

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 547.62+547.756

НОВЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА КОНДЕНСИРОВАННЫХ МАЛЕИМИДОВ

© 2024 г. А. А. Панов*

ФГБНУ “Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков
имени Г. Ф. Гаузе” (ФГБНУ “НИИНА”),
Россия, 119021 Москва, ул. Большая Пироговская, 11, стр. 1
*e-mail: 7745243@mail.ru

Поступила в редакцию 21.08.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 06.09.2023 г.

В обзоре обобщены сведения из литературы по методам синтеза пиррол[3,4-*b*]пиррол-4,6 (1*H*,5*H*)-дионов, 4*H*-тиено[2,3-*c*]пиррол-4,6(5*H*)-дионов, 4*H*-пиррол[3,4-*d*]тиазол-4,6(5*H*)-дионов, 5*H*-пиррол[3,4-*b*]пиридин-5,7(6*H*)-дионов, 1*H*-пиррол[3,4-*c*]пиридин-1,3(2*H*)-дионов и других гетероциклов, аннелированных с малеимидным циклом, за последние 10 лет. Рассмотрены как методы построения малеимидного цикла, так и методы, основанные на реакционной способности *N*-замещенных малеимидов, 3,4-дигаломалеимидов или иных производных малеимида.

Ключевые слова: малеимиды, аннелированные гетероциклы, имиды

DOI: 10.31857/S0514749224040014, **EDN:** RZSIUO

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА

2. ПЯТИЧЛЕННЫЕ ГЕТЕРОЦИКЛЫ

2.1 Тиофены и тиазолы

2.2 Пирролы и пиразолы

3. ШЕСТИЧЛЕННЫЕ ГЕТЕРОЦИКЛЫ

3.1 Дитианы и тиазины

3.2 Азафталимиды и родственные соединения

3.3. Пиридазины и пиразины

4. СЕМИ- И ВОСЬМИЧЛЕННЫЕ ЦИКЛЫ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Соединения, содержащие аннелированный с гетероциклом малеимидный цикл, находят применение в качестве органических полупроводников [1, 2], катализаторов [3–5], красителей [6], гер-

бицидов, а также ингибиторов протеинкиназ [7] и прочих биологически активных соединений. Химическая реакционная способность производных малеимида также позволяет строить на их основе новые гетероциклы, в том числе труднодоступные. Перегруппировка малеимидов может приводить

к хиноксалинам, производным имидазола, пиридина, морфолина и тиазолидин-2-имина [8]. Гидролиз имидного фрагмента приводит к производным дикарбоновых кислот, а реакция с гидразинами — к пиридазиндионам [9]. В данном обзоре рассматриваются методы синтеза соединений, содержащих гетероцикл, аннелированный с пиррол-2,5-дионовым циклом.

В настоящее время актуальным является изучение соединений данного класса и родственных им 3,4-дизамещенным малеимидам [10], индо-локарбазолам, аннелированным с малеимидным циклом [11], фталимидам [12, 13] и азафталимидам [14], а также циклическим имидам [15].

1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА

Реакции формирования малеимидного цикла на основе малеиновых ангидридов или диэфиров малеиновых кислот известны давно и до сих пор широко применяются [16, 17]. Этот метод можно считать одним из самых универсальных. К примеру, для превращения 1-бензил-1*H*-имидазол-4,5-дикарбоновой кислоты (**1**) в соответствующий *N*-(бензилокси)малеимид (**2**) использовали хлористый тионил (схема 1) [18]. Продемонстрирована необходимость защиты имидазольного атома азота: в противном случае происходит конденсация 2 молекул с образованием трициклического соединения **4**, которое удалось перевести в амид **5**, а затем в амид **6**.

Схема 1

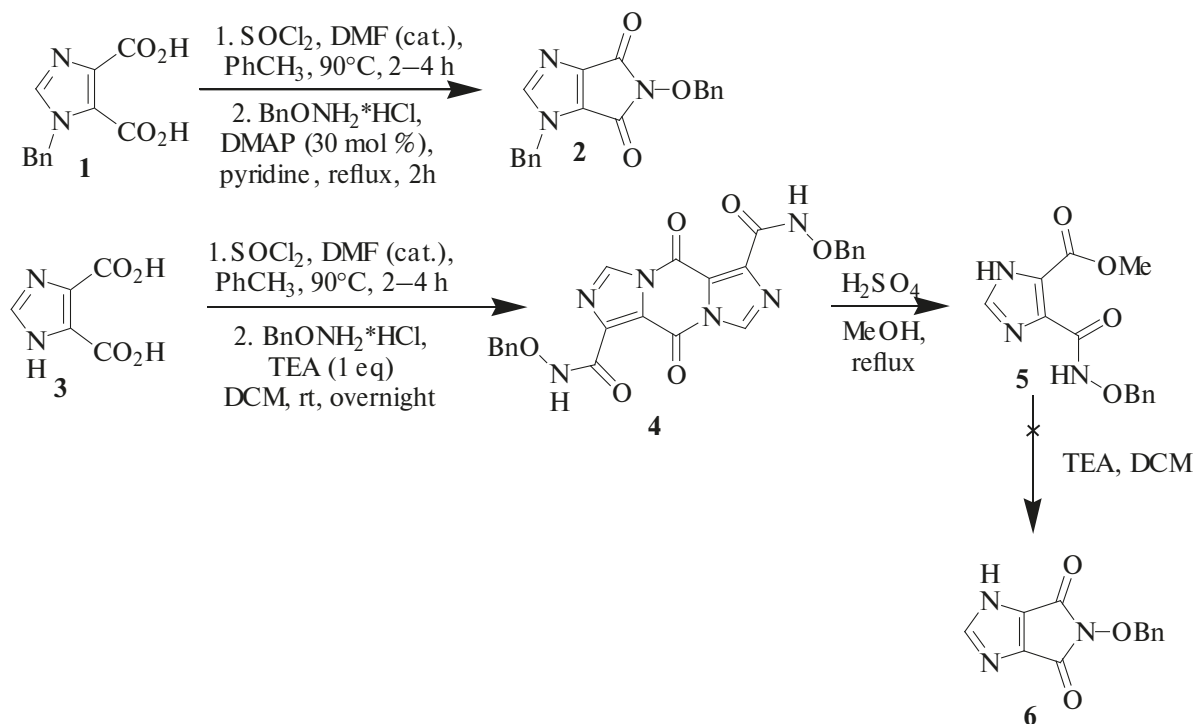


Схема 2

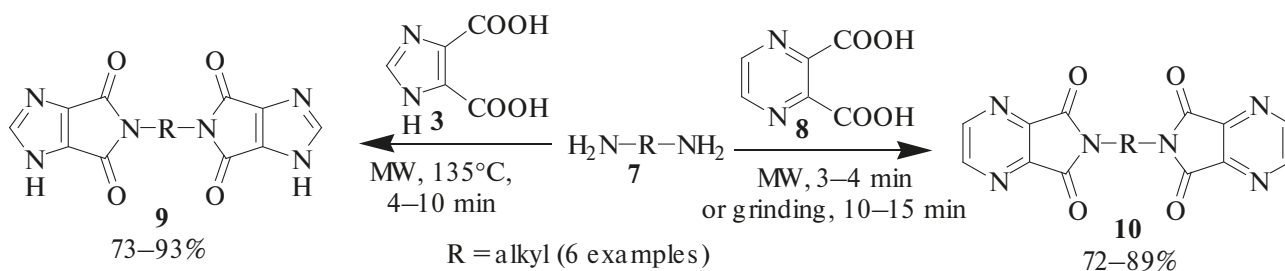


Схема 3

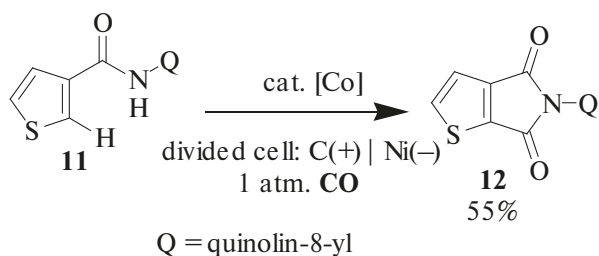
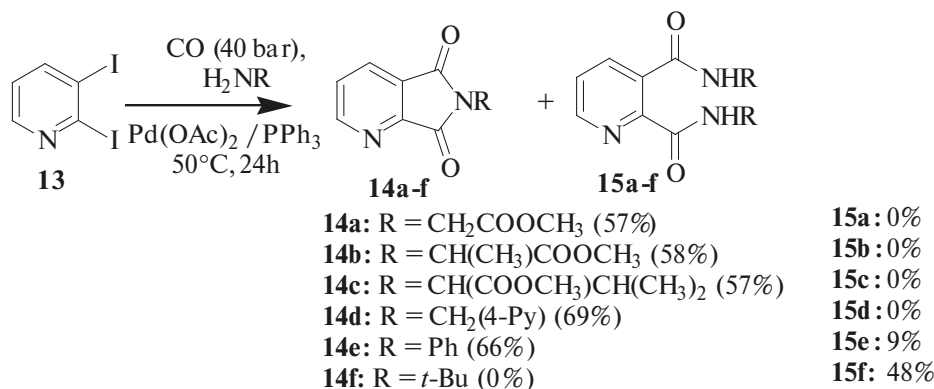


Схема 4



5, но не малеимид **6**. Сообщалось об образовании диаминов в качестве побочного продукта в подобных реакциях [19]. Однако существует сообщение о конденсации диаминов **7** с дикарбоновыми кислотами **3,8** в симметричные производные малеимида **9,10** при кратковременном нагреве микроволновым излучением или даже при растирании в ступке (схема 2) [20].

Реакция карбонилирования алкинов в присутствии переходных металлов приводит к производным дикарбоновых кислот, малеиновым ангидридам и малеимидам [21]. Карбонилирование арилкарбоксамидов широко используется для получения имидов [22, 23]. В качестве источника CO может быть использована муравьиная кислота [24] или триформат флороглюцина [25], а также ДМФА [26]. На производном амида тиофен-3-карбоновой кислоты (**11**) продемонстрирована возможность электрохимического карбонилирования *N*-(хинолин-8-ил)амидов карбоновых кислот для получения тиенопирролдиона **12**, замещенных фталимидов и других конденсированных малеимидов (схема 3) [27, 28]. Также карбонилирование пригодно для получения пиридинмалеимидов

[29]. Возможно замещение одного или двух атомов галогена на карбонильную группу: карбонилирование дииодпиридина (**13**) в присутствии аминов приводит к пиррол[3,4-*b*]пиридин-5,7(6*H*)-дионам **14** (схема 4) [30]. При использовании стерически затрудненных аминов основным продуктом реакции становятся 2,3-дикарбоксамиды **15**.

2. ПЯТИЧЛЕННЫЕ ГЕТЕРОЦИКЛЫ

2.1 Тиофены и тиазолы

Производные тиенопирролдиона находят применение как органические полупроводники для создания светодиодов и солнечных батарей [31]. Большая часть исследований посвящена модификации готовых производных тиенопирролдиона [32–34] или построению малеимидного цикла на основе тиофенкарбоновых кислот [35]. Широкие перспективы открывает недавно разработанный синтез ключевых прекурсоров — *N*-арилтиенопирролдионов (на примере содинения **19**) — реакцией *N*-фенилмалеимида (**16a**) с 1,4-дитиан-2,5-дионом (**17**) с последующим окислением и дегидратацией образующегося сукцинимиды **18** (схема 5) [36].

Схема 5

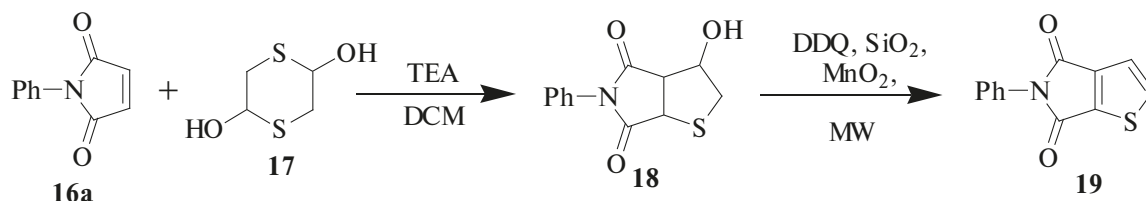


Схема 6

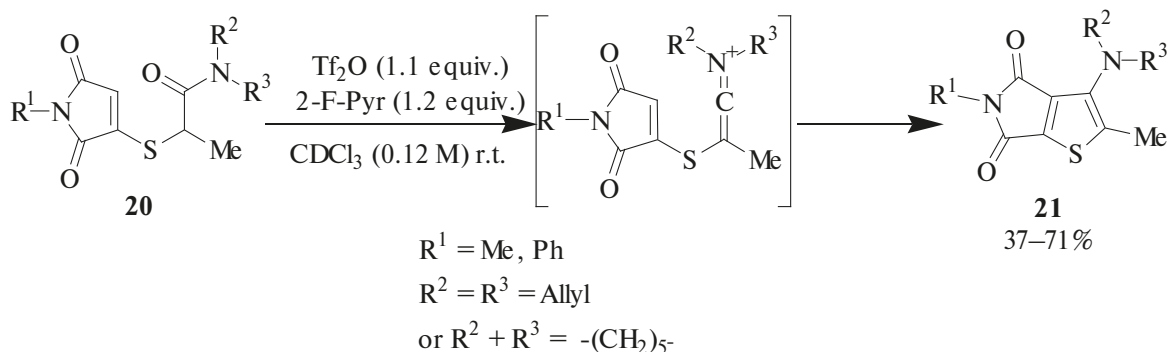
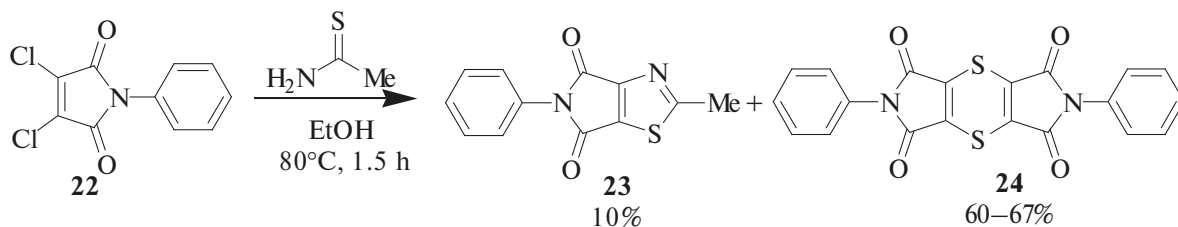


Схема 7



Также перспективен метод активации амидов, при помощи которого из 2-(винилтио)ацетамидов **20** были получены новые аминзамещенные производные тиафена **21**, конденсированные с малеимидным циклом (схема 6) [37].

Пиррол[3,4-*d*]тиазол-4,6-дионы **23**, находящие применение в качестве гербицидов, могут быть получены реакцией 3,4-дихлормалеимидов **22** с тиоамидами или тиомочевинами (схема 7) [38, 39]. При этом образуются также производные 1,4-дитиана **24**.

2.2 Пирролы и пиразолы

1,3-Диполярное присоединение к азометиновым илидам представляет собой мощный метод для создания пятичленных гетероциклов, и этот метод также применим к синтезу производных малеимида. Реакция эфиров 2-(тетрагидроизохинолин-2-ил)

уксусных кислот **25** с *N*-замещенными малеимидами **16** приводит к пирролмалеидам **26**, аннелированным с тетрагидроизохинолиновым циклом (схема 8) [40]. В реакции требуется окислитель, но набор вариантов чрезвычайно широк: помимо перекиси водорода в присутствии иода [40], пригоден кислород воздуха при облучении видимым светом в присутствии фотокатализаторов [41, 42] (в том числе метиленового синего [43] или сульфида кадмия [44]); диэтилазидикарбоксилат [45] или трет-бутилгидропероксид [46]; возможно также электрохимическое окисление [47]. Описана аналогичная реакция, при которой ацетофенон **28** реагирует с пиридином **27** в присутствии окислителя и иодида трет-бутиламмония с образованием илида, который затем вступает в реакцию присоединения с *N*-замещенными малеимидами **16** с образованием аннелированных пирролов **29** (схема 9) [48].

Также известна реакция с участием илидов бензимидазолия, образуемых из замещенного бензимидазола **31** и диазосоединений **30** (схема 10) [49]. Получение конденсированного малеимида описано только на одном примере, когда в реакцию вводили *N*-метилмалеимид **16b**. В других

случаях использовали эфиры фумаровой кислоты **32** (или ацетилендикарбоновой кислоты), которые приводили к эфирам соответствующих пирол-3,4-дикарбоновых кислот **33**. Они являются прямыми прекурсорами для построения малеимидного цикла.

Схема 8

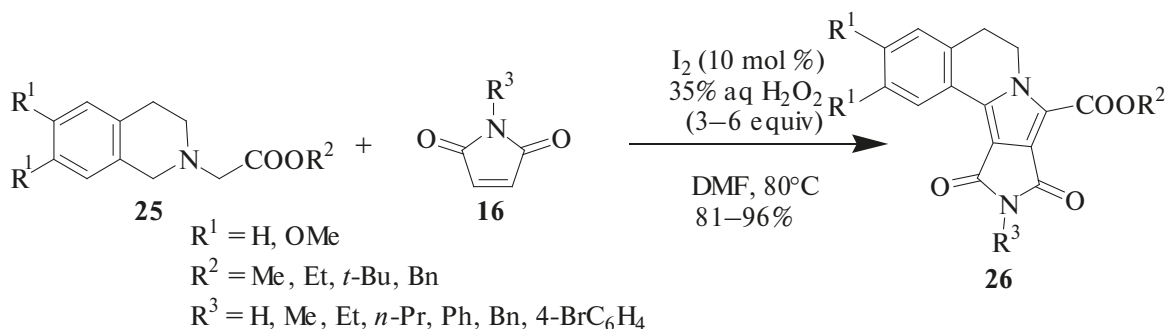


Схема 9

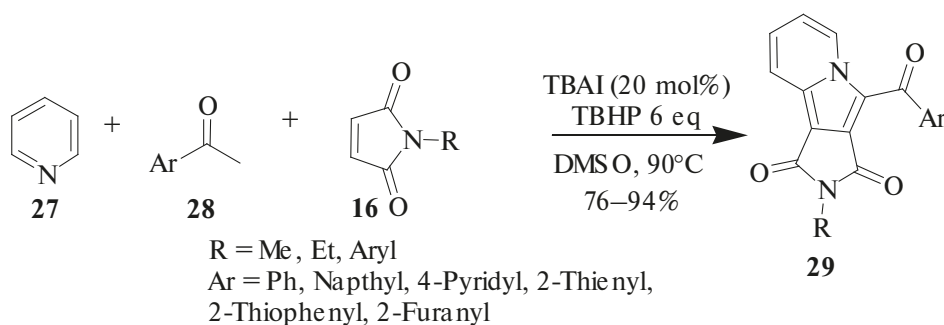


Схема 10

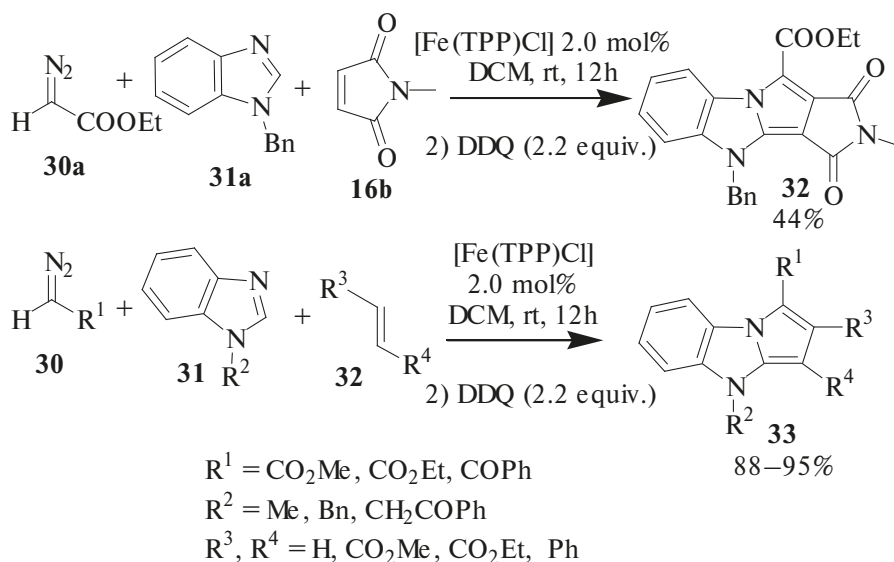
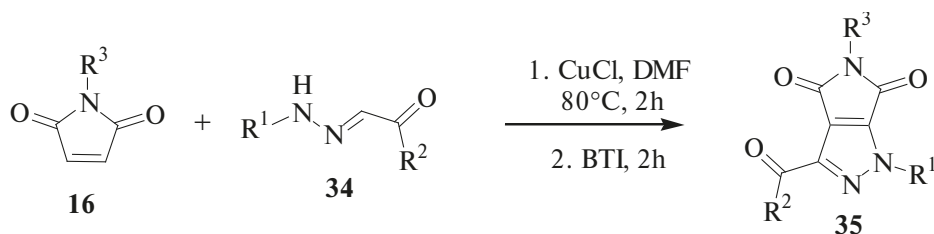


Схема 11



BTI = (Bis (trifluoroacetoxy)iodo)benzene

 $\text{R}^1 = \text{H}, \text{OEt}, \text{Ph}$ $\text{R}^2 = i\text{-Pr}, \text{Cy}, \text{Ph}, \text{Bn}$ $\text{R}^3 = \text{H}, \text{Me}, \text{Cy}, \text{Ph}, \text{Bn}$

Схема 12

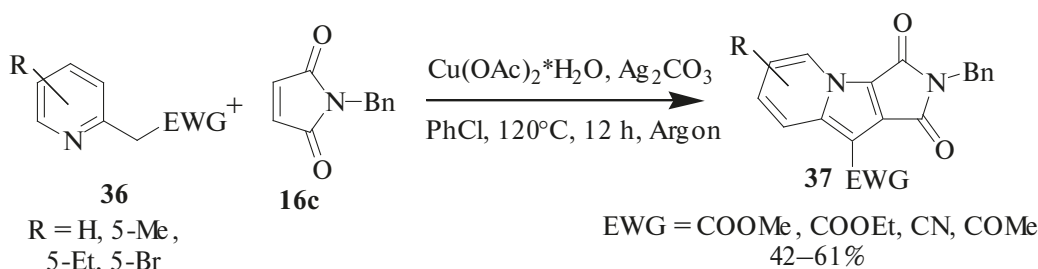
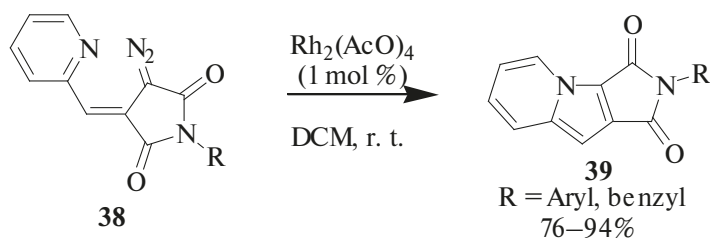


Схема 13



Аналогичное присоединение малеимидов **16** к гидразонам **34** в присутствии соли меди(I) и [бис(трифторацетокси)иод]бензола (BTI) в качестве окислителя приводит к производным пиррол[3,4-*c*]пиразола **35** (схема 11) [50]. Также в роли окислителя могут выступать DDQ, персульфат калия или (диацетокси)иодбензол.

Пиррол[3,4-*b*]индолизин-1,3-дионы **37** могут быть получены [3+2]-присоединением эфиров 2-(пиридин-2-ил)уксусных кислот **36** к малеимиду **16c** (схема 12) [51] или циклизацией карбенов, образуемых из (*E*)-3-(2-пиридилметил)-4-дiazapирролидин-2,5-дионов **38** (схема 13) [52]. Таким образом были получены неизученные ранее производные индолизина **39**, обладающие флуоресцентными свойствами.

В присутствии солей меди протекает трехкомпонентная циклизация малеимидов **16** с алкинами **40** и аминами **41**, приводящая к полизамещенным пирролмалеимидам **42** (схема 14) [53]. Реакция также требует окислителя, так как проходит через стадию образования сукцинимиды. Использование персульфата калия дает наилучшие результаты, но также пригодны DDQ и *трет*-бутилгидропероксид. Двухокись марганца, перекись водорода или надуксусная кислота не дали желаемого продукта.

В присутствии родиевого катализатора была достигнута C–H функционализация/кросс-дегидрогенативное аннелирование бензольного цикла в *N*-ацетилфенилгидразах **43** с образованием ан-

ЖУРНАЛ ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ том 60 № 4 2024

Схема 14

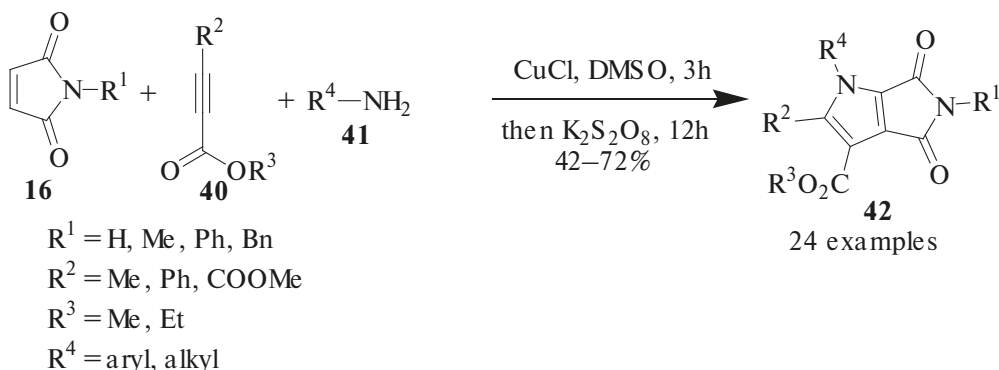


Схема 15

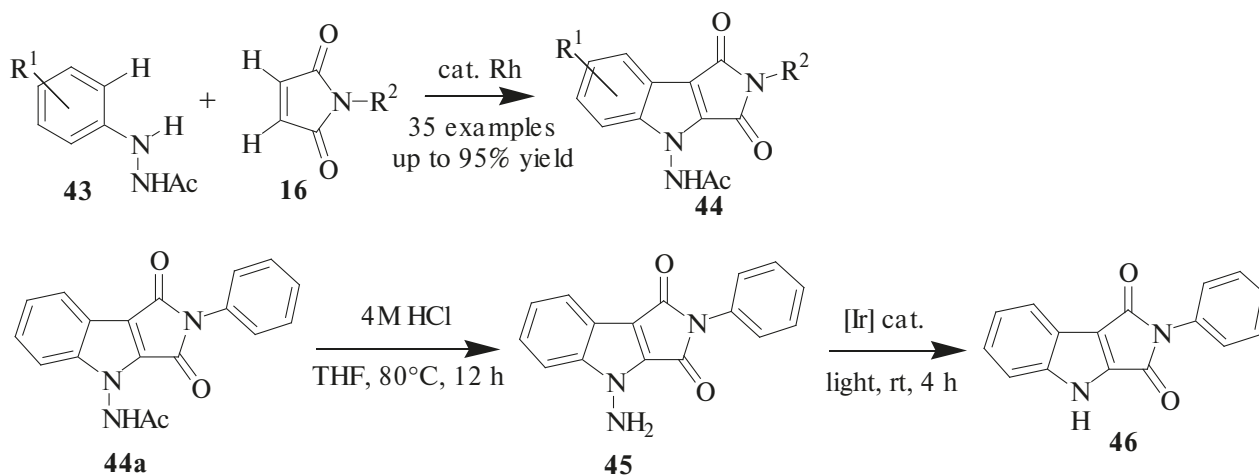
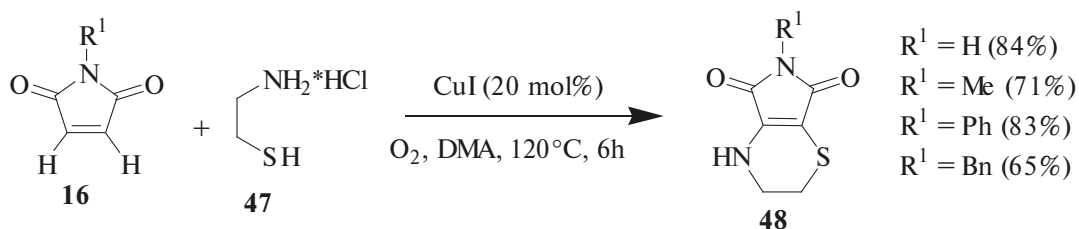


Схема 16



нелированных *N*-(ацетиламино)индолов **44** (схема 15) [54]. Продемонстрирована возможность дальнейшего превращения продуктов реакции в 4-амино-2-фенилпиррол[3,4-*b*]индол-1,3(2*H*,4*H*)-дион (**45**) и деаминирование в 2-фенилпиррол[3,4-*b*]индол-1,3(2*H*,4*H*)-дион (**46**).

3. ШЕСТИЧЛЕННЫЕ ГЕТЕРОЦИКЛЫ

3.1 Дитианы и тиазины

Из 1-фенил-3,4-дихлормалеимида (**22**) в реакции с тиомочевинной было получено, наряду с ожидаемым тиазолом **23**, производное 1,4-дитиана **24**

(схема 7). Родственные 1,4-дитианы обладают ценными фотоэлектрическими свойствами, а также активны в качестве диенофилов в реакции Дильса–Альдера [55]. 3,4-Дигидропиррол[3,4-*b*][1,4]тиазин-5,7(2*H*,6*H*)-дионы **48** впервые получены тиаминированием малеимидов **16** 2-меркаптоэтиламино (**47**) в присутствии CuI в атмосфере кислорода (схема 16) [56]. Получение подобных производных тиазина из 3,4-дигаломалеимидов до сих пор не описано и, по-видимому, представляет трудности, так как в вышеприведенных условиях 2-аминотиофенол **49** дает не аналогичное произ-

Схема 17

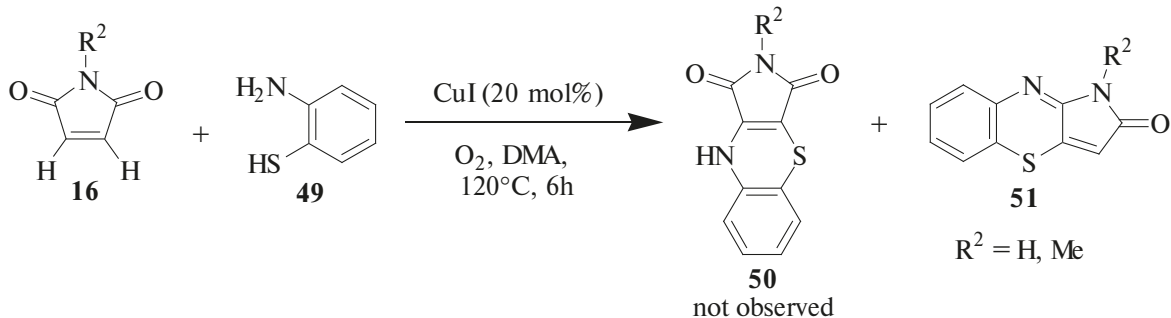
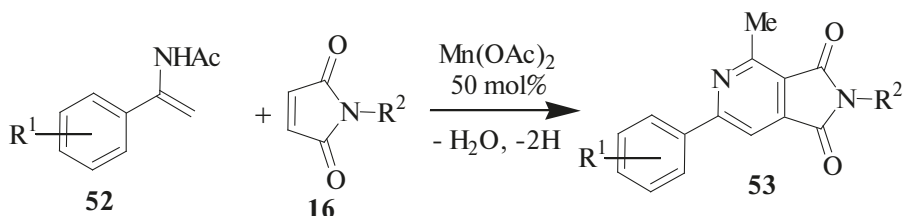


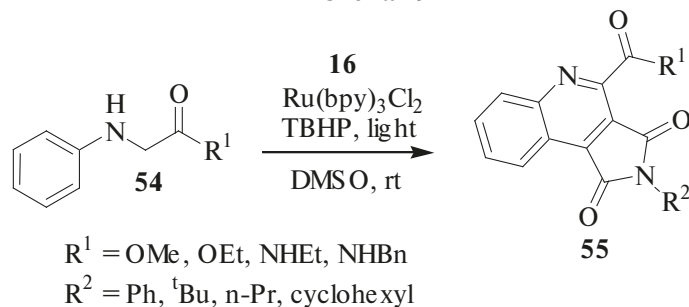
Схема 18



$\text{R}^1 = 4\text{-Me}, 4\text{-MeO}, 3\text{-MeO}, 2\text{-MeO},$
 $4\text{-F}, 4\text{-Br}, 4\text{-Ph}$ (16 examples)

$\text{R}^2 = \text{H}, \text{Me}, \text{Bn}, \text{Ph}, \text{Cy},$ substituted
 phenyl (20 examples)

Схема 19



водное бензотиазина **50**, а бензо[*b*]пиррол[2,3-*e*] [1,4]тиазин-2-он **51** (схема 17). Иные производные 2-меркаптоэтиламина, этилендиамин и этиленди-тиол, также не дали ожидаемых продуктов.

3.2 Азафталимиды и родственные соединения

Описаны способы получения пиррол[3,4-*c*] пиридин-1,3(2*H*)-дионов и 5*H*-пиррол[3,4-*b*]пиридин-5,7(6*H*)-дионов (азафталимидов) [14]. С тех пор, однако, открыты новые методы: синтез арил-замещенных азафталимидов **53** [4+2]-циклоприсоединением *N*-(1-фенилвинил)ацетамидов **52**

к *N*-замещенным малеимидам **16** в присутствии солей марганца или меди (схема 18) [57], а также применение реакции Поварова для присоединения малеимидов **16** к *N*-арильным производным глицина **54** с получением аннелированных азафталимидов **55** (схема 19) [58].

Реакция Дильса–Альдера между изоксазолами и малеимидами (реакция Кондратьевой) широко применяется не только для получения азафталимидов, но и для целей биоконъюгации [59]. Недавно впервые была проведена реакция Кондратьевой с участием 4-метоксиоксазолов **56** для

ЖУРНАЛ ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ том 60 № 4 2024

Схема 20

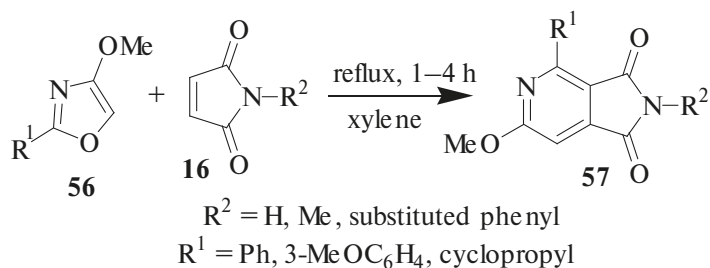


Схема 21

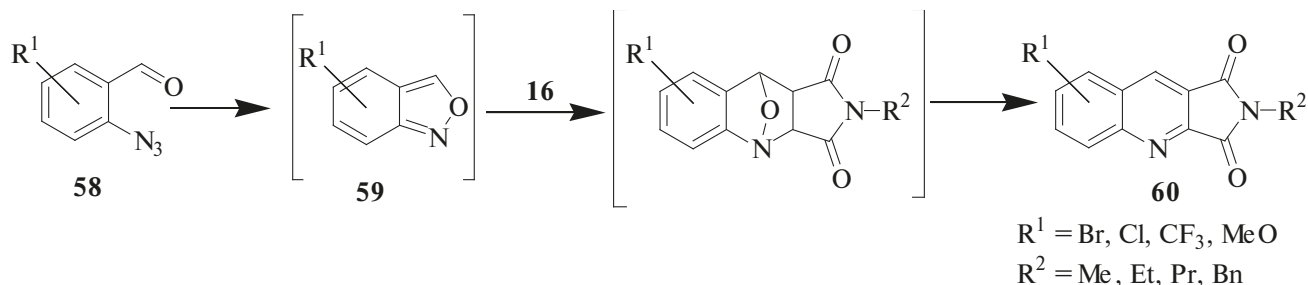


Схема 22

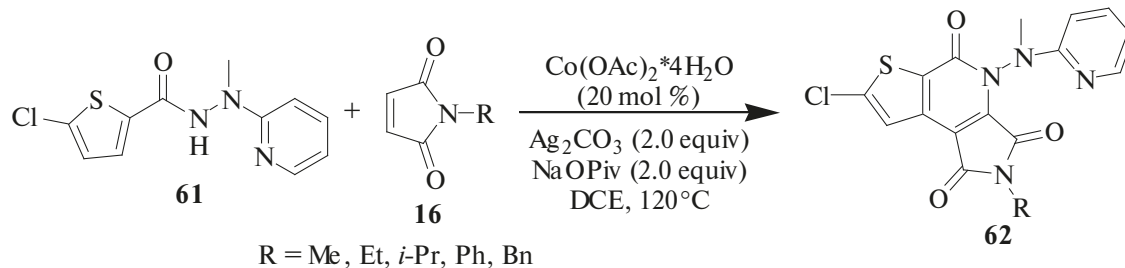
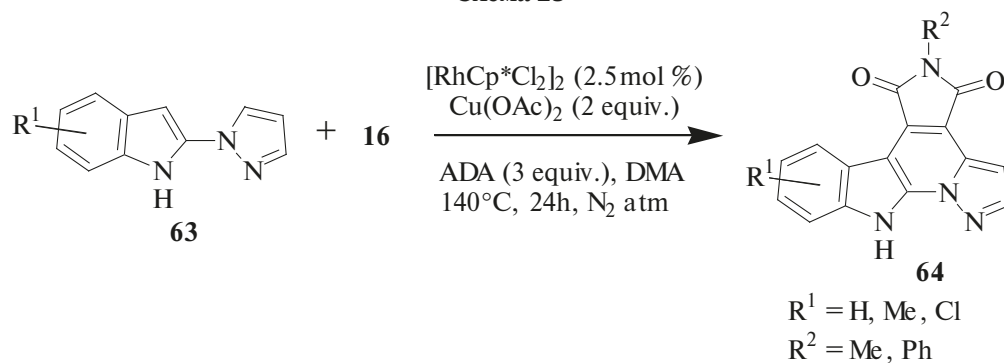


Схема 23



получения метоксизамещенных азафталимидов **57** (схема 20) [60]. Реакция 2-азидобензальдегидов **58** с малеимидом, приводящая к производным 1*H*-пиррол[3,4-*b*]хинолин-1,3(2*H*)-диона **60**, тоже, как предполагается, протекает через образование бензизоксазолов **59** (схема 21) [61].

При использовании соли кобальта и карбоната серебра в качестве окислителя достигнута C–H функционализация тиофенового цикла в гидразидах тиофен-2-карбоновых кислот (на примере соединения **61**) с получением *N*-аминопиридинов **62** (схема 22) [62, 63], а при использовании роди-

Схема 24

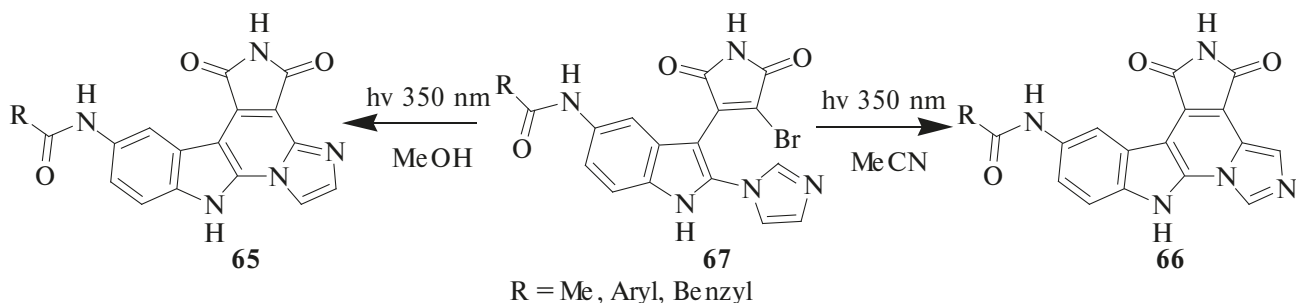


Схема 25

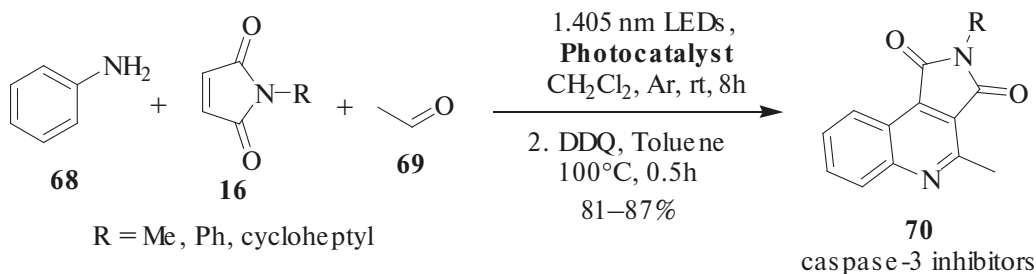
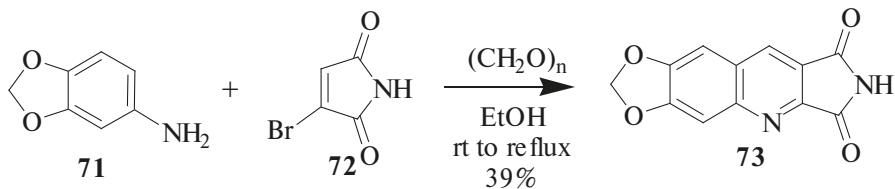


Схема 26



евого катализатора — функционализация 2-ариллиндов [64] и 2-арилимидазол[1,2-*a*]пиридинов **63** (схема 23) [65]. Аннелированные с малеимидом полициклические производные бензокарбазола/имидазол[1,2-*a*]пиридинов **64–66** продолжают привлекать к себе внимание как ингибиторы протеинкиназ (в частности, Chk1), обладающие антипролиферативной активностью [66–68]. Разработана методика фотоциклизации бромзамещенного малеимида **67** с образованием пиридинового цикла, причем направление циклизации зависело от растворителя (схема 24).

Серия биологически активных азафталимидов **70** — ингибиторов каспазы-3 — была получена трехкомпонентной конденсацией анилина **68**, ацетальдегида **69** и *N*-замещенных малеимидов **16** с использованием фотокатализатора на основе иридия (схема 25) [69].

Реакция замещенного анилина **71**, 3-броммалеимида **72** и параформа приводит к 1*H*-пиррол[3,4-*b*]хинолин-1,3(2*H*)-диону **73** (схема 26) [70]. Аналогично протекает трехкомпонентная реакция 3-ариламиномалеимидов с альдегидами и малонитрилом [71]. При использовании кетонов образуются спиро[дигидропиридины] [72, 73]. Реакция 1-метил-3-(ариламино)малеимидов **74** с коричневыми альдегидами **75** дает производные дигидропиридина **76**, но в этом случае исходный анилиновый цикл не аннелирован (схема 27) [74].

Также отдельно стоит отметить реакцию малеимидов с непредельными бензоилоксимами **77**, приводящую к пиридинмалеимидам **78**. Эта реакция пригодна также для модификации биологически активных соединений (схема 28) [75]. Для синтеза фторзамещенных пиридинов **80**, аннелированных с малеимидным циклом, был опробован новый метод синтеза, исходящий из трифторметилсодержащего

Схема 27

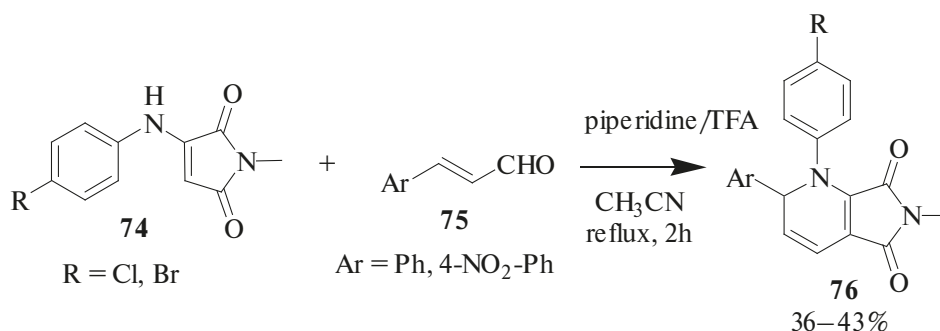


Схема 28

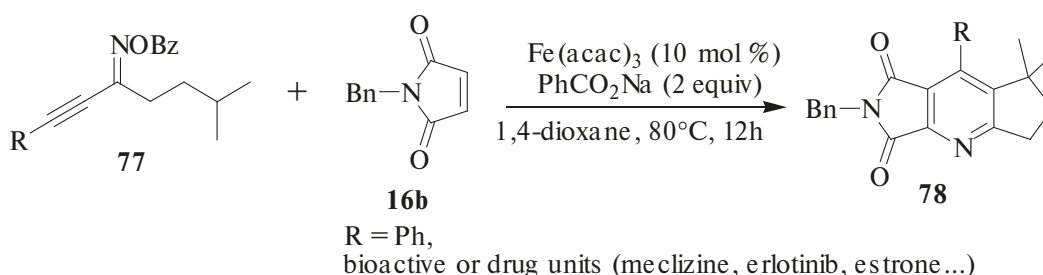
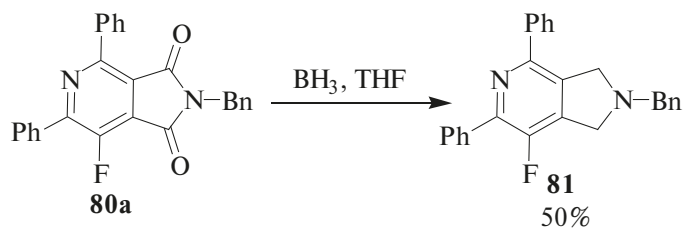
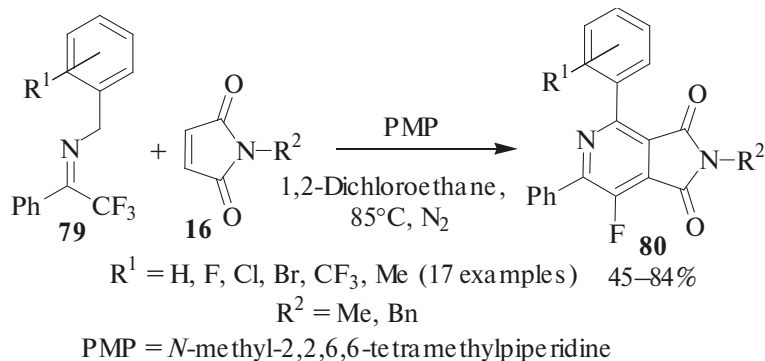


Схема 29



жащих иминов **79** (схема 29) [76]. Актуальность этого метода подтверждают тем, что полученные фторзамещенные пиридины можно восстановить действием BH₃ в ТГФ в производные изоиндолина **81**, представляющие интерес как возможные ингибиторы протеинкиназы SYK (Spleen Tyrosine Kinase).

3.3. Пиридазины и пиразины

Новые аннелированные пиридазины были получены по реакции Дильса–Альдера с обращенной полярностью [77]. Также разработана методика окисления метильной группы в арилкарбоксомидах **82** с образованием 5-гидрокси-пирролидин-2-онов **83**, которые могут быть окислены

Схема 30

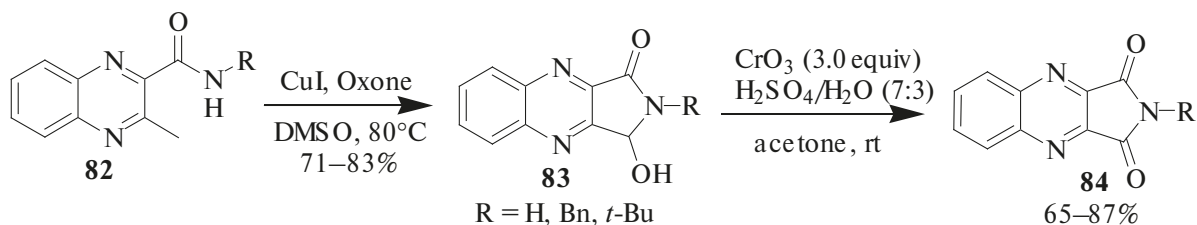


Схема 31

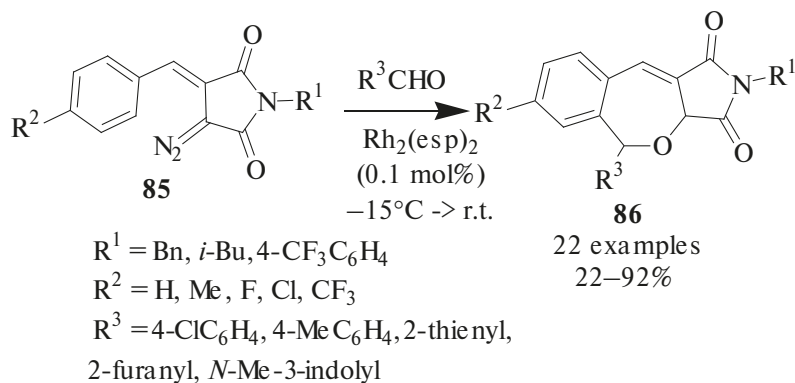


Схема 32

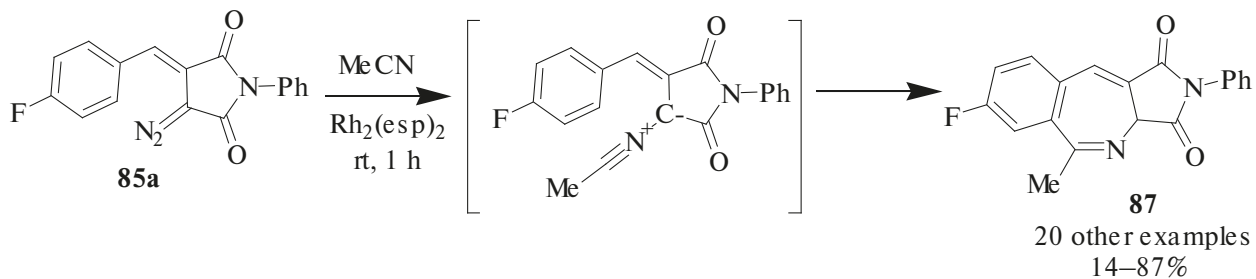
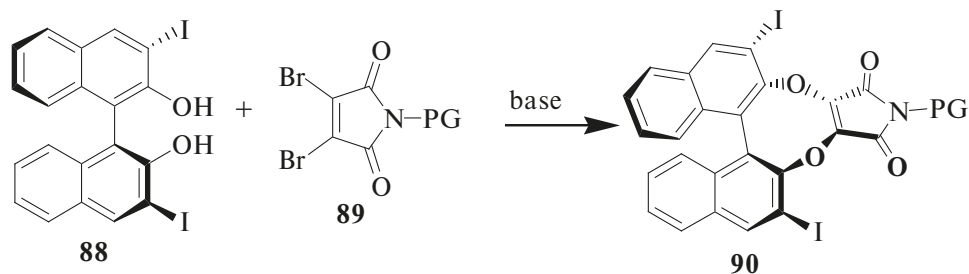


Схема 33



в производные малеимида **84** (схема 30) [78]. Реакция специфична только для аннелированных пиразинов: хиноксалинов, пиридо[2,3-*b*]пиразинов и тиено[3,4-*b*]пиразинов.

4. СЕМИ- И ВОСЬМИЧЛЕННЫЕ ЦИКЛЫ

Карбены, образуемые из (диазоарилиден)сукцинимидов **85**, в присутствии карбонильных соединений могут циклизоваться в бензоксепины **86**

при катализе соединениями родия [79, 80] и серебра (схема 31) [81]. При использовании нитрилов в аналогичных условиях образуются бензазепины **87** (схема 32) [82].

Конденсацией иодзамещенного β -бинафтола **88** с диброммалеимидами **89** были получены восьмичленные циклы с 2 атомами кислорода **90**, то есть производные диоксана (схема 33) [83], нашедшие применение в качестве хиральных катализаторов [84].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конденсированные и поликонденсированные производные малеимида продолжают представлять значительный интерес. Высокая реакционная способность малеимидного цикла позволяет осуществлять реакции аннелирования с непредельными соединениями, а в присутствии катализаторов возможна C–H функционализация ароматических циклов, в том числе неактивированного фенильного цикла. Большинство исследований посвящено именно реакциям присоединения *N*-замещенных малеимидов, катализируемым переходными металлами. Галогензамещенные малеимиды в настоящее время используются значительно реже. Реакция Дильса–Альдера, напротив, продолжает оставаться актуальной для синтеза новых аннелированных малеимидов.

Большой интерес представляют полизамещенные азафталимиды, разработка методов синтеза которых продолжает оставаться актуальной задачей. Также активно исследуются аннелированные пирролы, индолы и карбазолы. Новые методы синтеза малеимидов, содержащих аннелированный тиофеновый цикл, относительно малочисленны, несмотря на их востребованность. Кислородсодержащие гетероциклы представлены только оксепинами и диоксацинами; прочие гетероциклы малоизвестны, видимо, вследствие их неустойчивости при аннелировании с малеимидным циклом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Панов Алексей Александрович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6654-4081>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cappuccino C., Catalano L., Marin F., Dushaq G., Raj G., Rasras M., Rezgui R., Zambianchi M., Melucci M., Naumov P., Maini L. *Cryst. Growth Des.* **2020**, *20*, 884–891. doi 10.1021/acs.cgd.9b01281
2. Cappuccino C., Canola S., Montanari G., Lopez S.G., Toffanin S., Melucci M., Negri F., Maini L. *Cryst. Growth Des.* **2019**, *19*, 2594–2603. doi 10.1021/acs.cgd.8b01712
3. Chen K., Xie H., Jiang K., Mao J. *Chem. Phys. Lett.* **2016**, *657*, 135–141. doi 10.1016/j.cplett.2016.05.069
4. Benz S., Lopez-Andarias J., Mareda J., Sakai N., Matile S. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2017**, *56*, 812–815. doi 10.1002/anie.201611019
5. Caruso M., Petroselli M., Cametti M. *ChemistrySelect* **2021**, *6*, 12975–12980. doi 10.1002/slct.202103792
6. Imoto H., Fujii R., Naka K. *Eur. J. Org. Chem.* **2018**, 837–843. doi 10.1002/ejoc.201701479
7. Danilenko V.N., Simonov A.Y., Lakatos S.A., Kubbutat M.H.G., Totzke F., Schachtele C., Elizarov S.M., Bekker O.B., Printsevskaya S.S., Luzikov Y.N., Reznikova M.I., Shtil A.A., Preobrazhenskaya M.N. *J. Med. Chem.* **2008**, *51*, 7731–7736. doi 10.1021/jm800758s
8. Vandyshev D.Y., Shikhaliev K.S. *Molecules* **2022**, *27*, 5268. doi 10.3390/molecules27165268
9. Chung C.-Y., Tseng C.-C., Li S.-M., Tsai S.-E., Lin H.-Y., Wong F.F. *Molecules* **2021**, *26*, 2907. doi 10.3390/molecules26102907
10. Panov A.A., Simonov A.Y., Lavrenov S.N., Lakatos S.A., Trenin A.S. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2018**, *54*, 103–113. doi 10.1007/s10593-018-2240-z
11. Volvoikar P., Torney P., *Tetrahedron* **2021**, *82*, 131756. doi 10.1016/j.tet.2020.131756
12. Bansal M., Upadhyay C., Poonam; Rathi S.K.B. *RSC Med. Chem.* **2021**, *12*, 1854–1867. doi 10.1039/D1MD00244A
13. Das S. *New J. Chem.* **2021**, *45*, 20519–20536. doi 10.1039/D1NJ03924E
14. Ershov O.V., Ershova A.I. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2020**, *56*, 518–520. doi 10.1007/s10593-020-02693-6
15. Kavitha K., Praveena K.S.S., Ramarao E.V.V.S., Murthy N.Y.S., Pal S. *Curr. Org. Chem.* **2016**, *20*, 1955–2001. doi 10.2174/1385272820666160530145014
16. Mikie T., Okamoto K., Iwasaki Y., Koganezawa T., Sumiya M., Okamoto T., Osaka I. *Chem. Mater.* **2022**, *34*, 2717–2729. doi 10.1021/acs.chemmater.1c04196
17. Kobayashi K., Kunitomura R., Kogen H. *Molecules* **2019**, *24*, 4230. doi 10.3390/molecules24234230
18. Caruso M., Petroselli M., Cametti M. *ChemistrySelect* **2021**, *6*, 12975–12980. doi 10.1002/slct.202103792
19. Khitrov M.D., Platonov D.N., Belyy A. Yu., Trainov K.P., Velmiskina J.A., Medvedev M.G., Salikov R.F., Tomi-

- lov Y.V. *Dyes Pigm.* **2022**, *203*, 110344. doi 10.1016/j.dyepig.2022.110344
20. Kumar A., Banerjee S., Roy P., Sondhi S.M., Sharma A. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2017**, *27*, 501–504. doi 10.1016/j.bmcl.2016.12.031
21. Yin Z., Shi W., Wu X.-F. *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 4975–4994. doi 10.1021/acs.joc.2c00655
22. Kang C., Xu J., Li X., Wang S., Jiang G., Ji F. *J. Org. Chem.* **2022**, *87*, 10390–10397. doi 10.1021/acs.joc.2c00673
23. Ram S., Mehara P., Kumar A., Sharma A.K., Chauhan A.S., Kumar A., Das P. *Mol. Catal.* **2022**, *530*, 112606. doi 10.1016/j.mcat.2022.112606
24. Wang Y., Zhou Y., Lei M., Hou J., Jin Q., Guo D., Wu W. *Tetrahedron* **2019**, *75*, 1180–1185. doi 10.1016/j.tet.2019.01.023
25. Fu L.-Y., Ying J., Wu X.-F. *J. Org. Chem.* **2019**, *84*, 12648–12655. doi 10.1021/acs.joc.9b01890
26. Panda B., Albano G. *Catalysts* **2021**, *11*, 1531. doi 10.3390/catal11121531
27. Zeng L., Li H., Tang S., Gao X., Deng Y., Zhang G., Pao C.-W., Chen J.-L., Lee J.-F., Lei A. *ACS Catal.* **2018**, *8*, 5448–5453. doi 10.1021/acscatal.8b00683
28. Barsu N., Kalsia D., Sundararaju B. *Catal. Sci. Technol.* **2018**, *8*, 5963–5969. doi 10.1039/C8CY02060D
29. Chen L.-P., Chen J.-F., Zhang Y.-J., He X.-Y., Han Y.-F., Xiao Y.-T., Lv G.-F., Lu X., Teng F., Sun Q., Li J.-H. *Org. Chem. Front.* **2021**, *8*, 6067–6073. doi 10.1039/D1QO01147B
30. Takacs A., Varga G.M., Kardos J., Kollar L. *Tetrahedron* **2017**, *73*, 2131–2138. doi 10.1016/j.tet.2017.02.062
31. Favaretto L., Zambianchi M., Lopez S.G., Mazzanti A., Zanardi C., Seeber R., Gentili D., Valle F., Benvenuti E., Muccini M., Ruani G., Mercuri F., Milita S., Liscio F., Cavallini M., Toffanin S., Melucci M. *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 10320–10331. doi 10.1039/C7TC03930A
32. Ikai T., Kudo T., Nagaki M., Yamamoto T., Maeda K., Kanoh S. *Polymer* **2014**, *55*, 2139–2145. doi 10.1016/j.polymer.2014.03.021
33. Maini L., Gallino F., Zambianchi M., Durso M., Gazzano M., Rubini K., Gentili D., Manet I., Muccini M., Toffanin S., Cavallini M., Melucci M. *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 2033–2035. doi 10.1039/C4CC09177A
34. Punzi A., Coppi D.I., Matera S., Capozzi M.A.M., Operamolla A., Ragni R., Babudri F., Farinola G.M. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 4754–4757. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.7b02114>
35. Warnan J., Labban A.E., Cabanetos C., Hoke E.T., Shukla P.K., Risko C., Bredas J.-L., McGehee M.D., Beaujuge P.M. *Chem. Mater.* **2014**, *26*, 2299–2306. doi 10.1021/cm500172w
36. Shi W., Sun S., Hu Y., Gao T., Peng Y., Wu M., Guo H., Wang J., *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 3861–3863. doi 10.1016/j.tetlet.2015.04.097
37. Dagoneau D., Kolleth A., Lumbroso A., Tanriver G., Catak S., Sulzer-Mosse S., De Mesmaeker A. *Helv. Chim. Acta* **2019**, *102*, e19000. doi 10.1002/hlca.201900031
38. Katritzky A.R., Fan W.-Q. *J. Heterocycl. Chem.* **1988**, *25*, 901–906. doi 10.1002/jhet.5570250338
39. Kharitonova O.V., Solomentseva T.A., Golubtsov I.S., Mironov A.F. *Russ. J. Org. Chem.* **2014**, *50*, 45–47. doi 10.1134/S1070428014010084
40. Huang H.-M., Li Y.-J., Ye Q., Yu W.-B., Han L., Jia J.-H., Gao J.-R. *J. Org. Chem.* **2014**, *79*, 1084–1092. doi 10.1021/jo402540j
41. Koohgard M., Hosseinpour Z., Hosseini-Sarvari M. *Tetrahedron* **2021**, *89*, 132166. doi 10.1016/j.tet.2021.132166
42. Wang L., Ma T., Qiao M., Wu Q., Shi D., Xiao W. *Synthesis* **2019**, *51*, 522–529. doi 10.1055/s-0037–1610907
43. Fujiya A., Tanaka M., Yamaguchi E., Tada N., Itoh A. *J. Org. Chem.* **2016**, *81*, 7262–7270. doi 10.1021/acs.joc.6b00439
44. Firoozi S., Hosseini-Sarvari M., Koohgard M. *Green Chem.* **2018**, *20*, 5540–5549. doi 10.1039/C8GC03297A
45. Xu Y.-W., Wang J., Wang G., Zhen L. *J. Org. Chem.* **2021**, *86*, 91–102. doi 10.1021/acs.joc.0c01567
46. Nekkanti S., Kumar N.P., Sharma P., Kamal A., Nachtigall F.M., Forero-Doria O., Santos L.S., Shankaraiah N. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 2671–2677. doi 10.1039/C5RA24629F
47. Wang Q., Yuan T., Liu Q., Xu Y., Xie G., Lv X., Ding S., Wang X., Li C. *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 8398–8401. doi 10.1039/C9CC04336E
48. Zhang Q., Wang B., Ma H., Ablajan K. *New J. Chem.* **2019**, *43*, 17000–17003. doi 10.1039/C9NJ03076J
49. Zhou K., Bao M., Huang J., Kang Z., Xu X., Hu W., Qian Y. *Org. Biomol. Chem.* **2020**, *18*, 409–414. doi 10.1039/C9OB02571E
50. Zhu J.-N., Wang W.-K., Jin Z.-H., Wang Q.-K., Zhao S.-Y. *Org. Lett.* **2019**, *21*, 5046–5050. doi 10.1021/acs.orglett.9b01641
51. Lv K.-H., Zhao Q.-S., Zhao K.-H., Yang J.-M., Yan S.-J. *J. Org. Chem.* **2022**, *87*, 15301–15311. doi 10.1021/acs.joc.2c01879
52. Chupakhin E., Bakulina O., Dar'in D., Krasavin M. *Tetrahedron Lett.* **2021**, *85*, 153467. doi 10.1016/j.tetlet.2021.153467
53. Zhu J.-N., Chen L.-L., Zhou R.-X., Li B., Shao Z.-Y., Zhao S.-Y. *Org. Lett.* **2017**, *19*, 6044–6047. doi 10.1021/acs.orglett.7b02670
54. Li H., Zhang S., Feng X., Yu X., Yamamoto Y., Bao M. *Org. Lett.* **2019**, *21*, 8563–8567. doi 10.1021/acs.orglett.9b03107
55. Botes D.S., Khorasani S., Duminy W., Levendis D.C., Fernandes M.A., *Cryst. Growth Des.* **2020**, *20*, 291–299. doi 10.1021/acs.cgd.9b01167

56. Yang Z.-H., Tan H.-R., An Y.-L., Zhao Y.-W., Lin H.-P., Zhao S.-Y. *Adv. Synth. Catal.* **2018**, *360*, 173–179. doi 10.1002/adsc.201700955
57. Li X., Zhang X., Zhang F., Luo X., Luo H. *Adv. Synth. Catal.* **2022**, *364*, 1683–1688. doi 10.1002/adsc.202200251
58. Zhang Y., Jiang W., Bao X., Qiu Y., Yuan Y., Yang C., Huo C. *Chin. J. Chem.* **2021**, *39*, 3238–3244. doi 10.1002/cjoc.202100401
59. Lossouarn A., Renault K., Bailly L., Frisby A., Le Nahenec-Martel P., Renard P.-Y., Sabot C., *Org. Biomol. Chem.* **2020**, *18*, 3874–3887. doi 10.1039/D0OB00403K
60. Klyuchko S.V., Chumachenko S.A., Shablykin O.V., Brovarets V.S. *Russ. J. Gen. Chem.* **2021**, *91*, 348–356. doi 10.1134/S1070363221030026
61. Zhang X., Dhawan G., Muthengi A., Liu S., Wang W., Legrisa M., Zhang W. *Green Chem.* **2017**, *19*, 3851–3855. doi 10.1039/C7GC01380A
62. Zhao H., Wang T., Qing Z., Zhai H. *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 5524–5527. doi 10.1039/D0CC01582B
63. Pati B.V., Sagara P.S., Ghosh A., Mohanty S.R., Ravikumar P.C. *J. Org. Chem.* **2021**, *86*, 6551–6565. doi 10.1021/acs.joc.1c00367
64. Shinde V. N., Rangan K., Kumar D., Kumar A. *J. Org. Chem.* **2021**, *86*, 2328–2338. doi 10.1021/acs.joc.0c02467
65. Li B., Guo C., Shen N., Zhang X., Fan X. *Org. Chem. Front.* **2020**, *7*, 3698–3704. doi 10.1039/D0QO01109F
66. Lavrard H., Rodriguez F., Delfourne E., *Bioorg. Med. Chem.* **2014**, *22*, 4961–4967. doi 10.1016/j.bmc.2014.06.028
67. Lavrard H., Salvetti B., Mathieu V., Rodriguez F., Kiss R., Delfourne E. *ChemMedChem* **2015**, *10*, 607–609. doi 10.1002/cmdc.201500025
68. Salvetti B., Lavrard H., Delfourne E., *Tetrahedron Lett.* **2014**, *55*, 6463–6464. doi 10.1016/j.tetlet.2014.10.002
69. He J., Bai Z.-Q., Yuan P.-F., Wu L.-Z., Liu Q. *ACS Catal.* **2021**, *11*, 446–455. doi 10.1021/acscatal.0c05005
70. Akin K., Bontemps A., Farce A., Merlet E., Belmont P., Helissey P., Chavatte P., Sari M.-A., Giorgi-Renault S., Desbene-Finck S. *J. Enzyme Inhib. Med. Chem.* **2022**, *37*, 252–268. doi 10.1080/14756366.2021.2001806
71. Jiang Y.-H., Xiao M., Yan C.-G. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 35609–35616. doi 10.1039/C6RA03165J
72. Xiao M., Jiang Y.-H., Yan C.-G. *ChemistrySelect* **2017**, *2*, 2803–2806. doi 10.1002/slct.201602042
73. Xiao M., Sun Q., Sun J., Yan C.-G. *Eur. J. Org. Chem.* **2017**, *46*, 6861–6866. doi 10.1002/ejoc.201701356
74. Jiang Y., Yan C. *Chin. J. Chem.* **2016**, *34*, 1255–1262. doi 10.1002/cjoc.201600504
75. Du F., Li S.-J., Jiang K., Zeng R., Pan X.-C., Lan Y., Chen Y.-C., Wei Y., *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, *59*, 23755–23762. doi 10.1002/anie.202010752
76. Zhao J., Chen M., Wu M., Shi L., Li H. *Asian J. Org. Chem.* **2022**, *11*, e202200042. doi 10.1002/ajoc.202200042
77. Singh B., Bhatia R., Pani B., Gupta D. *J. Mol. Struct.* **2020**, *1200*, 127084. doi 10.1016/j.molstruc.2019.127084
78. Zhang Z., Wang S., Hu C., Ma N., Zhang G., Liu Q. *Tetrahedron* **2018**, *74*, 7472–7479. doi 10.1016/j.tet.2018.11.023
79. Vepreva A., Kantin G., Krasavin M., Dar'in D. *Synthesis* **2022**, *54*, 5128–5138. doi 10.1055/s-0037–1610790
80. Inyutina A., Kantin G., Dar'in D., Krasavin M. *J. Org. Chem.* **2021**, *86*, 13673–13683. doi 10.1021/acs.joc.1c01710
81. Laha D., Meher K.B., Bankar O.S., Bhat R.G. *Asian J. Org. Chem.* **2022**, *11*, e202200062. doi 10.1002/ajoc.202200062
82. Inyutina A., Dar'in D., Kantina G., Krasavin M. *Org. Biomol. Chem.* **2021**, *19*, 5068–5071. doi 10.1039/D1OB00773D
83. Brenet S., Baptiste B., Philouze C., Berthiol F., Einhorn J. *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, *2013*, 1041–1045. doi 10.1002/ejoc.201201525
84. Brenet S., Berthiol F., Einhorn J. *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, *2013*, 8094–8096. doi 10.1002/ejoc.201301329

New Methods of Synthesis of Annealed Maleimides

A. A. Panov*

Gause Institute of New Antibiotics, ul. B. Pirogovskaya, 11, Moscow, 119021 Russia

*e-mail: 7745243@mail.ru

Received August 21, 2023; revised September 4, 2023; accepted September 6, 2023

This review covers the new synthetic methods for annealed maleimide derivatives, namely pyrrolo[3,4-*b*]-pyrrolo-4,6(1*H*,5*H*)-diones, 4*H*-thieno[2,3-*c*]-pyrrolo-4,6(5*H*)-diones, 4*H*-pyrrolo[3,4-*d*]thiazole-4,6(5*H*)-diones, 5*H*-pyrrolo-[3,4-*b*]pyridine-5,7(6*H*)-diones, 1*H*-pyrrolo-[3,4-*c*]pyridine-1,3(2*H*)-diones, and other related compounds. The publications for the last 10 years are considered, including the methods for *de novo* synthesis of the maleimide core and the ones which use *N*-substituted maleimide or halogen-substituted maleimide derivatives as the main precursor.

Keywords: maleimides, annealed heterocycles, imides