

УДК 547.796.1

**Ю. В. ГРИГОРЬЕВ, С. В. ВОЙТЕХОВИЧ,
П. Н. ГАПОНИК, О. А. ИВАШКЕВИЧ**

НОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ХИМИИ ТЕТРАЗОЛОВ

*НИИ физико-химических проблем
Белорусского государственного университета,
Минск, Беларусь*

В обзоре обобщены результаты исследований, проведенных в НИИ ФХП БГУ в области химии производных тетразола за последнее пятилетие. Основное внимание уделено наиболее значимым направлениям в синтезе и использовании тетразолов: – гетероциклизации первичных аминов с триэтилортоформиатом и азидом натрия, являющейся удобным, безопасным и селективным методом получения широкого круга 1-замещенных тетразолов; – кислотно-катализируемому N-алкилированию тетразольного цикла, позволяющему селективно и целенаправленно получать N-замещенные тетразолы различного строения, включая полиядерные и макроциклические, а также соли тетразолия; – использованию производных тетразола в качестве лигандов в нанохимии для стабилизации наноразмерных объектов и координационной химии для целенаправленного дизайна полифункциональных материалов на основе координационных соединений тетразолов.

The review generalizes and systematizes the results of research on the synthesis and properties of tetrazole derivatives obtained in the Research Institute for Physical Chemical Problems at the BSU within the last five years. The main attention is fixed on important directions in synthesis and application of tetrazoles:

– heterocyclization of primary amines with triethyl orthoformate and sodium azide, which is the facile, safe and selective method for preparation of wide variety of 1-substituted tetrazoles;
– acid-catalyzed N-alkylation of tetrazole heteroring, which allows selective preparation of various tetrazoles, including polynuclear and macrocyclic N-substituted tetrazoles and tetrazolium salts;
– application of tetrazoles as ligands for stabilization of nanoparticles and for design of polyfunctional materials based on coordination compounds of tetrazoles.

Ключевые слова: производные тетразола, методы синтеза, функционализация, нанохимия, координационная химия.

Keywords: tetrazole derivatives, synthesis, functionalization, nanochemistry, coordination chemistry.

В ряду азолов тетразол обладает экстремальными свойствами, имея высшую кислотность, наименьшую основность, максимальный дипольный момент, высокую энтальпию образования и самое большое содержание азота при достаточно высокой стабильности. Поэтому производные тетразола имеют комплекс ценных свойств и представляют интерес в качестве объектов как фундаментальных, так и прикладных исследований. Производные тетразола находят практическое использование в различных областях жизнедеятельности человека: в специальной технике, промышленности, сельском хозяйстве в качестве фунгицидов и гербицидов, в биохимии и фармакологии [1]. Наличие в тетразольном цикле четырех электроотрицательных атомов азота обуславливает многообразие способов его координации и существование комплексов различных типов. Это дает широкие возможности создания металлосодержащих систем с уникальными магнитными, оптическими и иными свойствами, а также использования их в качестве аналитических реагентов и сорбентов различных металлов.

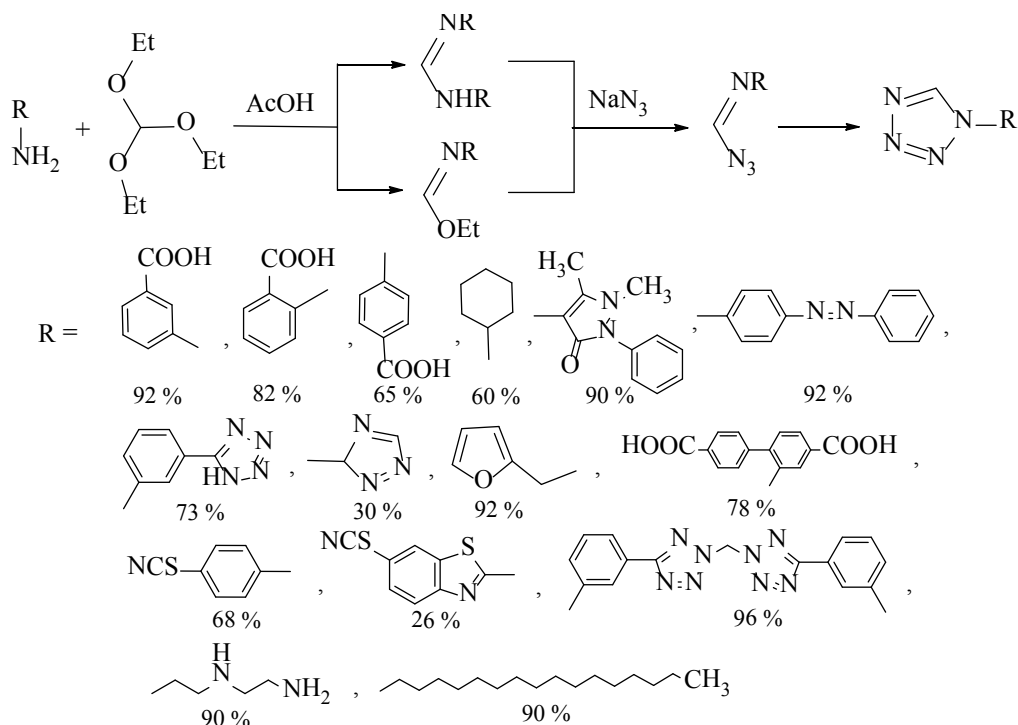
Успехи химии тетразолов обобщены в ряде обзорных работ, большинство из которых до 2006 г. включительно поименованы в фундаментальном обзоре [1].

В Белгосуниверситете исследования в области химии тетразолов проводятся с середины 1970-х гг. В результате разработаны удобные и эффективные методы синтеза производных тетразола, полимеров и металлокомплексов на их основе, изучены строение, термохимические и другие свойства полученных соединений, определены перспективы дальнейшего развития и практического использования результатов исследований, которые в той или иной степени обсуждены в обзорах [1–16].

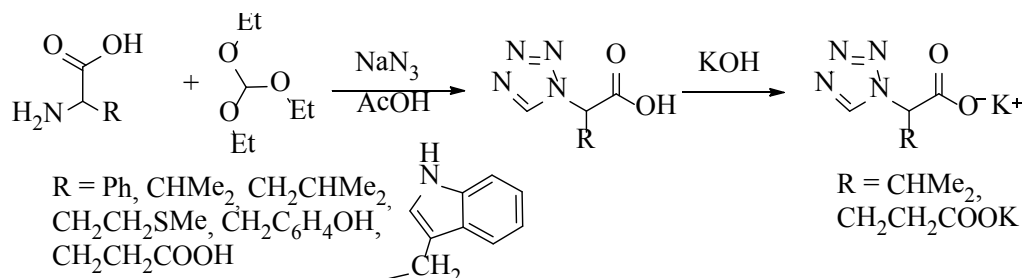
Данная работа посвящена систематизации и обобщению результатов, полученных в области химии тетразолов в БГУ в основном в последние 5 лет.

СИНТЕЗ 1-ЗАМЕЩЕННЫХ ТЕТРАЗОЛОВ

Ранее было показано (см. обзоры [6, 7, 9, 15, 16] и цитируемую там литературу), что одним из удобных и безопасных способов получения 1-замещенных тетразолов является гетероциклизация первичных аминов с триэтилортоформиатом и азидом натрия, протекающая с промежуточным образованием иминоэфиров, формамидинов и имидоилазидов. Эта реакция начинается уже при комнатной температуре, а при температурах 60–95 °С в нее легко и быстро вступают амины алифатического, ароматического и гетероциклического рядов, образуя в большинстве случаев при мольном соотношении амин – ортоэфир – азид 1 : 3 : 1,1 соответствующие 1-замещенные тетразолы с умеренным или высоким выходом. В последние годы препаративные возможности этой реакции нами существенно расширены. В результате синтезирован и охарактеризован ряд новых 1-замещенных тетразолов, перспективных для исследований в качестве биологически активных объектов, лигандов в процессах комплексообразования с солями переходных металлов и др.



Эта реакция может быть использована и для получения тетразолосодержащих аминокислот, которые представляют значительный научный и практический интерес в качестве гетероциклических аналогов аминокислот с блокированной аминогруппой. Ранее таким образом аминогруппа была замещена на тетразолильную в глицине, β-аланине, фенилаланине [15] и таурине [17]. В последние годы нами в реакцию гетероциклизации с азидом натрия и триэтилортоформиатом были вовлечены также валин, лейцин, метионин, тирозин, триптофан и др.



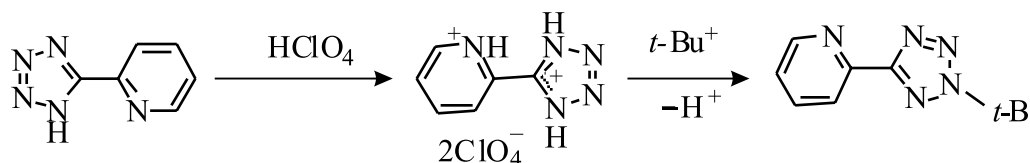
В опытах с триптофаном и глутаминовой кислотой соответствующие продукты тетразолирования были получены с невысокими выходами (31–35%), а в случае цистина и цистеиновой кислоты аминокислоты были выделены из реакционной среды в неизменном виде [18, 19].

Таким образом, проведенные авторами данной статьи на примере более 100 первичных аминов различного строения исследования позволяют сделать вывод об универсальности реакции гетероциклизации и перспективности ее использования для получения 1-замещенных тетразолов. Протеканию реакции не препятствуют объем заместителя у аминогруппы (*t*-Bu, Mes, 1-Ad, нафтил и др.) и наличие функциональных групп (NO₂, SO₂NH₂, N₃, Hlg, OH, COOH и др.), не способных в условиях гетероциклизации к конкурентному взаимодействию с другими компонентами реакционной системы.

КИСЛОТНО-КАТАЛИЗИРУЕМОЕ АЛКИЛИРОВАНИЕ ТЕТРАЗОЛОВ

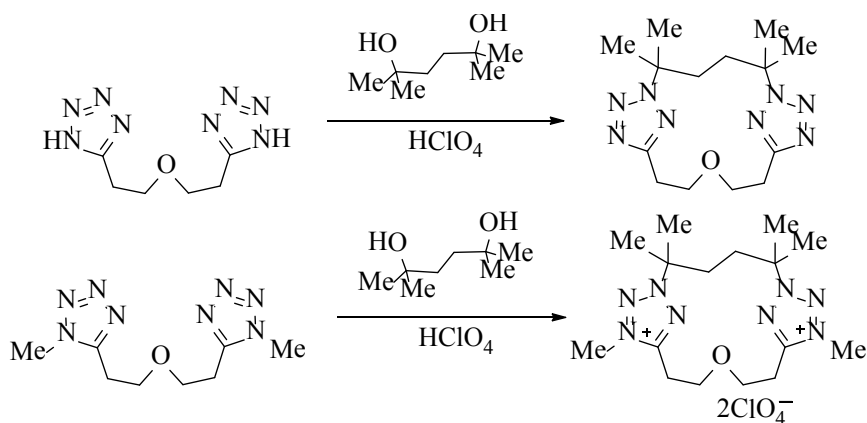
В 90-х годах прошлого века в лаборатории химии конденсированных сред НИИ ФХП БГУ было обнаружено, что алкилирование 5-монозамещенных тетразолов в среде концентрированной серной кислоты спиртами [20] и олефинами [21], имеющими структуру, способствующую стабилизации образующихся из них карбокатионов (*трет*-бутиловый, изопропиловый, циклогексильный спирты и соответствующие им олефины), протекает селективно с образованием N²-замещенных тетразолов с выходом более 75 %.

В развитие этих результатов в последние годы исследования кислотно-катализируемого алкилирования были направлены на вовлечение в него полифункциональных алкилирующих агентов и тетразолов. В частности, 2-*трет*-бутил-5-(2-пиридил)тетразол, представляющий интерес в качестве хелатирующего лиганда, был получен нами с выходом 83 % селективным алкилированием 5-(2-пиридил)-1*H*-тетразола *трет*-бутиловым спиртом в среде 65 % водной хлорной кислоты [22].

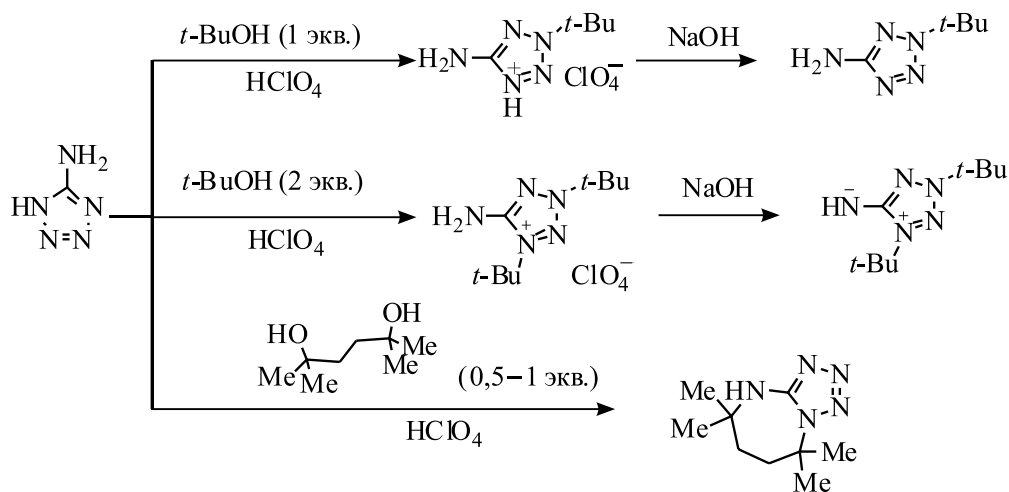


При алкилировании бистетразолов 2,5-диметилгександиолом-2,5 бифункциональным аналогом *трет*-бутилового спирта с высокими выходами были получены тетразолсодержащие макроциклы, включая первый представитель макроциклических солей тетразолия [23].

При изучении кислотно-катализируемого алкилирования 5-аминотетразола и его производных установлена принципиальная возможность участия в алкилировании аминогруппы [24], чего не наблюдается при проведении процесса в основных или нейтральных средах. В результате синтезирован ряд новых ранее не описанных соединений. *Трет*-бутилирование 5-аминотетразола системой *t*-BuOH–HClO₄ протекает аналогично таковому для тетразола и 5-метилтетразола [25] и, в зависимости от соотношения реагентов, ведет к селективному образованию продуктов N²-моно- и N¹,N³-ди-*трет*-



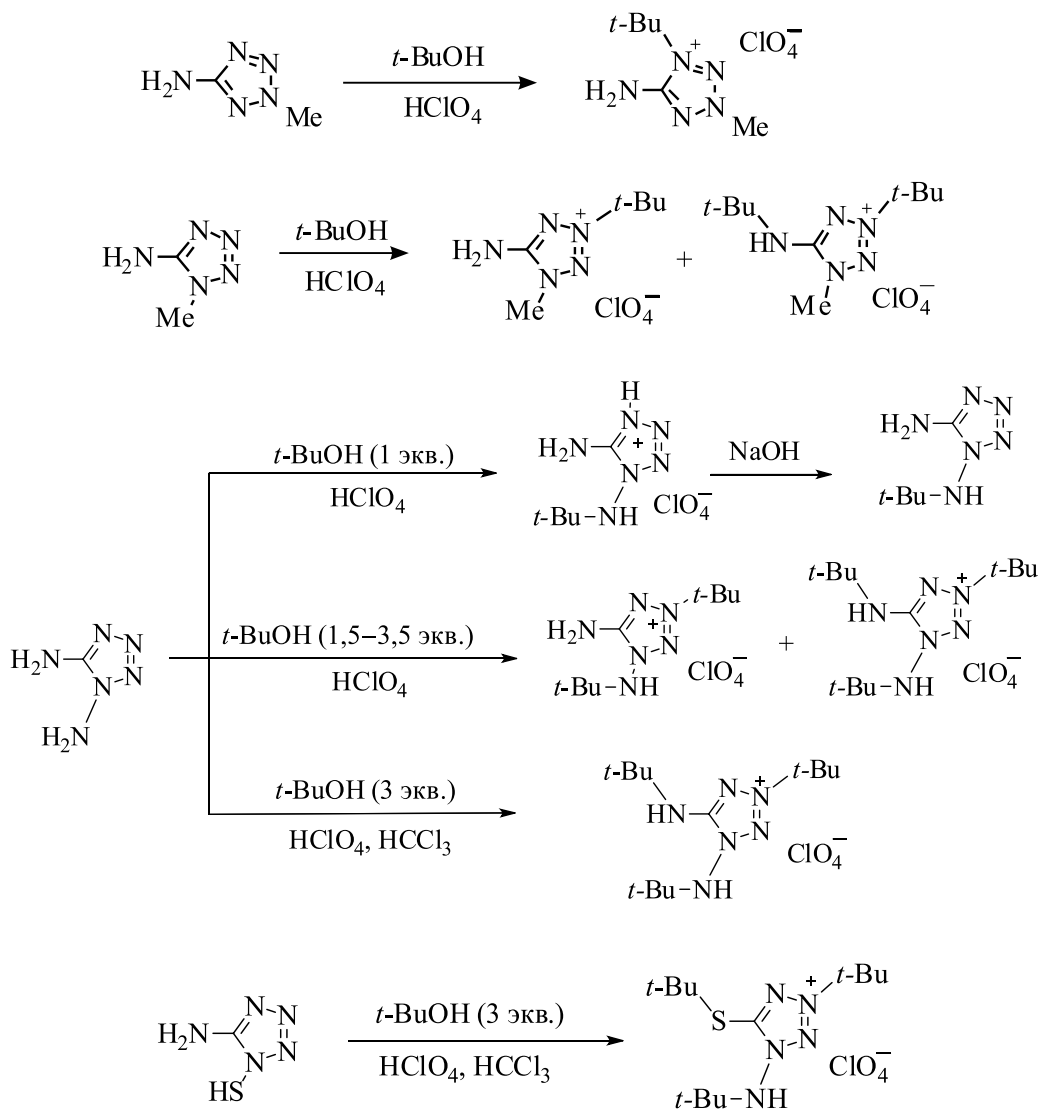
бутирования, которые при действии основания превращаются в свободные амины [24]. Однако при использовании в качестве алкилирующего агента 2,5-диметил-гександиола-2,5 процесс протекает по эндоциклическому атому азота и аминогруппе 5-аминотетразола, приводя к 5,5,8-тетраметил-5,6,7,8-тетрагидро-4*H*-тетразоло[1,5-*a*][1,3]дiazепину с выходом 70 % [26].



Различным образом системой *t*-BuOH–HClO₄ алкируются изомерные *N*-метил-5-аминотетразолы. Так, 5-амино-2-метилтетразол кватернизуется только по эндоциклическому атому N⁴, в то время как 5-амино-1-метилтетразол также алкируется и по аминогруппе [24].

В случае 1,5-диаминотетразола в зависимости от соотношения реагентов алкированию подвергаются как эндоциклический атом N³, так и атомы азота обеих аминогрупп [24].

На примере 1-амино-5-меркаптотетразола показано, что в кислотной среде наряду с эндоциклическим атомом N³ и атомом азота аминогруппы алкированию подвергается и меркаптогруппа [24].

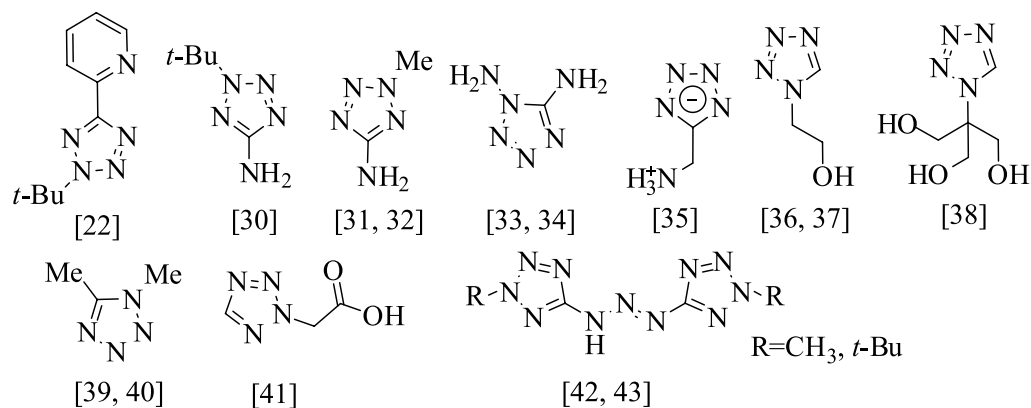


Как показано на примере производных 1,2,3- [27] и 1,2,4-триазолов [26, 28, 29], изученные для тетразолов процессы кислотно-катализируемого алкилирования могут быть успешно использованы и для функционализации других азолов.

ТЕТРАЗОЛЫ КАК ЛИГАНДЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Наличие в структуре тетразольного цикла четырех атомов азота, способных к комплексообразованию, определяет разнообразие образуемых производными тетразола координационных соединений, многие из которых обладают

такими практически важными свойствами, как фото- и термохромизм, ферромагнетизм, мезоморфизм, нелинейные оптические свойства, люминесценция, каталитические и биологические свойства. Сведения по основным типам этих соединений, опубликованные до 2005 г., обобщены нами в обзоре [2]. В последние годы наши исследования в области комплексных соединений производных тетразола были направлены главным образом на разработку новых подходов к их синтезу и исследование комплексобразующих свойств функционально замещенных тетразолов. В качестве лигандов по отношению к солям переходных металлов изучены нижеуказанные тетразолы:

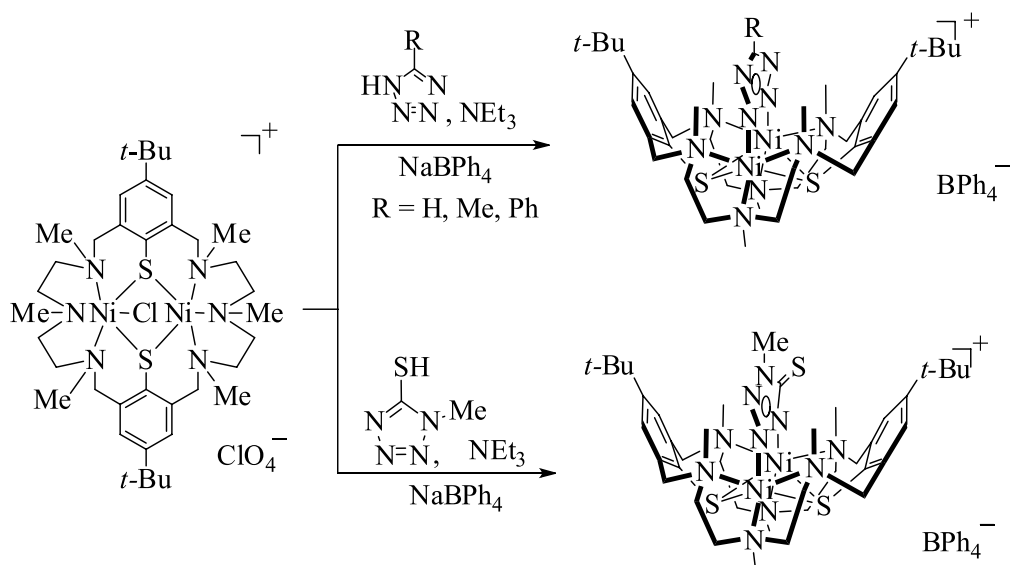


При исследовании молекулярной и кристаллической структуры координационных соединений 2-(тетразол-2-ил)уксусной кислоты впервые обнаружена необычная координация тетразольного цикла – N¹-монодентатная [22].

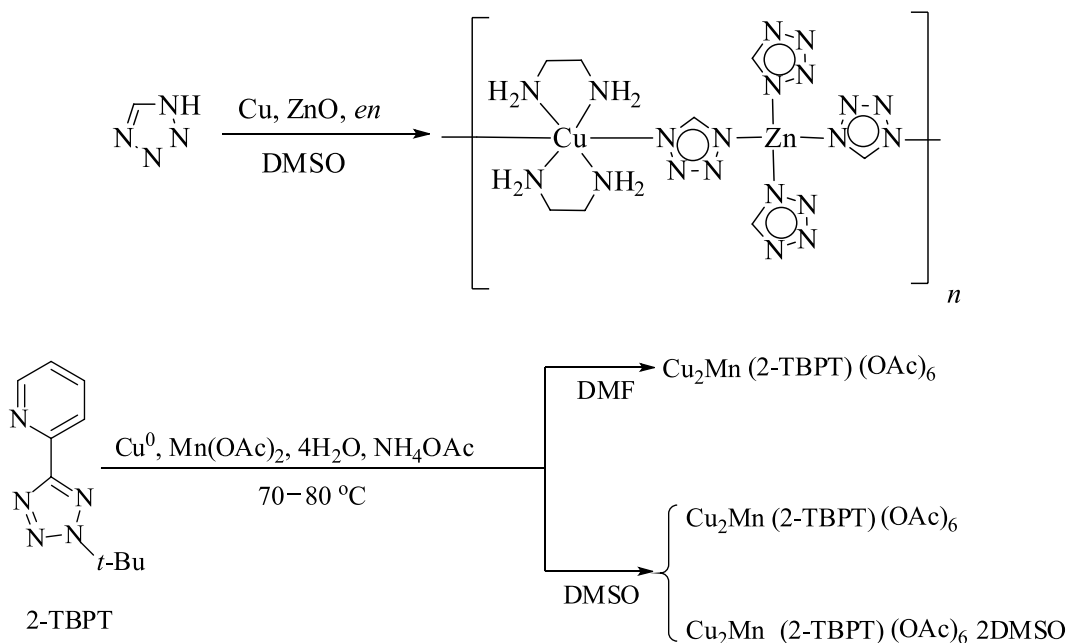
Совместно с сотрудниками Института неорганической химии Университета г. Лейпцига исследовано замещение тетразолатными лигандами хлорид-иона в комплексе Ni(II), содержащем в своей структуре 24-членный макроциклический бис(триаминотиофенолятный) лиганд, который является интересной моделью для выяснения как возможностей мостиковой координации колигандов, так и механизма обменного взаимодействия в биядерных системах [44–47].

Весьма неожиданно в этой реакции ведет себя 1-метил-5-меркаптотетразол, который, несмотря на высокую нуклеофильность атома серы, координируется в образуемом комплексе эндоциклическими атомами N³ и N⁴ [46]. Синтезированные макроциклические комплексы с тетразолатными лигандами проявляют слабое ферромагнитное обменное взаимодействие между ионами Ni²⁺.

Наряду с традиционными методами получения комплексных соединений, заключающимися во взаимодействии тетразолов с другими комплексами либо солями соответствующих металлов, в последние годы нами существенное внимание было уделено малоизученному прямому синтезу координационных соединений, включающему растворение порошков металлов и их оксидов в присутствии комплексобразующего агента в неводных средах [22,



48–50]. В результате разработан новый подход к получению тетразолсодержащих комплексных соединений *3d*-металлов, позволивший синтезировать ряд новых комплексов неожиданного состава, в том числе первого биметаллического Cu–Zn комплекса на основе простейшего тетразола и Cu–Mn комплекса 2-*трет*-бутил-5-(2-пиридил)тетразола.

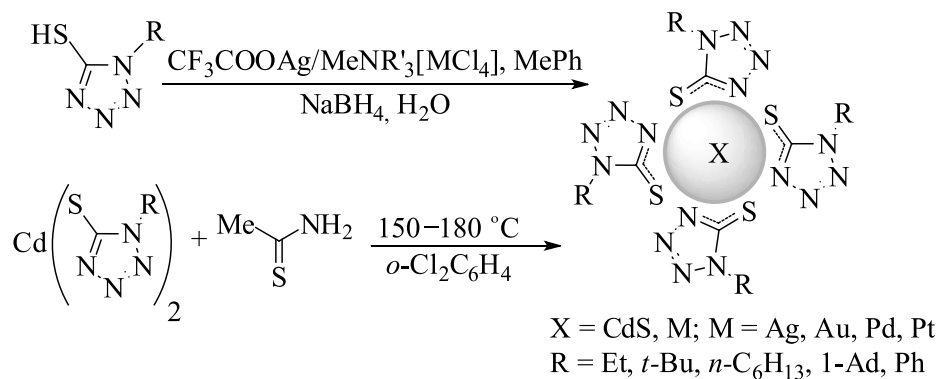


Отдельного внимания заслуживают результаты, полученные при систематическом исследовании взаимодействия N-замещенных производных тетразола и 5-аминотетразола с хлоридами платины(II) и палладия(II), позволившие разработать эффективные методы синтеза тетразолсодержащих аналогов широко используемого в современной клинической практике цитостатика «Цисплатин». К настоящему моменту получено более 20 ранее не описанных комплексных соединений, всестороннее исследование которых, включая цитотоксический скрининг, дало возможность выявить соединения, проявляющие достаточно высокую активность как по отношению к чувствительным, так и резистентным типам опухолевых клеток при более низкой, в сравнении с «Цисплатином», общей токсичности. Наибольшей активностью обладают комплексы платины(II) и N-замещенных 5-аминотетразолов, имеющие объемные заместители (*tert*-бутил, фенил) [30, 51].

ТЕТРАЗОЛЫ В НАНОХИМИИ

Одним из активно развивающихся направлений исследований производных тетразола в последние годы является изучение возможности их использования в качестве стабилизаторов наночастиц. Работы по этой тематике проводятся нами совместно с несколькими научными коллективами, специализирующимися в области коллоидного синтеза (Технический университет Дрездена, Университет Гамбурга, Университет Чикаго). Интерес к тетразолным стабилизаторам определяется спецификой их термического разложения, приводящего к образованию значительной доли летучих продуктов [10], что привлекательно для различного рода приложений наночастиц, требующих удаления молекул стабилизатора с целью повышения проводимости и улучшения их каталитических свойств [52].

В результате разработано два подхода к синтезу наночастиц CdS, стабилизированных 1-R-1,4-дигидротетразол-5-тионами:



Синтез в 1,2-дихлорбензоле включает взаимодействие 1-R-тетразол-5-тиолатов кадмия с тиоацетамидом, являющимся источником серы. Этим пу-

тем получены сферические либо тетраэдрические наночастицы CdS размером 3–9 нм [52]. При использовании 1-адамантил- и 1-этил-тетразол-5-тиолатов кадмия твердофазным синтезом получены сферические наночастицы CdS размером 2,5–3 нм, нагревание которых до 250 °С в токе азота приводит к де-струкции части органического составляющего и формированию ядра CdS, покрытого тетразол-5-тиолат-анионами.

Стабильные монодисперсные частицы благородных металлов (Au [53], Ag, Pd, Pt [54–56]) размером 2–4 нм получены восстановлением прекурсоров металлов борогидридом натрия в присутствии 1-R-5-меркаптотетразолов в двухфазной системе толуол–вода. На основании квантовохимических расчетов сделано предположение, что при связывании тетразол-5-тиолатных лигандов с поверхностью наночастиц металлов реализуется их мостиковая N⁴, S-координация [56].

Исследование 5-метилтетразола и 5-аминотетразола в качестве стабилизаторов золей серебра показали, что формирующиеся наночастицы характеризуются широким распределением по размерам. Тем не менее они являются интересной моделью для изучения агломерации наночастиц серебра, сопровождающейся существенными изменениями оптических свойств растворов [57].

Использование 5-меркаптометилтетразола в качестве стабилизатора позволило получить водорастворимые наночастицы CdTe [58], обладающие высокой люминесценцией (квантовый выход до 60 %) и уникальной способностью к обратимому образованию гидрогелей под действием солей *d*- и *f*-металлов. Данное свойство, обусловленное комплексообразующими свойствами тетразолильного фрагмента лиганда, позволило разработать новый метод получения гелеобразных гибридных наноструктур металл–полупроводник (CdTe–Au) регулируемого состава, представляющих интерес в качестве светособирающих и энергопереносящих систем в нанопотонике и фотовольтаике [59].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в последние годы в лаборатории химии конденсированных сред НИИ ФХП БГУ исследования в области химии производных тетразола существенно расширяют возможности исследователей по целенаправленному получению широкого круга функционально замещенных представителей этого класса соединений. Реакция гетероциклизации первичных аминов с триэтилортоформиатом и азидом натрия на сегодняшний день является, на наш взгляд, наиболее удобным, безопасным и, что весьма важно, селективным методом получения широкого круга 1-замещенных тетразолов. Кислотно-катализируемое алкилирование тетразольного цикла также привлекает своей селективностью, позволяющей целенаправленно получать N-замещенные тетразолы различного строения, включая полиядерные и макроциклические. Подходы к селективному синтезу N-замещенных производных в кислотных средах нашли свое развитие в химии 1,2,3-триазолов и 1,2,4-триазолов, позволив разработать оригинальные методы их селективной функционализации. Кроме того, исследования последних лет открыли новые перспективы в

использовании тетразолов. Это в первую очередь процессы стабилизации наноразмерных объектов производными тетразола, а также целенаправленный дизайн полифункциональных материалов на основе координационных соединений тетразолов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Ostrovskii V. A., Koldobskii G. I., Trifonov R. E.* // *Compr. Heterocyclic. Chem.* III. 2008. Vol. 6. P. 257–423.
2. *Гапоник П. Н., Войтехович С. В., Ивашкевич О. А.* // *Успехи химии.* 2006. Т. 75. С. 569–603.
3. *Aromi G., Barrios L. A., Roubeau O., Gamez P.* // *Coord. Chem. Rev.* 2011. Vol. 255. P. 485–546.
4. *Кижняев В. Н., Покатилов Ф. А., Верецагин Л. И.* // *Высокомолекулярное соединение.* Сер. С. 2008. Т. 50. С. 1296–1321.
5. *Гапоник П. Н., Ивашкевич О. А.* // *Вестн. БГУ.* Сер. 2. 2013. № 1. С. 3–28.
6. *Колдобский Г. И., Островский В. А.* // *Успехи химии.* 1994. Т. 63. С. 847–865.
7. *Butler R. N.* // *Compr. Heterocyclic. Chem.* II. 1996. Vol. 4. P. 621–678.
8. *Островский В. А., Колдобский Г. И.* // *Рос. хим. журн.* 1997. Т. 41, № 2. С. 84–98.
9. *Гапоник П. Н.* *Химические проблемы создания новых материалов и технологий.* Минск : БГУ, 1998. С. 185–214. *РЖХим.* 2002. 19Ж290.
10. *Ивашкевич О. А.* *Химические проблемы создания новых материалов и технологий.* Минск : БГУ, 1998. С. 215–236. *РЖХим.* 2002. 16Н136.
11. *Ostrovskii V. A., Koren A. O.* // *Heterocycles.* 2000. Vol. 53. P. 1421–1448.
12. *Войтехович С. В., Гапоник П. Н., Ивашкевич О. А.* // *Успехи химии.* 2002. Т. 71. С. 819–839.
13. *Колдобский Г. И., Харбаш Р. В.* // *Журн. орг. хим.* 2003. Т. 39. С. 489–505.
14. *Войтехович С. В., Гапоник П. Н., Колдобский Г. И.* // *Журн. орг. хим.* 2005. Т. 41. С. 1599–1616.
15. *Gaponik P. N., Ivashkevich O. A.* *Chemical problems of the development of new materials and technologies.* Minsk: Izd. Belarussian Gos. Univ. 2003. С. 193–233.
16. *Войтехович С. В., Гапоник П. Н., Ивашкевич О. А.* // *Журн. орг. хим.* 2013. Т. 49. С. 655–673.
17. *Lyakhov A. S., Grigoriev Y. V., Ivashkevich L. S., Gaponik P. N.* // *Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online.* 2007. Vol. 63. P. m495–m497.
18. *Войтехович С. В., Гапоник П. Н., Григорьев Ю. В., Ивашкевич О. А.* *Химические проблемы создания новых материалов и технологий.* Минск : БГУ, 2008. С. 117–143.
19. *Войтехович С. В., Григорьев А. Н., Гапоник П. Н., Ивашкевич О. А.* // *Вестн. БГУ.* Сер. 2. 2010. № 3. С. 11–14.
20. *Корень А. О., Гапоник П. Н.* // *Химия гетероцикл. соед.* 1990. С. 1643–1647.
21. *Корень А. О., Гапоник П. Н.* // *Химия гетероцикл. соед.* 1991. С. 1280–1281.
22. *Mosalkova A. P., Voitekovich S. V., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Dalton Trans.* 2013. Vol. 42. P. 2985–2997.
23. *Voitekovich S. V., Lyakhov A. S., Ivashkevich L. S., Gaponik P. N.* // *Tetrahedron Lett.* 2012. Vol. 53. P. 6111–6114.

24. *Voitekhovich S. V., Gaponik P. N., Lyakhov A. S., Ivashkevich O. A.* // *Tetrahedron*. 2008. Vol. 64. P. 8721–8725.
25. *Gaponik P. N., Voitekhovich S. V., Maruda I. I., Kulak A. A., Ivashkevich O. A.* // *Pol. J. Chem.* 1998. Vol. 72. P. 2247–2253.
26. *Voitekhovich S. V., Lyakhov A. S., Ivashkevich L. S., Gaponik P. N.* // *Tetrahedron Lett.* 2012. Vol. 53. P. 419–421.
27. *Filipova J. V., Sukhanova A. G., Voitekhovich S. V.* [et al.] // *J. Heterocyclic Chem.* 2012. Vol. 45. P. 965–968.
28. *Voitekhovich S. V., Lyakhov A. S., Ivashkevich L. S.* [et al.] // *Tetrahedron*. 2012. Vol. 68. P. 4962–4966.
29. *Григорьев Ю. В., Войтехович С. В., Ивашкевич О. А.* // *Журн. орг. хим.* 2012. Т. 48. С. 611–613.
30. *Voitekhovich S. V., Serebranskaya T. V., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Polyhedron*. 2009. Vol. 28. P. 3614–3620.
31. *Ivashkevich L. S., Serebryanskaya T. V., Lyakhov A. S., Gaponik P. N.* // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2011. Vol. 67. P. m195–m198.
32. *Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Mosalkova A. P.* [et al.] // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2010. Vol. 66. P. m114–m117.
33. *Gaponik P. N., Voitekhovich S. V., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Inorg. Chim. Acta*. 2005. Vol. 358. P. 2549–2557.
34. *Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Serebryanskaya T. V.* [et al.] // *Z. Kristallogr.* 2012. Vol. 227. P. 702–709.
35. *Lyakhov A. S., Voitekhovich S. V., Ivashkevich L. S., Gaponik P. N.* // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2010. Vol. 66. P. m22–m25.
36. *Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Serebryanskaya T. V., Gaponik P. N.* // *Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online*. 2008. Vol. 64. P. m1044–m1045.
37. *Lyakhov A. S., Mosalkova A. P., Degtyarik M. M.* [et al.] // *Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online*. 2009. Vol. 65. P. m1397–m1398.
38. *Дегтярик М. М., Ляхов А. С., Григорьев Ю. В., Ивашкевич О. А.* // *Коорд. хим.* 2012. Т. 38. С. 83–91.
39. *Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Gaponik P. N.* [et al.] // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2006. Vol. 62. P. m607–m609.
40. *Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Mosalkova A. P.* [et al.] // *Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online*. 2009. Vol. 65. P. m236.
41. *Voitekhovich S. V., Serebryanskaya T. V., Gaponik P. N.* [et al.] // *Inorg. Chem. Commun.* 2010. Vol. 13. P. 949–951.
42. *Lyakhov A. S., Gaponik P. N., Pytleva D. S.* [et al.] // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2004. Vol. 60. P. m421–m422.
43. *Serebryanskaya T. V., Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Polyhedron*. 2010. Vol. 29. P. 2844–2850.
44. *Lozan V., Voitekhovich S. V., Gaponik P. N.* [et al.] // *Z. Naturforsch., B: J. Chem. Sci.* 2008. Vol. 63. P. 496–502.
45. *Lach J., Voitekhovich S. V., Lozan V.* [et al.] // *Z. anorg. allg. Chem.* 2010. Vol. 636. P. 1980–1986.
46. *Voitekhovich S. V., Syre R., Lach J.* [et al.] // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2010. Vol. 34. P. 5387–5393.

47. *Lach J., Mosalkova A. P., Voitekhovich S. V.* [et al.] // *Polyhedron*. 2013. Vol. 49. P. 183–189.
48. *Mosalkova A. P., Voitekhovich S. V., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Inorg. Chem. Commun.* 2009. Vol. 12. P. 998–1000.
49. *Дегтярик М. М., Мосалкова А. П., Ивашкевич О. А., Гапоник П. Н.* // *Вестн. БГУ. Сер. 2*. 2009. № 2. С. 6–11.
50. *Mosalkova A. P., Voitekhovich S. V., Lyakhov A. S.* [et al.] // *Z. anorg. allg. Chem.* 2012. Vol. 638. P. 103–110.
51. *Serebryanskaya T. V., Yung T., Bogdanov A. A.* [et al.] // *J. Inorg. Biochem.* 2013. Vol. 120. P. 44–53.
52. *Voitekhovich S. V., Talapin D. V., Klinke C.* [et al.] // *Chem. Mater.* 2008. Vol. 20. P. 4545–4547.
53. *Nichick M. N., Voitekhovich S. V., Shavel A.* [et al.] // *Polyhedron*. 2009. Vol. 28. P. 3138–3142.
54. *Ничик М. Н., Войтехович С. В., Лесникович А. И., Ивашкевич О. А.* // *Докл. НАН Беларуси*. 2010. Т. 54, № 5. С. 60–64.
55. *Ничик М. Н., Войтехович С. В., Лесникович А. И., Ивашкевич О. А.* // *Докл. НАН Беларуси*. 2011. Т. 55, № 4. С. 60–65.
56. *Nichick M. N., Voitekhovich S. V., Lesnyak V.* [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. 2011. Vol. 115. P. 16928–16933.
57. *Ziegler C., Klose M., Voitekhovich S. V.* [et al.] // *Phys. Chem.* 2011. Vol. 225. P. 363–371.
58. *Lesnyak V., Voitekhovich S. V., Gaponik P. N.* [et al.] // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4. P. 4090–4096.
59. *Lesnyak V., Wolf A., Dubavik A.* [et al.] // *J. Am. Chem. Soc.* 2011. Vol. 133. P. 13413–13420.

Поступила в редакцию 29.10.2013.