

ФОТОХИМИЯ  
И МАГНЕТОХИМИЯ

УДК 541.64:541.14:539.199

ВЛИЯНИЕ АМФИФИЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА АКТИВНОСТЬ  
БЕНГАЛЬСКОГО РОЗОВОГО В РЕАКЦИИ ФОТООКИСЛЕНИЯ  
ТРИПТОФАНА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

© 2022 г. А. С. Курьянова<sup>a,b,\*</sup>, Н. А. Аксенова<sup>a,b</sup>, М. А. Савко<sup>a</sup>, Н. Н. Глаголев<sup>a</sup>, А. С. Дубовик<sup>c,d</sup>,  
И. Г. Плащина<sup>c</sup>, П. С. Тимашев<sup>a,b,e</sup>, А. Б. Соловьева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт регенеративной медицины, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

<sup>c</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эммануэля РАН, Москва, Россия

<sup>d</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

<sup>e</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: kuryanovaaanastasi@gmail.com

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 26.10.2021 г.

Принята к публикации 29.10.2021 г.

Исследовано влияние амфифильных полимеров (АП) – плуроников F-127 и F-108, поли-N-винилпирролидона (ПВП) и полиэтиленгликоля (ПЭГ) на фотокаталитическую активность ксантенового красителя – бенгальского розового (БР) в реакции фотоокисления триптофана в воде. БР – эффективный фотосенсибилизатор (ФС) в генерации синглетного  $^1\text{O}_2$  кислорода и находится в растворе в виде ассоциатов. Показано, что все указанные АП повышают эффективную константу скорости фотоокисления триптофана, что обычно связывается с частичной дезагрегацией таких ассоциатов. При этом наибольший эффект наблюдается в присутствии плуроника F-108. В присутствии АП наблюдается изменение ЭСП и спектров флуоресценции ксантенового красителя, в частности, в том числе, батохромный сдвиг (5–15 нм) полос поглощения красителя и рост интенсивности (в 2–5 раз) фотолюминесценции БР, причем наибольший рост интенсивности флуоресценции БР наблюдается при добавлении ПВП. Методом динамического рассеяния света показано, что размер частиц бенгальского розового уменьшается в 1.3–1.5 раза в присутствии плуроника F-108 и ПВП. Наблюдаемые закономерности свидетельствуют о взаимодействии между ксантеновым красителем и АП. Такие системы на основе БР-АП перспективны для применения в качестве препаратов для тераностики – флуоресцентной визуализации и лечения методом фотодинамической терапии онкологических и неонкологических опухолей.

**Ключевые слова:** бенгальский розовый, амфифильные полимеры, фотоокисление триптофана, спектры поглощения и фотолюминесценции, фотодинамическая терапия, тераностика

**DOI:** 10.31857/S0044453722050168

Переход к персонализированной медицине требует новые способы лечения различных видов заболеваний для конкретного пациента при диагностировании и терапии. Тераностика является одним из таких методов, объединяющих диагностику и терапию в единую систему для достижения оптимальной эффективности лечения [1–3]. В частности, при фотодинамической терапии (ФДТ) онкологических заболеваний, одним из наиболее органосажающих и эффективных методов лечения, в организм вводят внутримышечно/внутривенно туморотропный фотосенсиби-

лизатор (ФС), который избирательно накапливается в опухоли, визуализируя пораженные участки (флуоресцентная диагностика) и разрушает патологические клетки и ткани. Это происходит благодаря способности ФС активировать при фотовозбуждении молекулярный кислород с образованием активных форм кислорода, прежде всего, синглетного  $^1\text{O}_2$  кислорода. Однако большинство ФС имеют недостаточно интенсивную люминесценцию для использования их в тераностике [1, 2]. В последнее время наряду с макро-

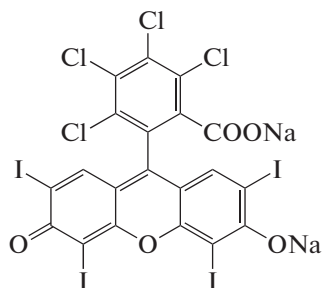


Рис. 1. Структурная формула бенгальского розового.

циклическими ФС – порфиринами и фталоцианинами в ФДТ начинают использовать природные и синтетические красители, более доступные и достаточно эффективные в генерации  $^1\text{O}_2$  кислорода. В частности, ввиду хорошей растворимости в воде, достаточно высокому квантовому выходу генерации синглетного  $^1\text{O}_2$  кислорода ( $\Phi_\Delta = 0.76$ ), низкой темновой токсичности, наличию собственных бактерицидных свойств, ксантеновый краситель – бенгальский розовый (БР) применяется в ФДТ при лечении онкологических [4–8] и неонкологических локализованных воспалений (антимикробная фотодинамическая терапия), в том числе при лечении микозов [8–14]. Однако из-за склонности к агрегации для БР характерна невысокая активность при применении в ФДТ, что приводит к необходимости использовать достаточно высокие концентрации красителя, что, соответственно, обуславливает повышенную токсичность БР [15, 16]. Для снижения агрегации и повышения фотосенсибилизирующей активности БР используют реагенты, препятствующие агрегации и способствующие проникновению красителя через клеточные мембраны. Среди таких реагентов известны, в частности, полисахариды и ПАВ [17–19].

Ранее нами было показано, что некоторые амфифильные полимеры (АП), в том числе поливинилпирролидон (ПВП), тройные блоксополимеры этилен – и пропилен-оксидов, плюроники F127 и F108, не обладающие собственной фотохимической активностью, образуют с порфириновыми фотосенсибилизаторами (ПФС) в воде слабосвязанные комплексы, что способствует разагрегации и увеличению фотосенсибилизирующей активности ПФС в модельных процессах фотоокисления, в клеточных экспериментах и *in vivo*-экспериментах (модельные раны у крыс линии Wistar) [20, 21]. Так, совместное использование ПФС с плюронином F127 повышает активность порфиринов в 10–30 раз при фотодинамическом воздействии на культуры раковых клеток, а также в экспериментах *in vivo* при ФДТ опухолей поверхностной локализации и модельных ран у жи-

вотных [21]. Возможно такое повышение активности ПФС в присутствии плюронинов, связано со способностью этих ПАВ облегчать проникновение ароматических соединений, в частности, цитотоксического антибиотика доксирубицина, в раковые клетки [22].

В данной работе изучено влияние амфифильных полимеров на спектры поглощения и флуоресценции и фотокаталитическую активность бенгальского розового в генерации синглетного  $^1\text{O}_2$  кислорода (в реакции фотоокисления триптофана).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использовали бенгальский розовый, БР (натриевая соль 4,5,6,7-тетрахлор-2',4',5',7'-тетрайодфлуоресцеина, 95%, Sigma-Aldrich), (рис. 1). В качестве амфифильных полимеров использовали: полиэтиленгликоль (ПЭГ), м.м.  $4 \times 10^4$  Da (Serva), поли-N-винилпирролидон (ПВП), м.м.  $4 \times 10^4$  Da (Sigma-Aldrich), а также плюроник F127 с м.м. 12600 Da (Sigma-Aldrich) и плюроник F108 с м.м. 14600 Da (Fluka). В качестве субстрата в модельной реакции фотоокисления использовали D,L-триптофан (Трп) (Acros Organics).

Системы БР-АП получали смешением водных растворов обоих компонентов и перемешиванием в течение 15 мин. Фотоокисление триптофана осуществлялось за счет растворенного в воде молекулярного кислорода в кварцевой кювете (толщина  $l = 1$  см) при комнатной температуре и перемешивании с помощью магнитной мешалки. Концентрация триптофана составляла  $1.0 \times 10^{-4}$  М, концентрацию БР варьировали от  $2 \times 10^{-6}$  до  $1 \times 10^{-5}$  М, а концентрация АП менялась от 0 до 0.8 мас. %. Освещение реакционной смеси осуществляли светодиодным фототерапевтическим аппаратом “АФС” (ООО “Полироник”, Россия) с  $\lambda = 530$  нм, мощностью – 210 мВт. Кинетику процесса фотоокисления фиксировали по уменьшению оптической плотности полосы поглощения в электронных спектрах поглощения Трп ( $\lambda = 280$  нм). Электронные спектры поглощения (ЭСП) растворов снимали на спектрофотометре Cary 50 (Varian), спектры флуоресценции – на спектрофлуориметре Cary Eclipse (Varian).

Для сопоставительной оценки активности фотосенсибилизирующей БР и его комплексов с АП использовали эффективную константу  $k_{\text{эф}}$  скорости фотоокисления триптофана:  $k_{\text{эф}} = (C^0 - C)/(C^0 \Delta t C^{\text{БР}})$ , где  $C^0$  и  $C$  – исходная концентрация субстрата и концентрации Трп в момент времени  $t$ ,  $C^{\text{БР}}$  – концентрация бенгальского розового. Ошибка измерений составляла ~10%.

Размер частиц БР в водном растворе в присутствии и отсутствии АП, а также амфифильных

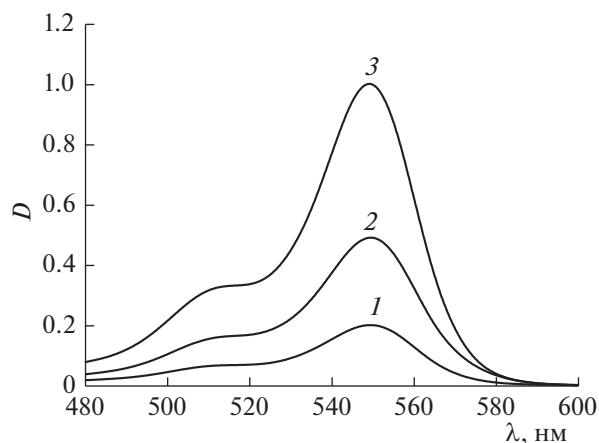


Рис. 2. ЭСП БР при концентрациях:  $2 \times 10^{-6}$  (1),  $5 \times 10^{-6}$  (2) и  $1 \times 10^{-5}$  (3) М.

полимеров определяли методом динамического рассеяния света (ДРС) на анализаторе Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., UK), оснащенный гелий-неоновым лазером с мощностью 4 мВт и длиной волны 633 нм. Растворы фильтровали через фильтрующую поливинилиденфторидную (PVDF) мембрану с диаметром пор 0,22 мкм (Milipore Millex-GV, Germany) в кварцевую кювету (PSC1115). Измерения проводились при комнатной температуре и угле рассеяния  $173^\circ$ . Данные обрабатывались с помощью программного обеспечения Zetasizer Software 6.20 (Malvern Instruments Ltd., UK).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже упоминалось, бенгальский розовый в силу своей гидрофобности склонен к агрегации в

водных растворах, уже при концентрациях выше  $2 \times 10^{-6}$  М БР образует агрегаты Н-типа [15]. Процессы агрегации БР отражаются в его спектре поглощения (рис. 2).

В частности, в ЭСП БР имеется основная полоса поглощения при 550 нм, которая относится к мономерной форме красителя и “плечо” в области 515 нм, относящееся к его димерной форме (рис. 2) [16, 23, 24]. Таким образом, увеличение оптической плотности полосы с  $\lambda = 515$  нм в ЭСП БР является свидетельством процесса агрегации молекул бенгальского розового, происходящего при увеличении концентрации красителя (рис. 2).

При введении АП в растворы БР наблюдается батохромный сдвиг обеих полос поглощения с  $\lambda = 550$  и 515 нм на 5–15 нм, связанный, очевидно, с изменением локального окружения молекул красителя. Одновременно наблюдается рост оптической плотности полосы поглощения БР при 550 нм, отвечающей мономерной форме БР (рис. 3а). Можно полагать, что в присутствии амфифильных полимеров происходит дезагрегация исходно существующих в растворе димеров БР. Об этом же свидетельствует и увеличение в 2–5 раз (в зависимости от природы полимера) интенсивности (I) полосы флуоресценции БР при добавлении к раствору ксантенового красителя амфифильных полимеров (рис. 3б). При этом наибольшее влияние на ЭСП и спектр флуоресценции БР оказывает ПВП. Известно, что ПВП в водных растворах склонен как к ионным, так и к гидрофобным взаимодействиям. Поскольку в молекуле БР присутствуют как анионные, так и гидрофобные группировки, взаимодействие ПВП – БР, очевидно, достаточно сильное (по сравнению с другими изученными АП), что и отражается в соответствующих спектрах флуоресценции и ЭСП [25–27].

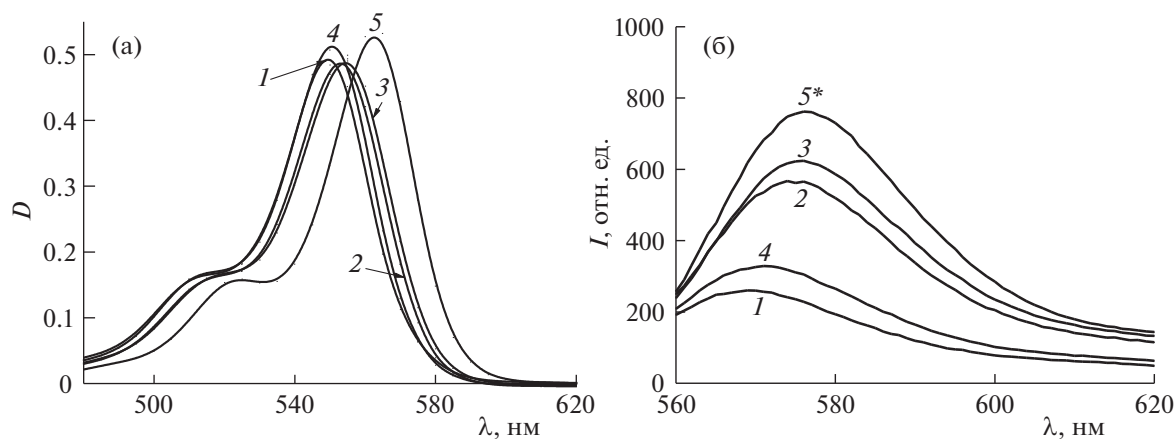
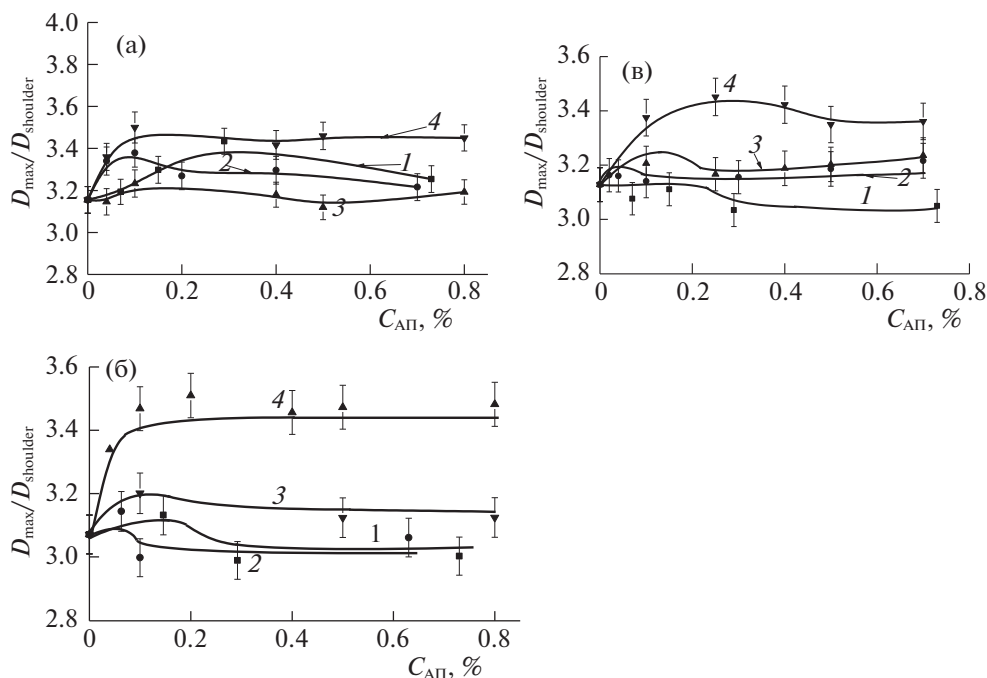


Рис. 3. Электронные спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) БР (1), и БР в присутствии АП: плюрионика F108 (2), F127 (3), ПЭГ (4) и ПВП (5); [БР] =  $5 \times 10^{-6}$  М, концентрации полимеров – 0,1 мас. %; \* – БР-ПВП разбавлен в 2 раза, ввиду резкого подъема интенсивности флуоресценции БР в присутствии ПВП.



**Рис. 4.** Зависимости  $\varphi = (D_{\max}/D_{\text{shoulder}})$  при концентрациях БР =  $2 \times 10^{-6}$  (а),  $5 \times 10^{-6}$  (б) и  $1 \times 10^{-5}$  (в) М от концентрации полимеров: плуроники F108 (1) и F127 (2), ПЭГ (3), ПВП (4).

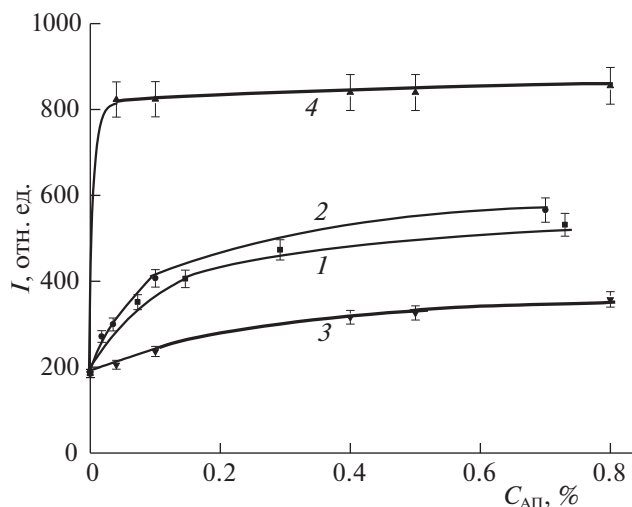
По соотношению  $\varphi$  оптических плотностей полос с  $\lambda = 550$  и  $515$  нм ( $\varphi = D_{\max}/D_{\text{shoulder}}$ ) обычно судят об изменении содержания димерной или мономерной формы ксантенового красителя. На рис. 4 представлена зависимость  $\varphi$  при трех концентрациях БР от концентрации всех изучаемых амфифильных полимеров. Так, для чистого БР при  $C = 2 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6}$  и  $1 \times 10^{-5}$  М величины  $\varphi$  практически одинаковы  $\varphi = 3\text{--}3.1$ , что в соответствии с литературными данными, означает, что ксантеновый краситель при данных концентрациях содержит больше мономерных, чем димерных форм [23, 24]. При добавлении полимеров с концентрацией 0.1 мас. % величина  $\varphi$  повышается (до  $\sim 3.4$ ), что свидетельствует о смещении равновесия мономер  $\leftrightarrow$  димер в сторону мономера. Дальнейшее повышение концентрации АП практически не влияет на величину  $\varphi$ , что свидетельствует о сохранении определенного равновесия мономер  $\leftrightarrow$  димер даже в присутствии избытка ПВП.

Таким образом, вне зависимости от природы АП, величины  $\varphi$  примерно одинаковы, т.е. определенное количество димерных (или более высоких) агрегатов БР в растворе сохраняется, даже при высоких содержаниях АП.

На рис. 5 приведены зависимости интенсивности флуоресценции  $I$  БР ( $2.0 \times 10^{-6}$  М) от концентрации амфифильных полимеров. Как уже было упомянуто выше (рис. 2), амфифильные по-

лимеры (0.1%) повышают величину  $I$  БР, причем наибольший рост наблюдается в присутствии ПВП. Важно, что как следует из рис. 5, уже при концентрации ПВП 0.04% интенсивность флуоресценции БР ( $2 \times 10^{-6}$  М) превышает  $I$  исходного БР в 4.5 раза. Дальнейшее увеличение концентрации ПВП практически не меняет интенсивность флуоресценции. Аналогичные зависимости  $I$  от концентрации АП были получены для БР с [ $5 \times 10^{-6}$  М] и [ $1 \times 10^{-5}$  М]. Во всех случаях при концентрации АП выше 0.04%  $I$  красителя уже практически не меняется вне зависимости от содержания добавленного АП. Это свидетельствует, очевидно, как о достаточно сильном взаимодействии молекул красителя с фрагментами макромолекул АП, так и о существовании динамического равновесия в системе мономер  $\leftrightarrow$  димер БР.

Таким образом, взаимодействие БР с изучаемыми амфифильными полимерами, приводящее к агрегации исходно ассоциированных молекул БР, происходит достаточно эффективно. Это подтверждается и при использовании БР в присутствии АП в качестве фотосенсибилизатора процесса окисления триптофана. При изучении фотосенсибилизирующей активности БР в реакции фотоокисления триптофана и влияния на эффективную константу  $k_{\text{эфф}}$  скорости процесса амфифильных полимеров оказалось, что с увеличением концентрации бенгальского розового уменьшается его фотокаталитическая актив-



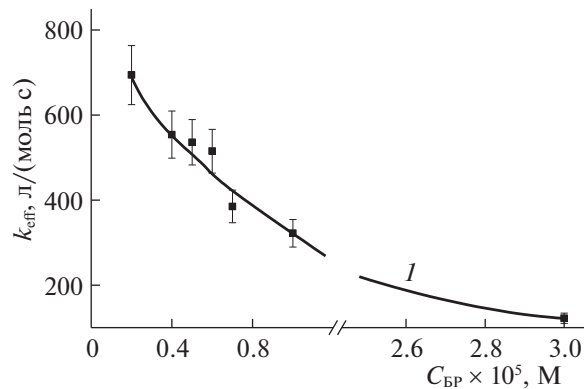
**Рис. 5.** Зависимости интенсивности флуоресценции бенгальского розового от концентрации полимеров. АП: плюроник F108 (1), плюроник F127 (2), ПЭГ (3), ПВП (4);  $[BR] = 2 \times 10^{-6}$  М.

ность, что, возможно, связано с увеличением степени агрегированности БР в водном растворе при увеличении его концентрации (рис. 6).

На рис. 7 приведены зависимости эффективной константы  $k_{\text{эфф}}$  скорости фотоокисления триптофана в присутствии БР при трех его концентрациях  $2 \times 10^{-6}$  М,  $5 \times 10^{-6}$  М и  $1 \times 10^{-5}$  М от концентрации амфифильных полимеров. Видно, что в присутствии АП  $k_{\text{эфф}}$  процесса (а, следовательно, и фотосенсибилизирующая активность ксантенового красителя) растет. Наибольший рост фотокаталитической активности бенгальского розового наблюдается при концентрациях красителя  $(2 \text{ и } 5) \times 10^{-6}$  М в присутствии плюроников F108 (кривая 1) и F127 (2), ПЭГ (кривая 3) с концентрацией 0.1 мас. % (рис. 7 а и б). Уменьшение  $k_{\text{эфф}}$  при дальнейшем увеличении концентрации АП, возможно, происходит из-за того, что не только молекулы БР, но и молекулы субстрата (триптофана) взаимодействуют с АП и, с ростом концентрации полимера возрастает вероятность “неэффективного” связывания БР и триптофана макромолекулами АП. Другими словами краситель и субстрат могут связываться с разными фрагментами цепей амфифильных полимеров или с разными макромолекулами АП.

Как следует из рис. 7в, при концентрации БР  $1 \times 10^{-5}$  М амфифильные полимеры незначительно влияют на величину эффективной  $k_{\text{эфф}}$  константы скорости фотоокисления триптофана, что, очевидно, связано с высоким содержанием агрегатов красителя при высокой концентрации БР.

Для подтверждения факта связывания амфифильных полимеров с БР методом динамическо-



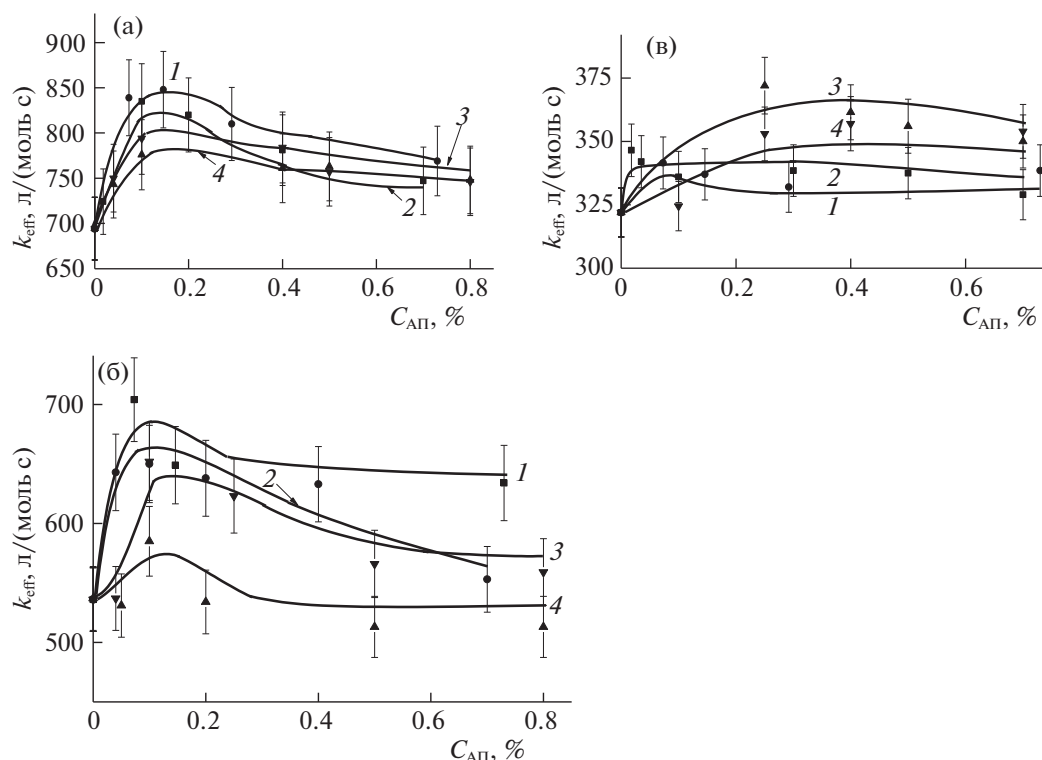
**Рис. 6.** Зависимость эффективной константы скорости ( $k_{\text{эфф}}$ ) фотоокисления триптофана ( $1 \times 10^{-4}$  М) от концентрации БР ( $I$ ).

го рассеяния света были измерены размеры частиц БР в присутствии и отсутствии полимеров. В качестве АП были взяты плюроник F108, который оказывает наибольшее влияние на фотокаталитическую активность БР, и ПВП, который среди выбранных АП оказывает наибольшее влияние на ЭСП и спектр флуоресценции бенгальского розового. Полученные данные приведены в таблице 1. Из табл. 1 следует, что размер частиц БР (при его концентрации в растворе  $10^{-3}$  М) представлен двумя величинами  $\sim 161$  нм, что можно отнести к агрегатам БР и 0.7 нм, что соответствует единичному размеру молекул красителя. Размер частиц анионного красителя в присутствии АП уменьшается в 1.2–1.5 раза, что подтверждает дезагрегацию молекул бенгальского розового в присутствии амфифильных полимеров.

**Таблица 1.** Средний размер частиц БР, F108, ПВП и смесей БР-АП в водных растворах, определенный методом динамического рассеяния света

Образец	Размер частиц, нм
BR ( $1 \times 10^{-3}$ М)	$0.7 \pm 0.2$ (6%)
	$161 \pm 1.5$ (94%)
F108 ( $1 \times 10^{-3}$ М)	$5.24 \pm 0.15$ (90%)
	$78.1 \pm 0.3$ (10%)
PVP ( $1 \times 10^{-3}$ М)	$6.05 \pm 0.5$ (66%)
	$29 \pm 1.5$ (34%)
BR + F108(1 : 1)	$5.75 \pm 0.5$ (16%)
	$35 \pm 1.5$ (30%)
BR + PVP (1 : 1)	$132 \pm 2.5$ (54%)
	$5.1 \pm 0.2$ (30%)
	$15.4 \pm 0.4$ (45%)
	$108 \pm 2.5$ (25%)





**Рис. 7.** Зависимости эффективной константы скорости фотоокисления триптофана ( $C = 1 \times 10^{-4}$  М) в присутствии БР ( $C = 2 \times 10^{-6}$  М (а),  $5 \times 10^{-6}$  М (б)) и  $1 \times 10^{-5}$  М (в) от концентрации АП: плуроник F108 (1), плуроник F127 (2), ПЭГ (3) и ПВП (4). Концентрации полимеров варьировались в пределах 0–0.8 мас. %.

Таким образом, некоторые АП способны повышать фотокаталитическую активность БР. Наибольший эффект достигался при добавлении плуроников F108 и F127. При росте концентрации красителя  $2$  и  $5 \times 10^{-6}$  М. С ростом концентрации БР (для  $1 \times 10^{-5}$  М) образуются очевидно прочно связанные ассоциаты красителя, которые практически не распадаются в присутствии АП. Наличие взаимодействия между ксантеновым красителем и АП иллюстрируют ЭСП и спектр флуоресценции. С помощью динамического светорассеяния показано, что в двухкомпонентной системе на основе БР-АП размер частиц ксантенового красителя уменьшается в 1.2–1.5 раза.

Наблюдаемая высокая интенсивность флуоресценции БР в присутствии АП, прежде всего ПВП, может стать основой для создания перспективных препаратов на основе бенгальского розового и поливинилпирролидона для терапии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-32-90097 и госзадания № 0082-2019-0012.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ryu J. H., Lee S., Son S. et al. // J. Control. Release. 2014. V. 190. P. 477. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.04.027>
- Josefsen L.B., Boyle R.W. // Theranostics. 2012. V. 2. № 9. P. 916. <https://doi.org/10.7150/thno.4571>
- Chernov V.I., Bragina O.D., Sinilkin I.G. et al. // Vestn. Rentgenol. Radiol. 2016. V. 97. № 5. P. 306. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2016-97-5-306-313>
- Sun W., Luo L., Feng Y. et al. // Adv. Mater. 2020. V. 32. № 23. P. 1. <https://doi.org/10.1002/adma.202000377>
- Qin J., Kunda N., Qiao G. et al. // Cell Death Dis. 2017. V. 8. № 2. P. 1. <https://doi.org/10.1038/cddis.2016.473>
- Uppal A., Jain B., Gupta P.K. et al. // Photochem. and Photobiol. 2011. V. 87. № 5. P. 1146. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00967.x>
- Maker A.V., Prabhakar B., Pardiwala K. // J. Clin. Cell. Immunol. 2015. V. 6. № 4. P. 5. <https://doi.org/10.4172/2155-9899.1000343>
- Demartis S., Obinu A., Gavini E. et al. // Dye. Pigment. 2021. V. 188. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109236>
- Fila G., Kasimova K., Arenas Y. et al. // Front. Microbiol. 2016. V. 7. P. 1. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01258>

10. *Rossoni R.D., Junqueira J.C., Santos E.L.S. et al.* // *Lasers Med. Sci.* 2010. V. 25. № 4. P. 581.  
<https://doi.org/10.1007/s10103-010-0765-1>
11. *Amescua G., Arboleda A., Nikpoor N. et al.* // *Cornea.* 2017. V. 36. № 9. P. 1141.  
<https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000001265>
12. *Корнишева В.Г.* // *Проблемы медицинской микологии* 2015. Т. 17. № 1. С. 3.
13. *Kochevar I.E., Redmond R.W.* // *Methods in Enzymol.* 2000. V. 319. P. 20.  
[https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(00\)19004-4](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(00)19004-4)
14. *Paulino T.P., Magalhaes P.P., Thedei G. et al.* // *Mol. Biol. Educ.* 2005. V. 33. № 1. P. 46.  
<https://doi.org/10.1002/bmb.2005.494033010424>
15. *Xu D., Neckers D.C.* // *J. Photochem. and Photobiol. A Chem.* 1987. V. 40. P. 361.  
[https://doi.org/10.1016/1010-6030\(87\)85013-X](https://doi.org/10.1016/1010-6030(87)85013-X)
16. *Neckers D.C.* // *J. Photochem. and Photobiol. A Chem.* 1989. V. 47. № 1. P. 1.  
[https://doi.org/10.1016/1010-6030\(89\)85002-](https://doi.org/10.1016/1010-6030(89)85002-)
17. *Fini P., Castagnolo M., Catucci L. et al.* // *Thermochim. Acta.* 2004. V. 418. P. 33.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.11.041>
18. *Shrestha A., Kishen A.* // *Photochem. and Photobiol.* 2012. V. 88. № 3. P. 577.  
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.01026.x>
19. *Wang X.L., Zeng Y., Zheng Y.Z. et al.* // *J. Chem. – A Eur.* 2011. V. 17. № 40. P. 11223.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201100975>
20. *Aksenova N.A., Zhientaev T.M., Brilkina A.A. et al.* // *Photonics Lasers Med.* 2012. V. 1. № 1. P. 189.  
<https://doi.org/10.1515/plm-2013-0011>
21. *Rudenko T.G., Shekhter A.B., Guller A.E. et al.* // *Photochem. and Photobiol.* 2014. V. 90. № 6. P. 1413.  
<https://doi.org/10.1111/php.12340>
22. *Batrakova E.V., Dorodnych T.Y., Klinskii E.Y. et al.* // *Br. J. Cancer.* 1996. V. 74. № 10. P. 1545.  
<https://doi.org/10.1038/bjc.1996.587>
23. *Mendes B., Kassumeh S., Aguirre-Soto A. et al.* // *Photochem. and Photobiol.* 2021. P. 1.  
<https://doi.org/10.1111/php.13379>
24. *Chang C.C., Yang Y.T., Yang J.C. et al.* // *Dye. Pigment.* 2008. V. 79. № 2. P. 170–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2008.02.003>
25. *Купи Ю.Э.* Поли-N-винилпирролидон и другие поли-N-виниламиды М.: Наука, 1998. 252 с.
26. *Ghiggino K.P., Brown J.M., Launikonis A. et al.* // *Aust. J. Chem.* 1988. V. 41. № 1. P. 9.  
<https://doi.org/10.1071/CH9880009>
27. *Maruthamuthu M., Sobhana M.* // *J. Polym. Sci. A1.* 1979. V. 17. № 10. P. 3159.  
<https://doi.org/10.1002/pol.1979.170171008>