

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИКАТИОННЫХ МАКРОЦИКЛИЧЕСКИХ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ С ТВИН 80

© 2022 г. А. В. Кустов^{a,b,*}, Д. Б. Березин^b, С. О. Кручин^a, Д. В. Батов^a

^a Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 153045, Иваново, Россия

^b Ивановский государственный химико-технологический университет, Научно-исследовательский институт макрогетероциклических соединений, 153460, Иваново, Россия

*e-mail: kustov@isuct.ru

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

После доработки 20.10.2021 г.

Принята к публикации 25.10.2021 г.

Методами спектрофотометрического и флуоресцентного титрования изучено взаимодействие дикатионных фотосенсибилизаторов (ФС) порфиринового {13(3),17(3)-*бис*-N-(2-N',N',N'-триметил-аммонийэтилоидид) амид дейтеропопоририна-IX} и хлоринового {3(1),3(2)-*бис*-(N,N,N,-триметил-аммонийметилоидид)-13(1)-N-метиламид-15(2),17(3)-диметиловый эфир хлорина e_6 } типа с потенциальным средством доставки неионогенным ПАВ Твин 80 в области существования сферических мицелл. Установлено образование устойчивых комплексов ФС-Твин 80, при этом на кривых титрования обнаружены два участка связывания со своей величиной константы и стехиометрией взаимодействия, обсуждаются наиболее вероятные причины этого. Сделан вывод о том, что молекулы ФС располагаются во внешнем слое мицеллы в окружении полярных оксиэтиленовых групп, куда могут проникать гидратированные иодид-ионы. С применением метода динамического светорассеяния обнаружено изменение размера мицелл Твин 80 в присутствии электролитов различной природы.

DOI: 10.31857/S0044453722040197

Антимикробная фотодинамическая терапия (АФДТ) рассматривается как реальная альтернатива привычным методам борьбы с патогенной микрофлорой и может быть использована, как эффективное дополнение к антибиотикотерапии [1–8]. АФДТ представляет собой принципиально новую и отличную от традиционных методов терапии стратегию лечения, основанную на селективном накоплении в микробных клетках окрашенных веществ – фотосенсибилизаторов [9–12]. Эти вещества при воздействии видимого света определенной длины волны и мощности генерируют активные формы кислорода (АФК), что позволяет инактивировать патогенную микрофлору путем запуска каскада фотохимических реакций окислительного типа [13–17].

Одной из наиболее существенных проблем при использовании макрогетероциклических ФС, таких как порфирины и хлорины, в клинической ФДТ, является их агрегация в водных растворах при терапевтических концентрациях, что не только снижает эффективность генерации АФК [14, 17], но и биодоступность препарата, время его циркуляции в системном кровотоке и тропность к клеточным мембранам [18]. Для решения перечисленных проблем на практике применяют широкий спектр средств как пассивной,

так и активной доставки препаратов в пораженную ткань, включая векторные носители, полимерные и мицеллярные поверхностно-активные вещества (ПАВ), липосомы, различные типы наночастиц и т.д. [19–23]. Одним из эффективных, биосовместимых и широко используемых в фармакологии неионогенных мицеллярных ПАВ является Твин 80 [24, 25]. Обладая невысокой критической концентрацией мицеллообразования (ККМ = 1.2×10^{-5} моль/кг) и низкой токсичностью, он применяется как действенное средство солюбилизации и пассивного транспорта лекарственных препаратов в биологические ткани [24, 26].

В связи с вышеизложенным, в настоящей работе изучено взаимодействие ионогенных ФС порфиринового (соединение 1) и хлоринового (соединение 2) типа (Схема 1), несущих по две катионные функциональные группы, с Твин 80, рассчитаны константы связывания ФС-ПАВ, дана оценка глубины проникновения макрогетероцикла (МГЦ) внутрь мицеллы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез объектов исследования (соединения 1–3) описан ранее в работах [26, 27]. Структура всех синтезированных соединений подтверждалась ме-

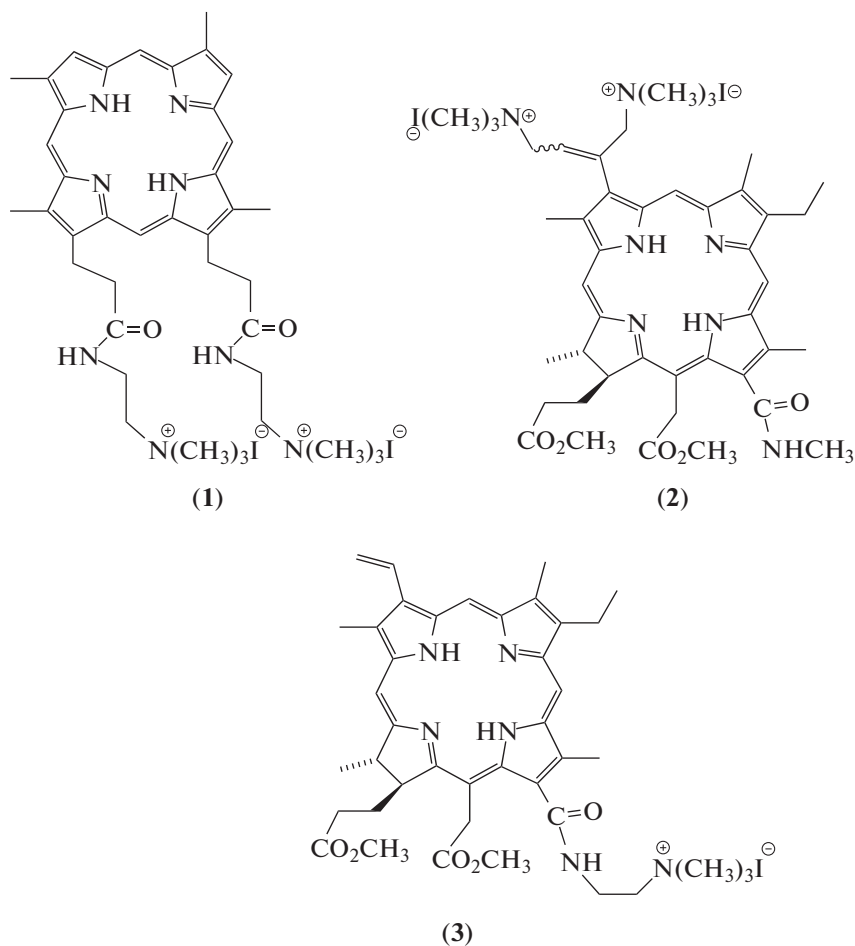


Схема 1.

тодами ^1H ЯМР-спектроскопии (Bruker 500 MHz Avance III, США) и масс-спектрометрии (MALDI-TOF Shimadzu Axima Confidence, Япония).

Воду непосредственно перед экспериментом подвергали бидистилляции. Твин 80 (Sigma-Aldrich), иодиды калия и тетраметиламмония (“х.ч.”, Sigma-Aldrich, ACS Reagent) использовали без дополнительной очистки.

Электронные спектры поглощения (ЭСП) регистрировали на спектрофотометре Drawell D8 (КНР) при 293 К и концентрации ФС $m = 7.3 \times 10^{-6}$ моль/кг. Стационарные спектры флуоресценции (Фл) пигментов регистрировали в диапазоне длин волн 600–750 нм при длине волны возбуждения $\lambda = 405$ нм на спектрофлуориметре Solar CM 2203 (Беларусь), используя предварительно термостатированные при 298 К растворы ФС с концентрацией $\sim 10^{-6}$ моль/кг.

Спектрофотометрическое титрование. Рабочие растворы порфиринового **1** или хлоринового **2** ФС с молярностью $m = 7.3 \times 10^{-6}$ моль/кг, а также исходный раствор неионогенного ПАВ

Твин 80 ($m = 7.3 \times 10^{-3}$ моль/кг) готовили путем растворения точной навески вещества в воде. Водные растворы с постоянной концентрацией ФС и различной концентрацией Твин 80 для проведения спектрофотометрического титрования в большинстве случаев готовили путем разбавления водой исходного рабочего раствора ПАВ большей концентрации. Для этого в пробирку помещали 1 г рабочего раствора МГЦ, расчетное количество исходного раствора Твин 80 и доводили дистиллированной водой до массы 10 г. Таким образом получали растворы с молярным соотношением ФС/Твин 80 от 1/5 до 1/150 и регистрировали ЭСП.

Флуоресцентное титрование. Водные растворы пигментов **1** и **2**, содержащие 60- или 6000-кратный молярный избыток Твин 80, титровали свежеприготовленным $3m$ раствором йодистого калия. Для этого к 2 г раствора ФС постепенно добавляли по 0.1 г раствора KI ($m = 3$ моль/кг), термостатировали при 298 К и регистрировали Фл на каждом шаге титрования.

Определение размера агрегатов ПАВ и изучение их распределения по размерам в водных растворах выполняли методом динамического светорассеяния (ДРС, фотонная корреляционная спектроскопия) с использованием анализатора Zetasizer Nano ZS ZEN3600 (Malvern Instruments, Великобритания), оснащенного лазером с длиной волны 633 нм и технологией неинвазивного обратного рассеяния (NIBS). Детектор рассеянного света располагался под углом 173° к падающему излучению. Растворы для проведения исследований готовили весовым методом, фильтровали с помощью целлюлозного фильтра (Jetbiofil, размер пор 0.22 мкм) и хранили в защищенном от света месте. Исследование водных растворов Твин 80 в присутствии катионного хлорина **3** и Me_4NI методом ДРС проводили через несколько дней после приготовления, по завершении формирования структуры агрегатов.

Результаты исследований приведены в таблице 1 и на рис. 1–4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дикатионные макрогетероциклические **ФС 1** и **2** демонстрируют хорошую растворимость в воде, которая при 298 К составляет 0.12 и 0.04 моль/кг, соответственно [27]. Несмотря на это, согласно данным фотонной корреляционной и электронной абсорбционной (рис. 1а) спектроскопии, оба соединения при концентрациях уже порядка 10^{-3} моль/кг находятся в агрегированной форме [27–30]. В области микромолярных концентраций хлорин **2** наноразмерных агрегатов в водном растворе не образует, однако, по данным Фл (рис. 1б) существует в виде ассоциатов небольшого (<1 нм) размера [28–31]. Проведенные нами исследования показали, что небольшие до-

Таблица 1. Параметры уравнения (6)

m_T , моль/кг	$\lg K_b$	n	R^2
Соединение 1			
$(0.37-1.81) \times 10^{-4}$	4.94 ± 0.09	1.08 ± 0.02	0.999
$(2.35-5.48) \times 10^{-4}$	9.30 ± 0.90	2.22 ± 0.27	0.973
Соединение 2 [33]			
$(3.9-14.6) \times 10^{-4}$	5.66 ± 0.29	1.76 ± 0.09	0.994
$(3.1-5.5) \times 10^{-3}$	9.09 ± 0.67	3.26 ± 0.28	0.992

Примечание. Погрешности здесь и далее представлены в виде удвоенного стандартного отклонения.

бавки полимерного (поливинилпирролидон, ПВП) и мицеллярного (Твин 80) ПАВ приводят к разрушению ассоциатов/агрегатов в растворах **ФС** (рис. 1), при этом Твин 80 при сопоставимых концентрациях обладает большей эффективностью, чем ПВП [28, 30].

Для изучения связывания **ФС** с Твин 80 и установления мест локализации молекул **ФС** в мицелле были использованы методы спектрофотометрического и флуоресцентного титрования. Расчет величины константы и стехиометрии молекулярного комплекса осуществляли в соответствии с предложенной ранее моделью [31–33], связывающей равновесные концентрации взаимодействующих объектов следующим образом:



где $[\text{ФС}]$, $[\text{T}]$ и $[\text{ФС} \cdot \text{T}_n]$ представляют собой равновесные концентрации **ФС**, Твин 80 и их комплекса в водном растворе, соответственно, а n –

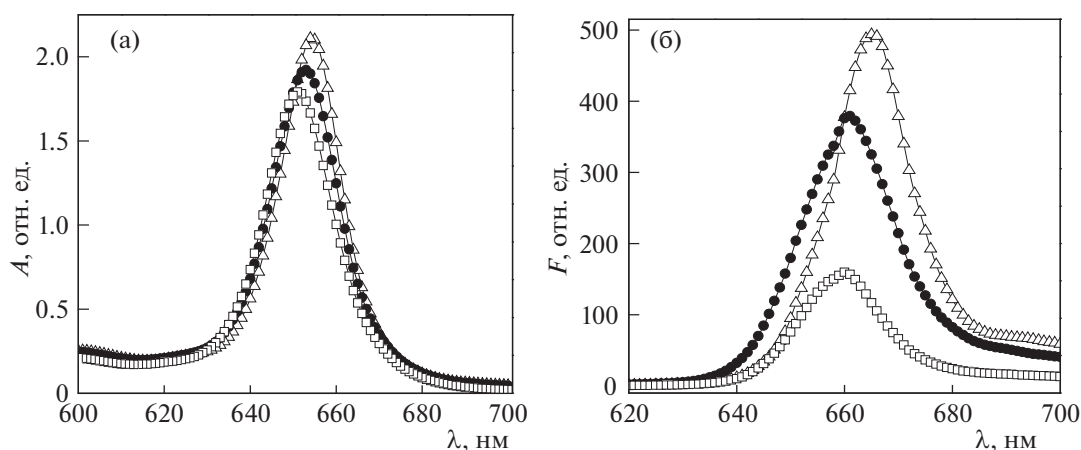


Рис. 1. Спектры поглощения (а, $m_{\text{ФС}} = 7.3 \times 10^{-4}$ моль/кг) и флуоресценции (б, $m_{\text{ФС}} = 1.1 \times 10^{-6}$ моль/кг) дикатионного хлоринового **ФС** (соединение **2**) в этаноле (Δ , молекулярная форма **ФС**), воде (\square , агрегированная форма **ФС**) и водном растворе Твин 80 (\bullet , $m_{\text{Твин 80}} = 10^{-4}$ моль/кг).

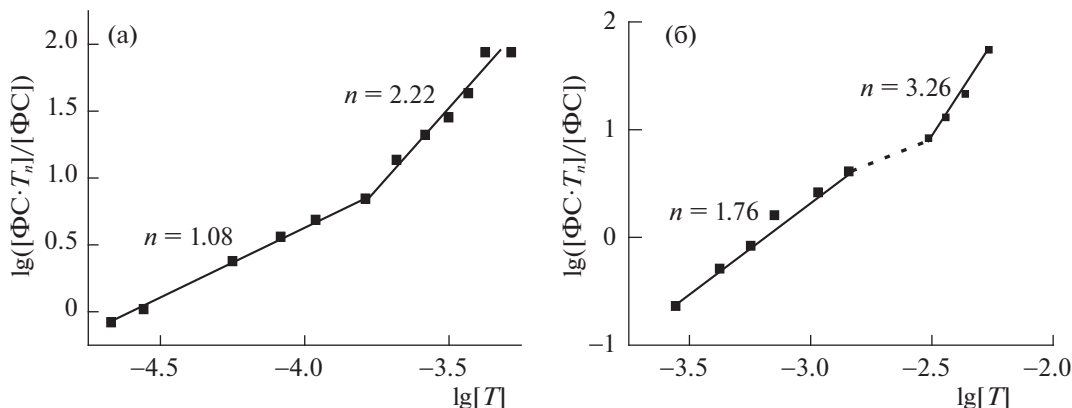


Рис. 2. Зависимости $\lg([\text{ФС} \cdot \text{T}_n]/[\text{ФС}])$ от равновесной концентрации Твин 80 для соединений: 1 (а) и 2 (б). Точки – эксперимент, сплошные линии – расчет по уравнению (6), точечные линии показывают переходный участок.

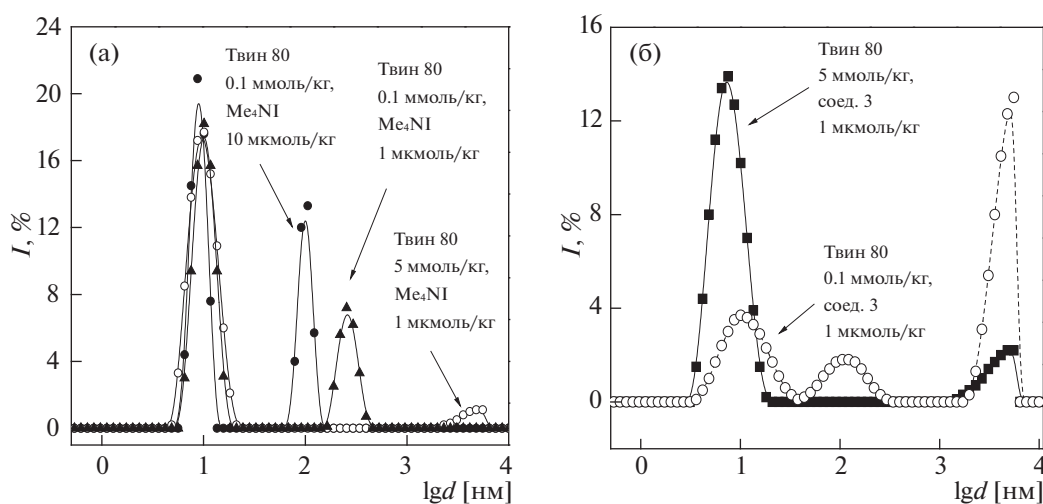


Рис. 3. Динамическое рассеяние света в растворах Твин 80 разных концентраций, содержащих Me_4NI (а) или соед. 3 (б) при 25°C: (а) (●) 0.1 ммоль/кг Твин 80 и 10 мкмоль/кг Me_4NI , (▲) 0.1 ммоль/кг Твин 80 и 1 мкмоль/кг Me_4NI , (○) 5 ммоль/кг Твин 80 и 1 мкмоль/кг Me_4NI ; (б) (■) 5 ммоль/кг Твин 80 и 1 мкмоль/кг соединение 3, (○) 0.1 ммоль/кг Твин 80 и 1 мкмоль/кг соединение 3. Линии – сплайн-функции.

число моль Твин 80, с которым взаимодействует 1 моль ФС. Константа связывания равна:

$$K_b = \frac{[\text{ФС} \cdot \text{T}_n]}{[\text{ФС}] \cdot [\text{T}]^n} \quad (2)$$

Равновесные концентрации ФС, Твин 80 и молекулярного комплекса (ФС · Твин 80) определяются уравнениями:

$$[\text{ФС}] = m_{\text{ФС}} \frac{1 - (A - A_0)}{A_{\text{max}} - A_0}, \quad (3)$$

$$[\text{T}] = m_m^{\text{T}} - n \frac{m_{\text{ФС}}(A - A_0)}{A_{\text{max}} - A_0}, \quad (4)$$

$$[\text{ФС} \cdot \text{T}_n] = \frac{A - A_0}{A_{\text{max}} - A_0} m_{\text{ФС}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{ФС}}$ – аналитическая концентрация ФС в растворе равная 7.3×10^{-6} моль/кг; $m_m^{\text{T}} = m_{\text{T}} - \text{ККМ}$ – концентрация ”мицеллярного” Твин 80, рассчитываемая как разница между его аналитической концентрацией и критической концентрацией мицеллообразования [24, 30]; n – число молекул Твин 80, которые взаимодействуют с ФС в мицелле; A_0 и A_{max} – оптические плотности растворов ФС в воде и водном растворе Твин 80, где кривая $A - f(m_{\text{T}})$ выходит на плато. Подстановка выражений (3)–(5) в уравнение (2), логарифмирование и преобразование приводят к двухпараметровому уравнению [31]:

$$\lg\left(\frac{A - A_0}{1 - (A - A_0)}\right) = \lg(K_b) + n \lg\left(m_m^{\text{T}} - n \frac{m_{\text{ФС}}(A - A_0)}{A_{\text{max}} - A_0}\right). \quad (6)$$

Уравнение (6) линеаризуется в координатах $\lg([\text{ФС} \cdot T_n]/[\text{ФС}]) - \lg[T]$, где тангенсом угла наклона является параметр n , а $\lg K_b$ – отрезком, отсекаемым на оси ординат. Параметры модели K_b и n , рассчитанные с помощью стандартной итерационной процедуры, приведены в таблице 1, а сравнение рассчитанных и экспериментальных значений дано на рис. 2.

Как видно, в обоих случаях имеет место связывание ФС мицеллами Твин 80, и на кривых титрования наблюдаются два участка, характеризующиеся своей константой и стехиометрией взаимодействия ФС-носитель. В области малых концентраций амфифила (недостаток мицелл) адсорбированный на них ФС взаимодействует с одной–двумя молекулами ПАВ.

С увеличением концентрации ПАВ связывающие молекулы ФС усиливается, что может быть объяснено взаимодействием мицелл друг с другом. При этом оказывается важным наличие в растворе заряженных молекул ФС, поскольку по данным ДРС в отсутствие электролитов в растворе в исследуемом интервале концентраций 10^{-4} – 10^{-2} моль/кг Твин 80 гидродинамический диаметр мицелл сохраняется в пределах 9.0 ± 0.5 нм. Это значение очень близко к величине, рассчитанной по данным молекулярной динамики, когда число агрегации ПАВ близко к 60 [25, 31].

Однако при добавлении к водному раствору Твин 80 электролита (см. рис. 3а), в частности, Me_4NI , даже при его концентрации 1 мкмоль/кг распределение интенсивности рассеяния становится не мономодальным, и к мицеллам Твин 80 с гидродинамическим диаметром 9 нм добавляется целый ряд агрегатов большого размера от 100 до 4000 нм.

Аналогичная картина наблюдается и в очень разбавленных растворах монокатионного хлоридна (соединение 3, рис. 3б), где также возрастает размер образующихся агрегатов вследствие взаимодействия мицелл друг с другом. Согласно величинам дзета-потенциалов, измеренным в растворах Твин 80 в присутствии соед. 3 и Me_4NI (-10 и -5 мВ соответственно), оба значения существенно выше пороговых величин (-30 мВ), что указывает на электрическую нестабильность исследуемых агрегатов и их склонность к дальнейшим перестройкам.

Поскольку на первом участке титрования у соединения 1 число мицелл ПАВ заметно меньше, чем количество молекул ФС в растворе, а в случае соединения 2 данные величины сопоставимы (см. диапазон концентраций в таблице 1 с учетом числа агрегации Твин 80 ~ 60), то находящиеся на поверхности мицелл молекулы макрогетероциклов могут контактировать друг с другом. С увеличением числа мицелл эта тенденция существенно

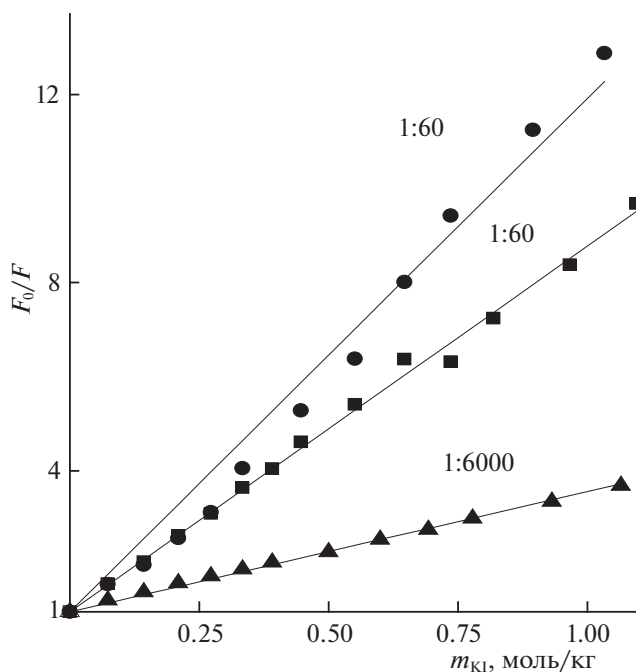


Рис. 4. Тушение флуоресценции ФС ($m_{\text{ФС}} = 1.1 \times 10^{-6}$ моль/кг) иодидом калия в растворах Твин 80 разных концентраций при 293 К: (●) – соединение 1, $m_{\text{Твин 80}} = 6.5 \times 10^{-5}$ моль/кг; (■) – соединение 2, $m_{\text{Твин 80}} = 6.6 \times 10^{-5}$ моль/кг, (▲) – соединение 2, $m_{\text{Твин 80}} = 6.6 \times 10^{-3}$ моль/кг.

ослабевает, контакты между молекулами ФС полностью или частично исчезают и число n растет. В пользу этого свидетельствует факт усиления флуоресценции обоих ФС с ростом концентрации ПАВ. Кроме того, быстрый рост числа мицелл в диапазоне молярностей Твин 80 10^{-4} – 10^{-2} моль/кг и наличие электролита в растворе приводит, как было показано выше (рис. 3), к взаимодействию между ними.

По-видимому, в этом случае локализованная во внешнем слое молекула ФС испытывает влияние молекул ПАВ, находящихся в составе другой мицеллы, гидратация полярных групп ослабляется, и становятся возможными контакты ФС с большим числом молекул Твин 80 [27].

С целью более глубокого понимания механизмов взаимодействия ФС-носитель было исследовано тушение флуоресценции МГЦ в водных растворах иодида калия разных концентраций [27, 31–35]. Из рис. 4 видно, что кривые тушения во всех случаях хорошо описываются известным уравнением Штерна–Вольмера:

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{SV}[I^-], \quad (7)$$

где F_0 – интенсивность флуоресценции ФС в водном растворе Твин 80; F – то же самое в присутствии KI; $[I^-]$ – молярная концентрация иодиона; K_{SV} – константа Штерна-Вольмера (кг/моль). Величины K_{SV} , определяемые как тангенс угла наклона на зависимостях $F_0/F - f([I^-])$ (см. рис. 4), составили при мольном отношении ФС/ПАВ = 1 : 60 10.92 ± 0.30 и 7.78 ± 0.08 кг/моль для соед. **1** и **2**, соответственно. Оба значения достаточно велики, указывая, что ФС находятся во внешнем слое мицеллы в окружении полярных оксиэтиленовых групп, куда относительно легко могут проникнуть гидратированные иодид-ионы.

Более значительная величина K_{SV} у соединения **1**, обладающего более высокой растворимостью в воде, обусловлена, по-видимому, большей доступностью макроцикла действию тушителя, что связано со сложностями упаковки молекулы порфиринового ФС в структуре мицеллы и его локализацией ближе к водной поверхности. Появление большого избытка мицелл (мольное отношение ФС/ПАВ = 1/6000) приводит к ощущению ослаблению тушения у соединения **2** ($K_{SV} = 2.56 \pm 0.03$ кг/моль). По всей видимости, это указывает на усиление связывания ФС с ПАВ (см. таблицу 1) вследствие взаимодействия между мицеллами Твин 80, что препятствует проникновению KI к локализованному в мицелле макроциклу. Таким образом, результаты исследований указывают на прочное связывание обоих ФС с мицеллами Твин 80, который может использоваться в качестве средства пассивной доставки препарата.

Таким образом, в результате проведенного анализа обнаружено образование в водных растворах достаточно прочных молекулярных комплексов ФС порфиринового и хлоринового ряда с неионогенным ПАВ Твин 80. Линеаризация кривой титрования в рамках предложенной нами ранее модели приводит к возникновению зависимости с двумя линейными участками со своей константой и стехиометрией взаимодействия, что, по всей видимости, может быть связано с изменением размера мицелл Твин 80 в присутствии электролитов, в частности, катионных ФС. Исследуемые дикатионные ФС локализуются в поверхностном слое мицеллы Твин 80, о чем свидетельствуют высокие значения констант динамического тушения их флуоресценции в водном растворе йодистого калия.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-13-00398) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИХР РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamblin M. // *Curr. Opin. Microbiol.* 2016. V. 33. P. 67. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2016.06.008>
2. Wainwright M., Maisch T., Nonell S. et al. // *Lancet Infect. Dis.* 2017. V. 17. № 2. P. e49–e55. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30268-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30268-7)
3. Alves E., Faustino M.A.F., Neves M.G.P.M.S. et al. // *Future Med. Chem.* 2014. V. 6. № 2. P. 141–164. <https://doi.org/10.4155/fmc.13.211>
4. Liu Y., Qin R., Zaat S.A.J. et al. // *J. Clin. Translat. Res.* 2015. V. 1. № 3. P. 140. <https://doi.org/10.18053/jctres.201503.002>
5. Maisch T. // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2015. V. 14. P. 1518. <https://doi.org/10.1039/c5pp00037h>
6. Cieplik F., Deng D., Crielaard W. et al. // *Critical Rev. Microbiol.* 2018. V. 44. № 5. P. 571. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2018.1467876>
7. Kustov A.V., Kustova T.V., Belykh D.V. et al. // *Dyes Pigment.* 2020. V. 173. 107948. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.107948>
8. Koifman O.I., Ageeva T.A., Beletskaya I.P. et al. // *Macroheterocycles.* 2020. V. 13. № 4. P. 311. <https://doi.org/10.6060/mhc200814k>
9. Bonnett R. // *Chem. Soc. Rev.* 1995. P. 19–33.
10. Photodynamic therapy: from theory to application. Ed. by M.H. Abdel-Kader. Springer: New York, 2014. 312 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39629-8>
11. Кустов А.В., Березин Д.Б., Стрельников А.И., Лапочкина Н.П. Противоопухолевая и антимикробная фотодинамическая терапия: механизмы, мишени, клинико-лабораторные исследования: руководство. Под ред. А.К. Гагуа. Москва: Ларго, 2020. 108 с. (ISBN 978-5-6045139-0-3).
12. Denis T.G.St., Huang Y.-Y., Hamblin M.R., In: *Handbook of porphyrin science* / Ed. by K.M. Kadish, K.M. Smith, R. Guilard. Singapore: World Scient. Publ., 2013. V. 27. P. 255.
13. Bonnett R. *Chemical aspects of photodynamic therapy.* Amsterdam: Gordon Breach Scient. Publ., 2000. 324 p.
14. Dabrowski J.M. // *Adv. Inorg. Chem.* 2017. V. 70. P. 343. <https://doi.org/10.1016/bs.adioch.2017.03.002>
15. Sobotta L., Skupin-Mrugalska P., Piskorz J., Mielcarek J. // *Eur. J. Med. Chem.* 2019. V. 175. P. 72. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.04.057>
16. Венедиктов Е.А., Туликова Е.Ю., Рожкова Е.П. и др. // *Макрогетероциклы.* 2017. Т. 10. № 3. С. 295. <https://doi.org/10.6060/mhc160963c>
17. Kuznetsova N. In: *Photosensitizers in medicine, environment and security* / Ed. by T. Nyokong, V. Ahsen. Dordrecht: Springer, 2012. p. 267.
18. Almeida A., Faustino M.A.F., Tome J.P. // *Future Med. Chem.* 2015. V. 7. № 10. P. 1221. <https://doi.org/10.4155/fmc.15.59>
19. Tiwari G., Tiwari R., Sriwastawa B. et al. // *Intern. J. Pharm. Invest.* 2012. V. 2. № 1. P. 2. <https://doi.org/10.4103/2230-973X.96920>
20. Lucky S.S., Soo Kh. S., Zhang Y. // *Chem. Rev.* 2015. V. 115. P. 1990. <https://doi.org/10.1021/cr5004198>

21. *Миронов А.Ф., Жданова К.А., Брагина Н.А.* // Успехи химии. 2018. Т. 87. № 9. С. 859.
<https://doi.org/10.1070/RCR4811>
22. *Mesquita M.Q., Dias C.J., Neves M.G.P.M.S. et al.* // *Molecules*. 2018. V. 23. P. 2424.
<https://doi.org/10.3390/molecules23102424>
23. *Yakavets I., Millard M., Zorin V. et al.* // *J. Contr. Release*. 2019. V. 304. P. 268.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.05.035>
24. *Mahmood M.E., Al-Koofee D.A.F.* // *Global J. Sc. Front. Res. Chem*. 2013. V. 13. № 4. https://www.researchgate.net/profile/Dhafer_AlKoofee2/publication/237841643_Effect_of_Temperature_Changes_on_Critical_Micelle_Concentration_for_Tween_Series_Surfactant/links/0deec51bdda5ecb54a000000/Effect-of-Temperature-Changes-on-Critical-Micelle-Concentration-for-Tween-Series-Surfactant.pdf
25. *Amani A., York P., de Waard H., Anwar J.* // *Soft Matter*. 2011. V. 7. P. 2900–2908.
<https://doi.org/10.1039/C0SM00965B>
26. *Kustov A.V., Belykh D.V., Smirnova N.L. et al.* // *Dyes Pigm.* 2018. V. 149. P. 553–559.
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.09.073>
27. *Кручин С.О.* Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. Иваново: ИХР РАН, 2020. 24 с.; *Kruchin S.O.*, Author's abstracts of PhD thesis. Ivanovo: SCI RAS, 2020. 24 p.
28. *Березин Д.Б., Солодухин Т.Н., Шухто О.В. и др.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2018. Т. 67. № 7. С. 1273.
<https://doi.org/10.1007/s11172-018-2212-6>
29. *Шухто О.В., Худяева И.С., Бельх Д.В., Березин Д.Б.* // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 86.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216411.6500>
30. *Батов Д.В., Кустов А.В., Кручин С.О. и др.* // *Журн. структур. химии*. 2019. Т. 60. № 3. С. 461.
https://doi.org/10.26902/JSC_id39509
31. *Berezin D.B., Kustov A.V., Krestyaninov M.A., Batov D.V., Kukushkina N.V., Shukhto O.V.*, *J. Mol. Liq.* 2019. V. 283. P. 532–536.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.091>
32. *Berezin D.B., Makarov V.V., Znoyko S.A. et al.* // *Mend. Commun.* 2020. V. 30. № 5. P. 621.
<https://doi.org/10.1016/j.mencom.2020.09.023>
33. *Kustov A.V., Krestyaninov M.A., Kruchin S.O. et al.* // *Mend. Commun.* 2021. V. 31. № 1. P. 65.
<https://doi.org/10.1016/j.mencom.2021.01.019>
34. *Gerola A.P., Tsubone T.M., Santana A. et al.* // *J. Phys. Chem. B*. 2011. V. 115. № 22. P. 7364.
<https://doi.org/10.1021/jp201278b>
35. *Giovannetti R.* // *Nanotechnology and nanomaterials. Micro to nano spectroscopy*. Ed. by J. Uddin. Shanghai: In Tech., 2012. P. 87.
<https://doi.org/10.5772/38797>