

ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ХИМИИ МАКРОГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА КАФЕДРЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Е.А. Данилова, Н.Е. Галанин, М.К. Исляйкин, В.Е. Майзлиш, Г.Р. Березина,
Т.А. Румянцева, Ю.В. Суворова, С.А. Знойко, Т.В. Кустова

Елена Адольфовна Данилова (ORCID 0000-0001-6765-6707)*, Михаил Константинович Исляйкин (ORCID 0000-0003-0070-0704), Владимир Ефимович Майзлиш (ORCID 0000-0001-5423-3297), Николай Евгеньевич Галанин (ORCID 0000-0001-6117-167X), Галина Рудольфовна Березина (ORCID 0009-0005-6897-3137), Таисия Андреевна Румянцева (ORCID 0000-0002-4110-0572), Юлия Валентиновна Суворова (ORCID 0000-0002-2994-8044), Серафима Андреевна Знойко (ORCID 0000-0001-7023-7407), Татьяна Владимировна Кустова (ORCID 0000-0001-7815-7399)

Кафедра технологии тонкого органического синтеза, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: danilova@isuct.ru*, islyaikin@isuct.ru, maizlish@isuct.ru, galanin_ne@isuct.ru, berezina@isuct.ru, rummyantseva_ta@isuct.ru, yuliya_butina@mail.ru, znoyko_sa@isuct.ru

Материал, представленный в данном обзоре, посвящен научным исследованиям, проводимым на одной из старейших выпускающих кафедр ИГХТУ - кафедре технологии тонкого органического синтеза (ТТОС).

Ключевые слова: фталоцианин, порфиразин, макрогетероциклы

ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF CHEMISTRY OF MACROHETEROCYCLIC COMPOUNDS AT THE DEPARTMENT OF TECHNOLOGY OF FINE ORGANIC SYNTHESIS

E.A. Danilova, N.E. Galanin, M.K. Islyaikin, V.E. Maizlish, G.R. Berezina,
T.A. Rummyantseva, Yu.V. Suvorova, S.A. Znoiko, T.V. Kustova

Elena A. Danilova (ORCID 0000-0001-6765-6707)*, Mikhail K. Islyaikin (ORCID 0000-0003-0070-0704), Vladimir E. Maizlish (ORCID 0000-0001-5423-3297), Nikolai E. Galanin (ORCID 0000-0001-6117-167X), Galina R. Berezina (ORCID 0009-0005-6897-3137), Taisiya A. Rummyantseva (ORCID 0000-0002-4110-0572), Yulya V. Suvorova (ORCID 0000-0002-2994-8044), Serafima A. Znoiko (ORCID 0000-0001-7023-7407), Tatiana V. Kustova (ORCID 0000-0001-7815-7399)

Department of Fine Organic Synthesis Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave, 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: danilova@isuct.ru*, islyaikin@isuct.ru, maizlish@isuct.ru, galanin_ne@isuct.ru, berezina@isuct.ru, rummyantseva_ta@isuct.ru, yuliya_butina@mail.ru, znoyko_sa@isuct.ru

The material presented in this review is devoted to scientific research carried out at one of the oldest graduating departments of ISUCT - the Department of Fine Organic Synthesis Technology.

Key words: phthalocyanine, porphyrizine, macroheterocycles

Для цитирования:

Данилова Е.А., Галанин Н.Е., Исляйкин М.К., Майзлиш В.Е., Березина Г.Р., Румянцева Т.А., Суворова Ю.В., Знойко С.А., Кустова Т.В. Достижения в области химии макрогетероциклических соединений на кафедре технологии тонкого органического синтеза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 111–119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6826j.

For citation:

Danilova E.A., Galanin N.E., Islyaikin M.K., Maizlish V.E., Berezina G.R., Rummyantseva T.A., Suvorova Yu.V., Znoiko S.A., Kustova T.V. Achievements in the field of chemistry of macroheterocyclic compounds at the department of technology of fine organic synthesis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 111–119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6826j.

Фталоцианины и тетрабензопорфирины

За более, чем полувековую «фталоцианиновую» историю, на кафедре по этой тематике защищено около 50 кандидатских и 7 докторских диссертаций (В.Ф. Бородкин – 1967 г., М.И. Альянов – 1982 г., М.И. Базанов – 1991 г., Г.П. Шапошников – 1995 г., В.Е. Майзлиш – 2001 г., Е.В. Кудрик – 2008 г., Н.Е. Галанин – 2010 г.), опубликованы монография [1], около десятка коллективных монографий, почти 500 статей, 200 авторских свидетельств СССР и патентов РФ, получено множество новых соединений фталоцианинового ряда, обладающих полезными свойствами, внедрен в промышленность и широко используется на нефтеперерабатывающих заводах страны и за рубежом катализатор на основе фталоцианина кобальта – ИВКАЗ [2].

Научные результаты, полученные за это время, вносят существенный вклад в развитие органической, физической и координационной химии фталоцианинов (Pc) и их структурных аналогов. В настоящее время преподаватели и научные сотрудники кафедры, занимающиеся синтезом и исследованиями соединений фталоцианинового ряда, входят в лабораторию синтеза фталоцианинов НИИ макрогетероциклов при ИГХТУ и активно продолжают работать в этой области научных знаний.

Химическая модификация Pc направлена на введение заместителей по периферии макрокольца, изменение природы металла и палубности макромолекулы. К настоящему времени получены многочисленные замещенные фталонитрилы, некоторые представлены в табл. 1. Например, нуклеофильным замещением нитрогруппы удалось синтезировать соответствующие замещенные фталонитрилы, у которых через атом серы, кислорода или иминогруппы введен остаток фенилкарбоновой кислоты. Реакцией 4-[(4'-карбокси)фенилсульфанил]фталонитрила с тионилхлоридом получен соответствующий хлорангидрид, который в дальнейшем был использован для получения различных карбамоил – и алкилкарбонилпроизводных фталонитрилов.

На основе замещенных фталонитрилов были синтезированы соответствующие фталоцианины и их металлокомплексы с двухвалентными металлами (Cu, Co, Ni, Zn, Mg), лантаноидами [3-8].

Все синтезированные соединения охарактеризованы данными электронной, ИК-спектроскопии, масс-спектрометрии. Изучена спектральная зависимость максимума полосы поглощения от положения заместителя на периферии макрокольца.

Показано, что многие соединения обладают прикладными свойствами. Металлокомплексы тетра-4-*трет*-бутил-5-нитрофталоцианина могут быть использованы в качестве жирорастворимых красителей полимерных материалов (полистирол, лавсан), с медью – модификатора поливинилхлоридных пленок, с никелем - адсорбента для газовой хроматографии, а комплекс с кобальтом эффективно катализирует окисление диэтилдитиокарбамата натрия [9-14]. Ряд комплексов проявляют термотропный мезоморфизм [15], формируя текстуры, характерные для колончатых фаз, а также лиотропный мезоморфизм с хлороформом и толуолом. Установлено, что комплексы способны окрашивать полистирол, причем комплексы, содержащие диалкильные цепочки, обладают наиболее яркими и чистыми цветами [16].

Таблица

Структура синтезированных фталонитрилов
Table. Structure of synthesized phthalonitriles

Формула	R	R ₁	X
	^t Bu		S
	^t Bu		S
	H		S
	H		S
	H		O/S/NH
	H		O/S/NH
	H		O/S/NH
	H		O

Цикл работ был посвящен синтезу и исследованию Pc, аннелированных ароматическими и гетероциклическими хинонами, - тетраантрахинопорфиразинов [17-19]. Установлено, что эти макрогетероциклы могут быть использованы в качестве материалов различного функционального назначения.

Как правило, синтезированные комплексы проходят скрининг в реакциях окисления сернистых соединений [20-23], и ряд замещенных Pc кобальта эффективны в этих процессах.

Влияние введения пиразиновых циклов в молекулу комплексов порфираина на их растворимость рассмотрено авторами [24] на примере координационных соединений эрбия и иттербия с порфиразином и его октафенил- и окта(*n*-алкилсульфамойлфенил)замещенными, а также тетрапиразинопорфиразином, его октаэтил-, тетра(*трет*-бутил)- и октафенил- производными. Введение пиразиновых циклов в молекулу порфираина увеличивает растворимость почти в 30 раз, что, вероятно, обусловлено вкладом от специфической сольватации пиразиновых атомов азота молекулами ДМФА. Периферийные заместители оказывают лишь разрыхляющее воздействие на кристаллическую решетку и способствуют универсальной сольватации соединений.

Результаты исследования влияния природы заместителей и центрального металла-комплексобразователя на растворимость бензотриазолилзамещенных фталоцианинов в хлороформе и ДМФА показали, что значения растворимости для безметалльных Pc и соответствующих комплексов с Cu(II) сопоставимы по величине, и природа металла практически не оказывает влияния на растворимость комплексов с одинаковыми экстралигандами [25].

Особый интерес представляют комплексы Pc с лантанидами, поскольку последние, обладая большими ионными радиусами и высокими координационными числами, способны образовывать с тетрапиррольными макроциклами соединения «сэндвичевого» строения. Для последних характерен эффект перекрывания π -орбиталей лигандов, зависящий от величины ионного радиуса лантанида и строения лигандов. Наличие этого эффекта открывает возможности применения «сэндвичевых» соединений в качестве материалов для молекулярной электроники нелинейной оптики, сенсорики, материалов для датчиков ионизирующего излучения, электрохромных материалов и в других областях.

Бис-фталоцианинаты лантанидов известны с 60-х гг. XX в. [26], а их структурные аналоги, бис-порфирилаты – с 80-х [27]. В то же время, первые сведения о «сэндвичевых» комплексах лантанидов, содержащих хромофоры тетрабензопорфирина, появились в литературе только в 2000 г. В работе [28] авторы сообщили о синтезе комплексов гадолиния и лютеция, содержащих

хромофоры тетрабензопорфирина и Pc в избытке фталонитрила, который служил реакционной средой, но при этом сам в результате реакции полимеризовался.

Поэтому был разработан более рациональный двухстадийный метод [29], заключающийся во взаимодействии тетрабензопорфиринов лантанидов с дилитийфталоцианином. Комплексы Gd, Lu, La, Nd, Dy после очистки методом колонной хроматографии характеризуются большей степенью чистоты.

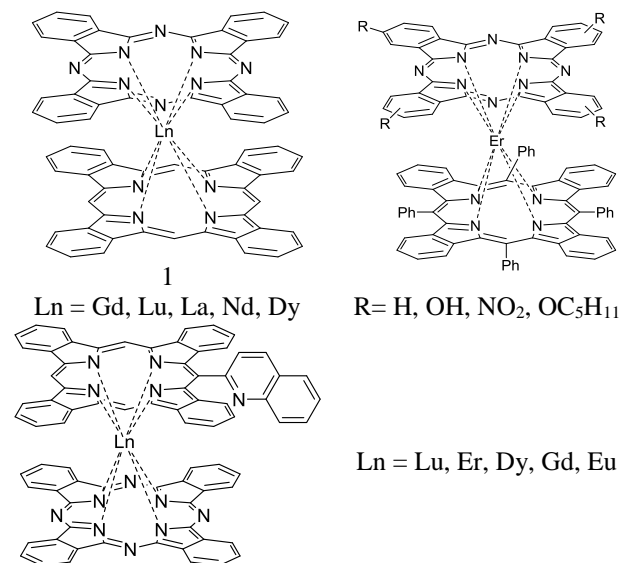


Рис. 1. Структурные формулы «сэндвичевых» комплексов лантанидов

Fig. 1. Structural formulas of "sandwich" complexes of lanthanides

В дальнейшем были получены «сэндвичевые» комплексы лантанидов (рис. 1), содержащие хромофоры Pc и *мезо*-замещенных тетрабензо-, тетрафенилтетрабензопорфиринов, тетра-(4-*трет*-бутилбензо)порфирина [30-34].

В работе [35] получены комплексы лютеция, в состав которых входили фрагменты тетрабензопорфирина и низкосимметричных алкокси(хлор)-замещенных Pc.

В качестве одного из лигандов в составе «сэндвичевых» комплексов может присутствовать и *мезо*-гетарилзамещенный тетрабензопорфирин [36].

Синтез гомолигандного бис-тетрабензопорфирилата гадолиния был осуществлен впервые в 2012 г [37] и требовал использования дорогостоящих реагентов, большой продолжительности, более 120 ч, при этом выход целевого продукта в расчете на исходное соединение составлял ~ 15%. Нами был предложен более удобный метод темплатного синтеза бис-тетрабензопорфиринов гадолиния, эрбия и лютеция [38].

Синтезированные гомо- и гетеролигандные комплексы лантанидов, включающие в свой состав хромофоры тетрабензопорфиринов, интересны в практическом плане. Некоторые из них проявляют жидкокристаллические свойства, каталитическую активность в реакции электровосстановления кислорода, их тонкие пленки обладают фоточувствительностью, а электрическая проводимость пленок экстремально возрастает при повышении температуры. Таким образом, дальнейшие исследования этих и других, схожих по строению, соединений представляются весьма актуальной задачей.

Собственно макрогетероциклические соединения

Разработанные к настоящему времени методы синтеза позволяют получать макрогетероциклические соединения (Mc) с различным строением макроциклического остова (ABAB, ABABAB, ABVV ABAAB – где A-гетероароматический фрагмент, B-изоиндольный или пиррольный); включать в макросистему гетероциклические фрагменты, которые входят в состав многих природных биологически активных и синтетических лекарственных веществ. В отличие от природных соединений хлорофилла и гемоглобина Mc обладают широкими возможностями структурной модификации, заключающейся как в изменении размера макроциклической полости, так и состава макрокольца, что приводит к появлению новых физико-химических свойств [39, 40].

Многие Mc не растворяются в воде. В результате были подобраны условия синтеза Mc на основе 3,5-диамино-1,2,4-триазола (гуаназола) с 4,5-карбоксизамещенными фталонитрилами (рис. 2) [41]. Выбор таких структурных блоков обусловлен тем, что гуаназол и его производные – это один из наиболее перспективных объектов для химической модификации. Введение карбоксильных групп придает растворимость в воде, позволяет обнаруживать каталитическую активность, демонстрирует интересные фотофизические и фотохимические свойства [42].

Учитывая терапевтический потенциал галлия, новые поколения соединений галлия в настоящее время находятся на различных стадиях доклинической и клинической разработки. Эти соединения обещают большую противоопухолевую активность против более широкого спектра раковых заболеваний. Соединения галлия могут также ингибировать рост опухоли посредством механизмов, не связанных с железом; более поздние исследования предполагают взаимодействие галлия с белками, участвующими в метаболизме

цинка. Кроме того, некоторые из новых соединений галлия обладают важными механизмами цитотоксического действия, такими как ингибирование функции протеасом в раковых клетках [41].

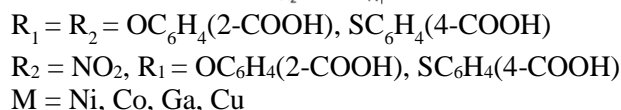
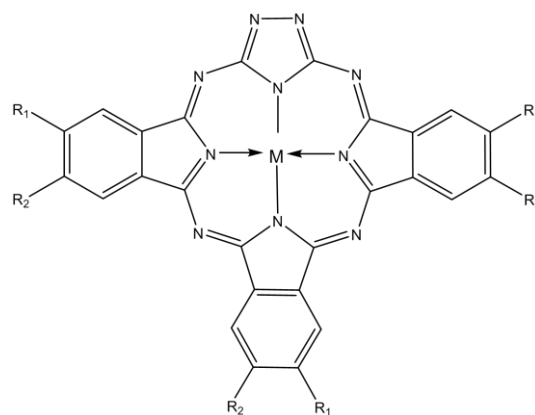


Рис. 2. Структурные формулы металлокомплексов замещенных Mc

Fig. 2. Structural formulas of metal complexes of substituted Mc

Гемигексафизазины

Гемигексафизазины представляют собой новый тип шестизвенных порфириноидов, обладающих уникальным строением и широчайшими возможностями структурной модификации как введением заместителей по периферии, заменой изоиндольных звеньев другими пирролсодержащими фрагментами, так и координацией различных металлов. Благодаря необычному строению, гемигексафизазины проявляют уникальные электрохимические свойства, способность эффективно улавливать и рекомбинировать радикалы, формировать упорядоченные протяженные мономолекулярные слои на поверхности, проявлять уникальные магнитные свойства, и, таким образом, представляют интерес в качестве новых молекулярных материалов для микроэлектроники, спинтроники, записи и хранения информации, катализа.

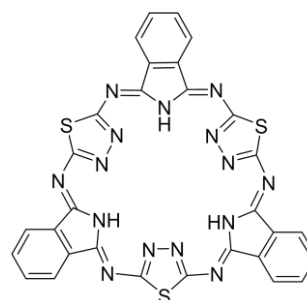


Рис. 3. Структура незамещенного гемигексафизазина
 Fig. 3. Structure of unsubstituted hemihexaphyrzine

Структура незамещенного гемигексафиазина (H_3Nhr) (рис. 3) была впервые установлена методом газовой электронографии [43]. Высокая термическая устойчивость H_3Nhr и его способность образовывать устойчивый поток молекул в глубоком вакууме [44] позволили провести изучение этого соединения методом сканирующей туннельной микроскопии [45]. Было установлено, что

молекулы макроцикла в результате самосборки формируют на поверхности $Au(III)$ протяженные мономолекулярные слои, которые способны к ступенчатому, пространственно-контролируемому с помощью зонда депротонированию, что может представлять интерес для последующего изучения Nhr в качестве материала для записи и хранения информации.

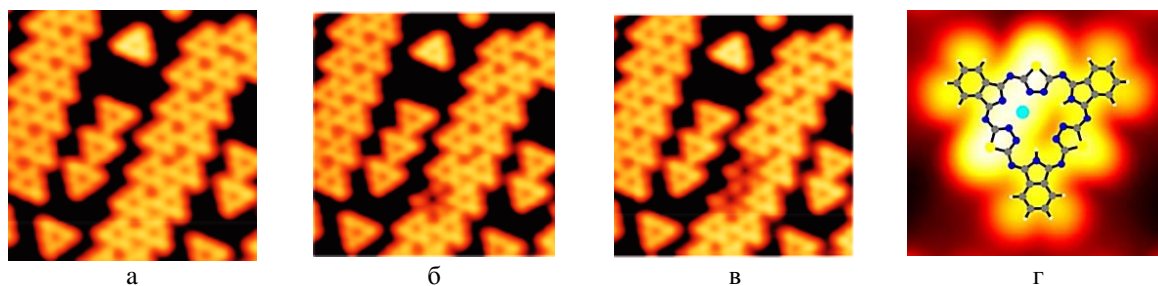


Рис. 4. Вид фрагмента заселенной поверхности (а), с одной (б) и двумя (в) депротонированными молекулами H_3Nhr ; (г) модель нецентросимметричного комплекса DyH_2Nhr по данным STM и квантово-химических расчетов
Fig. 4. View of a fragment of the populated surface (a), with one (b) and two (v) deprotonated H_3Nhr molecules; (r) model of the non-centrosymmetric DyH_2Nhr complex according to STM data and quantum chemical calculations

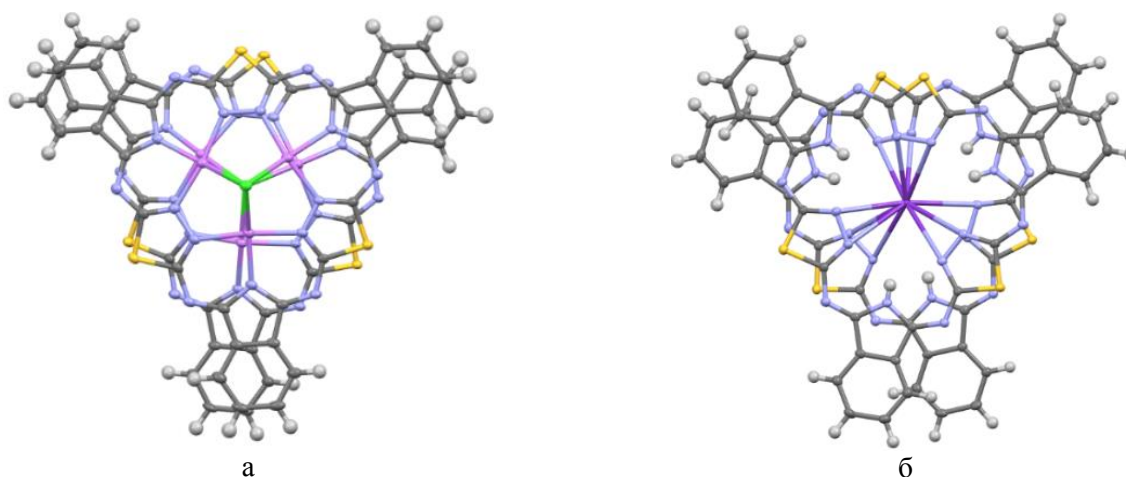


Рис. 5. Структура двухпалубных комплексов а - $\{Li_3(Cl)(Nhr)\}^{2-}$ дианиона [47], б - парамагнитного дианион-радикала $\{(K)(H_3Nhr)_2\}^{2-}$ [48] по данным РСА

Fig. 5. Structure of double decker complexes: а - $\{Li_3(Cl)(Nhr)\}^{2-}$ dianion [47], б- paramagnetic radical dianion $\{(K)(H_3Nhr)_2\}^{2-}$ [48] according to X-ray diffraction data

Молекулы H_3Nhr , будучи зафиксированными на поверхности, способны координировать диспрозий с образованием комплекса нецентросимметричного типа (рис. 4г). Оказалось, что комплексы на основе гемигексафиазинов также могут образовывать в результате самосборки упорядоченные слои на поверхности $Au(III)$ [46].

Совместно с группой проф. Д. В. Конарева (Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН РФ, Черноголовка) впервые было изучено поведение H_3Nhr и его металлокомплексов в восстановительной среде. В результате впервые получен

необычный двухпалубный комплекс дианионного типа, где в качестве связующего выступает хлорид-анион (рис. 5) [47].

Совершенно неожиданным оказалось образование двухпалубного парамагнитного дианион-радикала $\{(K)(H_3Nhr)_2\}^{2-}$, содержащего два макроциклических лиганда и катион калия, в результате взаимодействия H_3Nhr с соединением калий-графит [48]. Трехэлектронное восстановление гомотрехъядерных комплексов $(M=Ni, Cu)$ H_3Nhr , полученных в [49], показало, что может происходить как изменение степени окисления металла, так и присоединение электронов по мак-

роциклическому лиганду [50]. Таким образом, данные соединения представляют интерес в качестве потенциальных материалов для спинтроники.

Прикладные свойства макрогетероциклов

Открытие нового профиля на кафедре ТГОС «Химическая технология химико-фармацевтических препаратов и косметических средств» позволило по-новому взглянуть на прикладные свойства синтезируемых соединений. В результате появилось новое направление исследований, связанное с изучением биологически активных свойств продуктов.

Начало этому направлению положили статьи Исляйкина М.К., Даниловой Е.А. [51-54], посвященные первым исследованиям антимикробных свойств макрогетероциклических соединений и прекурсоров их синтеза.

В дальнейшем это направление получило развитие и результаты исследований были опубликованы не только в виде статей [40, 55-58], но и глав в монографии [17].

Основным фармакофором таких соединений являются диаминоазолы. Известно, что соединения, содержащие в своем составе фрагменты тиадиазола проявляют биологическую активность. Поиск биологически активных веществ был продолжен в направлении синтеза двухъядерных диаминов, содержащих два 1,3,4-тиадиазольных цикла, связанных между собой алкильным спейсером. Прежде чем приступить к синтезу таких соединений, нами был выполнен виртуальный скрининг спектров биологической, в том числе антибактериальной, активности и цитотоксичности бис(5-амино-1,3,4-тиадиазол-2-ил)метана, -этана, -пропана, -бутана, -пентана и -этена с применением сервисов PASS-Online, Anti-Bac-Pred и CLC-Pred (расположенных по ссылке <http://www.way2drug.com/passonline/services.php>). Результаты *in silico* прогноза показали, что все молекулы могут с высокой степенью вероятности проявлять свойства ингибиторов ферментов, антибактериальную активность по отношению к грамотрицательному штамму бактерий *Shigella sp.* и незначительную противоопухолевую активность [59, 60].

Синтез всех молекул проводили путем конденсации тиосемикарбазида с соответствующей дикарбоновой кислотой. Строение соединений подтверждено данными электронной, ИК и ЯМР спектроскопии, масс-спектрометрии. Кроме того, путем медленного испарения растворителя нам удалось вырастить монокристаллы и доказать структуру синтезированных соединений методом рентгеноструктурного анализа [60]. Полный набор

данных PCA был депонирован в Кембриджской базе данных. На рис. 6 в качестве примера представлена структура бис(5-амино-1,3,4-тиадиазол-2-ил)бутана.

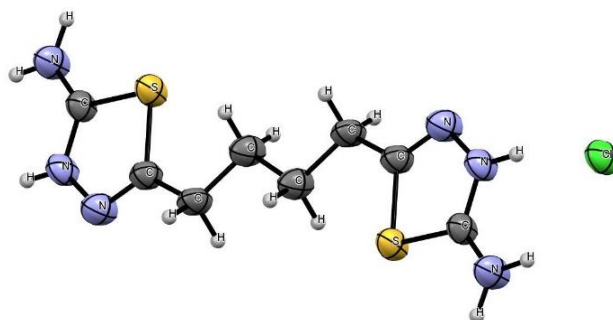


Рис. 6. Кристаллическая структура бис(5-амино-1,3,4-тиадиазол-2-ил)бутана

Fig. 6. Crystal structure of bis(5-amino-1,3,4-thiadiazol-2-yl)butane

Некоторые из молекул в ходе *in vitro* исследований проявили умеренную антибактериальную и фунгицидную активности.

Прогнозирование спектра биологической активности с использованием программы показало, что соединение 3,5-бис(1-имино-3-изоиндоллинолидениденамино)-1,2,4-триазола с галлием с вероятностью 85,2% активно в отношении неходжкинской лимфомы (*заболевание, при котором в лимфатической системе образуются злокачественные раковые клетки*), потенциально способно ингибировать киназы рецептора тромбоцитарного фактора роста ($P_a = 0,651$; $P_i = 0,010$), т. е. регулировать пролиферацию, дифференцировку, рост клеток и развитие онкологических заболеваний.

Водорастворимый гомотрехъядерный комплекс с Cu, полученный сульфированием соответствующего комплекса трис(4-трифенилметилфенокси)замещенного гемигексафториана хлорсульфоновой кислотой, проявил радиопротекторные свойства [61]. Показано, что сульфирование идет по фенильным ядрам, входящим в состав заместителей.

Надеемся, что дальнейшее развитие научных направлений кафедры будет продолжаться.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания, тема № FZZW-2023-0009. Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the framework of the State task, topic No. FZZW-2023-0009. The study was carried out using the resources of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Education and Science of Russia, agreement No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Шапошников Г.П., Кулинич В.П., Майзлиш В.Е. Модифицированные фталоцианины и их структурные аналоги. М.: Красанд. 2012. 480 с. Shaposhnikov G.P., Kulnich V.P., Maizlish V.E. Modified phthalocyanines and their structural analogues. M.: Krasand. 2012. 480 p. (in Russian).
2. Вильданов А.Ф., Луговской А.И., Магзаров А.М., Горохова С.А. Лионов Н.В., Ананьева Т.А. // Нефтеперераб. и нефтехимия. 1991. № 8. С. 15-16. Vildanov A.F., Lugovskoy A.I., Mazgarov A.M., Gorohova S.A. Li-onov N.V., Ananyeva T.A. // *Neftepererab. Neftekhim.* 1991. N 8. P. 15-16 (in Russian).
3. Maizlish V.E., Tikhomirova T.V., Znoiko S.A., Aleksandriiskii V.V., Vashurin A.S., Shaposhnikov G.P. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. V. 88. N 4. P. 736-741. DOI: 10.1134/S1070363218040187.
4. Tikhomirova T.V., Znoyko S.A., Petlina A.I., Filippova A.A., Maizlish V.E., Vashurin A.S. // *Izv. AN Ser. Khim.* 2018. V. 67. N 12. P. 2201-2204. DOI: 10.1007/s11172-018-2356-4. Тихомирова Т.В., Знойко С.А., Петлина А.И., Филиппова А.А., Майзлиш В.Е., Ващурина А.С. // *Иzv. AN. Ser. khim.* 2018. T. 67. № 12. С. 2201-2204 (in Russian).
5. Maizlish V.E., Martynyuk T.A., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Gen. Chem.* 2014. V. 84. N 1. P. 131-136. DOI: 10.1134/S1070363214010204.
6. Lebedeva N.Sh., Yurina E.S., Gubarev Yu.A., Mayzlish V.E. // *Russ. J. Bioorg. Chem.* 2016. V. 42. N 1. P. 29-35. DOI: 10.1134/S1068162015050143.
7. Кузнецова Д.А., Тихомирова Т.В., Майзлиш В.Е., Шапошников Г.П. // *Рос. хим. журн.* 2017. Т. LXI. № 1. С. 67-76. Kuznetsova D.A., Tikhomirova T.V., Maizlish V.E., Shaposhnikov G.P. // *Ross. Khim. Zhurn.* 2017. V. LXI. N 1. P. 67-76 (in Russian).
8. Berezina N.M., Bazanov M.I., Maizlish V.E. // *Rus. J. Electrochem.* 2018. V. 54. N 11. P. 873-878. DOI: 10.1134/S1023193518130074.
9. Rodionov A.V., Maizlish V.E., Shaposhnikov G.P. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2016. V. 86. N 1. P. 96-101. DOI: 10.1134/S1070363216010175.
10. Znoiko S.A., Tolstykh N.A., Tikhomirova T.V., Filip-pova A.A., Maizlish V.E., Vashurin A.S. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2019. V. 89. N 12. P. 2408-2412. DOI: 10.1134/S1070363219120132.
11. Кувшинова Е.М., Родионов А.В., Майзлиш В.Е., Сырбу С.А., Голубчиков О.А. // *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 12. С. 28-32. Kuvshinova E.M., Rodionov A.V., Maizlish V.E., Syrbu S.A., Golubchikov O.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 12. P. 28-32 (in Russian).
12. Петров О.А., Осипова Г.В., Майзлиш В.Е., Родионов А.В. // *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 6. С. 54-57. Petrov O.A., Osipova G.V., Maizlish V.E., Rodionov A.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 6. P. 54-57 (in Russian).
13. Petrov O.A., Kuz'mina E.L., Maizlish V.E. Rodionov A.V. // *Rus. J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 88. N 1. P. 7-11. DOI: 10.1134/S0036024414010208.
14. Кувшинов Г.В., Майзлиш В.Е., Кувшинова С.А., Бурмистров В.А., Койфман О.И. // *Макрогетероциклы.* 2016. Т. 9. № 3. С. 244-249. Kuvshinov G.V., Maizlish V.E., Kuvshinova S.A., Burmistrov V.A., Koifman O.I. // *Macroheterocycles.* 2016. V. 9. N 3. P. 244-249 (in Russian). DOI: 10.6060/mhc160318k.
15. Смирнова А.И., Кулев В.А., Рассолова А.Е., Майзлиш В.Е., Холодков И.В., Яблонский С.В., Тихомирова Т.В., Александрийский В.В., Абрамов И.Г., Глуховской Е.Г., Усольцева Н.В. // *Жидк. крист. и их практ. использ.* 2022. Т. 22. № 4. С. 37-54. Smirnova A.I., Kulev V.A., Rassolova A.E., Maizlish V.E., Kholodkov I.V., Yablonsky S.V., Tikhomirova T.V., Aleksandriiskii V.V., Abramov I.G., Glukhovskoi E.G., Usol'tseva N.V. // *Zhidk. Krist. Praktich. Ispol'z.* 2022. V. 22. N 4. P. 37-54 (in Russian). DOI: 10.18083/LCAppI.2022.4.92.
16. Журавлева Ю.М., Майзлиш В.Е., Шапошников Г.П., Ананьева Г.А., Усольцева Н.В. // *Жидк. крист. и их практ. использ.* 2012. № 2 (40). С. 5-19. Zhuravleva Yu.M., Maizlish V.E., Shaposhnikov G.P., Anan'eva G.A., Usol'tseva N.V. // *Zhidk. Krist. Praktich. Ispol'z.* 2012. N 2 (40). P. 5-19 (in Russian).
17. Функциональные материалы на основе тетрапиррольных макрогетероциклических соединений. Под ред. О.И. Койфмана. М.: ЛЕНАНД. 2019. 848 с. Functional materials based on tetrapyrrole macroheterocyclic compounds. Ed. by O.I. Koifman. M.: Lenand. 2019. 848 p. (in Russian).
18. Znoiko S.A., Kustova T.V., Pavlova E.I., Danilova E.A., Borisov A.V. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 2. P. 190 - 195. DOI: 10.1134/S1070363221020067.
19. Знойко С.А., Елизарова А.П., Кустова Т.В., Наконечная А.Н. // *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 4. С. 42-51. Znoiko S.A., Elizarova A.P., Kustova T.V., Nakonechnaya A.N. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 4. P. 42-51. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6380.
20. Vashurin A., Maizlish V., Kuzmin I., Znoyko S., Morozova A., Razumov M., Koifman O.J. // *Porph. Phthal.* 2017. V. 21. N 1. P. 37-47. DOI: 10.1142/S108842461750002X.
21. Botnar A.A., Domareva N.P., Erzunov D.A., Futerman N.A., Tikhomirova T.V., Maizlish V.E., Vashurin A.S. // *Rus. Chem. Bull.* 2021. V. 70. N 7. P. 1297-1303. DOI: 10.1007/s11172-021-3214-3.
22. Эрзунов Д.А., Ботнар А.А., Тихомирова Т.В., Майзлиш В.Е., Александрийский В.В., Абрамов И.Г., Марфин Ю.С., Ващурина А.С. // *Макрогетероциклы.* 2021. Т. 14. № 4. С. 355-363. Erzunov D.A., Botnar A.A., Tikhomirova T.V., Maizlish V.E., Aleksandriiskii V.V., Abramov I.G., Marfin Yu.S., Vashurin A.S. // *Macrohet-*

- erocycles*. 2021. V. 14. N 4. P. 255-263 (in Russian). DOI: 10.6060/mhc214025v.
23. Березина Г.Р., Борисов А.В., Майзлиш В.Е., Шапошников Г.П. // *Журн. физ. химии*. 2015. Т. 89. № 3. С. 392-395. Berezina G.R., Borisov A.V., Maizlish V.E., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Phys. Chem.* 2015. V. 89. N 3. P. 389-392 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044453715030097.
 24. Березина Г.Р., Румянцева Т.А., Кулинич В.П., Шапошников Г.П. // *Коорд. химия*. 2011. Т. 37. № 10. С. 797-800. Berezina G.R., Rumyantseva T.A., Kulinich V.P., Shaposhnikov G.P. // *Russ. J. Coord. Chem.* 2011. V. 37. N 10. P. 796-799 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070328411100010.
 25. Березина Г.Р., Знойко С.А., Майзлиш В.Е. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. Вып. 5. С. 27-30. Berezina G.R., Znoiko S.A., Maizlish V.E. // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2012. V. 55. N 5. P. 27-30 (in Russian).
 26. Кирин И.С., Москалев П.Н., Макашов Ю.А. // *Журн. неорг. химии*. 1967. Т. 12. № 3. С. 707-712. Kirin I.S., Moskalev P.N., Makashov Yu.A. // *Zhurn. Neorg. Khim.* 1967. V. 12. N 3. P. 707-712 (in Russian).
 27. Buchler J. W., de Cian A., Fischer J., Kihn-Botulinski M., Paulus H. Weiss R. // *J. Am. Chem. Soc.* 1986. V. 108. N 13. P. 3652-3659. DOI: 10.1021/ja00273a018.
 28. Kudrik E.V., Islyaiykin M.K., Smirnov R.P. // *Zhurn. Org. Khim.* 1997. V. 70. N 5. P. 821-824 (in Russian).
 29. Galanin N.E., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Org. Chem.* 2012. V. 48. N 6. P. 851-857. DOI: 10.1134/S1070428012060176.
 30. Galanin N.E., Yakubov L.A., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Org. Chem.* 2008. V. 44. N 6. P. 921-926. DOI: 10.1134/S1070428008060237.
 31. Galanin N.E., Shaposhnikov G.P. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2012. V. 82. N 4. P. 764-769. DOI: 10.1134/S1070363212040275.
 32. Galanin N.E., Yakubov L.A., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Org. Chem.* 2011. V. 11. N 6. P. 941-947. DOI: 10.1134/S1070428011060194.
 33. Якубов Л.А., Галанин Н.Е., Шапошников Г.П., Быкова В.В., Ананьева Г.А., Усольцева Н.В. // *Жидк. крист. и их практ. использ.* 2010. Вып. 2 (32). С. 25-31. Yakubov L.A., Galanin N.E., Shaposhnikov G.P., Bykova V.V., Anan'eva G.A., Usoltseva N.V. // *Zhidk. Krist. Praktich. Ispol'z.* 2010. V. 2(32). P. 25-31 (in Russian).
 34. Коптыаев А.И., Галанин Н.Е., Шапошников Г.П. // *Rus. J. Org. Chem.* 2019. V. 55. N 7. P. 944-950. DOI: 10.1134/S1070428019070042.
 35. Galanin N.E., Shaposhnikov G.P. // *Rus. J. Org. Chem.* 2015. V. 51. N 5. P. 727-732. DOI: 10.1134/S1070428015050243.
 36. Коптыаев А.И., Вазанов М.И., Галанин Н.Е. // *Rus. J. Org. Chem.* 2020. V. 56. N 5. P. 788-796. DOI: 10.1134/S1070428020050103.
 37. Xu H.Y., Hu C.H., Liu Q.F., Zhao W.X., Liu Y. // *Appl. Mech. Mater.* 2012. V. 190-191. P. 571-574. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.190-191.571.
 38. Коптыаев А.И., Галанин Н.Е., Travkin V.V., Pakhomov G.L. // *Dyes Pigments*. 2021. V. 186. P. 108984. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108984.
 39. Suvorova Yu.V., Kustova T.V., Danilova E.A. // *Macroheterocycles*. 2020. V. 13. N 3. P. 234-239. DOI: 10.6060/mhc200494s.
 40. Danilova E.A., Kudayarova T.V., Islyaiykin M.K., Koifman O.I. // *Russ. J. General Chem.* 2018. V. 88. N 9. P. 2000-2012. DOI: 10.1134/S1070363218090438.
 41. Кустова Т.В., Апенкина М.А., Знойко С.А., Степанова Д.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 8. С. 62-69. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6695. Kustova T.V., Apenkina M.A., Znoyko S.A., Stepanova D.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 8. P. 62-69. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6695.
 42. Vashurin A.S., Maizlish V.E., Kuzmina I., Znoyko S.A., Morozova A., Razumov M., Koifman O.I. // *J. Porph. Phthal.* 2017. V. 21. N 1. P. 37-47. DOI: 10.1142/S108842461750002X.
 43. Zhabanov Y.A., Zakharov A.V., Shlykov S.A., Trukhina O.N., Danilova E.A., Koifman O.I., Islyaiykin M.K. // *J. Porph. Phthal.* 2013. 17. P. 220-228. DOI: 10.1142/S1088424613500144.
 44. Trukhina O.N., Zhabanov Y.A., Krasnov A.V., Danilova E.A., Islyaiykin M.K. // *J. Porph. Phthal.* 2011. 15. P. 1287-1291. DOI: 10.1142/S108842461100418X.
 45. Cirera B., Trukhina O., Björk J., Bottari G., Rodriguez-Fernandez J., Martín-Jiménez A., Islyaiykin M. K., Otero R., Gallego J.M., Miranda R., Torres T., Ecija D. // *J. Am. Chem. Soc.* 2017. 139 (40). P. 14129-14136. DOI: 10.1021/jacs.7b06406.
 46. Bacilla A.C.C., Okada Y., Yoshimoto S., Islyaiykin M.K., Koifman O.I., Kobayashi N. // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 2021. 94. N 1. P. 34-43. DOI: 10.1246/bcsj.20200188.
 47. Nazarov D.I., Khasanov S.S., Rompanen I.A., Ivanov E.N., Koifman O.I., Islyaiykin M.K., Konarev D.V. // *Polyhedron*. 2021. 202. P. 115198. DOI: 10.1016/j.poly.2021.115198.
 48. Konarev D., Khasanov S.S., Islyaiykin M.K., Otsuka A., Yamochi H., Kitagawa H., Lyubovskaya R.N., Ivanov E.N., Koifman O.I., Zhabanov Y.A. // *Chemistry – An Asian J.* 2020. 15. P. 61-65. DOI: 10.1002/asia.201901518.
 49. Ivanov E.N., Trukhina O.N., Koifman O.I., Islyaiykin M.K. // *Macroheterocycles*. 2016. V. 9. N 3. P. 225 - 229. DOI: 10.6060/mhc160965i.
 50. Nazarov D.I., Islyaiykin M.K., Ivanov E.N., Koifman O.I., Batov M.S., Zorina L.V., Khasanov S.S., Shestakov A.F., Yudanova E.I., Zhabanov Y.A., Vyalkin D.A., Otsuka A., Yamochi H., Kitagawa H., Torres T., Konarev D.V. // *Inorg. Chem.* 2021. 60. 13. P. 9857-9868. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.1c01132.
 51. Данилова Е.А., Исляйкин М.К. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 1994. Т. 37. Вып. 2. С. 77-81. Danilova E.A., Islyaiykin M.K. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 1994. V. 37. N 2. P. 77-81 (in Russian).
 52. Islyaiykin M.K., Danilova E.A., Kudrik E.V., Smirnov R.P., Budunova A.P., Kinzirskii A.S. // *Pharmaceut. Chem. J.* 1997. V. 31. P. 409-412. DOI: 10.1007/BF02464352.
 53. Islyaiykin M.K., Danilova E.A. // *Rus. Chem. Bull. Internat. Ed.* 2007. V. 5. N 4. P. 689-706. DOI: 10.1007/s11172-007-0107-z.
 54. Islyaiykin M.K., Danilova E.A., Romanenko Yu.V., Khelevina O.G., Lomova T.N. In: *Chemical Processes with Participation of Biological and Related Compounds*.

- Ed. by T.N. Lomova, G.E. Zaikov. Leiden-Boston: BRILL. 2008. P. 219-270.
55. **Kudayarova T.V., Danilova E.A., Koifman O.I.** // *Rus. Chem. Bull. Int. Ed.* 2018. V. 67. N 12. P. 2262—2265. DOI: 10.1007/s11172-018-2367-1.
 56. **Кудаярова Т.В., Данилова Е.А., Питева Ю.А., Мочалина К.Е., Дмитриев М.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 121-127. **Kudayarova T.V., Danilova E.A., Piteva Yu.A., Mochalina K.E., Dmitriev M.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 4. P. 121-127 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196204.6000.
 57. **Бутина Ю.В., Кудаярова Т.В., Данилова Е.А., Исляйкин М.К.** // *Биомед. химия.* 2019. Т. 65. Вып.2. С. 99-102. **Butina Yu.V., Kudayarova T.V., Danilova E.A., Islyaikin M.K.** // *Biomed. Khim.* 2019. V. 65. N 2. P. 99-102 (in Russian). DOI: 10.18097/PBMC20196502099.
 58. **Суворова Ю.В., Петухова Е.А., Данилова Е.А., Тюрин Д.В.** // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2020. Т. 20. Вып. 4. С. 41–48. **Suvorova Yu.V., Petukhova E.A., Danilova E.A., Tyurin D.V.** // *Zhidk. Krist. Praktich. Ispol'z.* 2020. V. 20. N 4. P. 27-34 (in Russian). DOI: 10.18083/LCAppl.2020.4.27.
 59. **Суворова Ю.В., Петухова Е.А., Данилова Е.А., Тюрин Д.В.** // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22. № 1. С. 6–15. **Suvorova Yu.V., Petukhova E.A., Danilova E.A., Tyurin D.V.** // *Zhidk. Krist. Ppraktich. Ispol'z.* 2022. V. 22. N 1. P. 6-15 (in Russian). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.1.6.
 60. **Суворова Ю.В., Петухова Е.А., Дмитриев М.В., Данилова Е.А., Александрійский В.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 8-16. **Suvorova Yu.V., Petukhova E.A., Dmitriev M.V., Danilova E.A., Aleksandriiskii V.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 8-16 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6506.
 61. **Данилова Е.А., Исляйкин М.К., Штрыголь С.Ю.** // *Изв. АН. Сер. Хим.* 2015. № 7. P. 1610-1615. **Danilova E.A., Islyaikin M.K., Shtrygol S.Yu.** // *Izv. AN Ser. Khim.* 2015. V. 64. N 7. P. 1610—1615. DOI: 10.1007/s11172-015-1049-5.

Поступила в редакцию 01.03.2023

Принята к опубликованию 09.03.2023

Received 01.03.2023

Accepted 09.03.2023