

Н. А. Данилкина, А. Е. Куляшова, И. А. Балова*

ВНУТРИМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЦИКЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ ДИИНОВ

В обзоре рассматриваются примеры внутримолекулярных циклизаций функционализированных диацетиленов. Циклизации протекают с участием одной из тройных связей, что приводит к этинилзамещённым гетероциклам, или двух тройных связей, что используется в синтезе поликонденсированных гетероциклических систем и ансамблей.

Ключевые слова: бензосилол, бензотиофен, бензофуран, бута-1,3-диин, индазол, индол, конденсированные гетероциклы, этинилзамещённые гетероциклы, бисциклизация, внутримолекулярные циклизации, гетероциклические ансамбли.

Внутримолекулярные циклизации функциональных производных ацетилена хорошо известны с середины прошлого века. В первых упоминаниях эти реакции были использованы в синтезе производных бензофурана, индола и изокумарина [1–3]. В настоящее время функционализированные ацетиленовые соединения активно используются в синтезе карбо- и гетероциклов, что обусловлено уникальной способностью тройных связей участвовать в реакциях электрофильного, нуклеофильного, радикального присоединения, циклоприсоединения и др. процессах [4, 5]. За последнее десятилетие появилось заметное число публикаций, в которых в аналогичные превращения вовлекаются соединения, содержащие сопряжённую систему тройных связей [6–8]. Ранее в обзоре Маретиной и Трофимова, опубликованном в 2002 г., рассматривалось применение диацетилена и его производных в синтезе гетероциклов [9]. Настоящий краткий обзор посвящён внутримолекулярным циклизациям функционализированных диацетиленов и включает работы за период с 2000 по 2011 г.

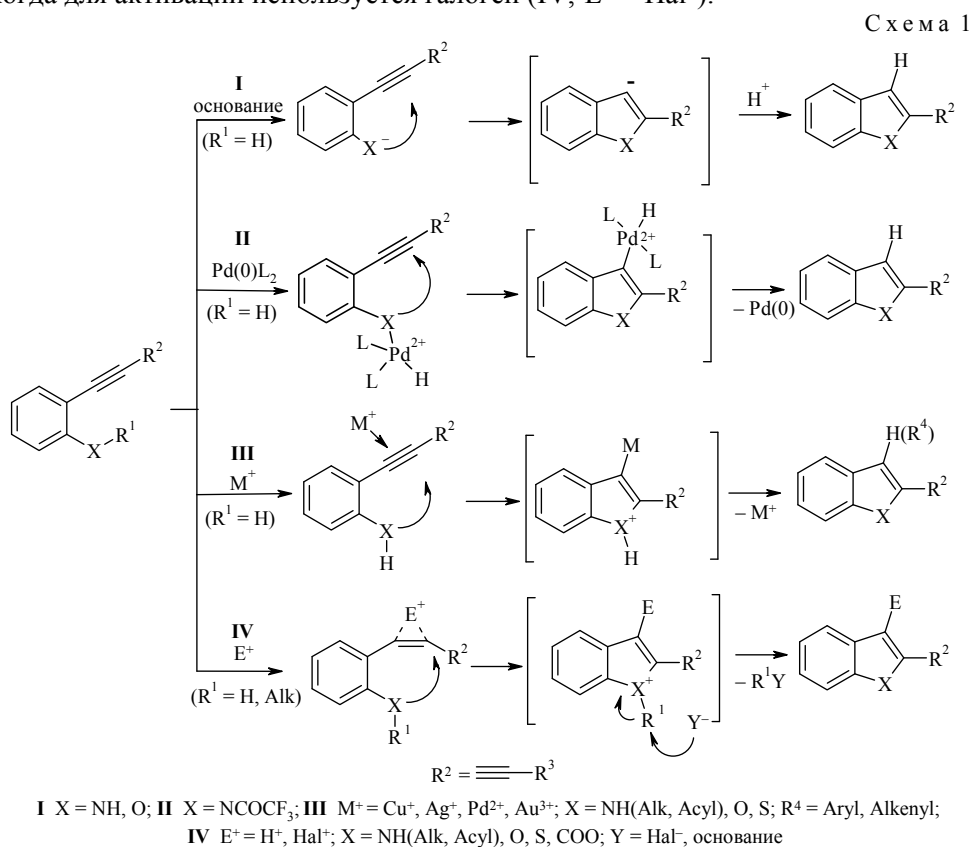
В подавляющем большинстве работ описаны циклизации диацетиленов, протекающие как реакции присоединения к тройной связи нуклеофильной функциональной группы, находящейся в соседнем положении (схема 1). В зависимости от условий реакции и строения субстрата реакции могут протекать как с сохранением одной из тройных связей, так и с участием в циклизации обеих тройных связей. Для активации диацетиленовых соединений, как и в случае моноацетиленовых производных, используются два основных подхода. В первом варианте активируется функциональная группа под действием оснований (I) или при использовании металлокомплексов (II). Во втором случае электрофильной активации подвергается тройная связь, главным образом при использовании металлокатализа (III), или при действии электрофильных реагентов (IV). Рассмотрению реакций этого типа посвящена первая часть обзора.

Во второй части приведены немногочисленные примеры внутримолекулярных циклизаций диацетиленов, протекающих как согласованные процессы.

1. Внутримолекулярное присоединение к тройной связи

Все примеры циклизаций функционализированных диациленов в результате внутримолекулярного присоединения к тройной связи реализуются по *эндо-диг* типу и, в зависимости от природы функциональной группы, приводят к образованию пяти- или шестичленных гетероциклов, аннелированных с исходным ароматическим ядром.

Если циклизация протекает по механизмам I, II, III (схема 1) или при электрофильной активации (IV, $E^+ = H^+$) – продуктами циклизации являются 2-замещённые гетероциклы. Введение дополнительного заместителя (алкенильного, арильного) в положение 3 возможно при электрофильной активации тройной связи в случае металлокатализа комплексами палладия (III, $M^+ = Pd^+$), когда палладиевый интермедиат задействован в образовании новой связи C–C. Продукт циклизации получает дополнительный заместитель и в том случае, когда для активации используется галоген (IV, $E^+ = Hal^+$).



В этом разделе в первую очередь будут рассмотрены реакции, в которых на стадии гетероциклизации образуются связи C–гетероатом и C–H, а далее – реакции, для которых при формировании гетероциклического кольца также имеет место образование дополнительной связи C–гетероатом или C–C.

1.1. Получение 2-замещённых гетероциклов

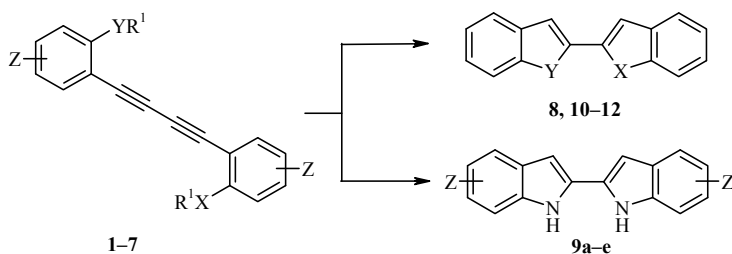
Наиболее типичными функциональными группами, участвующими в замыкании цикла в результате присоединения по тройной связи, являются amino- и гидроксильная группы. Эти однотипные реакции внутримолекуляр-

ной циклизации протекают с участием одной или двух тройных связей и приводят к образованию 2-этинилсидолов(бензофуранов) или бисиндолов(бензофуранов) соответственно.

Одним из первых способов получения 2,2'-бисиндола **8** – ключевого фрагмента синтетических аналогов природных антибиотиков, антисептиков и противоопухолевых препаратов – была циклизация симметричного бута-1,3-диина **1** (схема 2) под действием этилата натрия при кипячении в этаноле [10]. Позднее бисиндол **8** был получен при циклизации диацетилена **2** под действием гидрида калия [11], а использование катализа солями Au³⁺ позволило осуществить циклизацию при комнатной температуре в водном этаноле – в соответствии с принципами "зелёной химии" [12].

Металлокатализ солями одновалентной меди для активации тройной связи в бута-1,3-диинах **3**, **4a–d** при кипячении в ДМФА применялся для получения серии бисиндолов **9a–e** (схема 2). Синтезированные соединения были использованы в качестве ключевых субстратов для получения супрамолекулярных структур, которые нашли применение при создании чувствительных сенсоров и рецепторов разнообразных анионов [13–19].

Схема 2



1, 2, 5–7 Z = H; **3, 9e** Z = 4,4'-(N=N-Ar)₂-6,6'-I₂; **4a, 9a** Z = 4,4',5,5'-(OBn)₄; **4b, 9b** Z = 4,4'-(CO₂R)₂-6,6'-I₂; **4c, 9c** Z = 4,4'-(*t*-Bu)₂-6,6'-(NO₂)₂; **4d, 9d** Z = 4,4'-(*t*-Bu)₂-6,6'-I₂

Диин	X	Y	R ¹	Продукт реакции (выход, %)	Условия реакции
1	NH	NH	CO ₂ Et	8 (86)	NaOEt, EtOH, Δ [10]
2	NH	NH	H	8 (70)	KH, NMP, 80 °C [11]
3, 4a–d	NH	NH	H	9a–e (50–93)	NaAuCl ₄ ·2H ₂ O, EtOH, 23 °C [12] CuI, ДМФА, Δ [13–19]
5	O	O	Me	10 (58)	<i>p</i> -TsOH, EtOH, 160 °C, MW [20]
6	S	O	Me	11 (76)	<i>p</i> -TsOH, EtOH, 160 °C, MW [20]
7	SiMe ₂	SiMe ₂	H	12 (35)	LiNaph, ТГФ, 23 °C [21, 22]

Циклизация симметричного бис(2-метоксифенил)бута-1,3-диина (**5**) с образованием бисбензофурана (**10**) протекала при электрофильной активации тройной связи *para*-толуолсульфокислотой [20]. В этих же условиях несимметричный 2-[(2-метоксифенил)бута-1,3-диинил]тиоанизол (**6**) подвергался циклизации с образованием несимметричного продукта **11**, содержащего фурановый и тиофеновый циклы [20].

В случае бисциклизации силана **7**, по мнению авторов, на первой стадии под действием нафталида лития осуществляется двухэлектронный перенос по каждой тройной связи, и последующее замыкание цикла происходит при нуклеофильной атаке карбанионом атома кремния, что даёт соответствующий бисбензосилол **12** [21, 22].

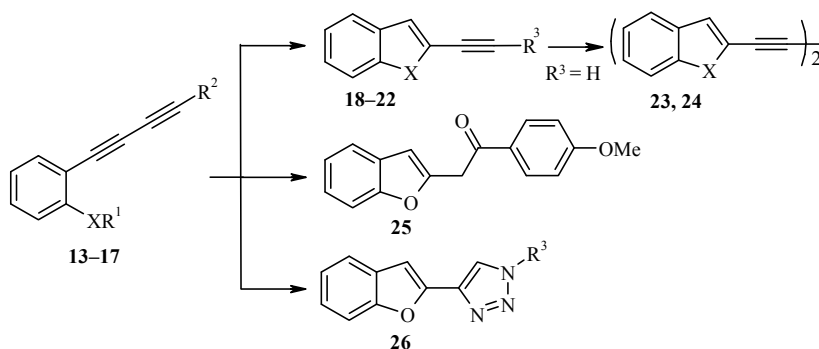
Циклизации, проходящие с участием одной из тройных связей, приводят к образованию этинилзамещённых гетероциклов (схема 3). Так в условиях

основного катализа при комнатной температуре соединения **13** и **14** превращались в соответствующие 2-этинилиндылы **18** и **19** [23, 24]. Эти же авторы показали, что циклизации *O*-TBDMS-*o*-(бута-1,3-диинил)фенола **15** протекали с образованием 2-этинилбензофуранов **24**, **21** и **20** под действием солей меди(II), при обработке раствора соединения **15** фторидом тетрабутил-аммония (TBAF) и в условиях кросс-сочетания соответственно. Так, при попытке получения *o*-(4-арилбута-1,3-диинил)фенолов кросс-сочетанием соединения **15** с иодаренами с использованием Pd–Ag каталитической системы в присутствии карбоната калия в метаноле происходило удаление не только TMS, но и TBDMS защитной группы, и образующиеся *in situ* фенолы циклизовались в 2-этинилбензофураны **20** [23].

Имеются примеры моноциклизации, в которых не участвующая в циклизации тройная связь подвергалась превращениям в ходе реакции.

При использовании в каталитической системе солей меди, в случаях TMS-замещённой тройной связи, наблюдался процесс десилилирования и димеризации первоначально образующихся 2-этинилинда **19** или бензофурана **21**, в результате чего были выделены соединения **23**, **24** (схема 3) [24].

Схема 3



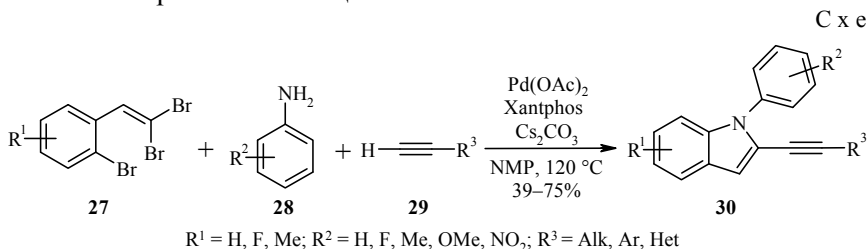
Динн	X	R ¹	R ²	Продукт реакции (выход, %)	R ³	Условия
13	NH	H	Ar	18 (50–68)	Ar	KH, NMP, 23 °C [23]
14	NH	H	TMS	19 (68)	H	KH, NMP, 23 °C [24]
14	NH	H	TMS	23 (50)	–	CuCl, ДМФА, 70 °C [24]
15	O	TBDMS	TMS	24 (82)	–	Cu(OAc) ₂ , ДМФА, 70 °C [24]
15	O	TBDMS	TMS	20 (40–85)	Ar, Het, Vinyl	Pd–Ag, K ₂ CO ₃ , MeOH, R ³ Hal, ДМФА, 40 °C [23]
15	O	TBDMS	TMS	21 (70)	H	TBAF, ДМФА, 40 °C [24]
16	O	Me	2-Naphth	22 (28)	2-Naphth	<i>p</i> -TsOH, EtOH, 160 °C, MW [20]
17	O	Me	4-MeOC ₆ H ₄	25 (94)	–	<i>p</i> -TsOH, EtOH, 160 °C, MW [20]
15	O	TBDMS	TMS	26 (56–72)	Alk, Ar	CuI, TBAF, основание, R ³ N ₃ [25]

При активации тройной связи соединения **17** *p*-TsOH наличие донорного 4-метоксифенильного заместителя приводит к гидратации тройной связи с образованием 2-фенацилбензофурана **25**, в то время как в реакции субстрата **16**, имеющего нафтильный заместитель, продукт реакции **22** сохраняет тройную связь (схема 3) [20].

Следует отметить интересный пример одновременного протекания двух различных гетероциклизаций силилового эфира *o*-(бута-1,4-диинил)фенола **15** при использовании в качестве катализатора CuI в присутствии TBAF и алкил- или

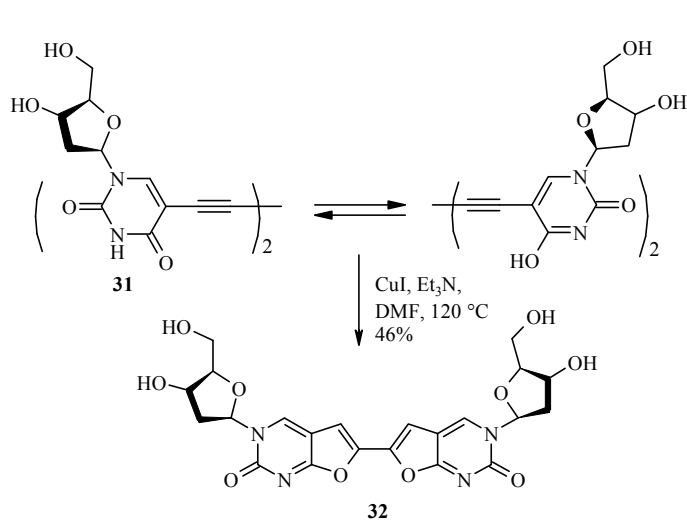
арилазидов. В этих условиях происходило образование этинилбензофурана **21**, который *in situ* взаимодействовал с органическими азидами, давая продукты *click*-реакции – 2-(1,2,3-триазол-4-ил)бензофураны **26** [25] (схема 3).

В работе [26] синтез *N*-арил-2-арилэтинилиндолов **30** (схема 4) был осуществлён в присутствии комплексов палладия в результате трёх-компонентной реакции замещённых *o*-бром(2,2-дибромвинил)бензолов **27**, анилинов **28** и терминальных ацетиленов **29**.

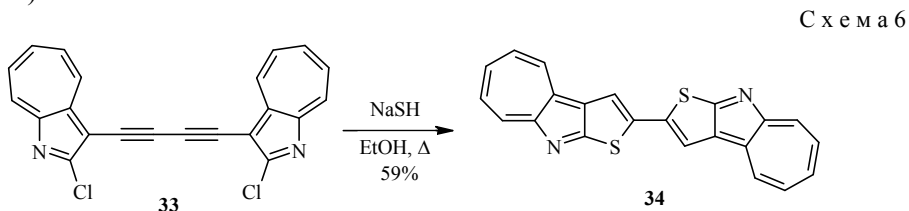


Одним из предполагаемых авторами механизмов является образование *o*-бромфенилдиацетилена и последующая реакция Бухвальда–Хартвига, приводящая к анилину, который циклизуется в конечный индол под действием Pd(OAc)₂.

Среди реакций с участием функционализированных диацетиленов можно выделить циклизации, описывающие построение симметричных полигетероциклических структур. Синтез замещённого фуропиримидина **32**, модельного соединения для изучения биохимических процессов, был осуществлён исходя из бута-1,3-диина **31** в присутствии иодида меди и основания (схема 5) [27].



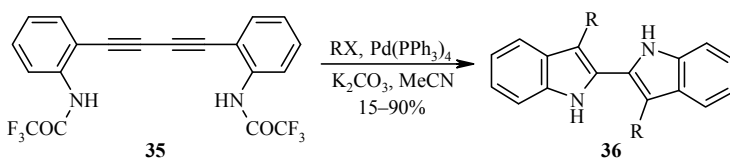
Реакция, протекающая как тандемный процесс: нуклеофильное замещение хлора на тиольную группу с последующим замыканием тиофенового цикла, была описана в работе [28] как метод получения бистиеноазазуленов **34** (схема 6).



1.2. Циклизации с введением дополнительных заместителей

Электрофильная активация тройной связи $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$ при циклизации 1,4-[*o*-(трифторацетиламино)фенил]бутадиина (**35**) в присутствии арилгалогенидов или арил-/винилтрифлатов была использована для получения 3,3'-дизамещённых бисиндолов **36** (схема 7) [29]. На первой стадии реакции возможно протекание конкурентных процессов образования σ -комплексов в результате окислительного присоединения $\text{Pd}(0)$ по связи N–H исходного соединения **35** или связи X–R трифлатов/иодидов. В первом случае циклизация реализуется по механизму II (схема 1) и приводит к незамещённым бисиндолам [29]. Во втором случае образующийся σ -комплекс палладия активирует тройную связь (путь III, схема 1) и после циклизации восстановительное элиминирование образующегося палладиевого интермедиата даёт бисиндолы **36**, содержащие заместители в третьем положении.

Схема 7

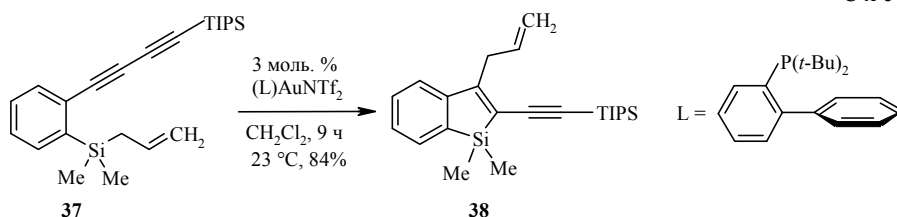


X = I, R = Ph, 4-MeO₂CC₆H₄, 3-MeO₂CC₆H₄, 4-ClC₆H₄, 4-MeC₆H₄, 2,4-Me₂C₆H₃, 2-MeOC₆H₄, 4-MeOC₆H₄;
X = Br, R = 4-MeCOC₆H₄, X = OTf, R = 4-MeC₆H₄, 1-Naphth, циклогекс-1-ен-1-ил

В случае винилтрифлатов и арилиодидов/трифлатов с акцепторными заместителями в ароматическом кольце в реакции выделяли только 3,3'-дизамещённые бисиндолы **36**. В случае донорных заместителей реакции протекали неселективно, и наблюдалось образование смеси 3-моно- и 3,3'-дизамещённых бисиндолов.

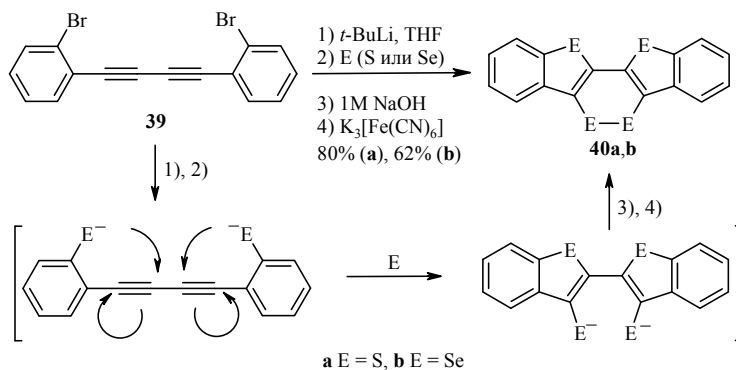
Другим примером реакции данного типа является циклизация аллилдиметил[2-(бута-1,3-динил)фенил]силанов **37** под действием комплексов золота(I) [30], предложенная как метод синтеза бензосилолов – перспективных соединений для разработки новых фотоматериалов. В присутствии комплексов золота(I) проходило внутримолекулярное *транс*-аллилсилилирование тройной связи в соединениях **37**, приводящее к 2-замещённым 3-аллил-1-силаидам **38** (схема 8). Оптимальным катализатором для этой реакции оказался бистрифлиimid золота(I), содержащий 2-ди-*трет*-бутилфосфинобифенильный лиганд.

Схема 8



Ещё один интересный пример использования бута-1,3-динов в однореакторном синтезе полианнелированных тиофен- **40a** и селенофенгетероценов **40b** описан в работе [31] (схема 9). Введение атомов серы или селена в положение 3 образующихся гетероциклов проходило *in situ* на стадии циклизации с участием образующегося дианионного интермедиата.

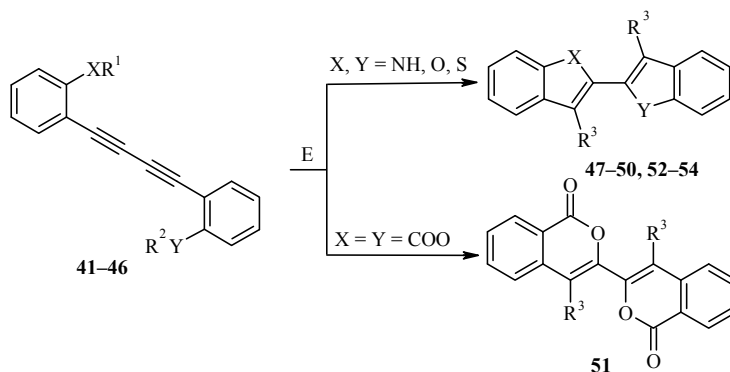
Реакции электрофильной циклизации функционализированных ацетиленов [4], в которых одновременно с формированием гетероциклического кольца



происходит образование новой связи С–галоген, являются чрезвычайно важными с точки зрения возможности дальнейшей модификации гетероцикла при помощи широкого арсенала реакций кросс-сочетания. Совсем недавно опубликованы примеры подобных циклизаций и для сопряжённых диацетиленов.

Использование иода [32], а также тетрафторбората бис(пиридин)иодония [33] и гексафторфосфата бис(коллидин)иодония [34] оказалось чрезвычайно эффективным в синтезе иодзамещённых несимметричного **47** и симметричных **48–50** бисгетероциклических соединений (схема 10). В случае синтеза бис(4-иодизокумарина) (**51**) циклизация диэфира **46** протекала под действием более сильного электрофильного агента – иодмоноклорида [35]. Кроме этого, бис(3-бромбензофуран) **53**, -бензотиофен **54**, а также дибромзамещённый 2-(бензотиофен-2-ил)бензофуран **52** были получены с использованием мягкого и эффективного электрофильного агента – *N*-метилпирролидин-2-он гидротрибромида (MPHT) [36].

Схема 10

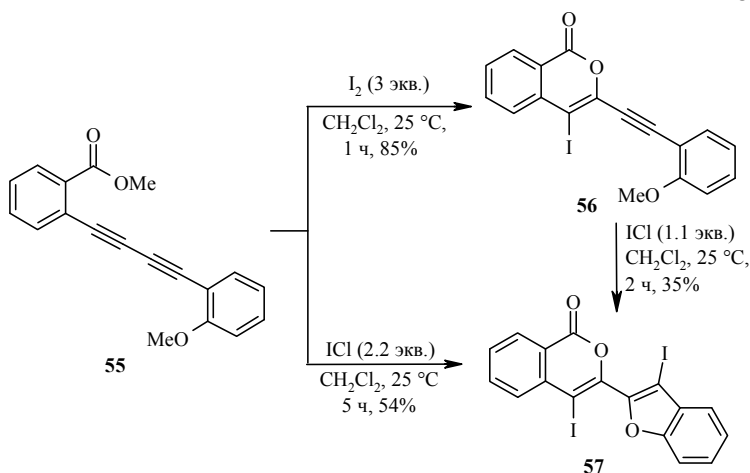


Дийн	X	Y	R ¹	R ²	E (экв.)	R ³	Продукт реакции (выход, %)	Ссылка
41	O	S	Me	Me	I ₂ (4.0)	I	47 (94)	[32]
42	O	O	Me	Me	I ₂ (4.0)	I	48 (76)	[32]
43	S	S	Me	Me	I ₂ (4.0)	I	49 (98)	[32]
44	NH	NH	Boc	Boc	IPy ₂ BF ₄ (2.0)	I	50 (63)	[33]
45	O	O	EE	EE	I(coll) ₂ PF ₆ (4.0)	I	48 (51)	[34]
46	COO	COO	Me	Me	ICl (2.4)	I	51 (90)	[35]
41	O	S	Me	Me	MPHT (4.2)	Br	52 (99)	[36]
42	O	O	Me	Me	MPHT (4.2)	Br	53 (96)	[36]
43	S	S	Me	Me	MPHT (4.2)	Br	54 (97)	[36]

Электрофильная циклизация функциональных производных диацетилена, затрагивающая лишь одну тройную связь, является особенным случаем. Она позволяет получать гетероциклы, содержащие при соседних атомах углерода этинильный фрагмент и атом галогена. Впервые возможность такой реакции была продемонстрирована недавно для метил *o*-(*o*-метоксифенилбута-1,3-диинил)бензоата (**55**), циклизация которого под действием иода протекала с образованием 4-иод-3-этинилизохромена **56** (схема 11) [32].

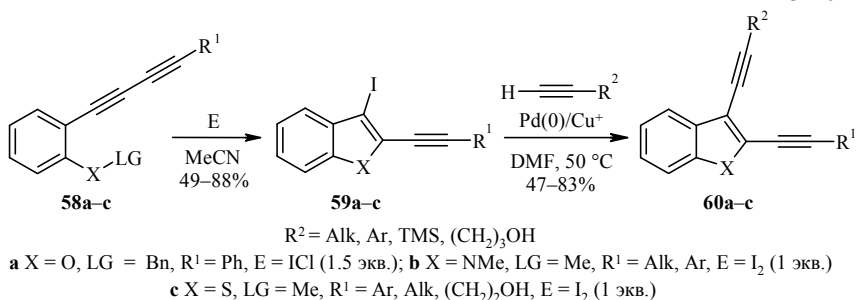
Метоксигруппа в реакциях данного типа проявляет меньшую реакционную способность по сравнению с метоксикарбонильной [37] и её участие в циклизации требует использования ICl, в этом случае авторами был получен бензофурилизохромен **57** [32]. Возможность проведения моноциклизации продемонстрирована и на примере получения 3-бром-2-(4-метоксифенилэтинил)бензофурана под действием МРНТ [36].

Схема 11



В работе [38] электрофильная циклизация диацетиленовых производных была предложена в качестве ключевой стадии в синтезе эндиновых систем **60a–c**, конденсированных с бензофураном, бензотиофеном и индолом (схема 12), представляющих интерес в качестве субстратов в циклизации Бергмана [39].

Схема 12

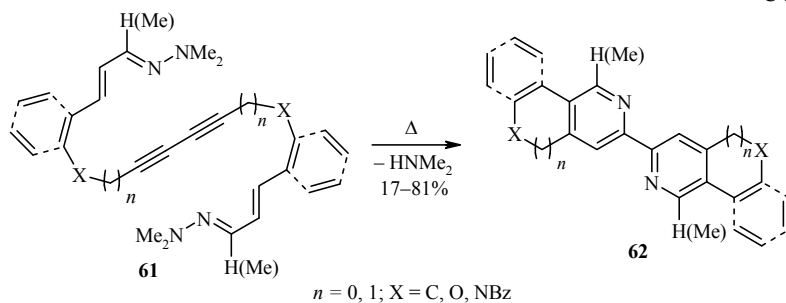


Было показано, что реакционная способность *o*-бута-1,3-диинильных производных фенола **58a**, анилина **58b** и тиофенола **58c** по отношению к иоду возрастает в ряду в соответствии с нуклеофильностью гетероатома функциональной группы. Для получения 2-(фенилэтинил)-3-иодбензофурана (**59a**) понадобилось использовать более сильный электрофильный агент – ICl.

2. Согласованные циклизации функционализированных диinov

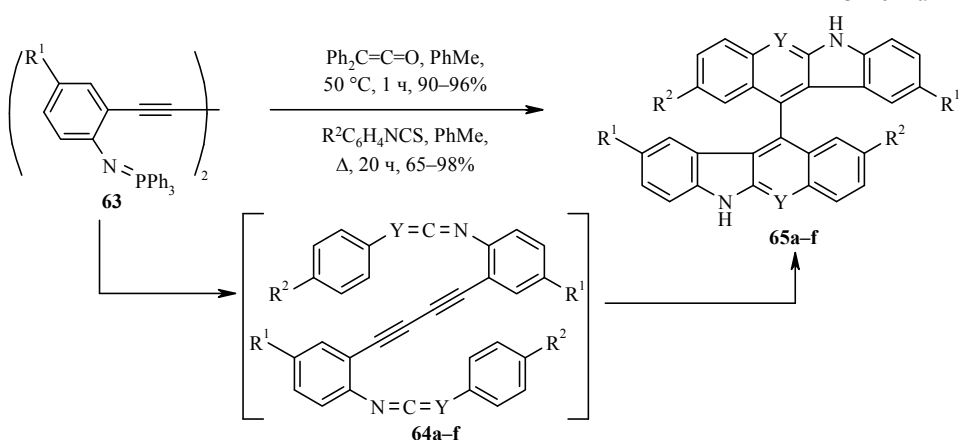
Получение шестичленных гетероциклов через реакцию гетеро-Дильса-Альдера с азидами является общим подходом в органическом синтезе [40]. В работе [41] авторы использовали внутримолекулярную циклизацию Дильса-Альдера бис(азида)бута-1,3-диinov **61** для построения бипиридинов **62**, аннелированных с различными циклическими системами (схема 13). В результате двойного внутримолекулярного [2+4]-циклоприсоединения были получены бипиридины, аннелированные с пяти- и шестичленными циклами и гетероциклами различной природы.

Схема 13



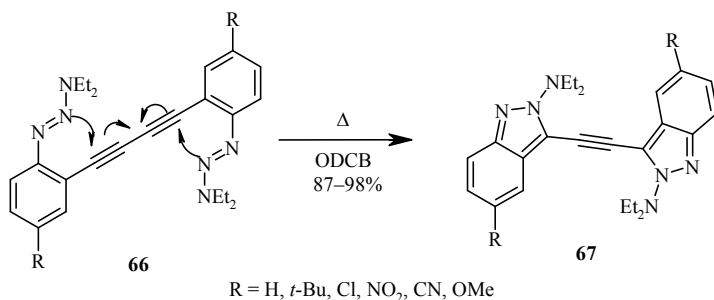
Взаимодействие дифенилдиациленов **63**, содержащих в *орто*-положении фосфазеновую группу, с дифенилкетеном или арилизоотионатами, и циклизации образующихся *in situ* бискетениминов **64a,b** или бискарбодиимидов **64c-f** приводили к соответствующим бисбензокарбазолам **65a,b** и бисхииндолинам **65c-f** (схема 14). Этот пример уникален, поскольку в ходе реакции образуются полианнелированные полигетероциклические соединения, которые были выделены в виде рацемической смеси двух энантимеров в соотношении 1:1, хиральная структура была подтверждена данными рентгеноструктурного анализа [42].

Схема 14



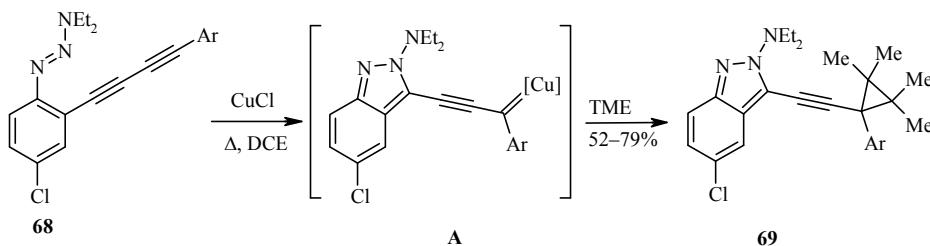
a Y = CPh, R¹ = R² = H; **b** Y = CPh, R¹ = Me, R² = H; **c** Y = N, R¹ = H, R² = Me;
d Y = N, R¹ = H, R² = OMe; **e** Y = N, R¹ = R² = Me; **f** Y = N, R¹ = Me, R² = OMe

Хергес с сотрудниками изучали термическую циклизацию диациленовых производных арилтриазенов **66** в различных растворителях (этанол, толуол, *o*-дихлорбензол (ODCB)). В случае симметричных бистриазеновых производных бутадина были получены бисизоиндазолилацетилены **67** (схема 15) [43].



Циклизация *o*-(бута-1,3-диинил)арилтриазенов **68** в присутствии CuCl приводила к этинилиндазолам **69**, содержащим циклопропильный фрагмент, образующийся в результате [2+1]-циклоприсоединения 2,3-диметил-2-бутена (TME) к карбеноиду **A** [44] (схема 16).

Схема 16

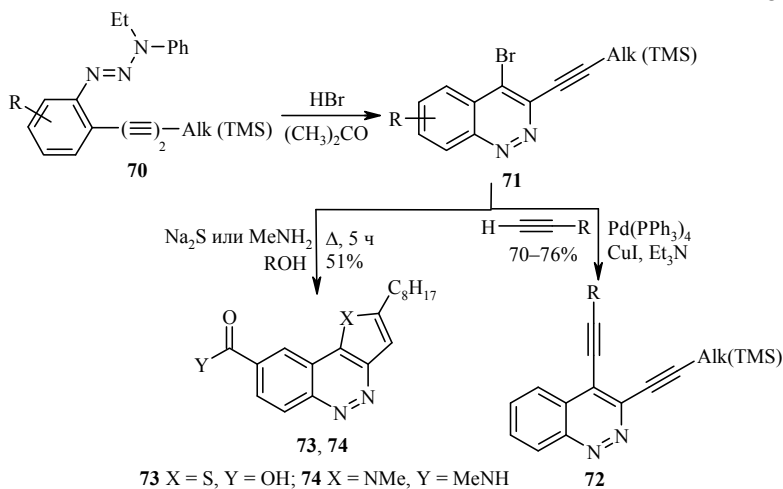


На основании полученных экспериментальных данных и данных квантово-химических расчётов авторы сделали вывод о том, что циклизация катализируется за счёт электрофильной активации ионами Cu⁺ тройной связи, удалённой от триазеновой группы.

Эти превращения являются немногочисленными примерами *экзо*-циклизации в ряду функционализированных диацетиленов. Переходное состояние в описываемых процессах носит название "сжатого" [43], поскольку в его образовании участвуют две тройные связи исходного триазена, из которых в продукте реакции формируется одна новая тройная связь.

Циклизация солей *o*-(бута-1,3-диинил)арендиазония (реакция Рихтера), генерируемых при разложении *o*-(бута-1,3-диинил)арилтриаз-1-енов **70** под действием HBr [45], была предложена как метод синтеза 4-бром-3-этинилциннолинов **71** (схема 17).

Схема 17



Хотя в ранних работах механизм реакции Рихтера обсуждался как результат присоединения иона диазония по тройной связи [46], вероятным механизмом данной реакции может являться электроциклизация. Полученные соединения были использованы в синтезе циннолинов, конденсированных с тиофеновым **73** и пиррольным **74** циклами, а также при получении ендиино-вых систем **72** [45, 47].

Таким образом, использование функционализированных диацетиленов в циклизациях позволяет в одну стадию получать симметричные и несимметричные полигетероциклические системы. Циклизации, протекающие с участием лишь одной тройной связи, могут применяться как альтернативный подход к этинилзамещённым гетероциклам. Синтезы гетероциклических систем, основанные на циклизации диацетиленов с использованием электрофильных реагентов или катализа комплексами переходных металлов в присутствии дополнительных реагентов или внутримолекулярных фрагментов, способных взаимодействовать с интермедиатами, представляются самыми перспективными среди рассмотренных реакций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (грант № 12.38.14.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. D. Stephens, C. E. Castro, *J. Org. Chem.*, **28**, 3313(1963).
2. F. Wessely, E. Zbiral, *Justus Liebigs Ann. Chem.*, **605**, 98 (1957).
3. С. Шварцберг, С. Ф. Василевский, Т. А. Приходько, *Изв. АН СССР, Сер. хим.*, 2524 (1982).
4. R. C. Larock, in *Acetylene Chemistry*, F Diederich, P. J. Stang, R. R. Tykwinski (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim, 2005, p. 51.
5. B. Godoi, R. F. Schumacher, G. Zeni, *Chem. Rev.*, **111**, 2937 (2011).
6. I. Ueda, K. Miyawaki, T. Sugane, Y. Sakurai, Y. Wada, M. Futai, *Pharmazie*, **55**, 192 (2000).
7. D. Rodriguez, A. Navarro, L. Castedo, D. Dominguez, C. Saa, *Org. Lett.*, **2**, 1497 (2000).
8. M. Rubina, M. Conley, V. Gevorgyan, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 5818 (2006).
9. I. A. Maretina, B. A. Trofimov, *Adv. Heterocycl. Chem.*, **82**, 157 (2002).
10. K. Shin, K. Ogasawara, *Synlett*, 859 (1995).
11. C. Koradin, W. Dohle, A. Rodriguez, B. Schmid, P. Knochel, *Tetrahedron*, **59**, 1571 (2003).
12. A. Arcadi, G. Bianchi, F. Marinelli, *Synthesis*, 610 (2004).
13. G. W. Lee, N.-K. Kim, K.-S. Jeong, *Org. Lett.*, **12**, 2634 (2010).
14. L. Capelli, P. Manini, A. Pezzella, A. Napolitano, M. d'Ischia, *J. Org. Chem.*, **74**, 7191 (2009).
15. U.-I. Kim, J. Suk, V. R. Naidu, K.-S. Jeong, *Chem. Eur. J.*, **14**, 11406 (2008).
16. J.-Y. Lee, M.-H. Lee, K.-S. Jeong, *Supramol. Chem.*, **19**, 257 (2007).
17. K.-J. Chang, M. K. Chae, C. Lee, J.-Y. Lee, K.-S. Jeong, *Tetrahedron Lett.*, **47**, 6385 (2006).
18. K.-J. Chang, B.-N. Kang, M.-H. Lee, K.-S. Jeong, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 12214 (2005).
19. K.-J. Chang, D. Moon, M. S. Lah, K.-S. Jeong, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **44**, 7926 (2005).
20. M. Jacubert, O. Provot, J.-F. Peyrat, A. Hamze, J.-D. Brion, M. Alami, *Tetrahedron*, **66**, 3775 (2010).
21. S. Yamaguchi, C. Xu, H. Yamada, A. Wakamiya, *J. Organomet. Chem.*, **690**, 5365 (2005).
22. C. Xu, A. Wakamiya, S. Yamaguchi, *Org. Lett.*, **6**, 3707 (2004).

23. V. Fiandanese, D. Bottalico, G. Marchese, A. Punzi, *Tetrahedron*, **64**, 7301 (2008).
24. V. Fiandanese, D. Bottalico, G. Marchese, A. Punzi, *Tetrahedron*, **64**, 53 (2008).
25. V. Fiandanese, D. Bottalico, G. Marchese, A. Punzi, M. R. Quarta, M. Fittipaldi, *Synthesis*, 3853 (2009).
26. Y. Liang, T. Meng, H.-J. Zhang, Z. Xi, *Synlett*, 911 (2011).
27. A. Sniady, M. D. Sevilla, S. Meneni, T. Lis, S. Szafert, D. Khanduri, J. M. Finke, R. Dembinski, *Chem. Eur. J.*, **15**, 7569 (2009).
28. N. Abe, Y. Harada, Y. Imachi, H. Fujii, A. Kakehi, M. Shiro, *Heterocycles*, **72**, 459 (2007).
29. G. Abbiati, A. Arcadi, E. Beccalli, G. Bianchi, F. Marinelli, E. Rossi, *Tetrahedron*, **62**, 3033 (2006).
30. T. Matsuda, S. Kadowaki, Y. Yamaguchi, M. Murakami, *Chem. Commun.*, 2744 (2008).
31. T. Okamoto, K. Kudoh, A. Wakamiya, S. Yamaguchi, *Org. Lett.*, **7**, 5301 (2005).
32. S. Mehta, R. C. Larock, *J. Org. Chem.*, **75**, 1652 (2010).
33. J. Barluenga, M. Trincado, E. Rubio, J. M. Gonzalez, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **42**, 2406 (2003).
34. T. Okitsu, D. Nakazawa, R. Taniguchi, A. Wada, *Org. Lett.*, **10**, 4967 (2008).
35. T. Yao, R. C. Larock, *J. Org. Chem.*, **68**, 5936 (2003).
36. M. Jacobert, A. Ticaud, O. Provot, A. Hamze, J.-D. Brion, M. Alami, *Eur. J. Org. Chem.*, 4492 (2010).
37. S. Mehta, J. P. Waldo, R. C. Larock, *J. Org. Chem.*, **74**, 1141 (2009).
38. N. A. Danilkina, S. Bräse, I. A. Balova, *Synlett*, 517 (2011).
39. N. J. Kerrigan, in *Name Reactions for Carbocyclic Ring Formations*, J. J. Li (Ed.), John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2010, p. 209.
40. F. Fringuelli, A. Taticchi, *The Diels–Alder Reaction: Selected Practical Methods*, John Wiley and Sons, Chichester, 2001, p. 66.
41. N. Bushby, C. J. Moody, D. A. Riddick, I. R. Waldron, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 2183 (2001).
42. M. Alajarin, B. Bonillo, A. Vidal, D. Bautista, *J. Org. Chem.*, **73**, 291 (2008).
43. L. D. Shirtcliff, A. G. Hayes, M. M. Haley, F. Köhler, K. Hess, R. Herges, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 9711 (2006).
44. L. D. Shirtcliff, M. M. Haley, R. Herges, *J. Org. Chem.*, **72**, 2411 (2007).
45. O. V. Vinogradova, V. N. Sorokoumov, I. A. Balova, *Tetrahedron Lett.*, **50**, 6358 (2009).
46. S. F. Vasilevsky, E. V. Tretyakov, H. D. Verkruijsse, *Synth. Commun.*, **24**, 1733 (1994).
47. O. V. Vinogradova, I. A. Balova, V. V. Popik, *J. Org. Chem.*, **76**, 6937 (2011).

Санкт-Петербургский государственный университет,
 Университетский пр., 26,
 Санкт-Петербург 198504, Россия
 e-mail: irinabalova@pobox.spbu.ru

Поступило 14.11.2011