

УДК 541.14:544.522.12

ГИДРОЛИТИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ФОТОСТАБИЛЬНОСТЬ БОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДИБЕНЗОИЛМЕТАНА С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАМЕСТИТЕЛЯМИ У АТОМА БОРА

© 2021 г. Д. С. Ионов^{a, *}, И. В. Ионова^a, Н. А. Лобова^{a, c}, Ю. Н. Кононевич^b, А. С. Белова^b,
Д. А. Бургарт^{c, d}, В. А. Сажников^{a, c}, А. М. Музафаров^{b, e}, М. В. Алфимов^{a, c}

^aЦентр фотохимии, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника”, Российская академия наук,
Москва, 119421 Россия

^bИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова, Российская академия наук,
Москва, 119991 Россия

^cМосковский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, 141707 Россия

^dИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, Российская Академия наук,
Москва, 125009 Россия

^eИнститут синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова, Российская академия наук,
Москва, 117393 Россия

*E-mail: dmitriy.ionov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.

После доработки 03.05.2021 г.

Принята к публикации 11.05.2021 г.

Исследованы основные фотофизические характеристики и изучены гидролитическая стабильность и фотостабильность борных комплексов дибензоилметана, содержащих различные заместители у атома бора. Установлено, что гидролитическая стабильность исследуемых комплексов увеличивается в ряду $DBMBO < DBMBF_2 < DBMB(C_6F_5)_2$. Из полученных данных рассчитаны константы скорости реакции гидролиза и энергии (E_A), энтальпии (ΔH_{\ddagger}) и энтропии (ΔS_{\ddagger}) активации. Изучение фотостабильности борных комплексов дибензоилметана показало, что фотодеградация исследуемых соединений в ацетонитриле увеличивается в ряду $DBMBF_2 < DBMBO < DBMB(C_6F_5)_2$ и коррелирует с изменением ΔH_{\ddagger} гидролиза.

Ключевые слова: борные комплексы дибензоилметана, гидролитическая стабильность, фотостабильность, флуоресценция, $DBMBF_2$

DOI: 10.31857/S0023119321050041

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению различных органических флуорофоров на основе комплексов бора. Благодаря разнообразным фотофизическим свойствам производные дибензоилметаната дифторида бора ($DBMBF_2$) занимают особое место среди представителей данного класса соединений и находят широкое применение в различных областях, например, для создания биосенсоров, оптоэлектронных устройств, для визуализации биологических объектов и др. [1–4]. Перспективным направлением использования рассматриваемых комплексов является создание химических датчиков. Производные $DBMBF_2$ могут быть успешно использованы для определения кислорода [5], для распознавания ароматических углеводородов в газовой фазе

[6–12] и растворах [13, 14], для определения газообразного HCl [15] и т.д. Основным недостатком, ограничивающим широкое использование производных $DBMBF_2$, является их низкая гидролитическая стабильность и фотодеградация. Решение данных проблем позволит существенно расширить область их применения. Несмотря на большую распространенность флуоресцентных комплексов бора, в литературе практически отсутствуют систематические работы по изучению стабильности этих соединений. Ранее была изучена фотостабильность $DBMBF_2$ в различных растворителях [16], однако вопрос о влиянии структуры производного $DBMBF_2$ на фотостабильность до сих пор не исследовался. Таким образом, установление взаимосвязи между структурой и гидролитической стабильностью и фотостабильностью соединений

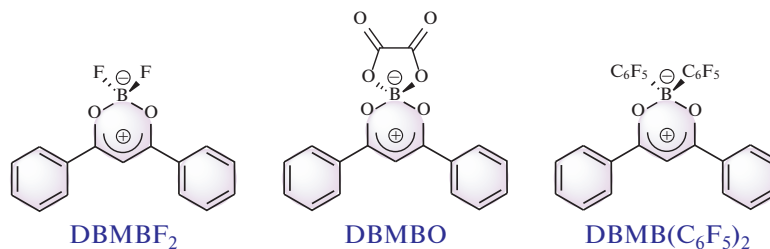


Рис. 1. Структуры DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂.

данного класса представляет большой практический интерес. В настоящей работе изучены фотофизические свойства, гидролитическая стабильность и фотостабильность трех борных комплексов дибензоилметана, содержащих заместители разной природы при атоме бора: DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂ (рис. 1).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалы. Флуорофоры DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂ были получены способами, описанными ранее [17–19].

Измерение спектрально-люминесцентных характеристик флуорофоров. UV/VIS спектры поглощения измеряли с использованием спектрофотометра Shimadzu UV-3101PC. Спектры флуоресценции получали с использованием спектрофлуориметра Agilent Cary Eclipse. Квантовые выходы флуоресценции измеряли относительно стандарта 9,10-дифенилантрацена в циклогексане, кислород был удален путем продувки азотом. Квантовый выход стандарта считали $\phi = 0.95$ [20]. Времена жизни флуоресценции измеряли с использованием времяразрешенного спектрофлуориметра Picoquant Fluotime 300. Возбуждение осуществлялось импульсным пикосекундным диодным лазером Picoquant LDH-P-C-375B с длиной волны 375 нм. Фитинг полученных данных выполнялся с использованием программы Picoquant EasyTau 2.

Исследование гидролитической стабильности. 1 мг красителя растворяли в 50 мл ацетона. 3 мкл полученного раствора смешивали с 3 мл деионизованной воды с сопротивлением 18 Мом см и переносили в кварцевую кювету с длиной оптического пути 1 см для дальнейшего анализа на спектрофлуориметре Cary Eclipse, оснащенный термостатом на основе элемента Пельтье. Исследуемые растворы термостатировали при заданной температуре в диапазоне от 25 до 60°C с шагом 5°C. Период регистрации спектров выбирался в зависимости от скорости наблюдаемых изменений в диапазоне 2–5 мин, а длительность эксперимента – в диапазоне 40–80 мин.

Исследование фотостабильности. Для изучения фотостабильности DBMBF₂, DBMBO и

DBMB(C₆F₅)₂ были приготовлены растворы соединений в ацетонитриле с концентрацией $\approx 10^{-5}$ моль/л. Облучение растворов проводили в течение 45 мин с интервалом 5 мин в кварцевой кювете марки КУ-1 с длиной оптического пути 1 см с использованием ртутно-ксеноновой лампы Hamamatsu LC-8 (средняя мощность ~ 143 Вт/м²) при комнатной температуре. Расстояние от источника света до центра кюветы было равным 15 см. Запись спектров поглощения проводилась на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC. При наблюдении кинетики фотодegradации соединений (в течение 240 мин) временной интервал записи спектров постепенно увеличивался (0–30 мин: запись каждые 5 мин, 30–60 мин: запись каждые 10 мин, 60–240 мин: запись каждые 60 мин).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структуры исследуемых комплексов представлены на рис. 1. На рис. 2 приведены нормированные спектры поглощения и флуоресценции комплексов в дихлорметане (ДХМ). Спектры поглощения и флуоресценции в ацетоне по форме не отличаются от полученных в ДХМ.

В табл. 1 представлены результаты измерений квантовых выходов (ϕ) и времен жизни флуоресценции (τ), а также рассчитанные из полученных данных значения константы скорости флуоресценции (k_r) и константы скорости безызлучательной дезактивации возбужденного состояния (k_{nr}) для изученных соединений. При переходе от дихлорметана к ацетону для DBMBF₂ и DBMBO наблюдается уменьшение ϕ и увеличение k_{nr} . Ранее для DBMBF₂ было показано, что основным каналом безызлучательного распада является внутренняя конверсия, обусловленная вращательными колебаниями фенильных групп [21–23]. По мере увеличения вязкости растворителя (вязкость ацетона $\eta = 0.306$ мПа с, дихлорметана $\eta = 0.413$ мПа с) энергия активации вращения фенильных групп увеличивается, что приводит к уменьшению константы скорости внутренней конверсии. Значения k_{nr} для DBMBO в ацетоне и ДХМ изменяются также, как и для DBMBF₂. По-

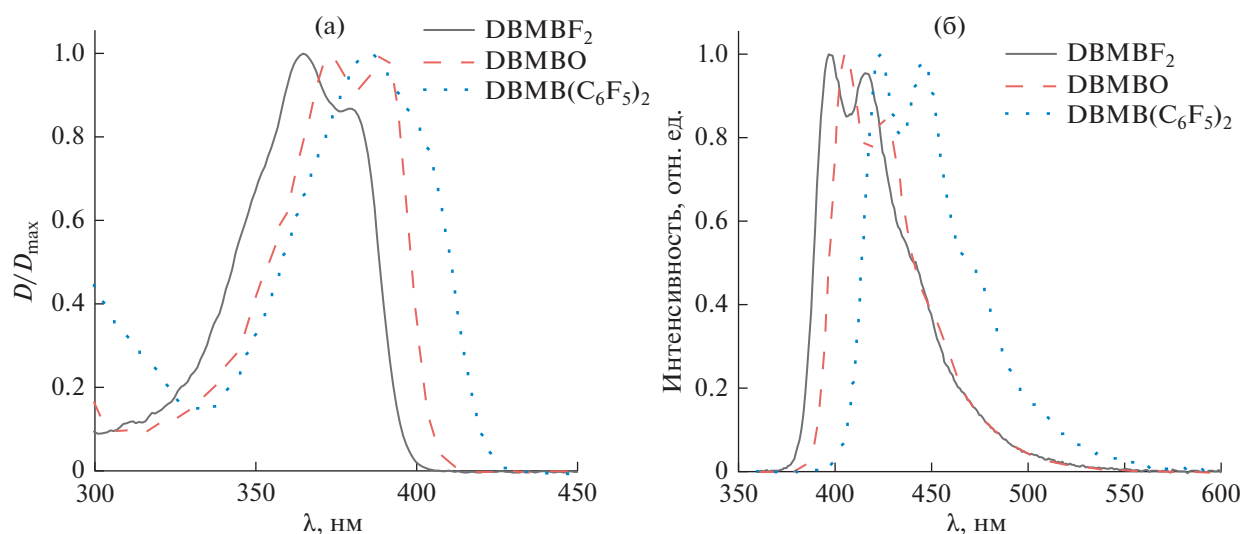


Рис. 2. Спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂ в дихлорметане.

этому для DBMBO можно предположить аналогичный механизм безызлучательной дезактивации. Однако, полученные k_{nr} в случае DBMBO значительно меньше, а разница между значениями в исследуемых растворителях близка к точности измерений. Уменьшение значения k_{nr} для DBMBO свидетельствует о существенном повышении энергии активации вращения фенильных групп, которое происходит, по-видимому, вследствие стабилизации плоской конформации молекулы. Стабилизация происходит, предположительно, в результате увеличения взаимодействия π -систем фенильных колец и хелатного цикла, в котором у атома бора отсутствуют группы, понижающие электронную плотность. Изменения k_{nr} для DBMB(C₆F₅)₂ при переходе от ДХМ к ацетону имеет противоположную направленность, следовательно, процесс безызлучательного распада дан-

ного комплекса не зависит от вязкости и не связан с вращением фенильных колец.

Исследование гидролитической стабильности

При хранении растворов борных комплексов дибензоилметана в гидрофобных органических растворителях в течение трех месяцев не наблюдается изменений спектров поглощения, что свидетельствует об их стабильности. В случае полярных растворителей, содержащих примеси воды, уже после нескольких часов после приготовления растворов наблюдаются изменения спектров поглощения, проявляющиеся в сдвиге максимума поглощения в область более коротких длин волн. Наблюдаемые изменения можно объяснить разложением комплекса и образованием дибензоилметана (DBM), имеющего более коротковолновый спектр поглощения с максимумом при 340 нм. При 50% воды в ацетоне при 60°C спектр погло-

Таблица 1. Спектрально-люминесцентные характеристики комплексов: λ_{\max}^{abs} — длина волны максимума спектра поглощения, λ_{\max}^{fl} — длина волны максимума спектра флуоресценции, ϕ — квантовый выход флуоресценции, τ — время жизни флуоресценции, k_r — константа скорости флуоресценции, k_{nr} — константа скорости безызлучательной дезактивации возбужденного состояния

Комплекс	Растворитель	λ_{\max}^{abs} , нм	λ_{\max}^{fl} , нм	ϕ	τ , нс	$k_r \times 10^6$, с ⁻¹	$k_{nr} \times 10^6$, с ⁻¹
DBMBF ₂	ДХМ	365	397	0.23 ± 0.01	0.50 ± 0.01	460 ± 30	1560 ± 30
	Ацетон	365	397	0.14 ± 0.01	0.34 ± 0.01	410 ± 30	2560 ± 30
DBMBO	ДХМ	390	406	0.84 ± 0.03	1.63 ± 0.01	520 ± 30	94 ± 30
	Ацетон	390	406	0.75 ± 0.03	1.58 ± 0.01	480 ± 30	150 ± 30
DBMB(C ₆ F ₅) ₂	ДХМ	386	423	0.37 ± 0.02	1.44 ± 0.01	250 ± 20	440 ± 20
	Ацетон	386	423	0.54 ± 0.02	2.28 ± 0.01	240 ± 20	200 ± 20

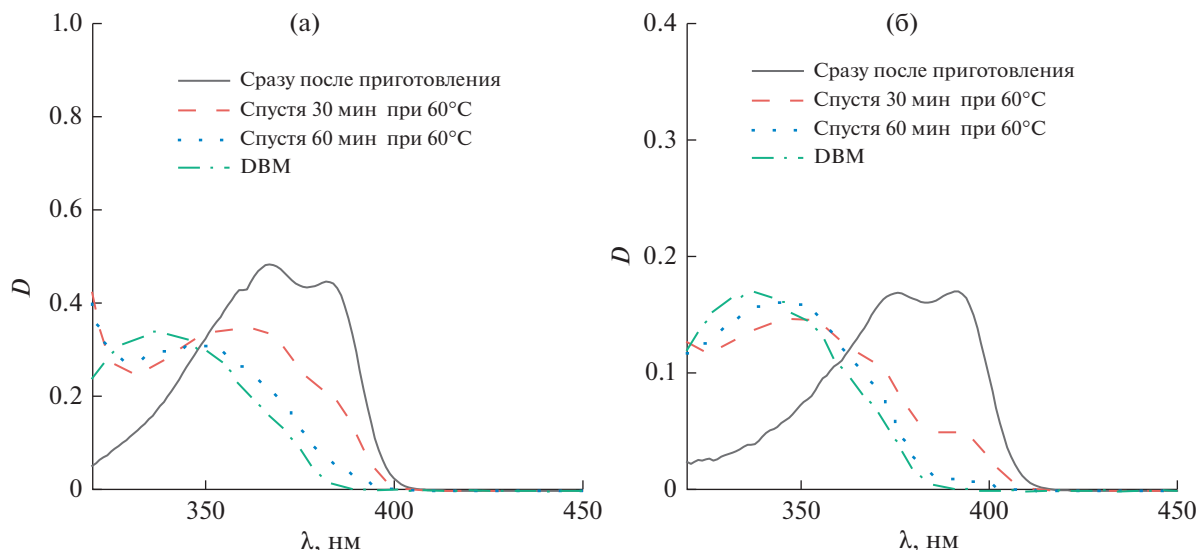


Рис. 3. Электронные спектры поглощения растворов DBMBF₂ (а) и DBMBO (б) в смеси ацетон/вода 50%/50% v/v, выдержанных в течение различных интервалов времени при 60°C. Спектры поглощения дибензоилметана представлены для сравнения.

шения соответствующего комплекса за час почти полностью переходит в спектр поглощения DBM, как показано на рис. 3.

Предположительный механизм гидролиза борных комплексов дибензоилметана, на примере DBMBF₂, представлен на схеме 1.

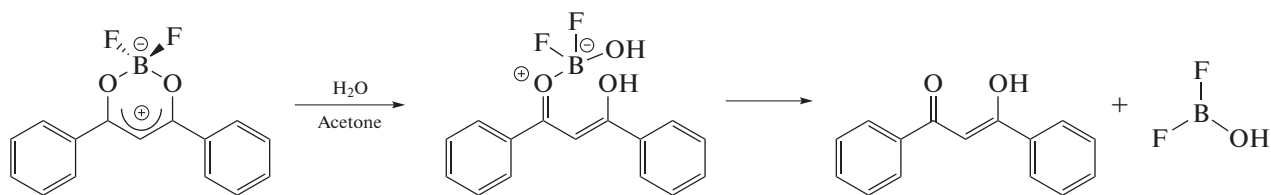


Схема 1. Предполагаемый механизм гидролиза DBMBF₂.

Рассматриваемые комплексы являются эффективными флуорофорами, в отличие от продуктов гидролитического разложения, которые не флуоресцируют. Поэтому гидролитическая деградация комплексов изучалась путем измерения зависимости спектров флуоресценции их растворов от времени. На рис. 4 в качестве примера представлены спектры флуоресценции DBMBF₂ при 45°C, полученные в различные моменты времени. По мере деградации комплексов наблюдается падение интенсивности флуоресценции, при этом форма спектра не меняется, что свидетельствует об отсутствии флуоресценции продуктов распада. Как можно видеть из представленных результатов, гидролитическая стабильность изменяется в ряду DBMBO < DBMBF₂ < DBMB(C₆F₅)₂. Полученную зависимость можно объяснить совокупным влиянием стерического и гидрофобного факторов объемистых заместителей –C₆F₅ у атома бора. Стерический фактор пентафторфенильных колец делает атом бора, подвергающийся атаке в

процессе гидролиза, менее доступным для взаимодействия. Гидрофобный эффект существенно препятствует сольватации и разделению продуктов гидролиза, что в совокупности определяет максимальную гидролитическую стабильность DBMB(C₆F₅)₂ в ряду перечисленных аналогов.

В эксперименте использовались концентрации, соответствующие оптической плотности $D \approx 0.1$. При данной оптической плотности доля поглощенного света и интенсивность флуоресценции прямо пропорциональна оптической плотности и, соответственно, концентрации флуорофоров в растворе.

На рис. 5 представлены зависимости от времени логарифма отношения интенсивности флуоресценции I на длине волны максимума спектра флуоресценции (см. табл. 1) к интенсивности флуоресценции в начальный момент времени I_0 для молекул DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂ в водно-ацетоновой смеси 50% : 50% v/v при различ-

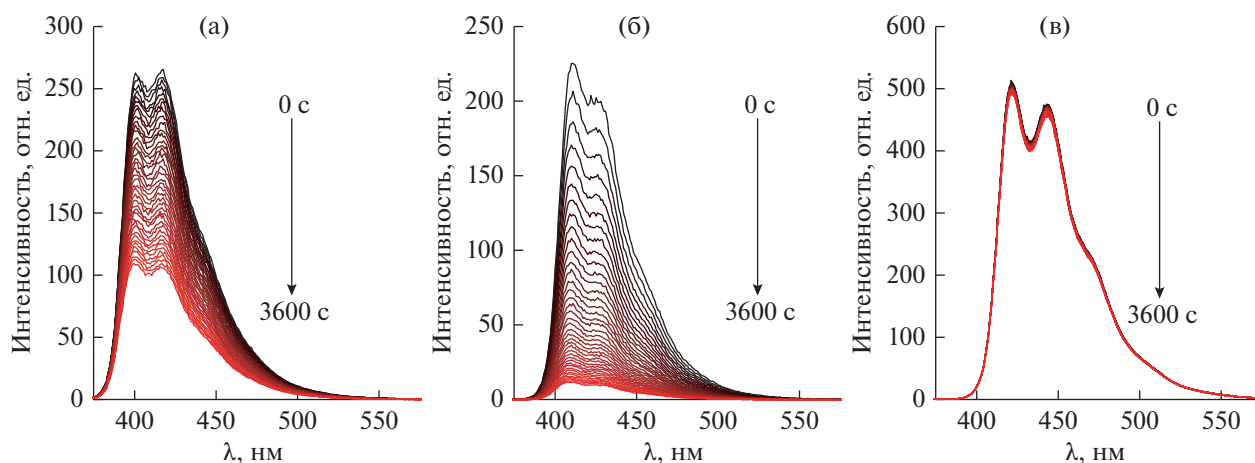


Рис. 4. Изменение спектров флуоресценции DBMBF₂ (а), DBMBO (б) и DBMB(C₆F₅)₂ (в) со временем при 45°C.

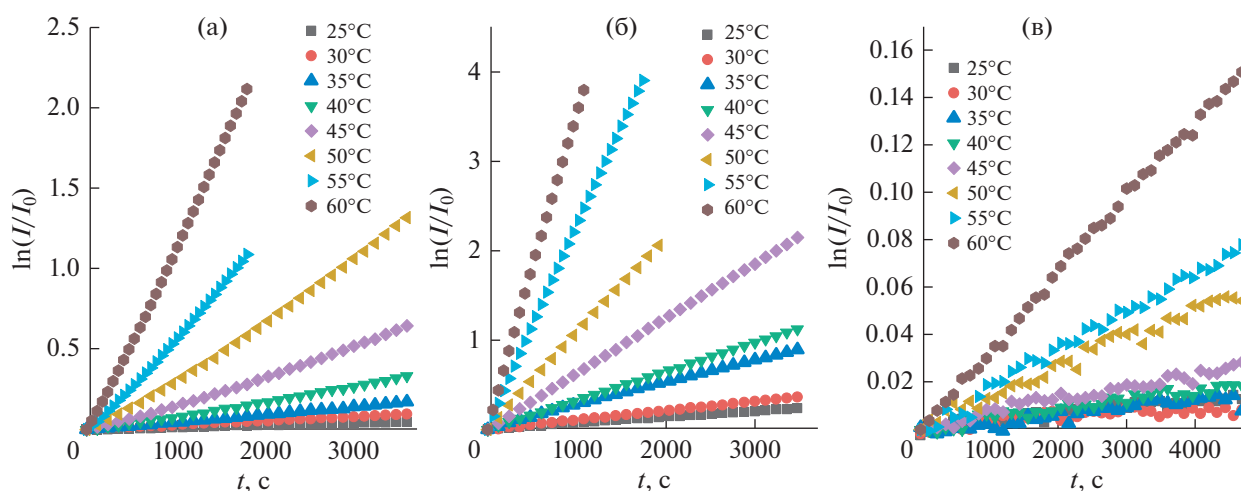


Рис. 5. Зависимость $\ln \frac{I}{I_0}$ от времени для DBMBF₂ (а), DBMBO (б) и DBMB(C₆F₅)₂ (в) при различной температуре.

ной температуре. Для рассматриваемых флуорофоров и экспериментальных условий зависимости линейны. Поэтому реакция гидролиза описывается уравнением первого порядка, и для интенсивностей флуоресценции справедливо уравнение:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -kt, \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции.

В табл. 2 представлены константы скорости реакции гидролиза для молекул DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂, полученные при различной температуре.

Полученные температурные зависимости констант скоростей линейны в координатах Аррениуса и Эрринга (см. рис. 6):

Таблица 2. Константы скорости реакции гидролиза DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂ при различной температуре

$T, ^\circ\text{C}$	$k \times 10^6, \text{c}^{-1}$		
	DBMBF ₂	DBMBO	DBMB(C ₆ F ₅) ₂
25	17 ± 1	70 ± 1	3.1 ± 0.1
30	30 ± 1	105 ± 1	2.2 ± 0.1
35	58 ± 1	262 ± 2	3.0 ± 0.1
40	110 ± 2	324 ± 1	4.3 ± 0.1
45	230 ± 4	621 ± 1	5.9 ± 0.1
50	470 ± 10	1070 ± 2	12.7 ± 0.2
55	770 ± 16	2270 ± 5	16.5 ± 0.2
60	1530 ± 35	3560 ± 10	32.6 ± 0.1

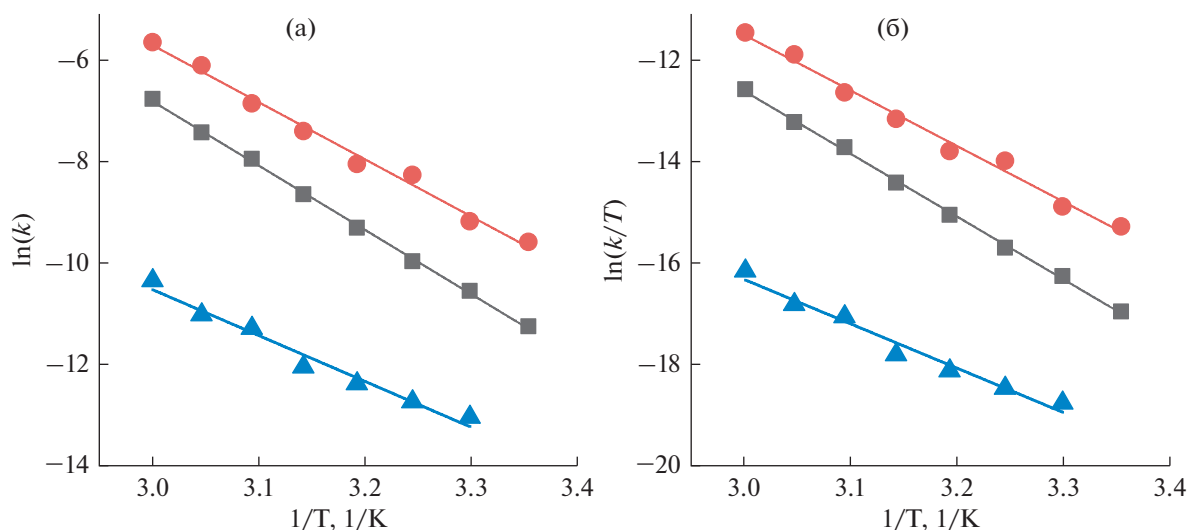


Рис. 6. Зависимость k от температуры для DBMBF_2 – (■), DBMBO – (●) и $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ – (▲) в координатах Аррениуса (а) и Эйринга (б), линиями показаны результаты линейной аппроксимации.

$$\ln(k) = -\frac{E_A}{RT} + \ln(B), \quad (2)$$

где B – предэкспоненциальный множитель, E_A – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

$$\ln\left(\frac{k}{T}\right) = -\frac{\Delta H_{\ddagger}}{RT} + \frac{\Delta S_{\ddagger}}{R} + \ln\left(\frac{k_B}{h}\right), \quad (3)$$

где ΔH_{\ddagger} – энтальпия активации, ΔS_{\ddagger} – энтропия активации, k_B – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка.

Полученные энергии, представленные в табл. 3, хорошо согласуются с вычисленными ранее для спироборатного комплекса куркумина [24]. Как можно видеть из полученных результатов в ряду DBMBF_2 , DBMBO , $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ возрастает ΔH_{\ddagger} с одновременным падением ΔS_{\ddagger} . Гидролитическая стабильность $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ обусловлена, прежде всего, энтропийным фактором. Для $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ ΔS_{\ddagger} почти на 100 Дж/моль·К меньше, чем у DBMBO , что подтверждает предположение о влиянии стерического и гидрофобного

факторов объемистых заместителей $-\text{C}_6\text{F}_5$, сделанное выше. При этом энтальпия активации для $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ существенно ниже, чем у DBMBO и DBMBF_2 . Понижение ΔH_{\ddagger} в рассматриваемом ряду, по-видимому, связано с уменьшением энергии разрыва связи $=\text{O}-\text{B}$. Эта связь в комплексе $\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$ становится менее устойчивой из-за сильного электроакцепторного эффекта групп $-\text{C}_6\text{F}_5$.

Исследование фотостабильности

На рис. 7 представлены кинетические кривые, которые были построены по нормированным значениям оптической плотности растворов, измеренной на длинноволновом плече поглощения на длинах волн 370, 390 и 390 нм соответственно.

Скорость фотодеградации разбавленных растворов в ацетонитриле увеличивается в ряду $\text{DBMBF}_2 < \text{DBMBO} < \text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$. Полученные результаты коррелируют с изменением энтальпии активации гидролиза ΔH_{\ddagger} и связаны, предположительно, с уменьшением энергии раз-

Таблица 3. Энергия (E_A), энтальпия (ΔH_{\ddagger}), энтропия (ΔS_{\ddagger}) активации реакции гидролиза

Вещество	$\ln(B)$	E_A , кДж/моль	ΔH_{\ddagger} , кДж/моль	ΔS_{\ddagger} , Дж/моль·К
DBMBF_2	31 ± 0.5	106 ± 1	103 ± 1	6 ± 4
DBMBO	28 ± 1	94 ± 3	91 ± 3	-19 ± 12
$\text{DBMB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2$	17 ± 2	75 ± 5	72 ± 5	-114 ± 17

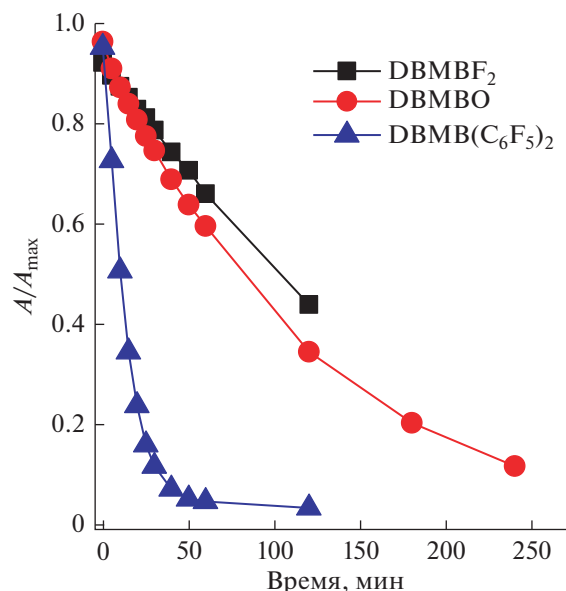


Рис. 7. Кривые фотодеградации растворов DBMBF₂ – (■), DBMBO – (●) и DBMB(C₆F₅)₂ – (▲) в ацетонитриле.

рыва связи =O–B, что соответствует гипотезе о механизме фотодеградации DBMBF₂, предложенной в работе [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование гидролитической стабильности трех борных комплексов дибензоилметана: DBMBF₂, DBMBO и DBMB(C₆F₅)₂, содержащих заместители разной природы при атоме бора, в водно-ацетоновой смеси показало, что гидролитическая стабильность исследуемых комплексов изменяется в ряду DBMBO < DBMBF₂ < DBMB(C₆F₅)₂. Рассчитанные константы скорости реакции гидролиза и энергии активации ΔH_{\ddagger} и ΔS_{\ddagger} дают основание полагать, что повышенная гидролитическая стабильность DBMB(C₆F₅)₂ обусловлена энтропийным фактором, связанным, предположительно, со стерическим эффектом и гидрофобностью фрагмента B(C₆F₅)₂. Изучение фотостабильности борных комплексов дибензоилметана показало, что фотодеградация исследуемых соединений в ацетонитриле увеличивается в ряду DBMBF₂ < DBMBO < DBMB(C₆F₅)₂, что коррелирует с падением ΔH_{\ddagger} гидролиза и связано, по-видимому, с понижением стабильности связи =O–B. Таким образом, введение –C₆F₅ у атома бора значительно повышает гидролитическую стабильность борных комплексов. Для достижения фотостабильности необходимо увеличить энергию разрыва связи =O–B, что, предположительно, можно достичь введением электронодонорных заместителей в DBM.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. В части синтеза борных комплексов дибензоилметана работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 18-73-10152). Характеристика полученных соединений проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на оборудовании Центра изучения молекулярного состава ИНЭОС РАН. Измерение времен жизни флуоресценции выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием оборудования ЦКП “Структурная диагностика материалов” ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen P.-Z., Niu L.-Y., Chen Y.-Z., et al. // *Coord. Chem. Rev.* 2017. V. 350. P. 196.
2. Tanaka K., Chujo Y. // *NPG Asia Mater.* 2015. V. 7. № 11. P. e223.
3. Frath D., Massue J., Ulrich G. et al. // *Angew. Chemie Int. Ed.* 2014. V. 53. № 9. P. 2290.
4. Li D., Zhang H., Wang Y. // *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. № 21. P. 8416.
5. Daly M.L., Kerr C., DeRosa C.A., et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V. 9. № 37. P. 32008.
6. Ионов Д.С., Сажников В.А., Юрасик Г.А. и др. // *Химия высоких энергий.* 2018. Т. 52. № 6. С. 473.
7. Ионов Д.С., Юрасик Г.А., Кононович Ю.Н. и др. // *Российские нанотехнологии.* 2017. Т. 12. № 7–8. С. 13.

8. *Ионов Д.С., Юрасик Г.А., Антонов А.В. и др.* // Химия высоких энергий. 2015. Том. 49. № 3. С. 210.
9. *Сажников В.А., Музафаров А., Копысов В.Н. и др.* // Российские нанотехнологии. 2012. Т. 7. № 1–2. С. 24.
10. *Ionov D., Yurasik G., Kononevich Y. et al.* // Procedia Eng. 2016. V. 168. P. 3415.
11. *Arias Espinoza J.D., Sazhnikov V., Smits E.C.P. et al.* // J. Fluoresc. 2014. V. 24. № 6. P. 1735.
12. *Ионов Д.С., Юрасик Г.А., Молчанов С.П. и др.* // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 7–8. С. 55.
13. *Kononevich Y.N., Sazhnikov V.A., Belova A.S. и др.* // New J. Chem. 2019.
14. *Chaudhuri T., Salampuria S., Mukhopadhyay C. et al.* // J. Photochem. Photobiol. A Chem. Elsevier B.V. 2012. V. 248. P. 55.
15. *Kobayashi H., Ogawa M., Alford R. et al.* // Chem. Rev. 2010. V. 110. № 5. P. 2620.
16. *Захарова Г.В., Чибисов А.К., Сажников В.А. и др.* // Химия высоких энергий. 2013. Т. 47. № 6. С. 477.
17. *Sakai A., Tanaka M., Ohta E. et al.* // Tetrahedron Lett. 2012. V. 53. № 32. P. 4138.
18. *Hartmann H.* // J. fur Prakt. Chemie. 1986. V. 328. № 5–6. P. 755.
19. *Nagai A., Kokado K., Nagata Y. et al.* // J. Org. Chem. 2008. V. 73. № 21. P. 8605.
20. *Rurack K.* // Standardization and Quality Assurance in Fluorescence Measurements I. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. P. 101–145.
21. *Harju T.O., Erostryák J., Chow Y.L. et al.* // Chem. Phys. 1994. V. 181. № 1–2. P. 259.
22. *Harju T.O.* // J. Mol. Struct. THEOCHEM., 1996. V. 360. № 1–3. P. 135.
23. *Harju T.O., Korppi-Tommola J.E.I., Huizer A.H. et al.* // J. Phys. Chem. 1996. V. 100. № 9. P. 3592.
24. *John J., Rugmini S.D., Nair B.S.* // Orient. J. Chem. 2017. V. 33. № 2. P. 849.