

02

## Спектрально-люминесцентные свойства катионного водорастворимого комплекса Pd(II) с нильским красным

© В.А. Феоктистова<sup>1</sup>, Р.И. Байчурин<sup>1</sup>, Т.А. Новикова<sup>1</sup>, А.Ю. Плеханов<sup>2</sup>, М.В. Пузык<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГПУ им. А.И. Герцена,  
191186 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт гриппа им. А.А. Смородинцева,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: puzyk@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

В окончательной редакции 23.01.2023 г.

Принята к публикации 01.02.2023 г.

Разработана методика синтеза катионного водорастворимого комплекса Pd(II) с 9-диэтиламино-5*H*-бензо[*a*]феноксазин-5-оном (нильский красный) [PdEnNR]OAc (En — этилендиамин, NR — депротонированный нильский красный, OAc — внешнесферный ацетат-ион) и установлен положительный сольватохромизм его люминесцентных свойств. Исследовано влияние ДНК на спектрально-люминесцентные свойства [PdEnNR]OAc, в воде обнаружена интеркаляция комплекса в ДНК.

**Ключевые слова:** циклометаллированный комплекс Pd(II), нильский красный, люминесценция, интеркаляция комплекса Pd(II) в ДНК.

DOI: 10.21883/OS.2023.02.55018.4480-22

### Введение

Феноксазиновые красители эффективно поглощают свет в видимом диапазоне, интенсивно флуоресцируют в красной области спектра, а с начала 20-го века нашли применение в гистологии для обнаружения внутриклеточных липидов [1,2]. Нильский красный (HNR) — 9-диэтиламино-5*H*-бензо[*a*]феноксазин-5-он (рис. 1), бензоконденсированная гетероциклическая система, имеющая плоскостное строение, реагирует с Pt(II) и Pd(II) как циклометаллирующий лиганд, образуя семейство комплексов, флуоресцирующих в красной области. Смешанно-лигандные комплексы платиновых металлов с нильским красным в настоящее время исследуют в нескольких направлениях: с  $\beta$ -дикетонатами [3,4] (далее [Me(NR)O<sup>^</sup>O]) для использования в светодиодах типа OLED; димерные комплексы — как сенсоры на эндогенный СО в живых организмах (эмбрионы рыбок, мыши); с полиалкилированными основаниями Шиффа — как жидкокристаллические фотопроводники [5–7].

С 1960-х гг. идет поиск комплексов платиновых металлов, используемых как противораковые препараты, способные ковалентно связываться с ДНК. Розенбергом была открыта противоопухолевая активность *цис*-дихлородиамина Pt(II) (цисплатин) [8]. А с 1979 г. цисплатин стал важным компонентом химиотерапии для лечения некоторых онкологических заболеваний. К сожалению использование цисплатина ограничено серьезными побочными эффектами, сокращающими дозу, и врожденной или приобретенной лекарственной устойчивостью [9].

С середины 1970-х гг. Липпард с сотрудниками расширили область исследования противораковых препаратов в сторону нековалентного взаимодействия ДНК с интеркаляторами — платиновыми металлокомплексами с азотсодержащими лигандами (аммиак, этилендиамин, 2,2',2''-терпиридин, 1,10-фенантролин, 2,2'-бипиридил) [10]. Согласно полученным ими данным катионные комплексы Pt(II) с дииминными лигандами (2,2',2''-терпиридин, 1,10-фенантролин, 2,2'-бипиридил) эффективно интеркалируются в ДНК по правилу исключения ближайшего соседа: один комплекс на каждые две пары азотистых оснований. В качестве интеркалирующего стандартного вещества для нашего эксперимента мы выбрали хлорид (2,2'-бипиридил)этилендиамин Pt(II) (далее [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub>, рис. 1), интеркаляция которого в настоящее время доказана множеством инструментальных методов: рентгено-дифракционными, дифракцией упругих нейтронов, гель-электрофорезом, изотермической титриметрической калориметрией, ИК линейным дихроизмом, двумерным ЯМР [11,12].

Актуальность работ по изучению взаимодействия интеркаляторов с ДНК имеет огромное значение как для развития теоретических моделей биологических процессов (репликация и транскрипция), так и для разработки новых противоопухолевых агентов. Однако известные комплексы [Me(NR)O<sup>^</sup>O] плохо растворимы в воде [3,4]. Поэтому с целью исследования интеркаляции нами был синтезирован новый катионный водорастворимый комплекс палладия (II) — [PdEnNR]OAc (En — этилендиамин, NR — депротонированный нильский красный, OAc — внешнесферный ацетат-ион) (рис. 1). Наличие положительного заряда, ароматического лиганда и

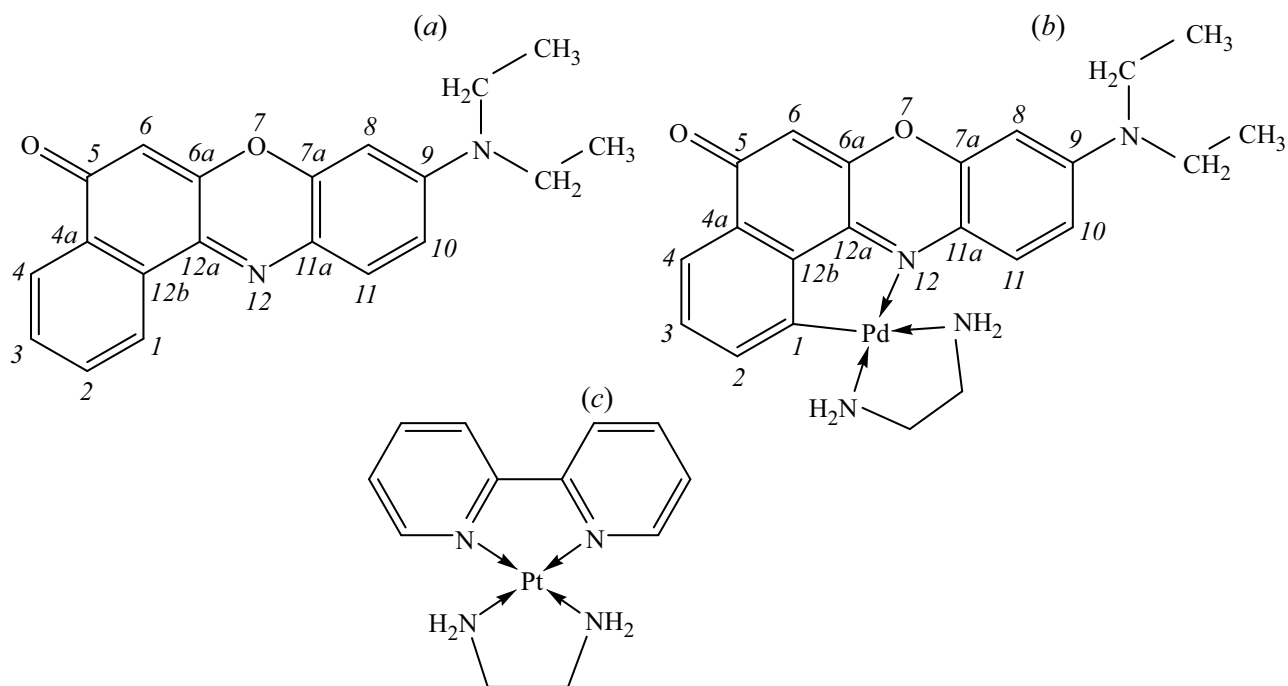


Рис. 1. Структурные формулы: (a) нильский красный, (b) [PdEnNR]<sup>+</sup>, (c) [PtEnBipy]<sup>2+</sup>.

плоскоквадратное строение комплекса согласно рекомендациям Липпарда [10] будет благоприятствовать взаимодействию [PdEnNR]OAc с отрицательно заряженной молекулой ДНК в растворе.

## Экспериментальная часть

9-диэтиламино-5*H*-бензо[*a*]феноксазин-5-он (HNR), ацетат палладия (PdOAc), этилендиамин (En), 2,2'-бипиридил (Bipy), тетрахлороплатинит калия (K<sub>2</sub>[PtCl<sub>4</sub>]), ледяная уксусная кислота и ДНК тимуса телёнка (коммерческие вещества Sigma-Aldrich, „Нева-реактив“) были использованы без дополнительной очистки. Все растворители очищали с использованием стандартных методик [13].

Циклометаллированный комплекс [PdEnNR]OAc получали в несколько стадий по методике, аналогичной синтезу комплексов Pd(II) [14,15]. Отличие, как правило, проявляется в цвете получаемых веществ. Вначале при слабом нагревании в ледяной уксусной кислоте (5 ml) растворяли ацетат палладия (21.6 mg, 9.6 · 10<sup>-5</sup> mol). Далее к полученному раствору добавляли нильский красный (HNR) (29.3 mg, 9.6 · 10<sup>-5</sup> mol) и наблюдали образование фиолетовой окраски. Затем смесь кипятили 180 min до появления однородной темно-синей окраски, после чего упаривали досуха. Полученный осадок [Pd(NR)(μ-OAc)]<sub>2</sub> растворяли в метаноле (10 ml) и прибавляли водный раствор этилендиамина (0.1 ml, 9.2 · 10<sup>-5</sup> mol), при этом наблюдали изменение окраски на светло-синюю. Смесь перемешивали 30 min при температуре 50°C. После испарения растворителя осадок

просушивали при 100°C. Масса продукта составила 20.8 mg, выход — 88%. Комплекс [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub> получали согласно методике [16].

## 9-диэтиламино-5*H*-бензо[*a*]-феноксазин-5-он (HNR)

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, ppm: 1.14 т (6H, CH<sub>3</sub>, <sup>3</sup>J 7.0 Hz), 3.48 к (4H, CH<sub>2</sub>, <sup>3</sup>J 7.0 Hz), 6.27 с (1H, H<sup>6</sup>), 6.65 д (1H, H<sup>8</sup>, <sup>4</sup>J 2.4 Hz), 6.81 д.д. (1H, H<sup>10</sup>, <sup>3</sup>J 9.1, <sup>4</sup>J 2.4 Hz), 7.60 д (1H, H<sup>11</sup>, <sup>3</sup>J 9.1 Hz), 7.69 т (1H, H<sup>2</sup>, (<sup>3</sup>J) = 7.4 Hz), 7.78 т.д (1H, H<sup>3</sup>, (<sup>3</sup>J) = 7.4, <sup>4</sup>J 1.0 Hz), 8.10 д (1H, H<sup>1</sup>, <sup>3</sup>J 7.4 Hz), 8.53 д (1H, H<sup>4</sup>, <sup>3</sup>J 8.0 Hz). Данные спектроскопии ЯМР <sup>1</sup>H соответствуют литературным [17].

Спектр ЯМР <sup>13</sup>C{<sup>1</sup>H}, δ, ppm: 12.99 (CH<sub>3</sub>), 45.00 (CH<sub>2</sub>), 96.55 (C<sup>8</sup>), 105.08 (C<sup>6</sup>), 110.84 (C<sup>10</sup>), 123.90 (C<sup>4</sup>), 124.77 (C<sup>11a</sup>), 125.58 (C<sup>1</sup>), 130.51 (C<sup>2</sup>), 131.50 (C<sup>11</sup>), 131.60 (C<sup>12b</sup>), 132.14 (C<sup>3</sup>, C<sup>4a</sup>), 138.80 (C<sup>12a</sup>), 146.98 (C<sup>7a</sup>), 151.39 (C<sup>9</sup>), 152.40 (C<sup>6a</sup>), 182.51 (C<sup>5</sup>).

## Ацетат 9-диэтиламино-5*H*-бензо[*a*]-феноксазин-5-онатоэтилендиаминпалладия (II)[PdEnNR]OAc

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, ppm: 1.15 т (6H, CH<sub>3</sub>, <sup>3</sup>J 7.0 Hz), 2.70 уш.с (4H, CH<sub>2</sub>N), 3.50 к (4H, CH<sub>2</sub>, <sup>3</sup>J 7.0 Hz), 4.64 уш.с (1H, NH), 5.57 уш.с (1H, NH), 6.27 с (1H, H<sup>6</sup>), 6.65–6.75 м (2H, H<sup>8</sup>, H<sup>10</sup>), 6.93 уш.с (1H, NH), 7.05 уш.с (1H, NH), 7.17 д (1H, H<sup>11</sup>, <sup>3</sup>J 8.8 Hz), 7.32 д (1H, H<sup>2</sup>,

$^3J$  7.4 Hz), 7.39 т (1H, H<sup>3</sup>,  $\langle^3J\rangle$  7.6 Hz), 7.65 д (1H, H<sup>4</sup>,  $^3J$  7.5 Hz).

Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ ,  $\delta$ , ppm: 13.01 (CH<sub>3</sub>), 45.09 (CH<sub>2</sub>), 44.60, 46.62 (NCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>N), 97.65 (C<sup>8</sup>), 106.80 (C<sup>6</sup>), 110.27 (C<sup>10</sup>), 121.30 (C<sup>4</sup>), 122.84 (C<sup>11a</sup>), 128.00 (C<sup>11</sup>), 130.20 (C<sup>3</sup>), 131.26 (C<sup>4a</sup>), 136.05 (C<sup>2</sup>), 144.18 (C<sup>12b</sup>), 148.18 (C<sup>7a</sup>), 150.48 (C<sup>12a</sup>), 150.97 (C<sup>9</sup>), 152.06 (C<sup>6a</sup>), 153.64 (C<sup>1</sup>), 184.15 (C<sup>5</sup>).

Спектр ИК (KBr),  $\nu$ , cm<sup>-1</sup>: 3309 (N-H), 1580, 1407, 1348, 1290, (C=C, C=N), 1637 (C=O).

Спектр поглощения в этаноле,  $\lambda_{\text{max}}$ , nm, (коэффициент экстинкции, l·mol<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>): 263 (13200), 299 (4050), 330 (4000), 443 (1800), 623 (13550).

Найдено, %: C 53.17; H 5.13; N 10.37. C<sub>24</sub>H<sub>28</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>Pd. Вычислено, %: C 53.89, H 5.24; N 10.48.

Спектральные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Физико-химические методы исследования нитросоединений, координационных, биологически активных веществ и наноструктурированных материалов“ Междисциплинарного ресурсного центра коллективного пользования „Современные физико-химические методы формирования и исследования материалов для нужд промышленности, науки и образования“ Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Спектры ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ ,  $^1\text{H}-^1\text{H}$  dqf-COSY,  $^1\text{H}-^1\text{H}$  NOESY,  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMQC и  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMBC регистрировали на спектрометре Jeol ECH400A с рабочими частотами 399.78 ( $^1\text{H}$ ) и 100.53 ( $^{13}\text{C}$ ); растворитель — ДМСО-*d*<sub>6</sub>. В качестве внутреннего стандарта использовали остаточные сигналы растворителя. Сигналы протонов интерпретировались по характеру расщепления (константам спин-спиновой взаимодействия). Спин-спиновая связь между протонами обнаруживалась по соответствующим кросс-пикам в спектрах  $^1\text{H}-^1\text{H}$  COSY. Для надежного отнесения протонов H<sup>8</sup>, H<sup>10</sup> использовались эксперименты  $^1\text{H}-^1\text{H}$  NOESY, а именно наличие соответствующих кросс-пиков с протонами метиленовой группы NCH<sub>2</sub>, обусловленные ядерным эффектом Оверхаузера. Сигналы протонированных атомов углерода в спектрах ЯМР  $^{13}\text{C}$  надежно относились по соответствующим кросс-пикам в спектрах  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMQC, а сигналы четвертичных (непротонированных) атомов углерода — по анализу кросс-пиков (гетероядерные КССВ через 2–3 связи) в спектрах  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMBC.

Инфракрасные спектры получены на фурье-спектрометре Shimadzu IRPrestige-21 в таблетках KBr. Элементный анализ проведен на анализаторе EuroVector EA3000 (CHN Dual). Электронные спектры поглощения — на СФ-2000 („ОКБ Спектр“, Санкт-Петербург, Россия). Люминесцентные исследования проводили при комнатной температуре на спектрофлуориметре Флюорат-02-Панорама (ГК „Люмэкс“, Санкт-Петербург, Россия).

Методика титрования комплексов [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub> и [PdEnNR]OAc водным раствором ДНК состояла в фиксировании спектров поглощения растворов комплексов

**Таблица 1.** Координационно индуцированные сдвиги (CIS, ppm) углерода

Углерод	C <sup>1</sup>	C <sup>2</sup>	C <sup>3</sup>	C <sup>4</sup>	C <sup>4a</sup>	C <sup>5</sup>	C <sup>6</sup>	C <sup>6a</sup>
CIS	28.06	5.54	-1.94	-2.60	-0.88	1.64	1.72	-0.34
Углерод	C <sup>7a</sup>	C <sup>8</sup>	C <sup>9</sup>	C <sup>10</sup>	C <sup>11</sup>	C <sup>11a</sup>	C <sup>12a</sup>	C <sup>12b</sup>
CIS	1.20	1.10	-0.42	-0.57	-3.50	-1.93	11.68	12.58

Pt(II) или Pd(II) (объем раствора комплекса — 2.5 ml, концентрация — 10<sup>-5</sup> mol·l<sup>-1</sup>) при последовательном добавлении по 10 μl раствора ДНК (3.2 mg ДНК растворили в 5 ml воды).

## Результаты и обсуждение

Комплекс [PdEnNR]OAc синтезирован согласно следующим уравнениям:

- 1) PdOAc<sub>2</sub> + 2AcOH = H<sub>2</sub>[PdOAc<sub>4</sub>],
- 2) 2H<sub>2</sub>[PdOAc<sub>4</sub>] + 2HNR = [Pd(NR)(μ-OAc)]<sub>2</sub> + 2AcOH,
- 3) [Pd(NR)(μ-OAc)]<sub>2</sub> + 2En = 2[PdEnNR]OAc.

Состав и строение [PdEnNR]OAc были подтверждены данными ИК, ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$  спектроскопии с привлечением гомоядерных ( $^1\text{H}-^1\text{H}$  COSY,  $^1\text{H}-^1\text{H}$  NOESY) и гетероядерных ( $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMQC,  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMBC) экспериментов, а также в сравнении с данными некоординированного HNR.

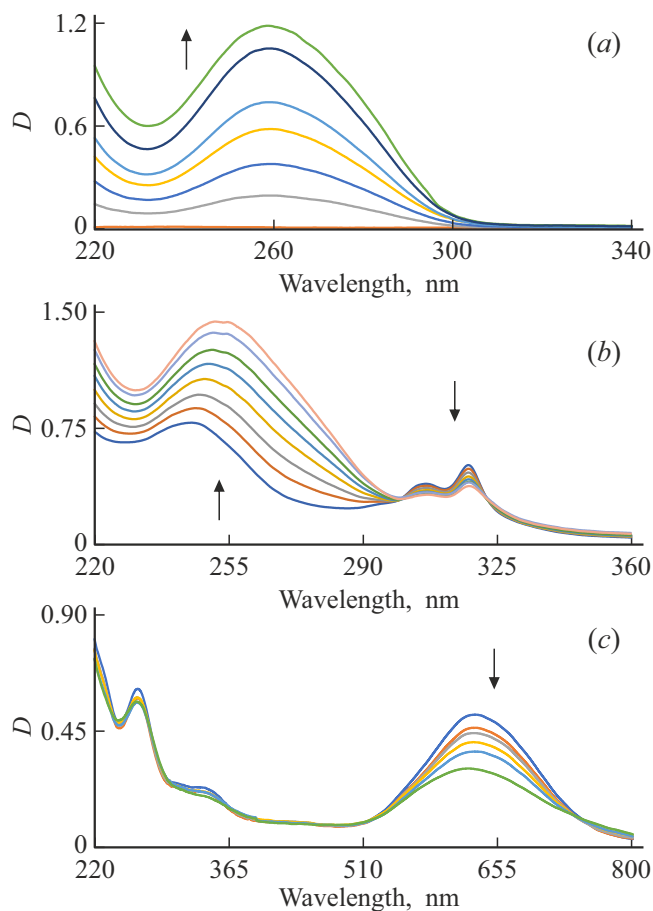
В табл. 1 представлены значения координационно индуцированного сдвига (CIS =  $\delta_{\text{комплекса}} - \delta_{\text{лиганда}}$ ), который рассчитывали как разность значений химических сдвигов ядер атомов углерода комплекса ( $\delta_{\text{комплекса}}$ ) и некоординированного лиганда — HNR ( $\delta_{\text{лиганда}}$ ). Из представленных данных видно, что расположенные ближе к атому палладия атомы углерода (C<sup>1</sup>, C<sup>2</sup>, C<sup>12a</sup>, C<sup>12b</sup>) имеют высокое значение CIS, указывающее на уменьшение электронной плотности на рассматриваемом атоме. Наибольшее значение CIS имеет атом углерода C<sup>1</sup>, подвергшийся депротонированию и образованию химической связи с палладием.

Электронные абсорбционные и эмиссионные свойства соединения HNR и комплекса рассмотрим в рамках теории локализованных молекулярных орбиталей [18]. Известно [19,20], что HNR обладает положительным сольватохромизмом, который проявляется в bathochromном смещении максимумов поглощения и флуоресценции при переходе от неполярного растворителя к полярному (табл. 2). Увеличение дипольного момента молекулы HNR при поглощении кванта света и переходе в возбужденное состояние обусловлено внутримолекулярным переносом заряда от amino-диэтильной группы к карбонильной: возбуждение молекулы сопровождается поворотом amino-диэтильной группы и выходом из плоскости хромофора. Положительный сольватохромизм характерен и для [PdEnNR]OAc (табл. 2). Сравнительно спектрально-люминесцентные свойства некоорди-

**Таблица 2.** Максимумы люминесценции (nm) HNR и [PdEnNR]<sup>+</sup> в некоторых растворителях (в скобках — полярность растворителя, kcal/mol [13], н/р — не растворим)

Комплекс	Бензол (54.0)	ДСМ (64.2)	Ацетон (65.7)	ДМФА (68.5)	ДМСО (71.1)	Этанол (81.2)	Метанол (83.6)	Вода (94.6)
HNR	576	603	613	626	634	639	638	н/р
[PdEnNR] <sup>+</sup>	н/р	675	680	687.5	697.5	700	703.5	719

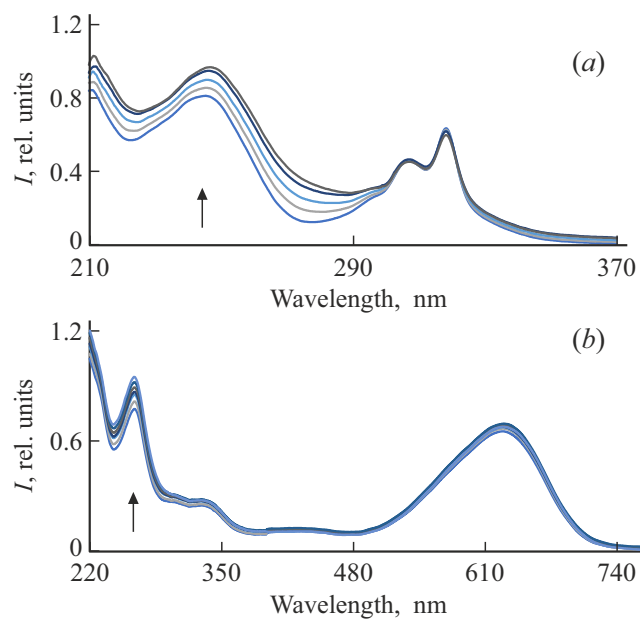
Примечание. ДСМ — дихлорметан, ДМФА — диметилформамид, ДМСО — диметилсульфоксид



**Рис. 2.** Изменения спектров поглощения водных растворов при возрастании концентрации ДНК: (a) вода, (b) [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub>, (c) [PdEnNR]OAc. Стрелки указывают направление изменения спектров при увеличении концентрации ДНК.

нированного лиганда (HNR) и известных комплексов [Me(NR)O<sup>+</sup>O] [3,4] со свойствами нового комплекса [PdEnNR]<sup>+</sup>, можно сделать вывод, что на них влияют как природа металла, так и донорно-акцепторные характеристики другого лиганда.

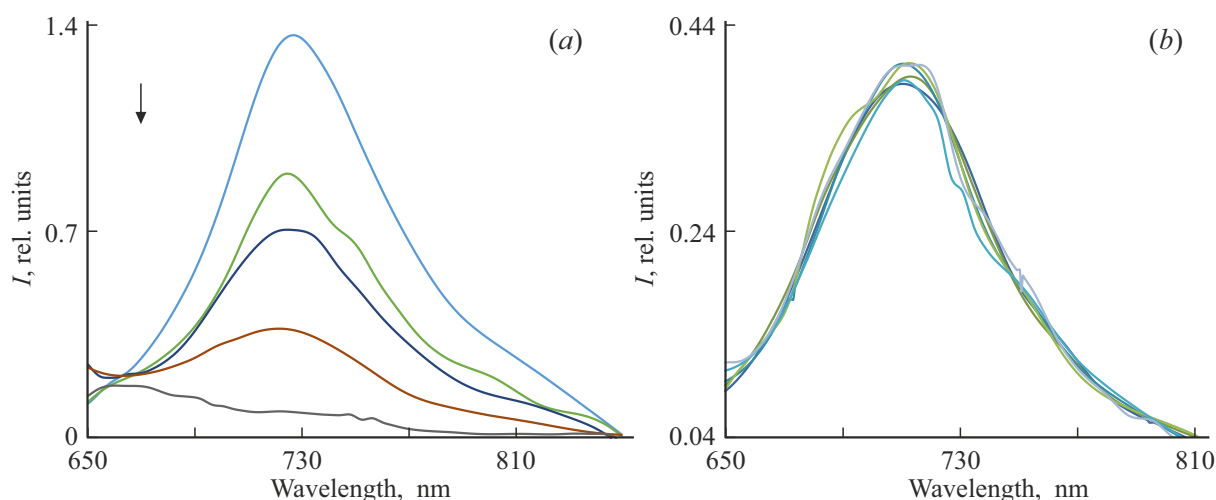
Спектры поглощения HNR характеризуются рядом спин-разрешённых внутрелигандных переходов различной интенсивности. Положение длинноволновой полосы зависит от полярности растворителя, а в комплексах —



**Рис. 3.** Изменения спектров поглощения водно-этанольных растворов при возрастании концентрации ДНК: (a) [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub>, (b) [PdEnNR]OAc. Стрелки указывают направление изменения спектров при увеличении концентрации ДНК.

от природы металла и другого лиганда. Это обусловлено перенос-зарядным характером этого перехода и частичным примешиванием электронной плотности металл-комплексобразователя (Pt(II) или Pd(II)) [3,4]. При исследовании интеркаляции комплекса [PdEnNR]OAc в ДНК было установлено снижение оптической плотности именно длинноволновой части спектра, которая ответственна за внедрение этой части молекулы в спираль ДНК.

Сравнение изменений в спектрах поглощения (рис. 2) выбранного нами стандарта [PtEnBipy]Cl<sub>2</sub> и нового комплекса — [PdEnNR]OAc, вызванных титрованием раствором ДНК, позволяет выявить несколько схожих элементов. Первое: увеличение концентрации ДНК в растворе приводит к увеличению оптической плотности раствора в области поглощения азотистых оснований ДНК (260 nm). Второе: оптическая плотность длинноволнового перехода внутрелигандного типа, локализованного на Bipy и NR, снижается. Третье: в спектрах



**Рис. 4.** Изменение спектров люминесценции комплекса [PdEnNR]OAc при возрастании концентрации ДНК: *a* — в воде, *b* — в 65%-растворе этанола.

поглощения комплексов появляются изосбестические точки, указывающие на один продукт реакции — интеркалят, состоящий из ДНК и внедрившихся в нее катионов комплекса Pt(II) или Pd(II). Однако после того, как все катионы комплексов из раствора внедряются в ДНК, очередная добавка раствора ДНК приводит к нарушению изосбестических точек.

Замена воды на 65%-водный этанол (рис. 3) привела к частичному воспроизведению в спектрах поглощения ранее наблюдаемых эффектов: увеличению оптической плотности растворов лишь в области поглощения азотистых оснований ДНК ( $\sim 260$  nm). Длинноволновые полосы поглощения (для [PtEnVipy]Cl<sub>2</sub> 305–318 nm, для [PdEnNR]OAc 622 nm) при увеличении концентрации ДНК не изменяли свою оптическую плотность. Это обусловлено тем, что в воде при интеркарировании комплексной частицы в ДНК происходит частичное экранирование ароматического гетероциклического лиганда (Vipy или NR), а в растворе этанола этого не происходит.

При титровании водного раствора [PdEnNR]OAc раствором ДНК в спектре флуоресценции (рис. 4) наблюдали снижение интенсивности флуоресценции, аналогичное спектру поглощения комплекса. Смена растворителя (воды на 65%-этанольный раствор) не привела к изменению спектров флуоресценции комплекса.

Таким образом, получение водорастворимого катионного комплекса [PdEnNR]OAc позволило изучить его интеркаляцию (межмолекулярное взаимодействие с ДНК) спектрально-люминесцентными методами. Наличие плоского ароматического лиганда нильского красного в [PdEnNR]OAc и бипиридила в [PtEnVipy]Cl<sub>2</sub> способствует встраиванию комплексов между соседними парами азотистых оснований двойной спирали ДНК в воде, тем самым обуславливая стэкинг за счет  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействия.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства просвещения России (проект № FSN-2020-0026).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] J.F. Thorpe. *J. Chem. Soc.*, **91**, 324 (1907). DOI: 10.1039/CT9079100324
- [2] P. Greenspan, E.P. Mayer, S.D. Fowler. *J. Cell Biology*, **100** (3), 965 (1985). DOI: 10.1083/jcb.100.3.965
- [3] M. La Deda, M. Ghedini, I. Aiello, T. Pugliese, F. Barigelletti, G. Accorsi. *J. Organomet. Chem.*, **690**(4), 857 (2005). DOI: 10.1016/j.jorganchem.2004.10.028
- [4] T. Pugliese, N. Godbert, I. Aiello, M. La Deda, M. Ghedini, M. Amati, S. Belviso, F. Lejl. *Dalton Trans.*, 6563 (2008). DOI: 10.1039/b810561h
- [5] K. Liu, X. Kong, Y. Ma, W. Lin. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **56** (43), 13489 (2017). DOI: 10.1002/anie.201707518
- [6] D. Madea, M. Martínek, L. Muchová, J. Váňa, L. Vítek, P. Klán. *J. Org. Chem.*, **85** (5), 3473 (2020). DOI: 10.1021/acs.joc.9b03217
- [7] A. Ionescu, N. Godbert, A. Crispini, R. Termine, A. Golemme, M. Ghedini. *J. Mater. Chem.*, **22** (44), 23617 (2012). DOI: 10.1039/C2JM34946A
- [8] B. Rosenberg, L. VanCamp, J.E. Trosko, V.H. Mansour. *Nature*, **222**, 385 (1969). DOI: 10.1038/222385a0
- [9] C.R. Brodie, J.G. Collins, J.R. Aldrich-Wright. *Dalton Trans.*, 1145 (2004). DOI: 10.1039/b316511f
- [10] S.J. Lippard. *Accounts of Chem. Res.*, **11** (5), 211 (1978). DOI: 10.1021/ar50125a006
- [11] S.A. Lee, H. Grimm, W. Pohle, W. Scheiding, L. van Dam, Z. Song, M.H. Levitt, N. Korolev, A. Szabó, A. Rupprecht. *Phys. Rev. E*, **62** (5), 7044 (2000). DOI: 10.1103/physreve.62.7044

- [12] A. Szabo, S.A. Lee. *J. Biomolec. Struct. Dynamics*, **26** (1), 93 (2008). DOI: 10.1080/07391102.2008.10507227
- [13] А. Гордон, Р. Форд. *Спутник химика* (Мир, М., 1976), с. 438–444. [A.J. Gordon, R.A. Ford. *The Chemist's Companion: A Handbook of Practical Data, Techniques, and References* (1st Edition. 1976)].
- [14] Е.А. Катленок, М.В. Пузык, К.П. Балашев. *ЖОХ*, **81** (8), 1367 (2011). [E.A. Katlenok, M.V. Puzyk, K.P. Balashev. *Rus. J. Gen. Chem.*, **81** (8), 1711 (2011). DOI: 10.1134/S1070363211080214]
- [15] Р.И. Байчурин, И.Т. Дуланова, А.М. Пузык, М.В. Пузык. *Опт. и спектр.*, **129** (11), 1387 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.11.51637.2253-21
- [16] М.В. Пузык, М.А. Иванов, К.П. Балашев. *Опт. и спектр.*, **95** (4), 624 (2003). [M.V. Puzyk, M.A. Ivanov, K.P. Balashev. *Opt. Spectrosc.*, **95** (4), 581 (2003). DOI: 10.1134/1.1621442].
- [17] Ю.Е. Москаленко, А.Ю. Меньшикова, Н.Н. Шевченко, В.В. Фараонова, А.В. Грибанов. *Хим. высоких энергий*, **45** (3), 214 (2011). [Yu.E. Moskalenko, A.Yu. Men'shikova, N.N. Shevchenko, V.V. Faraonova, A.V. Gribanov. *High Energy Chem.*, **45** (3), 183 (2011). DOI: 10.1134/S0018143911030118].
- [18] M. Ghedini, I. Aiello, A. Crispini, A. Golemme, M. La Deda, D. Pucci. *Coord. Chem. Rev.*, **250** (11–12), 1373 (2006). DOI: 10.1016/j.ccr.2005.12.011
- [19] J.F. Deye, T.A. Berger, A.G. Anderson. *Anal. Chem.*, **62** (6), 615 (1990). DOI: 10.1021/ac00205a015
- [20] N. Sarkar, K. Das, D.N. Nath, K. Bhattacharyya. *Langmuir*, **10** (1), 326 (1994). DOI: 10.1021/la00013a04