

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСИПЛЕКСНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ<sup>1</sup>

© Э. А. Соснин<sup>2</sup>, В. Н. Баталова<sup>2</sup>, Э. А. Захарова<sup>3</sup>

*Статья поступила 31 марта 2004 г.*

Обобщен опыт применения источников спонтанного ультрафиолетового излучения — эксимерных ламп (эксиламп) — для решения задач в области электрохимического анализа. Эксилампы использовали в процессе предварительной подготовки проб для разрушения комплексов металлов — растворенные органические вещества (РОВ) при определении токсичных элементов в пищевых продуктах, для очистки электродов от поверхностно-активных органических веществ (ПАОВ) и для удаления растворенного кислорода. Показано, что эксилампы являются перспективной системой для проведения фотохимических реакций в аналитической химии.

Ультрафиолетовое облучение (УФО) нашло применение для решения разнообразных задач в области химического анализа [1, 2]. В последнее время интерес к использованию УФО усилился в связи с анализом следов элементов в экологических, биологических объектах, пищевых продуктах и других образцах, так как выяснилось, что во многих методах анализа на результаты определений большое влияние оказывают органическая матрица и даже следы растворенных органических веществ. Появилось несколько обзоров [3 – 6], в которых рассматривается применение УФ окисления для проведения пробоподготовки в неорганическом анализе объектов окружающей среды: фотохимические методы определения общего углерода, азота и фосфора [3], сенсibilизированная  $Fe^{3+}$ ,  $TiO_2$  фотодegradация различных органических загрязнителей в водах [4], различные аспекты использования фотохимических реакций в электрохимическом анализе [5, 6].

Применение высокоактивных окислителей — кислорода, озона, пероксида водорода, радикалов-окислителей, полупроводниковых оксидов — в сочетании с УФ облучением в процессах очистки воды и воздуха позволило значительно ускорить

процессы дegradации РОВ. В зарубежной литературе эти процессы получили название AOPs (Advanced Oxidation Processes), менее распространенные альтернативные названия — AOTs (Advanced Oxidation Technologies) и EOPs (Enhanced Oxidation Processes). Использование разработанных в последнее десятилетие эксиламп на димерах инертных газов произвело революционизирующее воздействие на AOP и AOT. Эксилампы [7] (за рубежом их называют эксимерными лампами) являются новым перспективным источником спонтанного УФ излучения.

В настоящей работе обобщается опыт, полученный авторами при использовании эксиламп для решения некоторых задач в области электрохимического анализа.

### Разрушение органических матриц УФ излучением

Как известно [7 – 10], при УФ облучении растворов органических и неорганических веществ происходит поглощение кванта света, в результате которого возникает электронно-возбужденное или метастабильное триплетное состояние молекулы. К таким первичным фотохимическим реакциям относятся фотодиссоциация, фотоакватация, внутримолекулярное окисление или фотовосстановление, что ведет к образованию высокоактивных частиц с неспаренным электроном — радикалов. Продукты первичных реакций участвуют во вторичных (темновых) процессах, которые начинают играть главную роль в растворах, содержащих, помимо РОВ, кислород, взвеси и примеси металлов [11 – 13].

<sup>1</sup> Работа частично выполнена в рамках проекта МНТЦ № 1270.

<sup>2</sup> Томский государственный университет, г. Томск, Россия.

<sup>3</sup> Томский политехнический университет, г. Томск, Россия.

Темновой процесс существенно зависит от концентрации окислителя/катализатора, температуры, режима перемешивания. В качестве эффективных окислителей выступают  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $K_2S_2O_8$ ,  $TiO_2$ ,  $K_2Cr_2O_7$ ,  $KMnO_4$ ,  $HNO_3$  и т. д. В результате большинство органических веществ оказывается разложенным на воду и диоксид углерода и другие разновидности карбонатов ( $H_2CO_3$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ). Часто, имея в виду весь цикл превращений, завершающийся таким разложением, говорят о процессе фотоминерализации, в котором гетероатомные органические молекулы трансформируются в соответствующие минеральные кислоты ( $HNO_2$ ,  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HNO_3$  и т. д.). Аналогичная реакция протекает при взаимодействии окислителя и УФ излучения с металлоорганическими комплексами. При этом дополнительно в раствор высвобождаются ионы металлов.

Одно из первых сообщений об УФ минерализации — работа F. A. Armstrong, опубликованная в журнале Nature [14], в которой были описаны результаты минерализации морской воды при помощи 1200-Вт дуговой ртутной лампы Hanovia Engelhardt 189 A, излучающей в области длин волн 200 – 440 нм примерно 200 Вт. Далее в работах [15 – 17] было показано, что метод фотохимической пробоподготовки имеет очевидные достоинства: практически все органические вещества подвергаются декомпозиции УФ излучением; появилась возможность сделать пробоподготовку безреагентной либо использовать экологически чистые окислители; потери летучих веществ можно свести к минимуму.

Несмотря на то, что фотоминерализацию можно осуществить самыми разнообразными путями, почти всегда она сопровождается эффективной генерацией  $\bullet OH$ -радикалов [18 – 20]. Эти радикалы имеют мощную окислительную способность, небольшое время жизни, реагируют со всеми органическими веществами и могут быть получены различными способами. Кроме  $\bullet OH$ -радикалов, схемы мокрого окисления, т. е. окисления без сжигания, осуществляются при помощи частиц  $HO_2^*$ ,  $O_3$  и синглетного кислорода  $^1O_2$ . Одним из источников гидроксил-радикалов является циклическая реакция Раффа — Фентона (система  $Fe^{3+} + H_2O_2 + UFO$ ), в ходе которой происходит непрерывное фотовосстановление солей  $Fe^{3+}$  до  $Fe^{2+}$  и генерация  $\bullet OH$ . Известным фотохимическим источником  $\bullet OH$ -радикалов являются нитраты и нитриты [5].

С появлением коротковолновых эксилламп на димерах ксенона ( $\lambda \sim 172$  нм) генератором  $\bullet OH$ -радикалов — инициатором минерализации POB — становится фотолиз воды [21]. Работ, в которых этот тип ламп использовался бы непосредственно в

аналитических целях, пока немного [22], но обработка вакуумным ультрафиолетовым излучением (ВУФ) широко исследуется в изучении процессов очистки вод и воздуха от органических токсикантов (упомянутые выше процессы АОР). В целом ряде работ показано, что применение новых ламп для разложения органических веществ в растворах и газовой фазе позволяет отказаться от использования дополнительных окислителей [23 – 25].

### Традиционные источники ультрафиолетового излучения: ртутные, ксеноновые и криптоновые лампы

Распространенность тех или иных источников спонтанного излучения определяется во многом их пригодностью для практических целей. В условиях бурного развития фотохимических технологий традиционные источники излучения не всегда обладают необходимыми свойствами. Например, большинство органических веществ и  $H_2O_2$  поглощают ультрафиолет на  $\lambda < 250$  нм (полихлорбифенилы, фенолы, алифатические спирты, этилбензол и т. д.), а многие совсем не поглощают в области  $\lambda > 300$  нм. Между тем традиционные источники излучения, за исключением дейтериевой и водородной ламп, интенсивно излучают лишь в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра.

Известно, что капиллярная ртутная лампа высокого давления обладает чрезвычайно высокой энергетической яркостью в диапазоне от 300 до 650 нм. Внутреннее давление в таких лампах может достигать 200 атм, в связи с чем лампы являются взрывоопасными [26].

Ртутные лампы низкого давления имеют интенсивную линию излучения на 253,7 нм, а в случае использования колбы из плавленого кварца около 15 % излучения приходится на 185 нм. К недостаткам этих ламп можно отнести небольшую светимость (доли мВт/см<sup>2</sup>), хотя доля излучения в диапазоне 280 – 315 нм в общем лучистом потоке у них может превышать 50 %.

В работе [27] с целью определения доли излучения на  $\lambda < 300$  нм были использованы несколько коммерческих ламп — импульсная ксеноновая лампа Purus Pulsed Xe, ртутная лампа среднего давления Heraeus Ink Curing Lamp и ртутная лампа среднего давления Hanovia Med. Press. Hg 6806A-431. Измерения показали, что доля излучения импульсной ксеноновой лампы на длинах волн короче 300 нм в общем лучистом потоке составляет 18,5 %, а для ртутных ламп среднего давления Heraeus Ink Curing Lamp и Hanovia Med. Press. Hg — 11,4 и 18,8 % соответственно. Таким образом, для этих ламп, как

и для ксеноновых дуговых ламп [28], на  $\lambda < 300$  нм излучается не более 10 – 20 % энергии.

В то же время за счет интенсивного излучения в видимом и ИК диапазонах лампы сильно разогревают облучаемые пробы. Последнее требует интенсивного искусственного охлаждения и может привести к потерям летучих компонентов. При использовании воздушного охлаждения происходит сильное озонирование, поэтому необходимы дополнительные меры по защите персонала аналитической службы. Импульсные ксеноновые и криптоновые лампы требуют для своей работы устройств для коммутации сильноточных импульсов высокого напряжения. По этим причинам на сегодняшний день, несмотря на небольшую мощность, в аналитических методах часто используются ртутные лампы низкого давления.

### Экцимерные и эксиплексные газоразрядные лампы

Первой эксилампой, вероятно, можно было бы назвать систему на основе барьерного разряда между пластинами из конденсаторной керамики, предложенную И. В. Подмошенским с сотрудниками [29], хотя эксимерные континуумы He, Ne, Ar, Kr, H<sub>2</sub> в ультрафиолетовом диапазоне спектра экспериментально наблюдались ранее в период с 1930 по 1960 г. [30 – 33], а наиболее удачная качественная их интерпретация на примере двухатомной молекулы Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup> была сделана в работе [34].

Эксилампы [7, 35 – 37] являются подклассом разрядных ламп, излучающих за счет распада эксимерных молекул [эксимеров — от англ. excited dimer (excimer) — возбужденный димер, если речь идет о молекуле, состоящей из одинаковых атомов, например Ar<sub>2</sub><sup>\*</sup>] или эксиплексных молекул [эксиплексов — от англ. excited complex (exciplex) — возбужденный комплекс, если речь идет о гетероядерной молекуле, например XeF<sup>\*</sup>]. Особенностью этих молекул является их устойчивость в электронно-возбужденном состоянии и отсутствие прочной связи (неустойчивость) в основном. Время жизни такой молекулы в возбужденном состоянии ограничено и составляет для разных эксиплексов от 10<sup>-9</sup> до 10<sup>-7</sup> с. Спонтанный распад молекулы на отдельные атомы сопровождается высвечиванием характерного для данного комплекса кванта света.

Эксилампы излучают в УФ и ВУФ областях спектра. Как правило, до 80 % от общего светового потока сосредоточено в узкой полосе, имеющей ширину не более нескольких нанометров, что отличает эксилампы от других газоразрядных источников излучения. Выбором рабочей молекулы и давления рабочей смеси можно обеспечить преимущественное

облучение в заданном диапазоне длин волн. Ниже приведены длины волн, на которых излучение эксимерных и эксиплексных молекул максимально [36]:

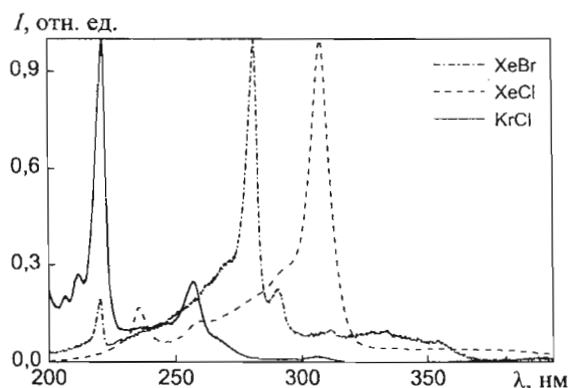
Эксимеры		Эксиплексы	
Молекула	$\lambda$ , нм	Молекула	$\lambda$ , нм
Ar <sub>2</sub> <sup>*</sup>	129	ArF <sup>*</sup>	193
Kr <sub>2</sub> <sup>*</sup>	147	ArCl <sup>*</sup>	175
Xe <sub>2</sub> <sup>*</sup>	172	ArBr <sup>*</sup>	165
F <sub>2</sub> <sup>*</sup>	158	KrF <sup>*</sup>	248
Cl <sub>2</sub> <sup>*</sup>	258	KrCl <sup>*</sup>	222
Br <sub>2</sub> <sup>*</sup>	290	KrBr <sup>*</sup>	207
I <sub>2</sub> <sup>*</sup>	343	KrI <sup>*</sup>	190
		XeF <sup>*</sup>	351
		XeCl <sup>*</sup>	308
		XeBr <sup>*</sup>	282
		XeI <sup>*</sup>	253

На рис. 1 представлены характерные спектры эксиламп емкостного разряда на различных молекулах. Рабочие параметры эксиламп емкостного разряда, использованные в экспериментах, приведены ниже:

	XeCl- эксилампа	KrCl- эксилампа	XeBr- эксилампа
Длина волны $\lambda$ ( <i>B</i> → <i>X</i> переход), нм	308	222	283
Полуширина полосы излучения <i>B</i> → <i>X</i> , нм	7	5	5
Плотность мощности УФ излучения, мВт/см <sup>2</sup>	До 10	До 20	До 10

Эксилампы были изготовлены в лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН.

Достоинствами эксиламп являются: большая энергия фотона (3,5 – 10 эВ), узкая полоса излучения,



Спектры эксиламп емкостного разряда на различных рабочих молекулах

относительно высокая удельная мощность излучения, возможность масштабирования и выбора произвольной геометрии излучающей поверхности, отсутствие ртути в колбе, относительно слабый разогрев колбы эксилламп, быстрый выход (за несколько секунд) на рабочий режим [37].

Использование эксилламп расширяет возможности селективного воздействия на фотохимические и фотофизические системы, где традиционно использовались ртутные лампы или эксимерные лазеры [38, 39]. Импульсные эксимерные лазеры, позволяют транспортировать излучение с минимальными потерями в нужную область фотохимического реактора и так же, как и эксилламп, селективно возбуждать некоторые электронные состояния изучаемых соединений. Однако лазеры имеют и недостатки, к которым относится их сложность, что ведет к большим эксплуатационным затратам и требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

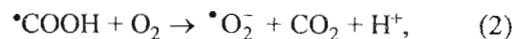
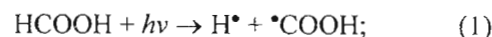
Таким образом, по совокупности своих свойств эксилламп являются потенциально перспективной системой, которая могла бы быть использована для решения различных задач аналитической химии.

#### Устранение помех в методе инверсионной вольтамперометрии (ИВА). Фотохимическая дезактивация кислорода в растворах

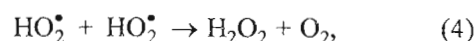
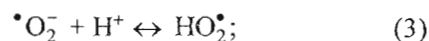
В методе ИВА с линейно меняющимся потенциалом основной помехой является растворенный кислород, который может оказывать мешающее влияние как деполяризатор, маскирующий ток определенных элементов, и как окислитель амальгамы на рабочем ртутном электроде [40]. Традиционные способы удаления кислорода из полярографируемых растворов (деаэрирование инертными газами, добавление в раствор восстановителей, вакуумирование ячейки, вымораживание кислорода) либо достаточно сложны в реализации, либо не дают полного удаления кислорода из раствора. Принципиально иной способ представляет собой ультрафиолетовое облучение полярографируемого раствора [41 – 43] ртутно-кварцевой лампой.

При УФ облучении раствора, куда вводятся небольшие добавки карбоновых или оксикислот, служащих фоном, на первом этапе происходит фотодиссоциация органических молекул с образованием активных к кислороду радикалов  $\cdot R$ , а затем вторичные реакции по механизму присоединения ( $\cdot R + O_2 \rightarrow RO_2\cdot$ ) или переноса ( $\cdot R + O_2 \rightarrow R^+ + \cdot O_2^-$ ) электрона. Авторами работы [43] доказано, что эффективной областью света является  $\lambda =$

$= 200 \div 300$  нм, и предложен следующий механизм дезактивации кислорода в 0,5 М растворе муравьиной кислоты:



далее анион-радикал  $\cdot O_2^-$  в кислой среде быстро диспропорционирует:



а образованные при этом пероксид водорода и кислород участвуют в фотохимических реакциях. В результате в каждом цикле количество растворенного в воде кислорода уменьшается в 2 раза, что ведет к устранению фарадеевской составляющей остаточного тока.

Привлекательность данной схемы состоит еще в том, что процесс удаления кислорода при УФО в полярографической ячейке совмещается с пробоподготовкой или минерализацией пробы биологического объекта за счет распада комплексов *Me*-POB. Этот эффект использован в вольтамперометрических анализаторах, снабженных ртутными лампами, и широко применяется на практике.

#### Разрушение ПАОВ, РОВ и комплексов металлов с гуминовыми и фульвокислотами

Источником помех в вольтамперометрических измерениях могут выступать гуминовые кислоты (ГК) и поверхностно-активные органические вещества (ПАОВ). ПАОВ и ГК адсорбируются на рабочем электроде, уменьшая его площадь, и образуют прочные комплексы с определяемыми ионами металлов. И то, и другое препятствует восстановлению ионов на поверхности рабочих электродов. Множество природных объектов, таких как естественные природные воды, земля, торф и т. д., содержат гуминовые и фульвокислоты, влияние которых необходимо устранять. Первая оценка возможности использования для этой цели эксилламп была сделана в работе [44]. В качестве ГК использовались вытяжки из почвы, сделанные в Институте торфа (г. Томск). Облучение раствора  $ХеСl$ -эксиллампой емкостного разряда в течение 15 мин полностью восстанавливало сигнал ртути, предварительно подавленный добавкой ГК.

В работе [45] изучались условия устранения мешающего влияния поверхностно-активных

органических веществ и гуминовых кислот при регистрации анодных пиков Zn, Cd, Pb и Cu различными способами. Традиционно для решения этой задачи используется мокрое озоление кислотами-окислителями, однако из-за длительности и других недостатков данной процедуры в последние годы все шире применяют УФ окисление, ультразвуковую пробоподготовку, микроволновое излучение и комбинированные методы [46].

Экспериментальная процедура последовательно включала получение значимых анодных пиков ионов металлов Zn, Cu, Cd, Pb на фоне 0,5 М HCOOH; добавление мешающего вещества (лаурилсульфата натрия или ГК), которое вело к исчезновению аналитического сигнала; озонирование или УФО раствора за время, необходимое для восстановления сигнала. УФО осуществляли ртутно-кварцевой лампой ( $\lambda = 254$  нм) либо KгCl-эксилампой емкостного разряда ( $\lambda \sim 222$  нм).

Исследование мешающего действия добавок лаурилсульфата Na показало, что это ПАОВ подавляет пики свинца и кадмия, оказывает слабое влияние на сигнал меди и не влияет на сигнал цинка (табл. 1). Озонирование оказалось успешным только при восстановлении сигналов ионов меди. Было показано, что облучение KгCl-эксилампой является наиболее эффективным для разрушения лаурилсульфата Na. Действие излучения Hg-лампы даже в присутствии в растворе фотокатализатора TiO<sub>2</sub> было менее эффективным. Последнее имело место для всех элементов в течение всех экспериментов.

**Таблица 1.** Величина пиков металлов на ртутном электроде в 0,5 М растворе HCOOH, мкА

Элемент	Пик анодного тока, мкА		
	Начальный раствор	Раствор	
		с добавкой лаурилсульфата Na	После озонирования раствора в течение 50 с
Zn	0,078	0,070	0,080
Cd	0,125	0,055	0,097
Pb	0,461	0,229	0,332
Cu	0,267	0,226	0,303

**Таблица 2.** Величины аналитических сигналов ионов металлов на ртутном электроде в 0,5 М растворе HCOOH, мкА

Элемент	Пик анодного тока, мкА			
	Начальный раствор	После добавки гуминовой кислоты	После озонирования раствора в течение 50 с	После облучения KгCl-эксилампой в течение 120 с
Zn	0,040	0,002	0,002	0,041
Cd	0,161	0,025	0,034	0,165
Pb	0,095	0,021	0,032	0,100
Cu	0,089	0,023	0,024	0,093

Деградиацию ГК под действием озона и излучения KгCl-эксилампы иллюстрируют данные табл. 2. Видно, что гуминовые кислоты сильнее всего подавляли аналитический сигнал Zn. Облучение KгCl-эксилампой всегда приводило к полной деградации ГК.

### Использование эксилампы в анализе различных объектов методом ИВА

Эксилампы были впервые использованы в процессе пробоподготовки пищевых продуктов методом инверсионной вольтамперометрии в работе [44]. Для УФО облучения были взяты ХеCl-, ХеBr- и KгCl-эксилампы емкостного разряда [47]. Для сравнения действия эксилампы с традиционными источниками УФО излучения использована U-образная ртутно-кварцевая лампа ДРФХ-204.

В качестве рабочего электрода применен золотографитовый (ЗГЭ) на основе графитового, накопленный в режиме *in situ* электролизом из раствора хлорида золота с концентрацией 1 мг/дм<sup>3</sup>. Электрод сравнения — хлоридсеребряный в 0,1 М растворе KCl.

Результаты определения ртути в различных продуктах приведены в табл. 3. Для проверки полноты устранения мешающего влияния матрицы делали добавки стандартного раствора ртути два раза. Совпадение величин концентраций ионов ртути в пределах случайной ошибки свидетельствовало об эффективности пробоподготовки.

Таким образом, как показали эксперименты, все исследуемые эксилампы могут быть альтернативной системой для пробоподготовки наряду с традиционными ртутными лампами низкого давления.

Предложенная пробоподготовка применена и к биологическим объектам. Так, в работе [49] была оптимизирована пробоподготовка при определении ртути в волосах с применением ХеBr-лампы емкостного разряда. В работе [50] выбраны условия подготовки проб и предложена методика определения иода в моче методом катодной ИВА с использованием эксилампы емкостного разряда на рабочих молекулах KгCl\* ( $\lambda \sim 222$  нм) и ХеBr\* ( $\lambda \sim 283$  нм).

Выбор ХеBr-эксилампы был обусловлен следующими причинами. Эта лампа имеет потенциально

**Таблица 3.** Результаты определения ионов  $Hg^{2+}$ , полученное методом ИВА с УФО в различных объектах, мг/кг

Объект анализа	Источник излучения	Время облучения, мин	Содержание ионов $Hg^{2+}$ после добавок стандарта $Hg^{2+}$	
			первой	второй
Огурец	ХеСl-эксиллампа	80	0,052	0,054
Молоко (образец 1)	KrCl-эксиллампа	45	0,012	0,012
	KrCl-эксиллампа	55	0,038	0,030
	Hg-лампа	55	0,071	0,120
Сметана	KrCl-эксиллампа	30	0,003	0,003
Молоко (образец 2)	KrCl-эксиллампа	60	0,014	0,015
Морковь	KrCl-эксиллампа	60	0,313	0,317
Картофель	KrCl-эксиллампа	50	0,114	0,120
	Hg-лампа	50	0,162	0,169
Мясо	KrCl-эксиллампа	60	0,060	0,063

**Примечание.** Содержание ртути в пробах < 0,005 – 0,001 мг/кг; ртуть вводили в пробы перед пробоподготовкой.

очень высокий срок службы в связи с тем, что атомарный бром практически не взаимодействует со стенками кварцевой колбы, что отличает эту эксиллампу от хлорсодержащих эксилламп [37]. Так, в ходе экспериментов лампа отработала более 500 ч без заметного спада интенсивности излучения. Спектр этой лампы имеет максимум на длине волны 283 нм, что, с одной стороны, позволяет проводить фотохимические реакции типа (3), а с другой стороны, уменьшает выделение озона в слое воздуха между лампой и облучаемым объектом. Это делает ХеВг-эксиллампу более безопасной для оператора-аналитика, чем ртутная лампа низкого давления. Кроме того, эксиллампы емкостного разряда легко зажигаются. Время выхода такой лампы на режим составляет несколько секунд, между тем традиционные ртутные лампы перед использованием должны предварительно разогреваться в течение нескольких минут. Перечисленные задачи, при решении которых были использованы эксиллампы, конечно, не исчерпывают всего списка возможных приложений.

Таким образом, предлагаемый безреагентный, экологически чистый эффективный способ УФ воздействия на анализируемые растворы, без сомнения, найдет широкое применение в современном анализе.

Авторы выражают признательность В. Ф. Тарасенко, Д. В. Шитцу, А. А. Лисенко и М. В. Ерофееву (Институт сильноточной электроники СО РАН), Г. Б. Слепченко (Томский политехнический университет), Г. Т. Вилисову (ООО «ИТМ», г. Томск) за техническую поддержку и обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Немодрук А.А., Безрогова Е.В. Фотохимические реакции в неорганической химии. — М.: Химия, 1972. — 167 с.
- Додин Е.И. Фотохимический анализ. — М.: Металлургия, 1979. — 176 с.
- Шкиль А.Н., Гаврилов И.Т., Краснушкин А.В. Фотохимические методы определения растворенного органического углерода в природных и технологических водах. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 86 с.
- Penuela G., Barcelo D. / Trends Anal. Chem. 1998. V. 17. № 10. P. 605 – 611.
- Golimowski J., Golimowska K. / Anal. Chim. Acta. 1996. V. 325. P. 111 – 133.
- Захарова Э.А. Симпозиум «Теория электроаналитической химии и метод инверсионной вольтамперометрии» / Тезисы докл. — Томск, 2000. С. 85.
- Ломаев М.В., Скаун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. / УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201 – 217.
- Кальверт Дж., Питс Дж. Фотохимия / Под ред. Р. Ф. Васильева. — М.: Мир, 1968. — 672 с.
- Введение в фотохимию органических соединений / Под ред. Г. О. Беккера, А. В. Ельцова. — Л.: Химия, 1976. — 380 с.
- Окабе Х. Фотохимия малых молекул / Под ред. М. Г. Кузьмина. — М.: Мир, 1981. — 500 с.
- Худяков И.В., Кузьмин В.А. / Успехи химии. 1978. Т. 47. Вып. 1. С. 39 – 82.
- Морковник А.С., Охлобыстин О.Ю. / Успехи химии. 1979. Т. 48. Вып. 11. С. 1968 – 2006.
- Бажин Н.М., Бердников В.М. — В кн.: Свободно-радикальные состояния в химии. — Новосибирск: Наука, 1972. С. 129 – 153.
- Armstrong F.A.J., Williams P.M., Strickland J.D.H. / Nature. 1966. V. 211. № 5048. P. 481 – 483.
- Piklar B. / Z. Wasser Abwasser Forsch. 1980. V. 13. № 14. P. 130.
- Stoppler M., Nurnberg H.W. / Chemia Analyt. 1983. V. 28. P. 411.
- Nurnberg H.W., Valenta P. / Fresenius Z. Anal. Chem. 1980. V. 300. P. 350.
- Andreozzy R., Caprio V., Insola A., Marotta R. / Catalysis Today. 1999. V. 53. P. 51.
- Бурсова С.Н., Кандзас П.Ф., Субботин В.А. Применение УФ облучения в технологии очистки сточных вод / Обзорная информация. Серия «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». — М.: НИИТЭХИМ, 1983. Вып. 5 (48). — 24 с.

20. *Glaze W.H., Kang J.-W., Chapin D.H.* / *Ozone Sci. Eng.* 1987. V. 9. P. 335–352.
21. *Oppenlander T.* *Photochemical Purification of Water and Air.* — Weinheim: WILEY–VCH Verlag, 2003. — 368 p.
22. *Grichetschkina M.V., Zaitsev N.K., Braun A.M.* / *Toxic. Environ. Chem.* 1966. V. 53. P. 143–151.
23. *Oppenländer T.* — In: *Book of Abstracts, XVIII IUPAC Symposium on Photochemistry, Dresden, July 22 – 27, 2000.* P. 479–480.
24. *Baum G., Oppenländer T.* / *Chemosphere.* 1995. V. 30. № 9. P. 1781–1790.
25. *Oppenländer T., Baum G., Egle W., Hennig T.* — In: *Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.).* 1995. V. 107. №. 6. P. 621–636.
26. *Справочник по лазерам (в 2-х томах). Т. 2.* — М.: Советское радио, 1978. С. 62–77.
27. *Haag W.R.* / *Preprint of Lawrence Livermore National Laboratory (6 August 1996).*
28. *Hamamatsu Photonics K.K. Catalog № TLSO0002E02,* July, 1998.
29. *Павловская Е.Н., Подмошенский И.В., Яковлева А.В.* / *ЖПТС.* 1974. Т. 20. Вып. 3. С. 504–506.
30. *Takamine T., Suda T., Tanaka Y.* / *Sci. Pap. I.P.S.R. (Tokyo).* 1939. V. 35. P. 447.
31. *Tanaka Y., Zelikoff M.* / *J. Opt. Soc. Amer.* 1954. V. 44. P. 245.
32. *Tanaka Y.* / *J. Opt. Soc. Amer.* 1955. V. 45. P. 710.
33. *Wilkinson P.G., Tanaka Y.* / *J. Opt. Soc. Amer.* 1955. V. 45. P. 344.
34. *Mulliken R.S.* / *J. Chem. Phys.* 1970. V. 52. P. 5170.
35. *Панченко А.Н., Полякевич А.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* / *Известия вузов. Физика.* 1999. Т. 42. № 6. С. 50–66.
36. *Gellert B., Kogelschatz U.* / *Appl. Phys. B.* 1991. V. 52. № 1. P. 14–21.
37. *Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Лисенко А.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* / *Оптический журнал.* 2002. Т. 69. № 7. С. 77–80.
38. *Соколова И.В. и др.* / *ХВЭ.* 2002. Т. 36. № 4. С. 307–310.
39. *Соснин Э.А.* II интеграционная междисциплинарная конференция молодых ученых СО РАН и высшей школы “Научные школы Сибири: взгляд в будущее”. / *Тезисы докл.* — Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2003. С. 150–157.
40. *Страмберг А.Г., Каплин А.А.* / *Известия СО АН СССР. Серия хим. наук.* 1978. № 9. Вып. 4. С. 31–38.
41. А. с. 957090 (СССР). Способ полярографического анализа / *Г. М. Мокроусов, Э. А. Захарова, Т. Н. Клевцова, Г. А. Катаев, В. Н. Волкова* // *Открытия. Изобретения.* 1982. № 33.
42. *Захарова Э.А., Мокроусов Г.М., Волкова В.Н., Лисецкий В.Н.* / *ЖАХ.* 1983. Т. 38. Вып. 9. С. 1584–1586.
43. *Захарова Э.А., Волкова В.Н.* / *ЖАХ.* 1984. Т. 39. Вып. 4. С. 636–641.
44. *Sosnin E.A., Batalova V.N., Slepchenko G.B., Tarasenko V.F.* / *Proc. SPIE.* 2002. V. 4747. P. 352–357.
45. *Sosnin E.A., Batalova V.N., Vyuyanova E.Yu., Tarasenko V.F.* *Proc. of Int. Conf. PHYSCON 2003, Aug. 20 – 22, St.-Peterburg, Russia.* P. 350–352.
46. *Слепченко Г.Б., Захарова Э.А., Дерябина В.И.* / *Заводская лаборатория.* 2004. Т. 70. № 7. С. 3–18.
47. *Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* / *Приборы и техника эксперимента.* 2002. № 6. С. 1–6.
48. *Баталова В.Н., Захарова Э.А., Слепченко Г.Б., Малыгина М.В.* / *ЖАХ.* 2004. Т. 5. № 4. С. 528–533.
49. *Bylatskaya O.A., Sosnin E.A., Batalova V.N.* *Digest of the VI International Conference “Atomic and Molecular Pulsed Lasers”.* Tomsk. 2003. F-18. P. 88.
50. *Носкова Г.Н., Соснин Э.А., Иванова Е.Е., Мержа А.Н., Тарасенко В.Ф.* / *Оптика атмосферы и океана.* 2004. № 2–3. С. 237–239.