

Д. С. Копчук^{1,2}, А. Ф. Хасанов¹, И. С. Ковалев¹, Г. А. Ким^{1,2},
И. Л. Никонов¹, Г. В. Зырянов^{1,2*}, В. Л. Русинов^{1,2}, О. Н. Чупахин^{1,2}

(БЕНЗО[*h*])ХИНОЛИНИЛМОНОАЗАТРИФЕНИЛЕНА: СИНТЕЗ И ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Предложен метод синтеза хинолинил- и бензо[*h*]хинолинилмоноазатрифениленов через стадию получения 1,2,4-триазиновых предшественников с последующей трансформацией в аза-реакции Дильса–Альдера. Изучены фотофизические свойства новых соединений, проведён анализ влияния на них аннелирования дополнительных ароматических циклов.

Ключевые слова: моноазатрифенилен, фенантренхинон, аза-реакция Дильса–Альдера, гетероциклизация, люминесценция.

Производные азатрифенилена представляют значительный интерес за счёт своих перспективных фотофизических свойств, связанных с большим временем жизни возбуждённого состояния флуоресценции, батохромным сдвигом значений максимумов абсорбции и эмиссии по сравнению с трифениленом, а также координационно-химических свойств. Азатрифенилены широко используются для получения фотолюминесцентных *N,N'*-металлированных [1] и циклометаллированных [2] комплексов. В биохимических исследованиях азатрифенилены представляют интерес в качестве нейтральных интеркалирующих лигандов для изучения структур ДНК [3, 4]. Присутствие фрагментов 2-азатрифенилена в ряде природных соединений [5–7] обуславливает интерес к поиску среди них соединений с потенциальной биологической активностью: противовоспалительной, противоопухолевой и др. В химии материалов азатрифенилены перспективны для создания на их основе дискотических жидких кристаллов [8] и супрамолекулярных архитектур [9], а также хемосенсоров для визуального (фотолюминесцентного) детектирования алифатических и ароматических нитросоединений (взрывчатых веществ) [10].

Среди азатрифениленов особый интерес представляют пиридилзамещённые, поскольку они являются полиаренаннелированными лигандами 2,2'-бипиридинового типа с широкими возможностями для их дальнейшей функционализации, однако к настоящему времени представлен только один метод синтеза данных соединений [11]. Ранее в ряду 2,2'-бипиридинов была показана возможность настройки фотофизических свойств (длинноволнового смещения максимумов поглощения и люминесценции, квантового выхода люминесценции) за счёт введения в пиридиновый цикл различных ароматических заместителей, в том числе путём аннелирования дополнительных ароматических колец [12–15], что делает такие бипиридины более интересными с точки зрения практического использования. Кроме этого, расширение системы сопряжения усиливает межмолекулярные π - π -взаимодействия, необходимые для ряда процессов (например, для межмолекулярной миграции экситона при фотовозбуждении), а изменение геометрии фрагмента ключевого пиридинового лиганда позволяет рассчитывать на наличие селективного связывания определённых катионов металлов (например преимущественное комплексо-

образование с катионами Zn^{2+} , Ca^{2+} в присутствии Cd^{2+} или селективное связывание катионов Am^{3+} из растворов лантаноидов [16]). В данной статье мы предлагаем метод синтеза лигандов 2,2'-бипиридинового типа моноазатрифениленового ряда с расширенной системой сопряжения за счёт пиридиновой составляющей, а именно содержащих фрагменты 2-хинолина и 2-бензо[*h*]хинолина.

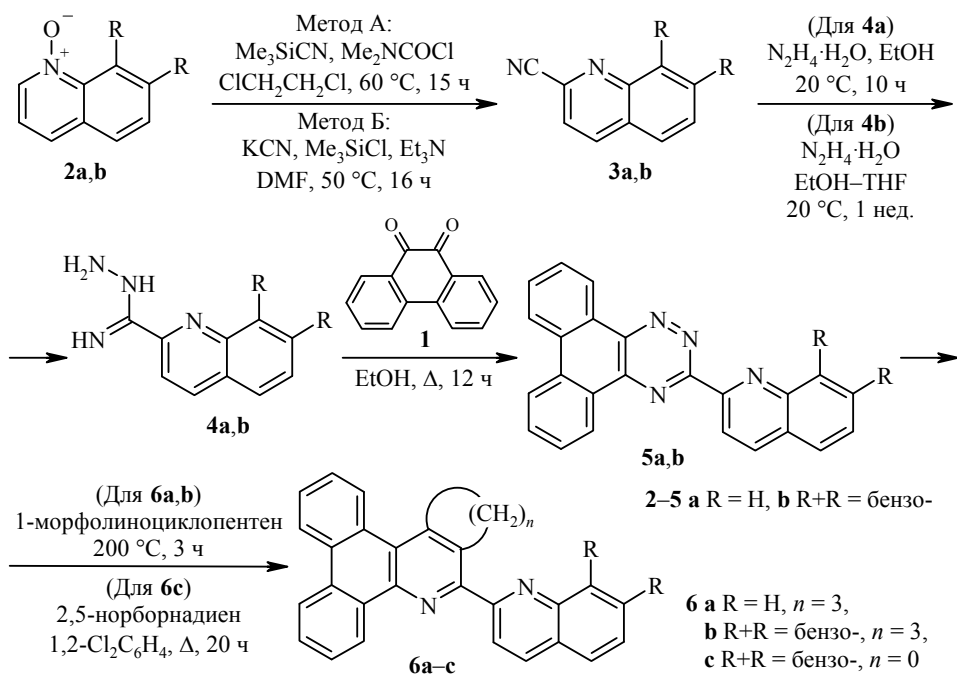
С целью получения пиридилмоноазатрифениленов ранее нами был использован метод, основанный на получении их 1,2,4-триазиновых аналогов с дальнейшей аза-реакцией Дильса–Альдера с енаминами. Данная методика синтеза различных производных пиридина известна уже продолжительное время [17–19], однако имеется лишь небольшое количество примеров получения таким образом хинолинилпиридинов [20], и отсутствуют примеры получения бензо[*h*]хинолинилпиридинов. Для синтеза 3-(хинолин-2-ил)-1,2,4-триазинов ранее были предложены циклизация гидразонов изонитрозоацетофенонов с хинолин-2-альдегидом [20], взаимодействие гидразида хинолин-2-карбоновой кислоты с 1,2-дионом с последующей реакцией с аммиаком [21], а также взаимодействие 1,2-дионов с хинолин-2-карбоксамидразоном [22]. Кроме этого, описано получение 3-(хинолин-2-ил)-1,2,4-триазин-5-онов циклизацией хинолин-2-карбоксамидразона и производных глиоксалевоы кислоты [23]. 3-(Бензо[*h*]хинолин-2-ил)-1,2,4-триазины в литературе не описаны, имеется лишь несколько методов получения 2-(бензо[*h*]хинолин-2-ил)пиридинов. В частности, предложено применение конденсации Фриландера [24], метода Крёнке [25], а также конденсации α -нафтизатина с производными ацетилпиридина [26, 27].

Для получения необходимых 1,2,4-триазиновых предшественников целевых структур нами было использовано взаимодействие 9,10-фенантренихинона (**1**) и соответствующих амидразонов. Для синтеза необходимых амидразонов в качестве исходных соединений были использованы хинолин-*N*-оксид (**2a**) и бензо[*h*]хинолин-*N*-оксид (**2b**) [28].

Реакция цианирования *N*-оксидов **2a,b** была выполнена по модифицированной литературной методике [29] с применением триметилсилилцианида и диметилкарбамоилхлорида. В качестве растворителя мы использовали 1,2-дихлорэтан вместо дихлорметана, предложенного в работе [29]. Было обнаружено, что данная замена растворителя приводит к полной конверсии исходных *N*-оксидов **2a,b** в нитрилы **3a,b** в отличие от ранее предложенного варианта.

Кроме этого, нами была опробована альтернативная методика получения цианосоединений **3a,b**, которая предполагает использование KCN и триметилсилилхлорида в ДМФА в присутствии триэтиламина (получение Me_3SiCN *in situ*). Следует отметить, что данные реагенты являются значительно более дешёвыми по сравнению с триметилсилилцианидом и диметилкарбамоилхлоридом, а выходы соединений **3a,b** в обоих случаях сопоставимы.

Хинолин-2-карбоксамидразон **4a** был получен по методике [22]. Соответствующий бензо[*h*]хинолиновый амидразон **4b** в литературе не описан. Методика его получения значительно отличается от таковой для 2-цианопиридина или 2-цианохинолина, а именно: требуется многодневное взаимодействие при комнатной температуре 2-цианобензо[*h*]хинолина с избытком гидразингидрата вследствие крайне низкой скорости протекания процесса. Реакцию проводили в смеси этанола и ТГФ (1:1) по причине низкой растворимости исходного соединения в этаноле.



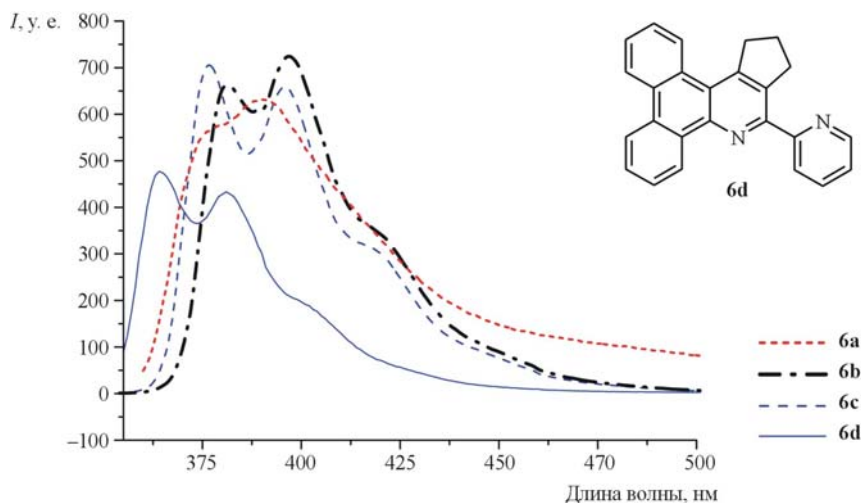
Реакции гетероциклизации проводили при кипячении смеси 9,10-фенантренхинона (**1**) и amidrazонов **4a,b** в этаноле. При охлаждении реакционной смеси наблюдается образование осадков соединений **5a,b**, что значительно облегчает процедуру их выделения.

Аза-реакция Дильса–Альдера с использованием 1-морфолиноциклопентена в качестве диенофила позволяет получить аннелированные с циклопентановым циклом лиганды 2,2'-бипиридинового типа **6a,b**. Реакцию проводили по описанной ранее эффективной методике (нагревание 1,2,4-триазина с енамином при 200 °С без растворителя [30]). Обработка реакционной смеси ацетонитрилом приводит к образованию осадков соединений **6a,b**, что позволяет исключить использование колоночной хроматографии для их очистки. Получение моноазатрифениленов без аннелированного циклопентанового цикла возможно при использовании в качестве диенофила 2,5-норборнадиена (с получением *in situ* продукта аза-циклоприсоединения по Дильсу–Альдеру и последующим ретро-распадом с элиминированием молекулы азота) при использовании 1,2-дихлорбензола как высококипящего растворителя в результате многочасового кипячения. При применении более низкокипящего *o*-ксилола выход соединения **6с** не превышал 5% даже в результате очень длительного кипячения.

Таким образом, применение 1-морфолиноциклопентена в качестве диенофила более предпочтительно, тем более что моноазатрифенилены с аннелированными циклоалкановыми циклами обычно обладают лучшей растворимостью по сравнению с соединениями, не имеющими данного фрагмента, то есть более интересны с точки зрения практического применения.

Структура полученных соединений **5a,b**, **6a–c** подтверждается данными спектроскопии ЯМР ^1H и ^{13}C , масс-спектрометрии и элементного анализа.

В ходе работы были изучены фотофизические характеристики новых моноазатрифениленов в сравнении с ранее описанным нами 10-(пиридин-2-ил)-12,13-дигидро-11*H*-дibenзо[*f,h*]циклопента[*c*]хинолином (**6d**) [11]. Спектры люминесценции соединений **6a–d** приведены на рисунке, результаты обобщены в таблице. Аннелирование дополнительных ароматических



Спектры флуоресценции моноазатрифениленов **6a–d**

Фотофизические характеристики соединений **6a–d**

Соединение	Максимумы поглощения в ацетонитриле, нм	Максимум люминесценции в ацетонитриле, нм	Квантовый выход люминесценции*
6a	263, 330, 343, 361	389	0.031
6b	253, 329, 348, 368	381, 397, 421 (пл.)	0.523
6c	251, 332, 348, 368	377, 396, 418 (пл.)	0.390
6d	263, 313, 339, 357	364, 381, 403 (пл.)	0.213

* Квантовые выходы определены относительно сульфата хинина ($\Phi = 0.546$ в 0.1 н. водном растворе H_2SO_4 [28]) для соединений **6a, b, d** и 2-аминопиридина ($\Phi = 0.60 \pm 0.005$ в 1 н. водном растворе H_2SO_4 [32]) для соединения **6c**.

колец к пиридиновому фрагменту во всех случаях привело к батохромному смещению максимумов поглощения и испускания. При этом происходит значительное увеличение квантового выхода люминесценции соединений **6b, c** в сравнении с азатрифениленом **6d**, особенно в случае продукта **6b**. Низкий квантовый выход соединения **6a**, по-видимому, связан с существенным вкладом безызлучательного перехода $n \rightarrow \pi^*$ в возбуждённое состояние, обуславливающее низкую интенсивность фотолюминесценции [31].

Таким образом, в данной работе предложены удобные методы получения неописанных ранее представляющих практический интерес лигандов 2,2'-би-пиридинового типа – моноазатрифениленов, содержащих в положении 2 фрагменты хинолина и бензо[*h*]хинолина. Расширение системы сопряжения в данном случае представляет интерес в качестве инструмента настройки свойств соединений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК спектры записаны на фурье-спектрометре Bruker Alpha с приставкой НПВО (ZnSe). Спектры поглощения записаны на спектрофотометре Shimadzu UV-2401PC в ацетонитриле. Спектры люминесценции записаны на флуориметре Varian Cary Eclipse в ацетонитриле. Спектры ЯМР 1H и ^{13}C зарегистрированы на спектрометре Bruker Avance II (400 и 100 МГц соответственно) в $CDCl_3$, внутренний стандарт TMS. Масс-спектры записаны на масс-спектрометре серии MicroTOF-Q II Bruker Daltonics, ионизация электрораспылением. Элементный анализ выполнен на CHN-анализаторе модели PE 2400, серия II фирмы Perkin Elmer. Температуры плавления определены на приборе Voetius. ТСХ выполнена на пластинах Merck silica gel 60F254, проявление в УФ свете.

Хинолин-*N*-оксид (**2a**) приобретён в компании Sigma-Aldrich. Бензо[*h*]хинолин-*N*-оксид (**2b**) [28] и гидразон амида хинолин-2-карбоновой кислоты **4a** [22] получены по описанным методам.

Получение нитрилов 3a,b (общая методика). А. В 50 мл 1,2-дихлорэтана растворяют 7.0 ммоль *N*-оксида **2a,b**. Добавляют 0.96 мл (7.7 ммоль) Me₃SiCN и 0.65 мл (7.0 ммоль) диметилкарбамоилхлорида и перемешивают при 60 °С в течение 15 ч. Реакционную смесь охлаждают, промывают раствором Na₂CO₃, затем H₂O, экстрагируют CH₂Cl₂ (3 × 50 мл). Экстракт сушат над безв. Na₂SO₄, растворители отгоняют в вакууме. Остаток обрабатывают Et₂O, осадок отфильтровывают и сушат. Полученные нитрилы **3a,b** используют в следующей стадии без дополнительной очистки.

Б. В 50 мл сухого ДМФА растворяют 7.0 ммоль *N*-оксида **2a,b**. Добавляют 1.07 мл (7.7 ммоль) Et₃N, 1.37 г (21.0 ммоль) KCN, а затем по каплям 3.55 мл (28.0 ммоль) Me₃SiCl. Полученную смесь перемешивают при 50 °С в течение 8 ч. После этого добавляют 0.91 г (14.0 ммоль) KCN, а затем по каплям 2.37 мл (18.7 ммоль) Me₃SiCl, полученную смесь перемешивают при 50 °С ещё 8 ч, охлаждают до комнатной температуры, добавляют 100 мл H₂O и перемешивают 1 ч. Образовавшийся осадок отфильтровывают, промывают H₂O, сушат. Полученные нитрилы **3a,b** используют в следующей стадии без дополнительной очистки.

Хинолин-2-карбонитрил (3a). Выход 0.98 г (91%, метод А), 0.82 г (76%, метод Б), бесцветные кристаллы, т. пл. 91–93 °С (т. пл. 88–91 °С [33]). Спектральные данные соответствуют литературным [33].

Бензо[*h*]хинолин-2-карбонитрил (3b). Выход 1.21 г (85%, метод А), 1.01 г (71%, метод Б), бесцветные кристаллы, т. пл. 162–164 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 7.72 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-6); 7.78–7.82 (2H, м); 7.85 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-5); 7.92–7.97 (2H, м); 8.29 (1H, д, ³*J* = 7.9, H-3); 9.28–9.32 (1H, м, H-4). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 205 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 82.16; Н 3.87; N 13.55. С₁₄H₈N₂. Вычислено, %: С 82.34; Н 3.95; N 13.72.

Гидразон амида бензо[*h*]хинолин-2-карбоновой кислоты (4b). В 100 мл смеси EtOH–ТГФ (1:1) растворяют 0.50 г (2.45 ммоль) нитрила **3b**. Добавляют 1.19 мл (24.50 ммоль) N₂H₄·H₂O и выдерживают полученную смесь при комнатной температуре 1 неделю. Растворители отгоняют в вакууме, остаток обрабатывают эфиром, осадок отфильтровывают. Соединение используют на следующей стадии без дополнительной очистки. Выход 0.52 г (90%). Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 5.54 (2H, уш. с, NH₂); 7.68–7.78 (3H, м); 7.83 (1H, д, ³*J* = 8.8); 7.91–7.95 (1H, м); 8.18 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-5); 8.27 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-6); 9.29–9.31 (1H, м, H-4). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 237 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 70.92; Н 4.89; N 23.49. С₁₄H₁₂N₄. Вычислено, %: С 71.17; Н 5.12; N 23.71.

Получение триазтрифениленов 5a,b (общая методика). В 50 мл EtOH растворяют 0.25 г (1.2 ммоль) 9,10-фенантренхинона (**1**). Добавляют раствор 1.44 ммоль амидраза **4a,b** в 30 мл EtOH, перемешивают при кипячении в течение 12 ч, охлаждают до комнатной температуры. Осадок отфильтровывают, промывают EtOH, сушат.

3-(Хинолин-2-ил)фенантро[9,10-*e*][1,2,4]триазин (5a). Выход 0.25 г (58%), светло-жёлтые кристаллы, т. пл. >250 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 7.65–7.69 (1H, м); 7.81–7.99 (6H, м); 8.46–8.50 (2H, м); 8.64–8.68 (2H, м); 8.99 (1H, д, ³*J* = 8.8, H-4 хинолин); 9.58–9.62 (2H, м, H-1,9). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м. д.: 121.1; 123.1; 125.4; 127.1; 127.2; 127.6; 127.9; 128.2; 128.7; 128.8; 129.1; 130.0; 130.6; 131.0; 131.1; 131.5; 132.5; 132.6; 134.0; 137.2; 148.6; 153.6; 160.7; 161.2. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 359 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 80.22; Н 3.83; N 15.29. С₂₄H₁₄N₄. Вычислено, %: С 80.43; Н 3.94; N 15.63.

3-(Бензо[*h*]хинолин-2-ил)фенантро[9,10-*e*][1,2,4]триазин (5b). Выход 0.32 г (66%), светло-жёлтые кристаллы, т. пл. 255–257 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 7.74–7.98 (9H, м); 8.44 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-6 бензохинолин); 8.61–8.65 (2H, м); 9.10 (1H, д, ³*J* = 8.4, H-5 бензохинолин); 9.58–9.62 (2H, м, H-1,8); 9.73 (1H, д, ³*J* = 8.0, H-4 бензохинолин). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м. д.: 122.1; 123.2; 123.3; 125.2; 125.4; 125.5; 127.2; 127.5; 127.6; 127.7; 128.0; 128.2; 128.4; 128.8; 128.9; 129.5; 131.2; 131.6; 132.1; 132.7; 134.0; 134.1; 137.0; 143.6; 145.6; 147.1; 152.0; 161.2. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %):

409 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 82.11; Н 3.81; N 13.49. C₂₈H₁₆N₄. Вычислено, %: С 82.34; Н 3.95; N 13.72.

Получение моноазатрифениленов 6a,b (общая методика). Смесь 0.70 ммоль триазатрифенилена **5a,b** и 0.56 мл (3.50 ммоль) 1-морфолиноциклопентена перемешивают при 200 °С в атмосфере аргона в течение 2 ч. Затем добавляют ещё 0.28 мл (1.75 ммоль) 1-морфолиноциклопентена и перемешивают в течение 1 ч при тех же условиях. Реакционную смесь охлаждают до комнатной температуры и добавляют 15 мл MeCN. Полученную смесь кипятят 10 мин, образующийся осадок отфильтровывают, промывают MeCN, сушат. Аналитический образец получают перекристаллизацией из MeCN.

10-(Хинолин-2-ил)-12,13-дигидро-11H-дибензо[*fh*]циклопента[*c*]хинолин (6a). Выход 0.24 г (87%), светлые кристаллы, т. пл. 190–192 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 2.28–2.32 (2H, м, 12-CH₂); 3.78 (2H, т, ³*J* = 7.2, 11-CH₂); 3.85 (2H, т, ³*J* = 7.2, 13-CH₂); 7.88–7.92 (1H, м); 8.19–8.23 (1H, м); 8.34–8.38 (1H, м); 8.60–8.64 (1H, м); 8.67–8.75 (2H, м); 8.89 (1H, д, ³*J* = 8.4, Н-4 хинолин); 9.56–9.60 (1H, м, Н-8). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м. д.: 26.0; 33.6; 37.4; 121.3; 122.4; 123.3; 123.4; 126.1; 126.6; 126.7; 127.2; 127.3; 127.6; 127.7; 127.8; 128.3; 129.2; 129.9; 130.1; 130.8; 131.1; 131.8; 136.0; 139.7; 144.9; 147.7; 150.1; 152.0; 158.6. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 397 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 87.81; Н 4.94; N 6.87. C₂₉H₂₀N₂. Вычислено, %: С 87.85; Н 5.08; N 7.07.

10-(Бензо[*h*]хинолин-2-ил)-12,13-дигидро-11H-дибензо[*fh*]циклопента[*c*]хинолин (6b). Выход 0.27 г (85%), светлые кристаллы, т. пл. 235–237 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 2.36–2.40 (2H, м, 12-CH₂); 3.81 (2H, т, ³*J* = 7.2, 11-CH₂); 4.05 (2H, т, ³*J* = 7.2, 13-CH₂); 7.65–7.88 (8H, м); 7.93–7.97 (1H, м); 8.38 (1H, д, ³*J* = 8.6, Н-6 бензохинолин); 8.61–8.65 (1H, м); 8.69–8.73 (2H, м); 9.12 (1H, д, ³*J* = 8.6, Н-5 бензохинолин); 9.44 (1H, д, ³*J* = 8.0, Н-4 бензохинолин); 9.60–9.62 (1H, м, Н-8). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м. д.: 26.3; 34.4; 37.4; 121.8; 122.4; 123.2; 123.3; 124.9; 125.4; 125.8; 126.2; 126.6; 127.0; 127.2; 127.4; 127.8; 127.9; 128.0; 128.3; 130.2; 130.9; 131.2; 131.9; 132.2; 133.9; 136.0; 139.4; 144.9; 145.7; 147.3; 150.1; 152.1; 157.1. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 447 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 88.55; Н 4.79; N 6.03. C₃₃H₂₂N₂. Вычислено, %: С 88.76; Н 4.97; N 6.27.

2-(Бензо[*h*]хинолин-2-ил)дибензо[*fh*]хинолин (6c). В 30 мл 1,2-дихлорбензола суспендируют 0.13 г (0.31 ммоль) триазатрифенилена **5a**. Добавляют 0.16 мл (1.53 ммоль) 2,5-норборнадиена и кипятят в течение 20 ч, добавляя по 0.16 мл (1.53 ммоль) 2,5-норборнадиена через каждые 5 ч. Реакционную смесь охлаждают до комнатной температуры, выпавший осадок отфильтровывают, промывают EtOH, сушат. Аналитический образец получают перекристаллизацией из *o*-ксилола. Выход 0.27 г (85%), светлые кристаллы, т. пл. 273–275 °С. Спектр ЯМР ¹H, δ, м. д. (*J*, Гц): 7.71–7.90 (8H, м); 7.94–7.98 (1H, м); 8.40 (1H, д, ³*J* = 8.4, Н-6 бензохинолин); 8.65–8.74 (3H, м); 9.10 (1H, д, ³*J* = 8.8, Н-3); 9.17 (1H, д, ³*J* = 8.4, Н-5 бензохинолин); 9.23 (1H, д, ³*J* = 8.8, Н-4); 9.60 (1H, д, ³*J* = 8.0, Н-4 бензохинолин); 9.62–9.66 (1H, м, Н-12). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 407 [M+H]⁺ (100). Найдено, %: С 88.52; Н 4.28; N 6.71. C₃₀H₁₈N₂. Вычислено, %: С 88.65; Н 4.46; N 6.89.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (ГК 8430), Совета по грантам Президента РФ (грант МК-1511.2013.3), а также программы 211 Правительства РФ (соглашение № 02.A03.21.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. H. Bakker, M. Goes, N. Hoebe, H. J. van Ramesdonk, J. W. Verhoeven, M. H. V. Werts, J. W. Hofstraat, *Coord. Chem. Rev.*, **208**, 3 (2000).
2. C.-H. Cheng, J.-L. Wu, C.-Y. Liao, US Pat. Appl. 2010327736.
3. C. W. Lim, O. Tissot, A. Mattison, M. W. Hooper, J. M. Brown, A. R. Cowley, D. I. Hulmes, A. J. Blacker, *Org. Process Res. Dev.*, **7**, 379 (2003).
4. H. Li, X.-Y. Le, D.-W. Pang, H. Deng, Z.-H. Xu, Z.-H. Lin, *J. Inorg. Biochem.*, **99**, 2240 (2005).

5. T. R. Govindachari, N. Viswanathan, J. Radhakrishnan, R. Charubala, N. Nityanandra Rao, B. R. Pai, *Indian J. Chem.*, **11**, 1215 (1973).
6. T. R. Govindachari, B. R. Pai, K. Nagarajan, *J. Chem. Soc.*, 2801 (1954).
7. A. McIver, D. D. Young, A. Deiters, *Chem. Commun.*, 4750 (2008).
8. S. Kumar, *Liq. Cryst.*, **31**, 1037 (2004).
9. M. Palma, J. Levin, O. Debever, Y. Geerts, M. Lehmann, P. Samori, *Soft Matter.*, **4**, 303 (2008).
10. Д. С. Копчук, И. Н. Егоров, Т. А. Цейтлер, А. Ф. Хасанов, И. С. Ковалев, Г. В. Зырянов, В. Л. Русинов, О. Н. Чупахин, *ХТС*, 538 (2013). [*Chem. Heterocycl. Compd.*, **49**, 503 (2013).]
11. Д. С. Копчук, Г. В. Зырянов, И. С. Ковалев, А. Ф. Хасанов, А. С. Медведевских, В. Л. Русинов, О. Н. Чупахин, *ХТС*, 535 (2013). [*Chem. Heterocycl. Compd.*, **49**, 500 (2013).]
12. V. N. Kozhevnikov, O. V. Shabunina, D. S. Kopchuk, M. M. Ustinova, B. Koenig, D. N. Kozhevnikov, *Tetrahedron*, **64**, 8963 (2008).
13. A. H. Younws, L. Zhang, R. J. Clark, L. Zhu, *J. Org. Chem.*, **74**, 8761 (2009).
14. J. C. Loren, J. S. Siegel, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **40**, 754 (2001).
15. F. Xiong, S.-Q. Wang, L.-M. He, S.-Y. Li, Q. Gan, G.-Q. Zhang, Y. Li, G.-Q. Yang, *Chin. J. Chem.*, 811 (2005).
16. R. D. Hancock, *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 1500 (2013).
17. G. R. Pabst, O. C. Pfüller, J. Sauer, *Tetrahedron*, **55**, 8045 (1999).
18. A. Rykowski, D. Branowska, J. Kielak, *Tetrahedron Lett.*, **41**, 3657 (2000).
19. D. S. Kopchuk, I. S. Kovalev, A. F. Khasanov, G. V. Zyryanov, P. A. Slepukhin, V. L. Rusinov, O. N. Chupakhin, *Mendeleev Commun.*, **23**, 142 (2013).
20. D. N. Kozhevnikov, O. V. Shabunina, D. S. Kopchuk, P. A. Slepukhin, V. N. Kozhevnikov, *Tetrahedron Lett.*, **47**, 7025 (2006).
21. R. Metz, *Chem. Ber.*, **89**, 2056 (1956).
22. F. H. Case, *J. Org. Chem.*, **30**, 931 (1965).
23. H. Neunhoeffer, D. Reichel, B. Cullmann, I. Rehn, *Liebigs Ann. Chem.*, 631 (1990).
24. E. C. Riesgo, X. Jin, R. P. Thummel, *J. Org. Chem.*, **61**, 3017 (1996).
25. A. V. Malkov, M.-M. Westwater, A. Gutnov, P. Ramírez-López, F. Friscourt, A. Kadlčíková, J. Hodačová, Z. Rankovic, M. Katora, P. Kočovský, *Tetrahedron*, **64**, 11335 (2008).
26. N. P. Buu-Hoi, F. Périn, P. Jacquignon, *J. Heterocycl. Chem.*, **2**, 7 (1965).
27. T. C. Bruice, *J. Am. Chem. Soc.*, **79**, 702 (1957).
28. A. Cappelli, M. Anzini, S. Vomero, L. Mennuni, F. Makovec, E. Doucet, M. Hamon, G. Bruni, M. R. Romeo, M. C. Menziani, P. G. De Benedetti, T. Langer, *J. Med. Chem.*, **41**, 728 (1998).
29. W. Baratta, M. Ballico, K. Siega, S. Magnolia, P. Rigo, B. Pierluigi, C. Salvatore, G. Chelucci, E. Herdtweck, *Chem.–Eur. J.*, **14**, 9148 (2008).
30. V. N. Kozhevnikov, M. M. Ustinova, P. A. Slepukhin, A. Santoro, D. W. Bruce, D. N. Kozhevnikov, *Tetrahedron Lett.*, **49**, 4096 (2008).
31. Д. Барлтрон, Д. Койл, *Возбужденные состояния в органической химии*, Мир, Москва, 1978, с. 41, 46.
32. С. Паркер, *Фотолюминесценция растворов*, Мир, Москва, 1972, с. 251.
33. A. Xie, M. Cao, Y. Liu, L. Feng, X. Hu, W. Dong, *Eur. J. Org. Chem.*, 436 (2014).

¹ Уральский федеральный университет,
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург 620002, Россия
e-mail: gvzyryanov@gmail.com

Поступило 19.02.2014
После доработки 31.03.2014

² Институт органического синтеза
им. И. Я. Постовского УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 22 / ул. Академическая, 20,
Екатеринбург 620219, Россия
e-mail: chupakhin@ios.uran.ru