0.125 ml of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 4 – uranyl perchlorate

В ИК-спектре полоса  $540\text{ см}^{-1}$  сдвигается в длинноволновую сторону, свидетельствуя об уменьшении силы связи молекул воды со своим окружением. Это говорит о том, что при увеличении фоновой концентрации нитрата кальция происходит процесс вытеснения молекул воды из координационной сферы иона уранила и замена их ионами  $\text{NO}_3^-$ . На это указывают изменения ИК-спектра и в области  $940\text{--}960\text{ см}^{-1}$ . При высокой концентрации соли  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (объем 0,5 мл), добавленной в раствор перхлората на широкой полосе  $960\text{ см}^{-1}$ , в длинноволновой области появляется перегиб с максимумом  $945\text{ см}^{-1}$ , который можно отнести к полосе поглощения  $\nu_3$  иона уранила в комплексе типа  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Таким образом, даже без доступа кислорода воздуха при облучении системы ультрафиолетовым светом происходят физико-химические изменения внутри координационной сферы иона уранила.

В спектрах электронного поглощения в видимой области положения полос иона уранила практически не претерпевают изменений, а в длинноволновой области появляются новые полосы. На рис. 3 представлены две группы полос, которые образуются в комплексной системе при облучении светом в присутствии кислорода воздуха и без него.

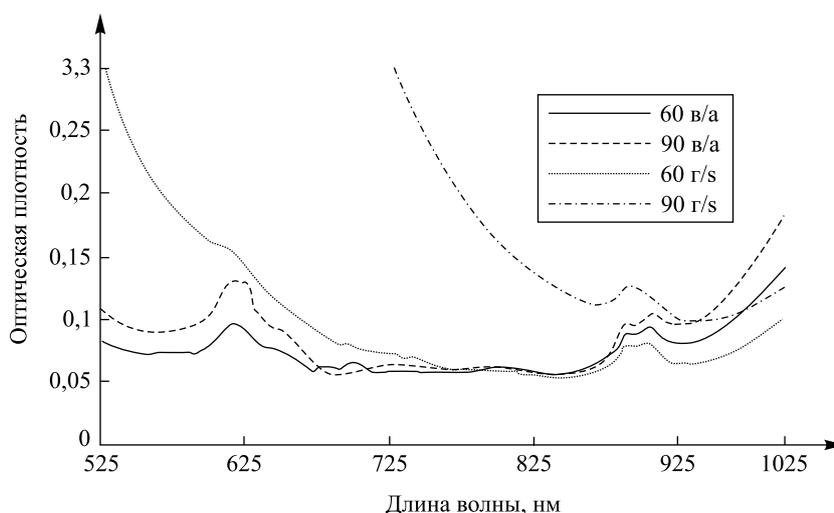


Рис. 3. Длинноволновые участки электронных спектров поглощения в растворах перхлората уранила в ацетоне.

На вставке – время облучения в минутах; в – в присутствии воздуха; г – герметичная кювета

Fig. 3. Long wavelength sections of electron absorption spectra in solutions of uranyl perchlorate in acetone.

The inset gives irradiation time in minutes (a – in the presence of air; s – in the sealed cell)

Процесс образования ионов  $U(4+)$ , как видно из рис. 3, идет довольно медленно в отсутствие атмосферы и заметно увеличивается в ее присутствии. Полосы области 890–920 нм практически не изменяют своей интенсивности, возрастая со временем облучения.

В ацетоновом растворе УПХ ион уранила окружен молекулами воды, и атом урана в возбужденном ионе уранила восстанавливается до пяти-, а затем и до четырехвалентного состояния. В растворе преимущественно идет процесс фотохимического преобразования уранила в четырехвалентный уран. Попутно образуются другие окислы (например, окись мезитила  $C_6H_{10}O$ ), а затем более сложные продукты полимеризации ацетона, которые включают ионы  $U(4+)$  и  $U(5+)$ .

Сравнение спектров свидетельствует о различии видов образующихся комплексов четырех- и пятивалентного урана и их координационного окружения. В системах с доступом кислорода воздуха при облучении появляются новые полосы с длинами волн 625–650 нм, принадлежащие комплексам четырех- и пятивалентного урана, а в области 890–920 нм обнаруживается поглощение комплексов трехвалентного урана. При этом в фотоокислении солей уранила участвуют не только температура [8] и свет, но и органические и неорганические молекулы и ионы. Возможны два главных механизма реакций [9] электронно-возбужденного иона уранила, обеспечивающих его реакционную способность. Электронно-возбужденный ион уранила  $UO_2^{2+}$  реагирует на изменения окружения либо вдоль линии связей «уран – кислород» с присоединением восстановителей (например, ионов  $H^+$ ), либо в плоскости, перпендикулярной линии связей  $U=O$ , с участием атома урана и координируемых атомов лигандов.

Первые реакции протекают по межмолекулярному механизму – изменяется окружение кислородов иона  $UO_2^{2+}$ , а вторые – по внутримолекулярному механизму, перестраивается внутренняя координационная сфера иона уранила. Для первых реакций характерен переход атома водорода к кислороду иона, а во вторых реакциях происходит перенос электрона от лиганда к центральному атому урана, что приводит к понижению его валентности до (5+). При этом по первому типу осуществляется реакция диспропорционирования урана (5+), в которой возбужденный ион уранила выступает как восстановитель.

В системах  $UO_2(ClO_4)_2 \cdot 5H_2O$  в ацетоне с добавлением нитрата кальция в ацетоне при облучении их в герметичных кюветах происходит фотополимеризация ацетона, а катализатором процесса являются возбужденные комплексы уранила. В реакциях такого типа возбужденные светом ионы уранила окисляют одну часть органической молекулы, а затем снова окисляются другой ее частью до  $U(VI)$ . Таким образом, ионы уранила выступают как катализаторы дисмутации, активируемой светом. Реакции обоих типов могут происходить в отсутствие кислорода. В спектрах тех же образцов растворов, облученных в кюветах с доступом кислорода воздуха, наблюдается появление полос, принадлежащих комплексам четырех- и пятивалентного урана, т. е. в присутствии кислорода становится возможной реакция третьего типа – сенсibilizированное автоокисление органического восстановителя и сопутствующее восстановление  $U(VI)$  до  $U(V)$  и  $U(IV)$ .

### Заключение

В итоге отметим, что механизмы фотохимических реакций в солях уранила весьма разнообразны и процессы окисления и восстановления ионов урана происходят различными способами. Введение дополнительно к основному электролиту небольших количеств электролитов иной природы и воздуха, по-видимому, позволит влиять на изменение фотохимических свойств системы более тонким смещением равновесия в нужном направлении, что, в свою очередь, может отразиться на расширении возможностей утилизации ЖРОО. Фоновые добавки других солей способны влиять на положение полос в спектрах поглощения, что может быть учтено при спектрохимическом анализе радиоактивных отходов атомных реакторов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бернадинер М. Н., Шурыгин А. П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М., 1990.
2. Карпенко В. И., Шушакова М. В., Ожерельев О. А. Технология каталитической переработки жидких радиоактивных органических отходов // Изв. Том. политехн. ун-та. 2005. Т. 308, № 3. С. 88–91.
3. Фотообразование и фотокаталитическая активность уранила в ацетоновых растворах / А. П. Зажогин [и др.] // Журн. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 5. С. 565–568.
4. Спектры электронного поглощения и фотохимическая активность иона уранила в перхлоратных растворах в ацетоне с добавлением ДМСО и ДМФА при оптическом возбуждении / Д. С. Умрейко [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2014. № 2. С. 3–7.
5. Умрейко Д. С., Вилейшикова Е. В., Комяк А. И. Исследование влияния физико-химических свойств растворов Mg, Na и K на процессы фотохимического образования комплексов урана с органическими лигандами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2014. № 3. С. 7–14.

6. Определение фотохимической активности иона уранила в ацетоне при световом облучении в присутствии примесей катионов металла и анионов / Д. С. Умрейко [и др.] // Журн. прикл. спектроскопии. 2015. Т. 82, № 3. С. 781–783.
7. Жерин И. И., Амелина Г. Н. Химия, теория урана и плутония. Томск, 2010. С. 50–56.
8. Гармаш С. А. Образование активных форм кислорода при совместном действии низких концентраций ионов уранила и ряда физических факторов // Фундам. исслед. 2012. № 9, ч. 4. С. 961–954.
9. Бучаченко А. Л., Худяков И. В. Фотохимия уранила: спиновая селективность и магнитные эффекты // Успехи химии. 1991. Т. 60, № 6. С. 1105–1127.

#### REFERENCES

1. Bernadiner M. N., Shurygin A. P. Ognevaya pererabotka i obezvrezhivanie promyshlennykh otkhodov. Mosc., 1990 (in Russ.).
2. Karpenko V. I., Shushakova M. V., Ozherel'ev O. A. Tekhnologiya kataliticheskoi pererabotki zhidkikh radioaktivnykh organicheskikh otkhodov [Technology of catalytic processing of liquid radioactive organic wastes]. *Izv. Tomsk. politekhnicheskogo univ.* 2005. Vol. 308, No. 3. P. 88–91 (in Russ.).
3. Zajogin A. P., Zajogin A. A., Komyak A. I., et al. Fotoobrazovanie i fotokataliticheskaya aktivnost' uranila v atsetonovykh rastvorakh [The photoformation and photocatalytic activity of uranyl in acetone solutions]. *Zhurnal prikl. spektrosk.* 2007. Vol. 74, No. 5. P. 565–568 (in Russ.).
4. Umreiko D. S., Vilejshikova E. V., Komyak A. I., et al. Electronic absorption spectra and photochemical (catalitic) activity of uranyl ion in perchlorate solutions in acetone with the addition of DMSO and DMF under optical irradiation. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2014. No. 2. P. 3–7 (in Russ.).
5. Umreiko D. S., Vilejshikova E. V., Komyak A. I. A study of the effects exerted by the physical and chemical properties of the solutions of Mg, Na, and K on the photochemical formation processes of uranium complexes with organic ligands. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2014. No. 3. P. 7–14 (in Russ.).
6. Umreiko D. S., Vilejshikova E. V., Zajogin A. P., et al. Opredelenie fotokhimicheskoi aktivnosti iona uranila v atsetone pri svetovom obluchenii v prisutstvii primesei kationov metalla i anionov [Determination photochemical activity of uranyl ion in acetone under light illumination in the presence of the impurities of metal cations and anions]. *Zhurnal prikl. spektrosk.* 2015. Vol. 82, No. 3. P. 781–783 (in Russ.).
7. Zherin I. I., Amelina G. N. Khimiya, teoriya urana i plutoniya [Chemistry, theory of uranium and plutonium]. Tomsk, 2010. P. 50–56 (in Russ.).
8. Garmash S. A. The formed reactiv oxygen species under the combined action of uranyl ions and physical factors. *Fundamental'nye issled.* 2012. No. 9, part 4. P. 961–954 (in Russ.).
9. Buchachenko A. L., Khudyakov I. V. The photochemistry of uranyl: spin selectivity and magnetic effects. *Usp. Khim.* 1991. Vol. 60, No. 6. P. 1105–1127 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.08.2016.  
Received by editorial board 22.08.2016.