

ГЕТЕРОЦИКЛИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОФИЛЬНЫХ АГЕНТОВ

А.А. Смоляк, *Институт технической химии УрО РАН*

Ю.В. Шкляев, *Институт технической химии УрО РАН*

Для цитирования:

Смоляк А.А., Шкляев Ю.В. Гетероциклизации некоторых непредельных соединений под действием электрофильных агентов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – № 4. – С. 62–73. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.5>

В обзоре рассмотрены вопросы образования азот-, кислород- и серосодержащих гетероциклов при взаимодействии непредельных соединений с электрофильными реагентами различной природы: галогенами, солями двухвалентной ртути и некоторыми другими.

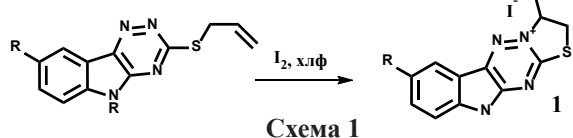
Ключевые слова: *непредельные соединения, электрофильные реагенты, гетероциклизация.*

Циклизация – один из важнейших процессов в органической химии и живой природе. Практически все живые организмы содержат в себе карбо- или гетероциклы, а количество разнообразных лекарственных препаратов, содержащих карбо- или гетероциклы, составляет более 50% мирового производства. Механизмы циклизации/гетероцикликации весьма разнообразны – элиминирование атомов галогенов, конденсации по Дикману, Ружичке, циклообразование в реакциях Дильса – Альдера и т.д.

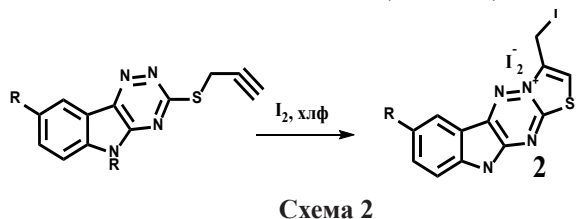
Одним из наиболее часто используемых реакций являются электрофильные реакции, к которым относятся реакции как электрофильного замещения в ароматическом (гетероциклическом) ряду, так и реакции циклообразования, исходя из подходящих линейных соединений.

Одним из привлекательных примеров электрофильных реакций являются гетероцикликации N-, O-, S-аллильных производных азинов и азолов с образованием мостиковых (узловых) гетероциклов, зачастую при этом атом азота несёт положительный заряд. Данные гетероцикликации достаточно легко осуществляются под действием сильных кислот, галогенов (Cl, Br, I), псевдогалогенов типа диородана, галогенидов и других солей переходных металлов, например, серебра, золота, меди, платины, родия, рутения, железа, ртути. Большое количество примеров взаимодействия солей ртути с непредельными соединениями описано в фундаментальной монографии А. Г. Макаровой и А. Н. Несмеянова [1], однако в данной монографии описаны взаимодействия солей ртути в подавляющем

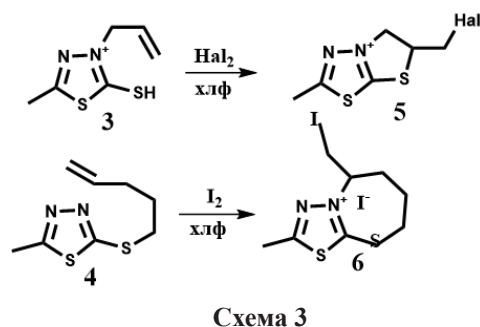
Так, при действии иода осуществлен синтез 3-иодметил-2,3-дигидро-10-R-[1,3]тиазоло[3',2':2,3][1,2,4]триазино[5,6-b]индолия **1** [7] (схема 1).



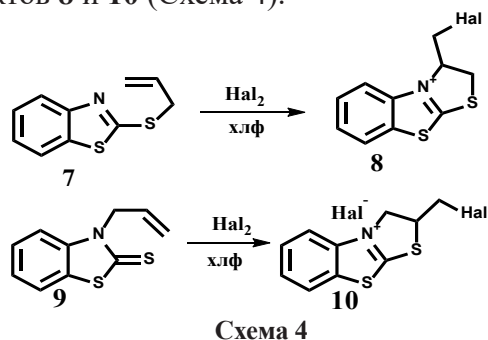
К аналогичным результатам приводит и галогенциклизация пропаргильных производных [8]. Полученный таким образом трииодид **2** проявил высокую активность против грибка *Trichophyton rubrum* в дозе 3.12 мкг/мл (схема 2).



Как и следовало ожидать, галогенциклизации N- или S-аллильных производных тиадиазолов **3**, **4** приводят к получению региоизомерных продуктов **5** и **6** [9] (схема 3).

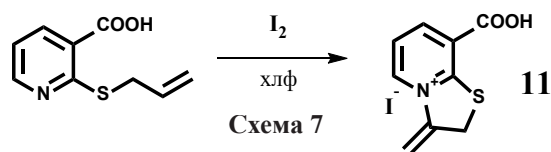


Аналогично ведут себя производные бензотиазола **7** и **9** с образованием продуктов **8** и **10** (Схема 4).

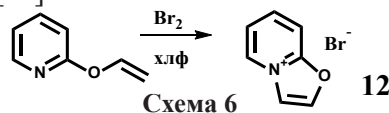


Интересно, что иодид 5-(иодметил)-2-метил-6,7-дигидро-5H-[1,3,4]тиадиазоло[2,3-b][1,3]тиаазиния **10** при концентрации 0.1 мкг/мл препятствует биоплёнкообразованию культур *B. Subtillis* и *K. Pneumonia* и снижает рост культуры *Candida 39*, а при концентрации 10 мкг/мл ингибирует биоплёнкообразование культур *Candida 39* и рост культуры *Staphilococcus* [9, см выше].

На противомикробную и противогрибковую активность испытан ряд соединений – иодид 8-карбоксит-3-метил-идено-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния, иодид 7-метилено-7,8-дигидро[1,3]тиазоло[2,3-і]пуриния и иодид 3-иодметил-8-карбоксит-3-метил-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния [10]. Наиболее активным против *St. aureus*, *Candida albicans* и *Aspergillus niger* оказался иодид 8-карбоксит-3-метил-идено-2,3-дигидро[1,3]тиазоло[3,2-а]пиридиния **11** (схема 5), который в условиях испытаний показал 100%-ную активность против всех исследованных штаммов и, кроме того, подавлял биоплёнкообразование эффективнее клотримазола и цефазолина, взятых в качестве контроля. К сожалению, авторы не указали, какие именно штаммы были испытаны.



2-Винилоксипиридин под действием брома образует бромид 2-бром-2,3-дигидрооксазоло[2,3-а]пиридиния **12** (схема 6) [11].



Аналогично ведут себя 2-винилтиопиридин **13** и 2-винилтиохиолин **15** (схема 7) с образованием соответствующих бромидов тиазоло[2,3-а]пиридиния **14** и – хиолиния **16** [12].

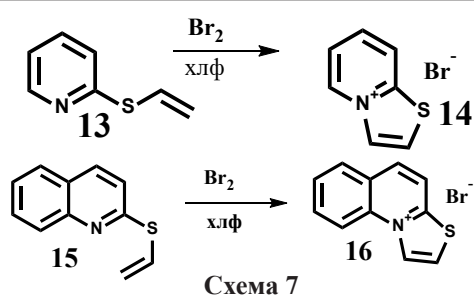


Схема 7

Интересно протекает циклизация N-винилпиридин-2(1H)тиона **17**, приводящая к образованию бромида 2,3-дигидро-1H-индолизин-4-иума **18**, (схема 8), тогда как с аллильным производным **19** образуется «нормальный» продукт – 2-(бромметил)-2,3-дигидротиазоло[3,2-а]пиридин-4-иум бромид **20** [13, 14].

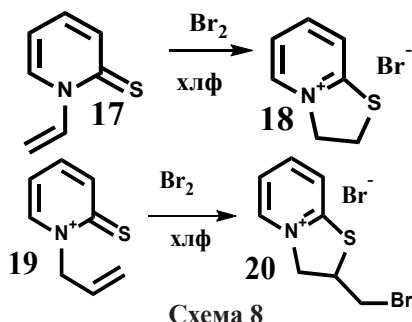


Схема 8

Разумеется, возможны и «обратные» варианты циклизации (схема 9) – атака на атом хинолинового азота, исходя из 8-аллилтиохинолина **21** или 8-аллилоксихинолина **23** [15, 16], что приводит к образованию продуктов **22** и **24**.

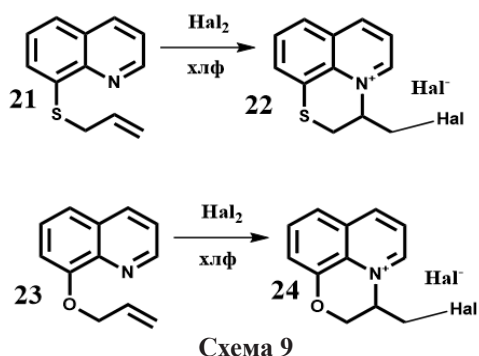


Схема 9

Кроме пиридина и хинолина в реакциях галогенциклизации могут участвовать и другие азотсодержащие гетероциклы. Так, N-аллил-3-хлорпирозин-2-амин **25** (схема 10) под действием иода циклизуется в три-

иодид 8-хлор-3-(иодметил)-2,3-дигидро-1H-имидазо[1,2a]пирозин-4-пирозиниум **26** [17].

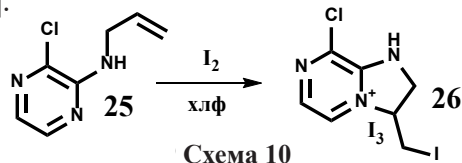


Схема 10

При взаимодействии 6-аллилтиопурина **27** с избытком галогена в хлороформе образуются тригалогениды 7-галогенметил-7,8-дигидротиазоо[2,3-й]пуринов **28**, легко переходящие в 7-галогенметил-7,8-дигидротиазоо[2,3-й]пурины **29** (схема 11) [18].



Схема 11

Орчак с соавторами сообщил о гетероциклизации S-аллильных производных хиनाзолина **30** (схема 12) под действием различных электрофильных агентов с получением трициклических систем **31** [19].

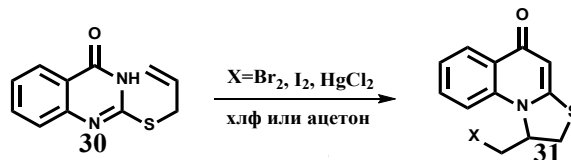


Схема 12

Гетероциклизации под действие солей ртути

Использование галогенидов, ацетатов, трифторацетатов ртути в практике органического синтеза достаточно известно. В нашей стране основные работы по внутримолекулярной электрофильной циклизации различных N-, O-, S-аллилированных гетероциклов принадлежат школе Дмитрия Гымнановича Кима (Южно-Уральский государственный национальный исследовательский университет). В работах Д. Г. Кима показано, что S-аллильные производные 2-меркаптопиридина **32** и 2-меркаптохинолина **34** (схема 13) [20] легко дают бромиды 3-броммеркурометил-2,3-дигидротиазоло[3,2-а]

пиридиния **33** и – хинолиния **35** соответственно при обработке бромидом ртути в ацетоне.

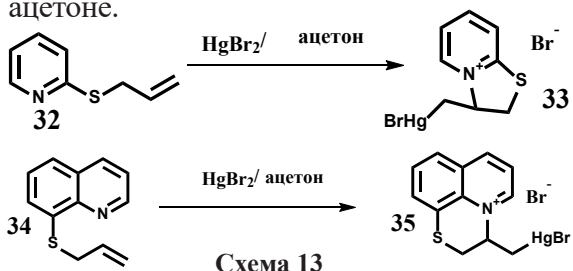


Схема 13

В текущей литературе по циклизации аллильных производных, как правило, используются галогениды двухвалентной ртути или её ацетаты и бис-трифторацетаты. Так, в работе [21] (схема 14) показано, что N-изопропил-1-аминогекс-4-ен **36** с одним эквивалентом хлорида ртути даёт смесь производных пирролидина **37** и пиперидина **38** в соотношении 3:1.

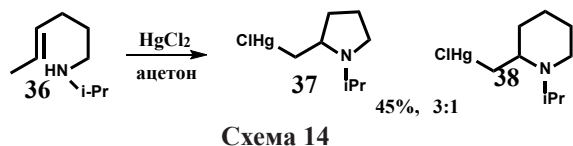


Схема 14

В то же время N-метил-2-бут-2'-ен **39** образует цис-продукт **40** наряду с производным пиперидина **41** [22] (схема 15).

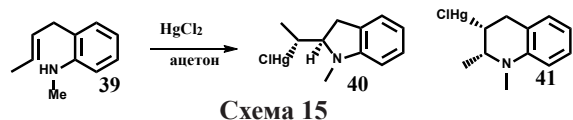


Схема 15

Наличие в молекуле подвижного атома водорода позволило осуществить получение полностью гидрированных азот- или кислородсодержащих гетероциклов (схема 16), причём в случае азотсодержащего – с высокой энантиоселективностью, как это показано при трансформации **42** в **43** [23].

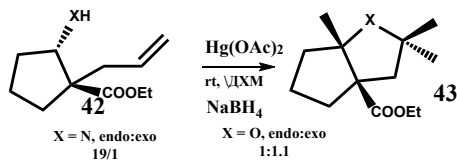


Схема 16

Как описано в работе [24], при обработке соединения **44** трифторацетатом ртути образуется диастереомерная пара имидазолов **45** и **46** в соотношении 1:1 (схема 17).

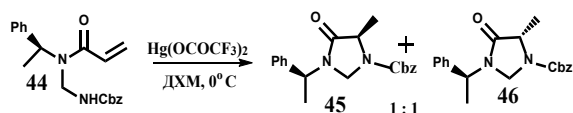


Схема 17

При использовании же аллильного производного **47** (схема 18) образуются соответствующие производные ртутисодержащего пиримидина **48**.

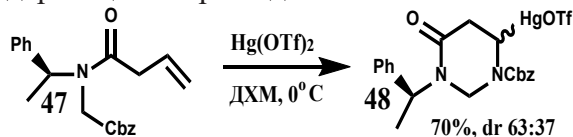


Схема 18

O-Аллильное производное фталимида **49** с высокой диастереоселективностью превращается в трициклическое производное **50** при обработке эквивалентом ацетата ртути с последующим восстановлением боргидридом лития (схема 19) [25].

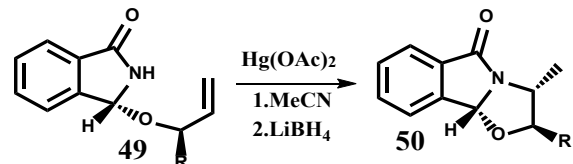


Схема 19

Гомоаллильные производные бензоксазина **51**, как и содержащие фрагмент терминального бутена **54**, ведут себя аналогично, образуя соответственно пяти- **52**, **53** или шестичленный аннелированный гетероцикл **55**, **56** (схема 20) [26].

Лярок и Харрисон [27] показали (схема 21), что в реакции циклизации под действием ацетата ртути (схема 21) могут вступать и орто-замещённые ацетилены **57**, **59** и **61**, причём природа гетероатома в орто-положении роли не играет, что приводит к получению замещённых бензотиофенов **58**, бензофуранов **60** и индолов **62**.

Наряду с ацетатом ртути используют и соответствующие галогениды. Так, Бисвас использовал сулему (схема 22) или диодид ртути для циклизации ацетиленов **63** в дигидропиридин **64**, причём решающую роль в образовании продукта играет

не гетероатом X, а характер ацетилена: для терминального ацетилена характерно образование соединения **64**, а для интернального – образование продуктов **65** (дигидропирролов, дигидрофуранов или карбоциклов) [28].

Интересный пример влияния хирального катализатора приведен в статье [29] (схема 23). Авторами получен рацемический винилиндолин **67** при обработке со-

единения **66** каталитическим количеством трифлата ртути при комнатной температуре и, кроме того, (S)-1-тозил-2-винилиндолин **68** с *ee* 99% при катализе (R)бинафаном. Похожие результаты получили Курисаки с соотр. (схема 24) [30], также при использовании каталитических количеств трифлата ртути для циклизации ацетилена **69** в N-тозилированный индол **70**.

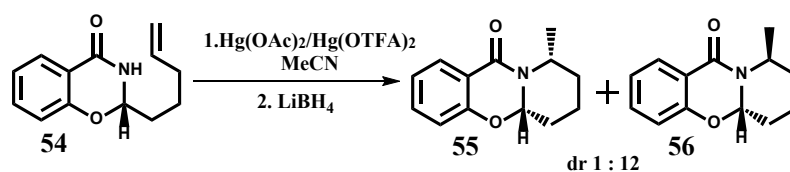


Схема 20

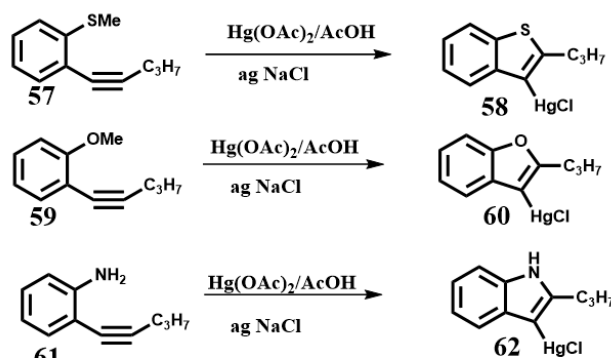


Схема 21

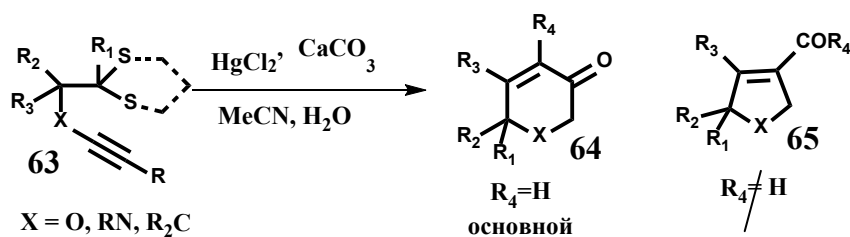


Схема 22

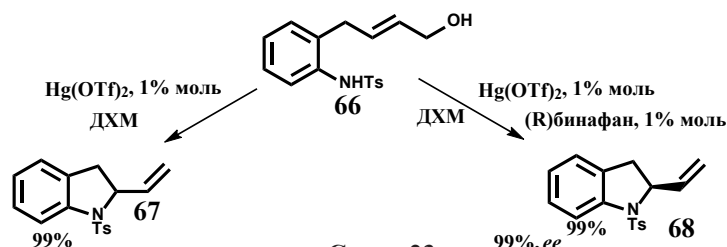


Схема 23

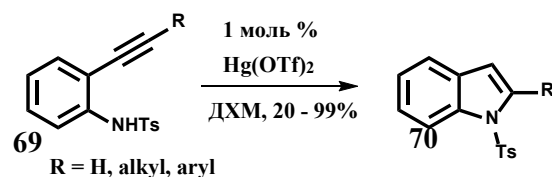


Схема 24

Циклизация 6-аминогекс-1-ина **71** в присутствии каталитического количества (1 моль %) нитрата ртути в ацетонитриле приводит к получению 2-метил-1,2-дигидропиперидина **72** (схема 25) – перспективного синтона для получения аннелированных гетероциклов [31].

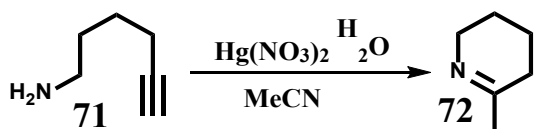


Схема 25

Занг и Хайдер показали, что анилид **73** при действии каталитического количества ацетата ртути даёт трициклический продукт **74** (схема 26), причём реакцию проводили в редко используемой в данных реакциях муравьиной кислоте [32].

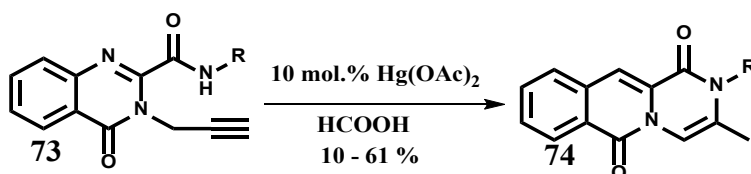


Схема 26

Радикальную циклизацию N-аллилбензамидов **75** в замещённый дигидроизохинолон **76** под действием [бис(дифторацетокси)иодо]бензола осуществили авторы [33] (схема 27).

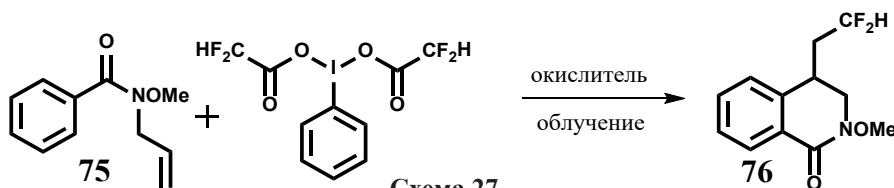


Схема 27

Кроме использования солей ртути, применяют и другие циклизующие агенты. Так, интересный синтез аналогов тропановых алкалоидов **78** осуществили авторы [34] (схема 28). На решающей стадии циклизации соединения **77** был использован рутениевый катализатор Граббса 2-ого рода.

получения серии хроман-4-онов и хинолин-4-онов **80**, содержащих дифторметильную группу.

В работе [35] (схема 29) показана применимость солей меди для циклизации 2-(аллилокси)арилальдегидов **79** для

В реакциях циклизации открытоцепных соединений, содержащих гетероатом в цепи, можно применять «органометаллокатализ», например, (схема 30) авторы [36] получили таким образом представительный ряд замещённых N-метилпир-ролидинонов **82** из аллиламидов **81**.

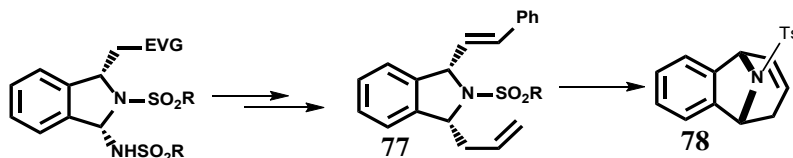


Схема 28

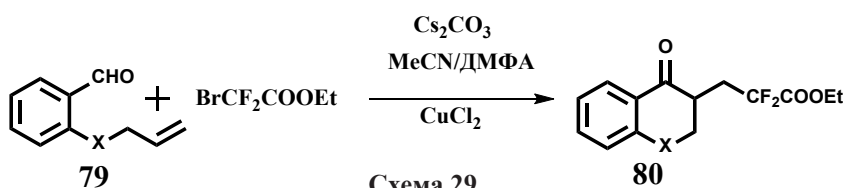


Схема 29

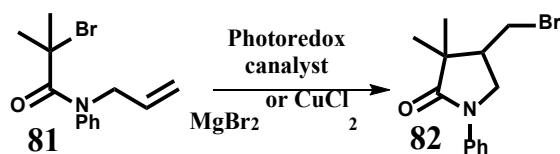


Схема 30

Арилдиформетилирование соединений **83** в соответствующие индолоны-2 **84** достаточно просто осуществляется (схема 31) за счёт использования возникающих при облучении производных, например, диформетилсульфонов, радикалов [37].

Китайские исследователи показали возможность дифторалкилирования соединения **85** (схема 32) для синтеза соответ-

ствующих производных дигидробензофурана и –индола **86** [38].

Проблемы функционализации продуктов внутримолекулярной циклизации решаются иногда довольно своеобразно (схема 33). Так, авторы [39] использовали производные алленов **87** для синтеза β-карболинов **88** под действием N-иодсукцинимда.

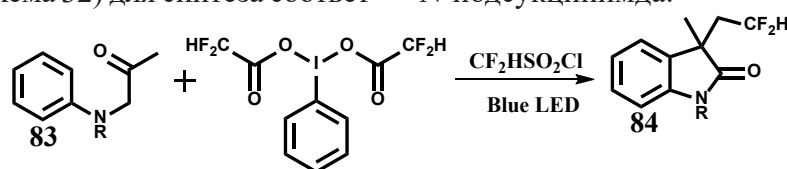


Схема 31

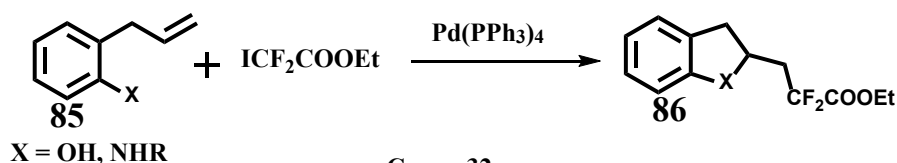


Схема 32

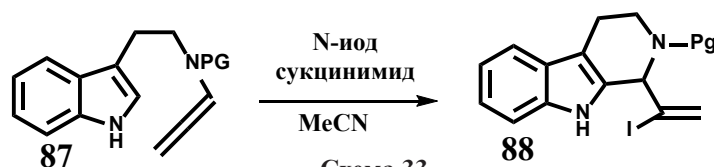


Схема 33

Альваро и др. [40] показали, что 1-аллил-(2-трет.бутил)-1-бензил-3-оксоиндолин-1,2-дикарбоксилат **89** (схема 34) при катализе аллильными комплексами палладия превращается в трет.бутил 1-аллил-1-бензил-3-оксоиндолин-2-карбоксилат **90**, тогда как N-незащищённое производное **91** можно перевести в 10-бензил-1,10b-пиридо[2,1-a]изоиндол-6(4H)-он **92**.

Следует отметить, что большинство работ по взаимодействию непредельных (в основном аллильных) соединений с различными производными, содержащими ртуть, используются авторами для

формирования новых связей углерод-углерод или углерод-гетероатом и, по формированию необходимой структуры, атом ртути, как правило, удаляется или боргидридами металлов, или галогеном. Так, интересный подход к аналогам мезембриновых алкалоидов **93** продемонстрирован в работе [41] (схема 35). Ещё более интересен синтез морского алкалоида мандангамина А **94**. [42].

Сведения о биологической активности продуктов ртутициклизации/демеркурирования весьма скудны, что объясняется в большинстве случаев известной биологической активностью целевых продуктов.

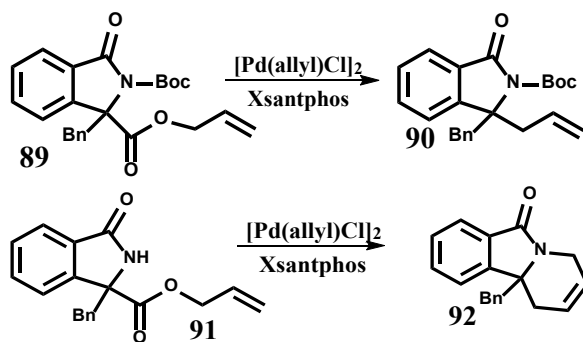


Схема 34

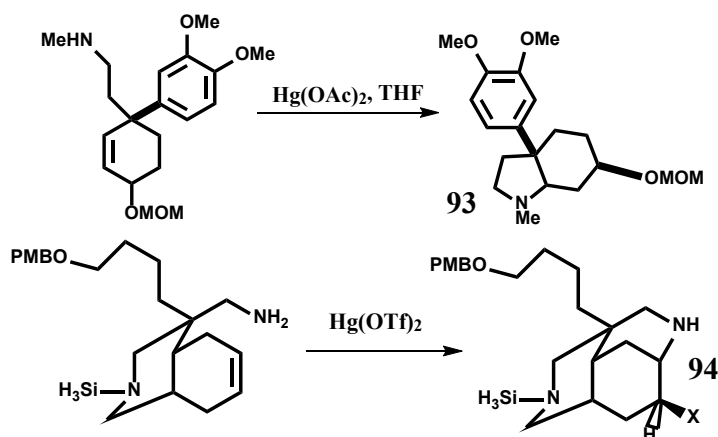


Схема 35

Сведения о биологической активности продуктов ртутициклизации/демеркурирования весьма скудны, что объясняется в большинстве случаев известной биологической активностью целевых продуктов.

Вместе с тем, несмотря на многочисленные ссылки на биологическую активность продуктов реакции, первоначально образующиеся ртутиорганические соединения практически не испытывались в качестве БАС.

При изучении противомикробного действия некоторых производных 3,4-ди-

гидроизохинолина было установлено (схема 36), что действие препарата **96**, полученного из N-аллил-3,3-диметил-3,4-дигидроизокарбостирила **95**, на бактерии *S.haemolyticus 18*, и полученного лабораторной селекцией его производного штамма *S.haemolyticus 18₃₃*, обладающего устойчивостью к ванкомицину, находится на уровне 1×10^{-2} мкг/мл. В качестве референтных штаммов при оценке антибиотикочувствительности использовали бактерии *S.aureus ATCC 25923* и *S.epidermidis 33 GISK* [43].

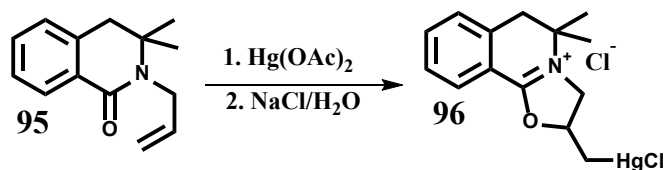


Схема 36

Библиографический список

1. А. Г. Макарова, А. Н. Несмеянов, Методы элементоорганической химии. Ртуть. Москва: «Наука», 1965. с. 115-181
2. Y. - S.Wu, The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review / Y.-S.Wu, A. I. Osman, M. Hosny, A. M. Elgarahy, A. S. Eltaweil, D. W. Rooney, Zh. Chen, N. S. Rahim, M. Sekar, S. C. B. Gopinath, N.N.I. M. Rani, K. Batumalaie, P. S.Yap./ ACSOmega. 2024, 9, 5, 5100-5126 (Review), DOI: 10.1021/acsomega.3c07047
3. J. F. Risher., Organic mercury compounds: human exposure and its relevance to public Health / J.F. Risher., H.E. Murray, G.R. Prince // Toxicology and Industrial Health, 2002; 18: 109/160. Doi 10.1191/0748233702th138oa
4. F. Maqsood, Recent trends in medicinal applications of mercury based organometallic and coordination compounds / F. Maqsood , S. S. Al-Rawi, A. H. Ibrahim, F. Jamil, A. Zafar, M.A. Iqbal, U.S. Shoukat, M. Asad , S. U. Zia, F. Ahmad, M. Atif // Rewievs in Inorganic Chemistry, 45, 2025, 375–396. doi. org/10.1515/revic-2024-0033
5. D. Ukale, Organomercury Nucleic Acids: Past, Present and Future / D. Ukale, T. Lönnberg // Chembiochem, 2021; 22(10):1733-1739. doi:10.1002/cbic.202000821
6. Г. Дженкинс, У. Хартунг, Химия органических лекарственных препаратов // Москва: Изд. Иностран. Лит., 1949, с. 502 -506
7. Д.Г. Ким, Новый синтез [1,3]тиазино[3',2',2,3][1,2,4]триазино[5,6-*b*]индольной системы / Д.Г. Ким, А.В. Журавлёва // ХГС, 2009, № 10, 1590-1592
8. А.В. Рыбакова, О направлении реакций гетероциклизации 3-аллил- и 3-пропаргилсульфанил-5Н-[1,2,4]триазино[5,6-*b*]индолов / А.В. Рыбакова, П.А. Слепухин, Д. Г. Ким // ХГС, 2013, № 8, 1320-1324
9. Д.Г. Ким, Исследование галогенциклизации S- и N-аллильных производных 2-бензотиазолтиона / Д.Г. Ким, Н.М. Судолова, П.А. Слепухин // ХГС, 2011, № 5, 760-765
10. Калита Е.В., Петрова К.Ю., Ким Д.Г. Конденсированные [1,3]тиазолоазиниевые системы с узловым атомом азота, обладающие фунгицидной и бактериостатической активностью. Пат. РФ 2 717 943, опубл. 27.03.2020, Бюл. № 9
11. Скворцова Г.Г., Необычное взаимодействие 2-винилоксипиридина с бромом / Скворцова Г. Г., Ким Д. Г., Сигалов М. В. // ХГС, 1975, 8, 1147 – 1148
12. Скворцова Г.Г., О синтезе тиазоло[2,3-*a*]пиридиниевых солей / Скворцова Г. Г., Ким Д. Г., Сигалов М. В. // ХГС, 1976, 6, 858
13. Г.Г. Скворцова, Способ получения дигидротиазоло[3,2-*a*]хинолиний бромидов / Г.Г. Скворцова, Д.Г. Ким, Л.М. Ким. А.с. СССР 854930, БИ 1981, № 30
14. Г.Г. Скворцова, 2-бромметилтиазоло[5,4,3-*ij*]хинолиний бромид, проявляющий туберкулостатическую активность / Г.Г. Скворцова, Д.Г. Ким, С.Н. Тандура, А.Е. Александрова, Б.И. Вишневецкий, Л.Н. Эртевциан. А.с. СССР 707220
15. Д. Г. Ким, Синтез галогенидов 2,3-дигидро[1,4]тиазино[2,3,4-*ij*]хинолиния / Д.Г. Ким, Д. Н. Амбур, И. А. Шеина // Изв. ВУЗов, Химия и хим. технология, 1993, 3, 111 – 113
16. Д. Г. Ким, Галогенциклизация 8-аллилоксихинолинов /Д. Г. Ким, Э. Р. Закирова // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология, 1993, 3, 46-48
17. P.A. Slepukhin, Simple synthesis of imidazo[1,2-*a*]pyrazines / P. A. Slepukhin, D. G. Kim, G. L. Rusinov, V. N. Charushin, O. N. Chupakhin // Chem. Heterocyclic Comp. 38, 1142–1143 (2002). doi. org/10.1023 / A:1021282004750
18. D.G. Kim, Synthesis of derivatives of 7,8-dihydrothiazolo[2,3-*i*]purine by halocyclization of 6-allylthiopurine / D. G. Kim, Yu. R. Galina // Chem Heterocycl Compd, 40, 10, 1339 – 1341, 2004. doi.org/10.1007/s10593-005-0076-9
19. V.V. Orysyk, Heterocyclization of 2-(2-propenylthio)-4(1H)-quinazolinone under the influence of electrophilic agents / V. V. Orysyk,; A. A. Dobosh, Yu. L Zborovskii, V. I. Staninets, S. M. Khripak // Ukrainskii Khimicheskii Zhurnal (Russian Edition) (2001), 67(9-10), 46-48
20. Ким Д.Г., Меркуроциклизация 2-аллилтиопиридинов / Ким Д.Г., Слепухин П.А. Меркуроциклизация 2-аллилтиопиридинов. // ХГС, 1999, 12, 1694.

21. *Perie, J.J.*; Reaction d'aminomercuration–VII: Heterocyclisation intramoléculaire d'amines éthyleniques: Etude des différents paramètres / Perie, J. J.; Laval, J. P.; Roussel, J.; Lattes, A. // *Tetrahedron*. 1972, 28, 675–699. doi:10.1016/0040-4020(72)84031-6
22. *Roussel, J.*; Reaction d'aminomercuration VIII: Stereochimie /Roussel, J.; Perie, J.J.; Laval, J.P.; Lattes, A. // *Tetrahedron*. 1972, 28, 701–716. doi:10.1016/0040-4020(72)84032-8].
23. *Peçanha, E.P.*; Highly diastereoselective mercury-mediated synthesis of functionalized 2-azabicyclo[3.3.0]octane derivatives / Peçanha, E. P.; Verli, H.; Rodrigues, C. R.; Barreiro, E. J.; Fraga, C. A. M. // *Tetrahedron Lett.* 2002, 43, 1607–1611. doi:10.1016/s0040-4039(02)00074-6
24. *Amoroso, R.*; Synthesis of L and D α -amino acids from chiral amidals / Amoroso, R.; Cardillo, G.; Tomasini, C. // *Tetrahedron Lett.* 1990, 31, 6413–6416. doi:10.1016/s0040-4039(00)97079-5
25. *Takacs, J. M.*; A Removable Auxiliary for Amidomercuration Reactions: The Stereocontrolled Preparation of Vicinal Amino Alcohols / Takacs, J. M.; Helle, M. A.; Yang, L. // *Tetrahedron Lett.* 1989, 30, 1777–1780. doi:10.1016/s0040-4039(00)99577-7
26. *Takacs, J. M.*; A removable auxiliary for amidomercuration reactions: The stereoselective preparation of substituted n-acyl pyrrolidines and piperidines / Takacs, J. M.; Helle, M. A.; Takusagawa, F. // *Tetrahedron Lett.* 1989, 30, 7321–7324. doi:10.1016/s0040-4039(00)70687-3
27. *Larock, R. C.*; Mercury in Organic Chemistry. 26.' Synthesis of Heterocycles via Intramolecular Solvomercuration of Aryl Acetylenes / Larock, R. C.; Harrison, L. W. // *J. Am. Chem. Soc.* 1984, 106, 4218–4227. doi:10.1021/ja00327a026
28. *Biswas, G.*; Mercuric Chloride and Iodide Mediated Cyclization of Tethered Alkyndithioacetals as a General Route to Five- and Six-Membered Rings: Tuning of Regioselectivity by Alkyne Substitution / Biswas, G.; Ghorai, S.; Bhattacharjya, A. // *Org. Lett.* 2006, 8, 313–316. doi:10.1021/ol0527274
29. *Namba, K.*; Hg(OTf)₂-Catalyzed Cyclization of N-Tosylanilinoallylic Alcohols to 2-Vinylindolines / Namba, K.; Nakagawa, Y.; Yamamoto, H.; Imagawa, H.; Nishizawa, M. // *Synlett*. 2008, 1719–1723. doi:10.1055/s-2008-1077881
30. *Kurisaki, T.*; Hg(OTf)₂-Catalyzed cycloisomerization of 2-ethynylaniline derivatives leading to indoles / Kurisaki, T.; Naniwa, T.; Yamamoto, H.; Imagawa, H.; Nishizawa, M. // *Tetrahedron Lett.* 2007, 48, 1871–1874. doi:10.1016/j.tetlet.2006.12.120
31. *Müller, T. E.*; Intramolecular hydroamination of alkynes catalysed by late transition metals / Müller, T. E.; Pleier, A.-K. // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1999, 583. doi:10.1039/a808938h
32. *Zhang, J.*; An efficient access to novel 2H-pyrazino[2,1-b]quinazoline-1,6-diones via intramolecular alkyne hydroamination (16-9495SP)/Zhang, J.; Haider, N. // *ARKIVOC*. 2016, No. iii, 125–133. doi:10.3998/ark.5550190.p009.495
33. *X. Wang, R. Liu, Sh. Zhang, T. Zhou, X. Zhao, K. Lu.* Visible-light-induced radical cyclization of N-allylbenzamide with Bis(difluoroacetoxy)iodo]benzene to difluoromethylated dihydroisoquinolinones // *Tetrahedron Lett.* 96 (2022) 153761. Doi /doi.org/10.1016/j.tetlet.2022.153761
34. *T. Tsujihara,* Synthesis of 6,7-benzene-fused tropane derivatives from isoindoline-aminal hybrid compound / T. Tsujihara, R. Sasaki, M. Fukkoshi, S. Hatakeyama, T. Takehara, T. Suzuki, T. Kawano // *Tetrahedron Lett.*, 95, (2022), 153724. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2022.153724
35. *W. Guo,* Copper-catalyzed radical cascade cyclization of 2-(allyloxy)arylaldehydes towards chroman-4-one derivatives / W. Guo, L. Gui, X. Chen, Zh. Dai, L. Wang, X. Wang. // *Tetrahedron Lett.*, 94, (2022) 153605. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.153605
36. *N. Tsuchiya,* Atom-transfer radical cyclization of α -bromocarboxamides under organophotocatalytic conditions / N. Tsuchiya, Y. Nakashima, G. Hirata, T. Nishikata. // *Tetrahedron Lett.*, 69, (2021) 152962. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152962
37. *K. Lu,* Visible-light induced radical aryldifluoromethylation of N-arylacrylamides by bis(difluoroacetoxy)iodo]benzene / K. Lu, L. Lei, Q. Wei, T. Zhou, X. Jia, Q. Li, X. Zhao. // *Tetrahedron Lett.*, 67, (2021) 152864. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152864
38. *M.-J. Ma,* Difluoroalkylation of alkenes promoted by noncovalent interaction: A general method for the synthesis of difluoro-contained dihydrobenzofurans and indolins / M.-J. Ma, J. Jia, G. Yan, C. Yin, W. Yu, P. Guo, L. Zhao, Ch.-Y. He. *Tetrahedron Lett.*, 67, (2020) 152558. Doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.152558

39. N. Ding, NIS-promoted intramolecular cyclization of allenamides for the synthesis of tetrahydro- β -carbolines / N. Ding, X.-F. Zhong, X.-J. Tan, L. Yang, T. Hong, X.-X. Li, Z.-G. Zhao. // *Tetrahedron Lett.*, 81, (2021) 153334. doi.org/10.1016/j.tetlet.2021.153334
40. M. Alvarado, Synthesis of 3,3-disubstituted allyl isoindolinones via Pd-catalyzed decarboxylative allylic alkylation / M. Alvarado, M. Loo, H. Adler, C. Arnall, K. Amsden, G. Martinez, R. Navarro // *Tetrahedron Lett.*, 148, (2024) 155242. doi.org/10.1016/j.tetlet.2024.155242
41. Chida, N.; Chiral and stereoselective total synthesis of (-)-mesembranol starting from D-glucose / Chida, N.; Sugihara, K.; Ogawa, S. // *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1994, 901. DOI:10.1039/C39940000901
42. Matzanke, N.; A Concise Approach to the Tricyclic Core of the Cytotoxic Marine Alkaloid Madangamine A / Matzanke, N.; Gregg, R. J.; Weinreb, S. M.; Parvez, M. // *J. Org. Chem.* 1997, 62, 1920. DOI: 10.1021/jo970208b
43. Кононова Л.И., Синергидное действие катионного пептида хоминина и нового дезинфектанта на основе изохинолина на образование биоплёнок полирезистентных стафилококков / Кононова Л.И., Пьянков И.А., Смоляк А.А., Шкляев Ю.В., Коробов В.П. // *Антибиотики и Химиотерапия.* 2020;65(5-6):11-18 doi.org/10.37489/0235-2990-2020-65-5-6-11-18 09.

HETEROCYCLIZATION OF SOME UNLIMITED COMPOUNDS UNDER THE ACTION OF ELECTROPHILIC AGENTS

Smolyak A.A., Shklyayev Yu.V.

Institute of Technical Chemistry UB RAS

For citation:

Smolyak A.A., Shklyayev Yu.V. Heterocyclization of some unlimited compounds under the action of electrophilic agents // *Perm Federal Research Center Journal.* – 2025. – № 4. – P. 62–73. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2025.4.5>

The review considers the formation of nitrogen-, oxygen- and sulfur-containing heterocycles in the interaction of non-limiting compounds with electrophilic reagents of various nature: halogens, salts of divalent mercury and some others.

Keywords: non-limiting compounds, electrophilic reagents, heterocyclization.

Сведения об авторах

Смоляк Андрей Алексеевич, кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт технической химии УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИТХ УрО РАН»), 614068, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 3; e-mail: smolyak.andrew@gmail.com
Шкляев Юрий Владимирович, доктор химических наук, заведующий лабораторией синтеза активных реагентов, «ИТХ УрО РАН»; e-mail: yushka49@mail.ru

Материал поступил в редакцию 14.10.2025