

УДК 618.7.03; 628.58; 57.083

## ОСОБЕННОСТИ ФОТОРАЗЛОЖЕНИЯ ДИАЗОКРАСИТЕЛЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ,

### СОДЕРЖАЩИХ СОЛИ ЦИНКА, АЛЮМИНИЯ И ЭРБИЯ

К.С. Евстропьев<sup>a</sup>, С.Ю. Масленников<sup>a</sup>, К.В. Дукельский<sup>a</sup>, Е.В. Колобкова<sup>b,a</sup>,  
Н.В. Никоноров<sup>a</sup>, И.С. Болтенков<sup>b</sup>, С.К. Евстропьев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный Технологический Институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

Адрес для переписки: [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

#### Информация о статье

Поступила в редакцию 25.10.18, принята к печати 30.11.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-67-73

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Евстропьев К.С., Масленников С.Ю., Дукельский К.В., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Болтенков И.С., Евстропьев С.К. Особенности фоторазложения диазокрасителя в водных растворах, содержащих соли цинка, алюминия и эрбия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 67–73. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-67-73

#### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы водные растворы, содержащие органический диазокраситель *Chicago Sky Blue 6B*, нитраты цинка и алюминия и соли эрбия. Проанализировано влияние типа и концентрации солей этих металлов на спектральные свойства растворов и кинетические закономерности процессов разложения диазокрасителя под действием ультрафиолетового излучения ртутной лампы высокого давления ДРТ-240. **Метод.** Методика проведенных исследований состояла в последовательном измерении спектров поглощения растворов на спектрофотометре Perkin-Elmer Labda 650 в ультрафиолетовой и видимой части спектра после облучения ультрафиолетовым светом различной продолжительности и анализе наблюдаемых спектральных изменений. **Основные результаты.** Исследования показали, что в присутствии солей металлов в растворах спектр поглощения красителя изменяется, и на характерной широкой и интенсивной полосе поглощения красителя в видимой части спектра ( $\lambda=540\text{--}680$  нм) появляется дополнительный максимум, что позволяет предположить протекание процессов структурирования молекул красителя. При введении в раствор солей металлов существенно изменяется и механизм его разложения под действием ультрафиолетового излучения. В присутствии солей металлов наряду с уменьшением интенсивности полосы поглощения красителя в видимой части спектра наблюдается ее существенный сдвиг в коротковолновую область. Исследования кинетики разложения красителя при ультрафиолетовом облучении показали, что в присутствии в растворах нитратов металлов резко увеличивается скорость фоторазложения красителя. Особенно сильное влияние на процессы фоторазложения красителя в водном растворе оказывает введение в раствор нитрата цинка. **Практическая значимость.** Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке фотохимических процессов очистки воды от органических загрязнений.

#### Ключевые слова

фотолиз, диазокраситель, раствор, нитрат, УФ облучение

#### Благодарности

Работа была выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (Проект 16.1651.2017/4.6).

## FEATURES OF DIAZO DYE PHOTODECOMPOSITION IN AQUEOUS SOLUTIONS CONTAINING ZINC, ALUMINUM AND ERBIUM SALTS

K.S. Evstropiev<sup>a</sup>, S.Yu. Maslennikov<sup>a</sup>, K.V. Dukelskii<sup>a</sup>, E.V. Kolobkova<sup>b,a</sup>,  
N.V. Nikonorov<sup>a</sup>, I.S. Boltenev<sup>b</sup>, S.K. Evstropiev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

Corresponding author: [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

#### Article info

Received 25.10.18, accepted 30.11.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-67-73

Article in Russian

**For citation:** Evstropiev K.S., Maslennikov S.Yu., Dukelskii K.V., Kolobkova E.V., Nikonorov N.V., Boltenev I.S., Evstropiev S.K. Features of diazo dye photodecomposition in aqueous solutions containing zinc, aluminum and erbium salts. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 67–73 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-67-73

#### Abstract

The features of diazo dye *Chicago Sky Blue 6B* photodecomposition in aqueous solutions containing the salts of zinc, aluminum and erbium were studied. The paper presents the research of effect of the type and concentration of salts of these metals on the spectral properties of solutions and kinetic dependencies of the decomposition processes of a diazo dye under the action of UV radiation from DRT-240 high-pressure mercury lamp. The methodology of the studies consisted in the sequential measurement of the absorption spectra of the solutions on a Perkin-Elmer Labda 650 spectrophotometer in the UV and visible parts of the spectrum after UV irradiation of various durations and analysis of the observed spectral changes. Based on the research carried out, it was shown that the absorption spectrum of the dye changes in the presence of metal salts in solutions and an additional maximum appears on the characteristic broad and intense absorption band of the dye in the visible part of the spectrum ( $\lambda = 540\text{--}680$  nm). That fact suggests the behavior of dye molecular structuring. When metal salts are introduced into the solution, the mechanism of its decomposition under the action of UV radiation also changes significantly. In the presence of metal salts, along with a decrease in the intensity of the absorption band of the dye in the visible part of the spectrum, its substantial shift to the shortwave region is also observed. Studies of the dye decomposition kinetics under UV irradiation showed that the rate of the dye photodegradation sharply increases in the presence of metal nitrates in solutions. The introduction of zinc nitrate into the solution has particularly strong effect on the dye photodegradation in an aqueous solution. The experimental results obtained can be used in the development of photochemical processes for the purification of water from organic pollutants.

#### Keywords

photolysis, diazo dye, solution, nitrate, UV irradiation

#### Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project 16.1651.2017/4.6).

### Введение

Взаимодействие светового излучения с органическими красителями является предметом исследований на протяжении многих лет, что обусловлено как интересом к его фундаментальным физическим механизмам, так и большой практической значимостью таких работ. В настоящее время многочисленные исследования направлены на разработку методов использования светового излучения для разложения различных органических загрязнений в водной среде или на поверхности различных твердых тел [1–14].

Широкое практическое применение диазокрасителей определяет актуальность разработки методов очистки воды от этих экологически небезопасных соединений [8, 10]. Облучение УФ-светом водных растворов является известным и эффективным способом разложения органических красителей [1, 4, 10]. При этом при наличии в растворах и других химических веществ эффективность и механизм разложения красителя могут существенно изменяться, что определяет возможность использования специальных химических добавок для эффективного управления фотохимическими процессами.

Химические добавки, используемые для ускорения фотохимических процессов, можно разделить на:

- 1) фотокатализаторы;
- 2) вещества, участвующие в фотохимической реакции и подвергающиеся химическому превращению.

Примером веществ, участвующих в разложении красителей в растворах под действием УФ-излучения, являются нитраты металлов [15, 16]. Ионы переходных металлов могут участвовать в формировании межмолекулярных комплексов из молекул красителя, а нитрат-анионы разлагаются под действием УФ-излучения, выделяя химически активные кислородные соединения, окисляющие органический краситель [15].

В последние годы большое число работ посвящено исследованиям фотохимических процессов с участием соединений цинка [4, 9, 11–17]. В первую очередь это связано с перспективами использования материалов на основе оксида цинка в качестве фотокатализаторов, бактерицидных сред и медицинских препаратов. Кроме того, некоторые соединения цинка способны под действием УФ-излучения разлагаться, выделяя химически активный кислород, что может быть использовано для ускорения разложения органических красителей в водных средах [15, 16].

В целом ряде работ показано, что добавки оксидных соединений редкоземельных металлов усиливают фотокаталитические свойства материалов на основе оксида цинка [9, 11, 13, 14].

В качестве диазокрасителя в работе использован водорастворимый краситель *Chicago Sky Blue 6B*, спектральные свойства и структура которого хорошо известны [18]. Целью настоящей работы является исследование процесса фотолиза этого диазокрасителя в водных растворах, содержащих соединения цинка и эрбия.

### Материалы и методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались водные растворы  $Zn(NO_3)_2$  ( $3,4 \cdot 10^{-2}$ – $0,11$  М);  $Al(NO_3)_3$  ( $2,7 \cdot 10^{-2}$  М),  $ErCl_3$  ( $2,6 \cdot 10^{-2}$  М) или  $Er(CH_3COO)_3$  ( $2,7 \cdot 10^{-2}$  М), а также водный раствор органического диазокрасителя *Chicago Sky Blue 6B* (CSB) (Sigma Aldrich) ( $6,6 \cdot 10^{-6}$ – $5,2 \cdot 10^{-5}$  М). Структура молекулы этого красителя приведена на вставке к рис. 1, а. Растворы смешивались в заданных соотношениях при комнатной температуре. Для расчета относительной концентрации красителя использовалось значение оптической плотности ( $D$ ) на длине волны, соответствующей максимуму полосы поглощения красителя в видимой части спектра ( $\lambda_{max} = 618$  нм).

Измерения спектров поглощения материалов проводились на спектрофотометре Perkin-Elmer Labda 650. Для измерения спектров поглощения и УФ-облучения исследуемые растворы помещались в кварцевую кювету.

Облучение материалов осуществлялось ртутной лампой высокого давления ДРТ-250. Спектр излучения лампы приведен в [19]. Плотность мощности излучения, падающего на испытуемый образец, составляла  $0,25$  Дж/см<sup>2</sup>.

### Экспериментальные результаты и обсуждения

В спектрах поглощения водных растворов красителя наблюдаются характерная [18] интенсивная полоса поглощения в видимой части спектра с максимумом 618 нм и меньшая по интенсивности полоса поглощения в ближней УФ-области спектра ( $\lambda_{max} = 325$  нм) (рис. 1, а, кривая 1).

Характер изменений спектральных свойств красителя в водном растворе в процессе облучения ультрафиолетовым светом приведен на рис. 1, а. Под действием УФ-излучения снижается интенсивность полосы поглощения в красной части спектра и быстро изменяется окраска раствора.

В УФ-части спектров растворов, содержащих краситель и соли металлов (рис. 1, б–з), хорошо видна полоса поглощения с максимумом  $\lambda_{max} \sim 300$  нм, характерная для анионов  $NO_3^-$  [2, 3]. В спектрах этих растворов эта полоса является результатом наложения полосы поглощения анионов  $NO_3^-$  и коротковолновой полосы поглощения CSB с  $\lambda_{max} = 325$  нм. Об этом свидетельствуют небольшие плечи, наблюдаемые на длинноволновых краях полос поглощения.

Интенсивная полоса поглощения водных растворов CSB, содержащих нитраты металлов, имеет сложную несимметричную структуру. В спектрах растворов, содержащих соли металлов, в длинноволновой части этой полосы наблюдается перегиб ( $\lambda \sim 670$  нм) (рис. 1, б, в). Наблюдаемая сложная структура полосы поглощения связана с образованием димеров и тримеров из молекул красителя [18] и комплексов, состоящих из нескольких молекул диазокрасителя с ионами металлов [15, 16]. Отметим, что наиболее сильно наличие второго максимума проявляется в растворах, содержащих нитрат цинка.

Ионы  $Er^{3+}$  характеризуются довольно сложной электронной структурой и наличием многочисленных полос поглощения в видимой части спектра. В спектрах исследованных растворов, содержащих  $Er^{3+}$ , наблюдаются пики наиболее интенсивных полос поглощения этого иона, соответствующие переходам с основного уровня  $^4I_{15/2}$  на уровни  $^4G_{11/2}$ ,  $^4F_{7/2}$ ,  $^2H_{11/2}$  и  $^4F_{9/2}$  (рис. 1, г, д). На полученных спектрах эти полосы поглощения слабо различимы на фоне интенсивного поглощения света диазокрасителем.

При облучении ультрафиолетовым светом растворов происходит разложение анионов  $NO_3^-$  [2, 3], сопровождающееся выделением химически активных продуктов, участвующих в разложении органических соединений [3]. Можно предположить, что эти фотохимические процессы влияют на значительное ускорение разложения диазокрасителя в присутствии солей металлов.

Из рис. 1, б–з видно, что при облучении ультрафиолетом наряду с уменьшением интенсивности и сдвигом полосы поглощения CSB в видимой части спектра в коротковолновую область наблюдается также некоторое изменение ее формы и исчезновение ее длинноволнового пика, это может свидетельствовать о том, что при облучении происходит быстрое разложение агрегатов молекул красителя.

В спектрах поглощения растворов CSB, содержащих соли металлов, при облучении ультрафиолетом не наблюдается уменьшения интенсивности полосы поглощения в коротковолновой части спектра с максимумом  $\lambda_{max} \sim 300$  нм, хотя фоторазложение ионов  $NO_3^-$  должно было вызывать уменьшение ее интенсивности. Наблюдаемое сохранение интенсивности этой полосы может объясняться сочетанием двух факторов:

- 1) существенно более высокая концентрация анионов  $NO_3^-$  ( $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  М), по сравнению концентрацией молекул CSB ( $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  М);
- 2) образование при фотолизе CSB продуктов реакции, обладающих высоким поглощением в УФ-области спектра, о чем свидетельствует рис. 1, а.

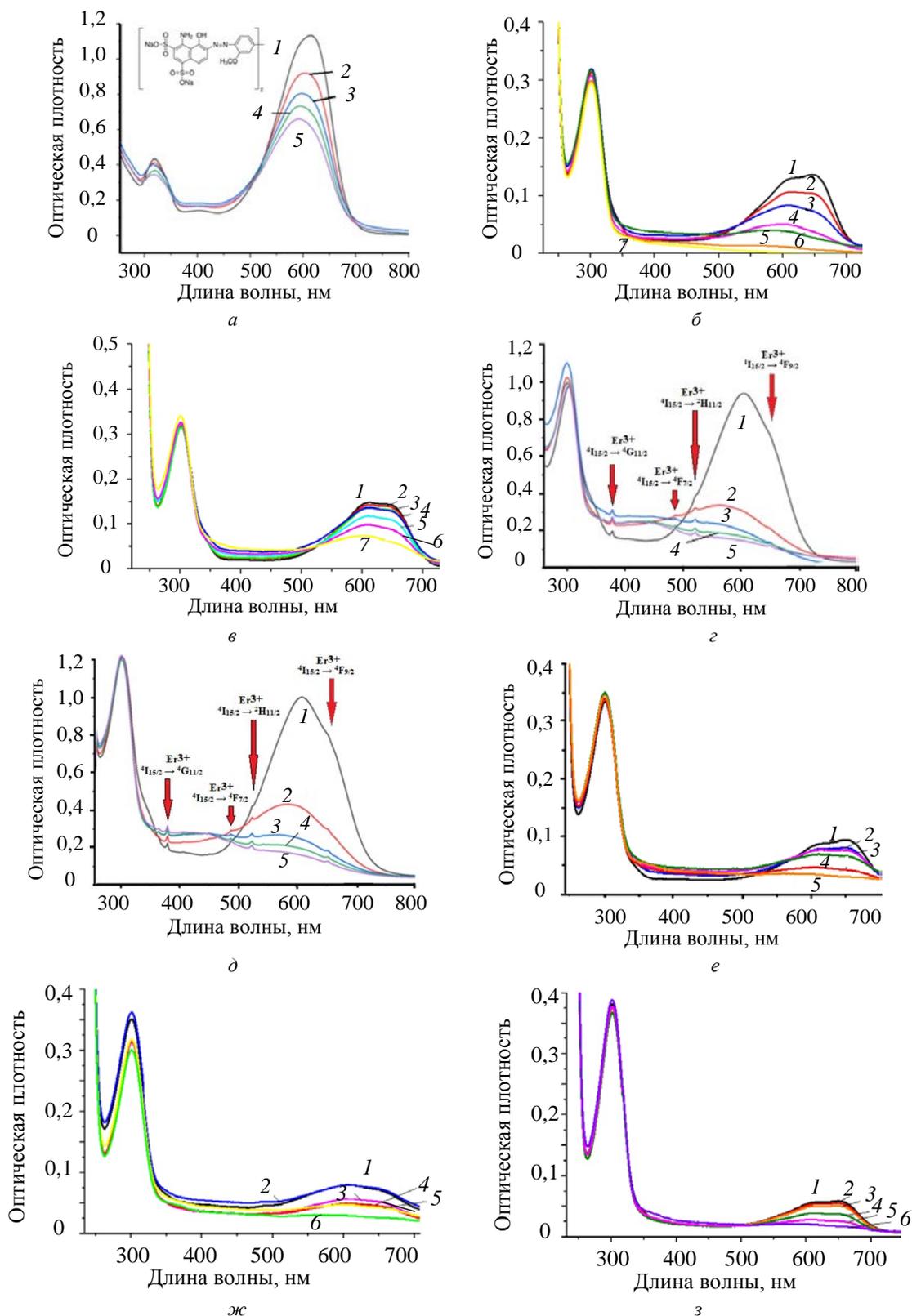


Рис. 1. Влияние облучения ультрафиолетовым светом на спектры поглощения растворов, содержащих:  
 а – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М); б – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) и  $Zn(NO_3)_2$  ( $1,7 \cdot 10^{-2}$  М); в – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) и  $Al(NO_3)_3$  ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  М);  
 г – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М),  $Zn(NO_3)_2$  ( $5,5 \cdot 10^{-2}$  М) и  $Er(CH_3COO)_3$  ( $6,0 \cdot 10^{-3}$  М);  
 д – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М),  $Zn(NO_3)_2$  ( $5,5 \cdot 10^{-2}$  М) и  $ErCl_3$  ( $6,6 \cdot 10^{-3}$  М); е – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М),  $Zn(NO_3)_2$  ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  М)  
 и  $Al(NO_3)_3$  ( $3,3 \cdot 10^{-3}$  М); ж – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М),  $Zn(NO_3)_2$  ( $8,7 \cdot 10^{-3}$  М) и  $Al(NO_3)_3$  ( $6,6 \cdot 10^{-3}$  М); з – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М),  
 $Zn(NO_3)_2$  ( $4,2 \cdot 10^{-3}$  М) и  $Al(NO_3)_3$  ( $1,0 \cdot 10^{-2}$  М) Продолжительность облучения. а, г, д: 1 – 0, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 5, 5 – 6;  
 е: 1 – 0, 2 – 1,5, 3 – 3, 4 – 10, 5 – 20; ж – 1 – 0, 2 – 1,5, 3 – 3, 4 – 5, 5 – 10, 6 – 20;  
 з: 1 – 0, 2 – 0,5, 3 – 1,5, 4 – 5, 5 – 10, 6 – 20 мин

На рис. 2 приведен внешний вид растворов на различных стадиях облучения ртутной лампой. Видно, что наиболее сильное изменение окраски раствора наблюдается при присутствии в растворе нитрата цинка.

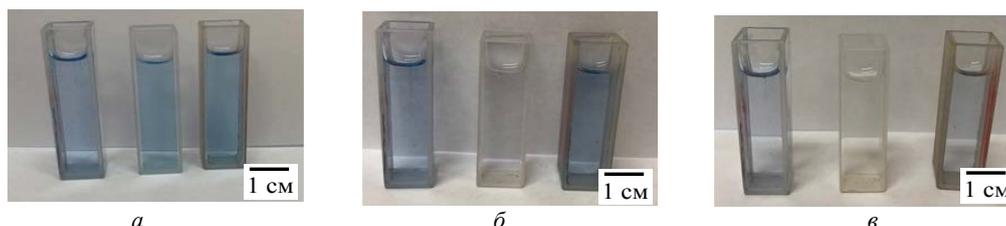
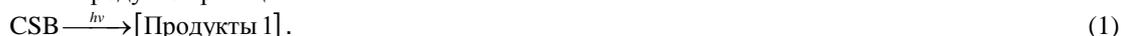


Рис. 2. Внешний вид растворов на различных стадиях облучения ртутной лампой. Исходные растворы (а); после облучения в течение 5 (б) и 20 мин (в).  
Исходные растворы содержали: CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) (кувета справа); CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) и  $Zn(NO_3)_2$  ( $1,7 \cdot 10^{-2}$  М) (в центре); CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) и  $Al(NO_3)_3$  ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  М) (слева)

Процесс фотолиза красителя включает поглощение света молекулой красителя, ее разложение и образование продуктов реакции:



Кинетика фотолиза часто описывается экспоненциальной зависимостью [15, 16, 20], как фотохимическая реакция первого порядка:

$$C/C_0 = e^{-kt}, \quad (2)$$

где  $C_0$  и  $C$  – исходная и текущая концентрации красителя, а  $k$  – константа скорости фотохимической реакции. Значение  $k$  зависит от интенсивности излучения, и, если образующиеся в ходе реакции (1) продукты характеризуются наличием поглощения в спектральной области излучения источника света, кинетическая зависимость фотолиза будет отклоняться от зависимости, описываемой уравнением (2).

Из рис. 1, а видно, что разложение исследованного раствора CSB не сопровождается появлением каких-либо полос поглощения, которые могли бы принадлежать продуктам разложения красителя. Поэтому вполне оправданно описывать кинетику процесса (1) с помощью уравнения (2).

При облучении растворов красителя, содержащих соли металлов, помимо фотолиза красителя (1), происходит разложение нитрат-анионов, сопровождающееся выделением химически активных кислородных соединений [КС], которые, в свою очередь, окисляют молекулы красителя:



Поэтому скорость процесса разложения диазокрасителя в растворе, содержащем использованные соли металлов, складывается из скорости процесса непосредственного фотолиза красителя (1) и скорости его окисления продуктами разложения нитрат-анионов по реакции (3).

На рис. 3 приведены зависимости относительной концентрации CSB в растворах от продолжительности УФ-облучения. Рисунок иллюстрирует влияние добавок солей цинка и самария в водные растворы на кинетику разложения в них диазокрасителя при УФ облучении. Видно, что в присутствии солей металлов УФ-облучение за 5 мин приводит к разложению больше половины молекул красителя.

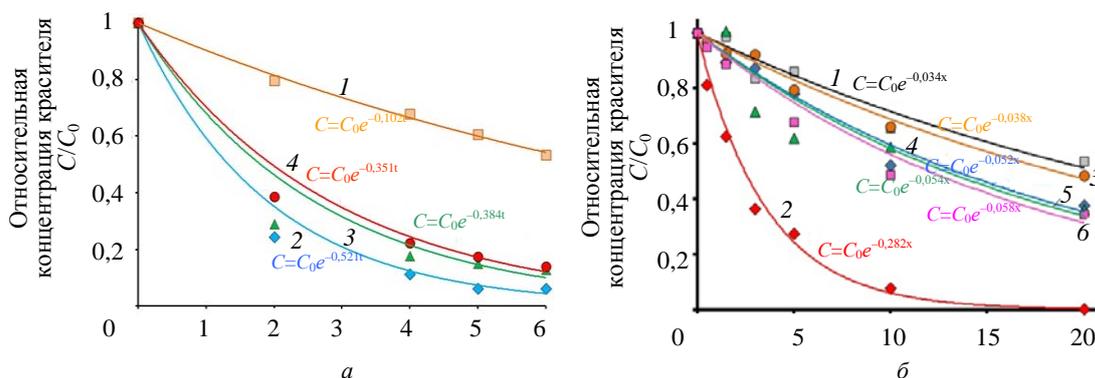


Рис. 3. Зависимости относительной концентрации CSB ( $C/C_0$ ) в растворах от продолжительности облучения ультрафиолетовым светом.  $C$  – текущее значение концентрации красителя;  $C_0$  – концентрация красителя в растворе до облучения. а: 1 – раствор CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М), 2 – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $5,5 \cdot 10^{-2}$  М), 3 – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $5,5 \cdot 10^{-2}$  М) +  $Er(CH_3COO)_3$  ( $6,0 \cdot 10^{-3}$  М), 4 – CSB ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $5,5 \cdot 10^{-2}$  М) +  $ErCl_3$  ( $6,6 \cdot 10^{-3}$  М); б: 1 – раствор CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М), 2 – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $1,7 \cdot 10^{-2}$  М), 3 – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) +  $Al(NO_3)_3$  ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  М), 4 – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  М) +  $Al(NO_3)_3$  ( $3,3 \cdot 10^{-3}$  М), 5 – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $8,7 \cdot 10^{-3}$  М) +  $Al(NO_3)_3$  ( $6,6 \cdot 10^{-3}$  М), 6 – CSB ( $5,1 \cdot 10^{-5}$  М) +  $Zn(NO_3)_2$  ( $4,2 \cdot 10^{-3}$  М) +  $Al(NO_3)_3$  ( $1,0 \cdot 10^{-2}$  М)

Обращает на себя внимание тот факт, что введение в раствор нитрата цинка ускоряет процесс фоторазложения красителя более существенно, чем добавки солей других металлов при схожих концентрациях нитрат-анионов (рис. 3, б, кривые 2 и б). Можно предположить, что это связано с формированием нестойких к облучению комплексов между ионами цинка и молекулами красителя. Некоторым дополнительным основанием для этого предположения является отмеченная относительно высокая интенсивность длинноволнового максимума на полосе поглощения красителя в видимой части спектра (рис. 1, б, кривая 1).

### Заключение

Облучение ультрафиолетовым светом водных растворов диазокрасителя *Chicago Sky Blue 6B* приводит к фотолизу, обуславливающему уменьшение интенсивности его полосы поглощения и изменению окраски растворов. Присутствие нитрата цинка, нитрата алюминия и солей эрбия в водных растворах диазокрасителя существенно изменяет характер эволюции спектральных свойств растворов и сильно ускоряет процесс разложения красителя под действием ультрафиолетового излучения.

### Литература

1. Chatterjee D., Dasgupta S. Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants // *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 2005. V. 6. N 2. P. 186–205. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2005.09.001
2. Warneck P., Wurzinger C. Product quantum yields for the 305-nm photodecomposition of nitrate in aqueous solution // *Journal of Physical Chemistry*. 1988. V. 92. N 22. P. 6278–6283. doi: 10.1021/j100333a022
3. Minero C., Chiron S., Falletti G., Maurino V., Pelizzetti E., Ajassa R., Carlotti M.E., Vione D. Photochemical processes involving nitrite in surface water samples // *Aquatic Sciences*. 2007. V. 69. N 1. P. 71–85. doi: 10.1007/s00027-007-0881-6
4. Киселев В.М., Евстропьев С.К., Стародубцев А.М. Фотокаталитическая деградация и сорбция метиленового синего на поверхности оксидов металлов в водном растворе красителя // *Оптика и спектроскопия*. 2017. Т. 123. № 5. С. 798–805. doi: 10.7868/S0030403417090173
5. Mohamed R.M., Mkhaliid I.A., Al-Thabaiti S.A., Mokhtar Mohamed. Nano Cu metal doped on TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanoparticle catalysts in photocatalytic degradation of direct blue dye // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2013. V. 13. N 7. P. 4975–4980. doi: 10.1166/jnn.2013.7602
6. Othman I., Tabet M., Farag A. Characterization and photocatalytic activity of sulphated V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZrO<sub>2</sub> catalysts for the degradation of Direct Blue-1 dye // *Journal of International Environmental Application and Science*. 2012. V. 7. N 3. P. 661–672.
7. El-Bahy Z.M., Ismail A.A., Mohamed R.M. Enhancement of titania by doping rare earth for photodegradation of organic dye (Direct Blue) // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 166. N 1. P. 138–143. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.022
8. Zavastin D.E., Gherman S., Cretescu I. Removal of Direct Blue dye from aqueous solution using new polyurethane-cellulose acetate blend micro-filtration membrane // *Revista de Chimie*. 2012. V. 63. N 10. P. 1075–1078.
9. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Dukelskii K.V., Kiselev V.M., Evstrop'yev K.S., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V. Transparent bactericidal coatings based on zinc and cerium oxides // *Ceramics International*. 2017. V. 43. N 16. P. 14504–14510. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.093
10. Zainal Z., Hui L.K., Hussein M.Z., Taufiq-Yap Y.H., Abdullah A.H., Ramli I. Removal of dyes using immobilized titanium dioxide illuminated by fluorescent lamp // *Journal of Hazardous Materials*. 2005. V. 125. N 1-3. P. 113–120. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.05.013
11. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Dukelskii K.V., Evstrop'yev K.S., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V. Transparent ZnO-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings: bactericidal effect in the lighting and in the darkness // *Ceramics International*. 2018. V. 44. N 8. P. 9091–9096. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.02.116
12. Rajendran S., Khan M.M., Gracia F., Qin J., Gupta V.K., Arumainathan S. Ce<sup>3+</sup>-ion induced visible-light photocatalytic degradation and electrochemical activity of ZnO/CeO<sub>2</sub> nanocomposite // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. N 1. doi: 10.1038/srep31641

### References

1. Chatterjee D., Dasgupta S. Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2005, vol. 6, no. 2, pp. 186–205. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2005.09.001
2. Warneck P., Wurzinger C. Product quantum yields for the 305-nm photodecomposition of nitrate in aqueous solution. *Journal of Physical Chemistry*, 1988, vol. 92, no. 22, pp. 6278–6283. doi: 10.1021/j100333a022
3. Minero C., Chiron S., Falletti G., Maurino V., Pelizzetti E., Ajassa R., Carlotti M.E., Vione D. Photochemical processes involving nitrite in surface water samples. *Aquatic Sciences*, 2007, vol. 69, no. 1, pp. 71–85. doi: 10.1007/s00027-007-0881-6
4. Kiselev V.M., Evstrop'ev S.K., Starodubtsev A.M. Photocatalytic degradation and sorption of methylene blue on the surface of metal oxides in aqueous solutions of the dye. *Optics and Spectroscopy*, 2017, vol. 123, no. 5, pp. 809–815. doi: 10.7868/S0030403417090173
5. Mohamed R.M., Mkhaliid I.A., Al-Thabaiti S.A., Mokhtar Mohamed. Nano Cu metal doped on TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanoparticle catalysts in photocatalytic degradation of direct blue dye. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, vol. 13, no. 7, pp. 4975–4980. doi: 10.1166/jnn.2013.7602
6. Othman I., Tabet M., Farag A. Characterization and photocatalytic activity of sulphated V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZrO<sub>2</sub> catalysts for the degradation of Direct Blue-1 dye. *Journal of International Environmental Application and Science*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 661–672.
7. El-Bahy Z.M., Ismail A.A., Mohamed R.M. Enhancement of titania by doping rare earth for photodegradation of organic dye (Direct Blue). *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, no. 1, pp. 138–143. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.022
8. Zavastin D.E., Gherman S., Cretescu I. Removal of Direct Blue dye from aqueous solution using new polyurethane-cellulose acetate blend micro-filtration membrane. *Revista de Chimie*, 2012, vol. 63, no. 10, pp. 1075–1078.
9. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Dukelskii K.V., Kiselev V.M., Evstrop'yev K.S., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V. Transparent bactericidal coatings based on zinc and cerium oxides. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no. 16, pp. 14504–14510. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.093
10. Zainal Z., Hui L.K., Hussein M.Z., Taufiq-Yap Y.H., Abdullah A.H., Ramli I. Removal of dyes using immobilized titanium dioxide illuminated by fluorescent lamp. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, vol. 125, no. 1-3, pp. 113–120. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.05.013
11. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Dukelskii K.V., Evstrop'yev K.S., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V. Transparent ZnO-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings: bactericidal effect in the lighting and in the darkness. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 8, pp. 9091–9096. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.02.116
12. Rajendran S., Khan M.M., Gracia F., Qin J., Gupta V.K., Arumainathan S. Ce<sup>3+</sup>-ion induced visible-light photocatalytic degradation and electrochemical activity of ZnO/CeO<sub>2</sub> nanocomposite. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no. 1. doi: 10.1038/srep31641

13. Vuppala V., Motappa M.G., Venkata S.S., Sadashivaiah P.H. Photocatalytic degradation of methylene blue using a zinc oxide-cerium oxide catalyst // *European Journal of Chemistry*. 2012. V. 3. N 2. P. 191–195. doi: 10.5155/eurjchem.3.2.191-195.564
14. Shahmoradi B., Yavari S., Zandsalimi Y., Shivaraju H.P., Negahdari M., Maleki A., Mckay G., Pawar R.R., Lee S.-M. Optimization of solar degradation efficiency of bio-composting leachate using Nd:ZnO nanoparticles // *Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry*. 2018. V. 356. P. 201–211. doi: 10.1016/j.jphotochem.2018.01.002
15. Волкова Н.А., Евстропьев С.К., Истомина О.В., Колобкова Е.В. Фотолит диазокрасителя в водных растворах нитратов металлов // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 124. № 4. С. 472–476. doi: 10.21883/OS.2018.04.45746.266
16. Болтенков И.С., Колобкова Е.В., Евстропьев С.К., Дукельский К.В. Фотолит диазокрасителя Chicago Sky Blue 6B в водных растворах, содержащих нитраты цинка и самария // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. № 7. С. 84–86. doi: 10.17586/1023-5086-2018-85-07-84-86
17. Пронин И.А., Донкова Б.В., Димитров Д.Ц., Аверин И.А., Пенчева Ж.А., Мошников В.А. Взаимосвязь фотокалалитических и фотолюминесцентных свойств оксида цинка, легированного медью и марганцем // *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48. № 7. С. 868–874.
18. Abbott L.C., Batchelor S.N., Oakes J., Lindsay Smith J.R., Moore J.N. Spectroscopic studies of the intermolecular interactions of a Bis-Azo Dye, Direct Blue 1, on Di and trimerization in aqueous solution and in cellulose // *Journal of Physical Chemistry B*. 2004. V. 108. N 36. P. 13786–13735. doi: 10.1021/jp0485542
19. Серова В.Н., Носкова Э.Н. Оптические характеристики и светостойкость полимерных упаковочных пленок и нанесенных на них красочных слоев // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 15. С. 61–63.
20. Теренин А.Н. Фотохимия красителей и родственных органических соединений. М.: Наука, 1947. 343 с.
13. Vuppala V., Motappa M.G., Venkata S.S., Sadashivaiah P.H. Photocatalytic degradation of methylene blue using a zinc oxide-cerium oxide catalyst. *European Journal of Chemistry*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 191–195. doi: 10.5155/eurjchem.3.2.191-195.564
14. Shahmoradi B., Yavari S., Zandsalimi Y., Shivaraju H.P., Negahdari M., Maleki A., Mckay G., Pawar R.R., Lee S.-M. Optimization of solar degradation efficiency of bio-composting leachate using Nd:ZnO nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry*, 2018, vol. 356, pp. 201–211. doi: 10.1016/j.jphotochem.2018.01.002
15. Volkova N.A., Evstropiev S.K., Istomina O.V., Kolobkova E.V. Photolysis of diazo dye in aqueous solutions of metal nitrates. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, no. 4, pp. 489–493. doi: 10.1134/S0030400X18040197
16. Boltenkov I.S., Kolobkova E.V., Evstropiev S.K., Dukelskii K.V. Photolysis of Chicago Sky Blue 6B diazo dye in aqueous solutions containing zinc nitrate and samarium nitrate. *Journal of Optical Technology*, 2018, vol. 85, no. 7, pp. 445–446. doi: 10.1364/JOT.85.000444
17. Pronin I.A., Averin I.A., Donkova B.V., Dimitrov D.T., Pencheva J.A., Moshnikov V.A. Relationship between the photocatalytic and photoluminescence properties of zinc oxide doped with copper and manganese. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 7, pp. 842–847. doi: 10.1134/S1063782614070173
18. Abbott L.C., Batchelor S.N., Oakes J., Lindsay Smith J.R., Moore J.N. Spectroscopic studies of the intermolecular interactions of a Bis-Azo Dye, Direct Blue 1, on Di and trimerization in aqueous solution and in cellulose. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, vol. 108, no. 36, pp. 13786–13735. doi: 10.1021/jp0485542
19. Serova V.N., Noskova E.N. Optical characteristics and lightfastness of polymer packaging films and paint layers applied on them. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 2016, vol. 19, no. 15, pp. 61–63. (in Russian)
20. Terenin A.N. *Photochemistry of Dyes and Related Organic Compounds*. Moscow, Nauka Publ., 1947, 343 p. (in Russian)

#### Авторы

**Евстропьев Кирилл Сергеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1259-8196, ekirills@yandex.ru

**Масленников Сергей Юрьевич** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7379-7979, Maslennikov10@yandex.ru

**Дукельский Константин Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1627-7499, kdukel@mail.ru

**Колобкова Елена Вячеславовна** – доктор химических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный Технологический Институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0134-8434, Kolobok106@yandex.ru

**Никоноров Николай Валентинович** – ведущий профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7003772604, ORCID ID: 0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

**Болтенков Иннокентий Сергеевич** – аспирант, Санкт-Петербургский государственный Технологический Институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2237-1510, Kesh250i@yandex.ru

**Евстропьев Сергей Константинович** – доктор химических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru

#### Authors

**Kirill S. Evstropiev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1259-8196, ekirills@yandex.ru

**Sergey Yu. Maslennikov** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7379-7979, Maslennikov10@yandex.ru

**Konstantin V. Dukelskii** – PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1627-7499, kdukel@mail.ru

**Elena V. Kolobkova** – D.Sc., Full Professor, Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0134-8434, Kolobok106@yandex.ru

**Nikolay V. Nikonorov** – Leading Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7003772604, ORCID ID: 0000-0002-1341-067X, nikonorov@oi.ifmo.ru

**Innokentiy S. Boltenev** – postgraduate, Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation ORCID ID: 0000-0002-2237-1510, Kesh250i@yandex.ru

**Sergey K. Evstropiev** – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0160-8443, evstropiev@bk.ru