

грації спеціалістів різних областей знання, в країнах Тихоокеанського басейну (США, Канада, Японія, Китай) і Західної Європи (Франція, Італія, Німеччина, Іспанія, Швейцарія, Великобританія, Австрія) уже створено регіональні Міжнародні комітети, курирують розвиток досліджень по молекулярним магнетикам, а в 2000 і 2001 гг. в Німеччині, Франції, Італії і Іспанії створено Національні наукові комітети по проблемам молекулярного магнетизму, які в наші часи об'єдналися в єдину європейську мережу. В деяких країнах СНГ, наприклад, в Росії, на Україні і в Молдові ця проблематика також розвивається, хоча темпи її розвитку суттєво зменшуються через недостаток фінансування і відсутність належного рівня кооперації між партнерами. Можливо лише надіятися на покращення ситуації за рахунок появи взаємодії між національними науковими фондами Росії, України і Молдови, країн, де наукові зв'язки між ученими традиційно сильні.

1. Бучаченко А.Л. Химия как музыка. – М., 2004. – С. 104. 2. Малков А.Е., Фомина И.Г., Сидоров А.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. – 2003. – № 2. – С. 489. 3. Михайлова Т.Б., Плахмутова Е.В., Малков А.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. хим. – 2003. – № 10. – С. 1994. 4. Новоторцев В.М., Ерменко И.Л., Малков А.Е. и др. // Ферромагнитные пентаядерные карбоксилатные комплексы Co(II) // Тез. I Всерос. конф. "Высокоспиновые молекулы и молекулярные ферромагнетики" – Черноголовка, 2002. 5. Сагдеев Р.З., Овчаренко В.И. // Успехи хим. – 1999. – Т. 68. – С. 381. 6. Уильямс Р.С. Молекулярная электроника // Нанотехнология в ближайшем десятилетии. – М., 2002. 7. Фомина И.Г., Сидоров А.А., Александров Г.Г. и др. // Изв. АН. Сер. хим. – 2004. – № 7. – С. 1422. 8. Bian G.-Q., Kuroda-Sowa T., Konaka H. et al. // Inorg. Chem. – 2004. – Vol. 43. – P. 4790. 9. Ikoriskii V.N., Ovcharenko V.I., Shvedenkov Y. et al. // Inorg. Chem. – 1998. – Vol. 37. – P. 4360. 10. Khan O. Molecular Magnetism. – N. Y., 1993. 11. Khan O. // Acc. Chem. Res. – 2000. – Vol. 33. – P. 647. 12. Koreneva O.V., Romanenko G.V., Shvedenkov Yu.G. et al. – 2003. – Vol. 22 (14–17). – P. 2487. 13. Kuroda-Sowa T., Nogami T., Konaka H. et al. // Polyhedron. – 2003. – Vol. 22. – P. 1975. 14. Ovcharenko V., Fursova E., Romanenko G., Ikoriskii V. // Inorg. Chem. – 2004. – Vol. 43 (11). – P. 3332. 15. Ray P., Ovcharenko V.I. Copper(II) Nitroxide Molecular Spin-Transition Complexes // Magnetism: Molecules to Materials IV / Eds. J.S. Miller, M. Drillon. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2002. 16. Sessoli R., Tsai H., Schake A.R. et al. // J. Am. Chem. Soc. – 1993. – Vol. 115. – P. 1804. 17. Shvedenkov Y., Ikoriskii V., Romanenko G. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1999. – Vol. 334. – P. 405. 18. Verdager M. // Polyhedron. – 2001. – Vol. 20. – P. 1115.

Надійшла до редколегії 21.02.06

В. Скопенко., д-р хім. наук, І. Фрицький, д-р хім. наук

ІЄРАРХІЧНА САМООРГАНІЗАЦІЯ НАНОРОЗМІРНИХ ОБМІННИХ КЛАСТЕРІВ

Подано огляд можливостей застосування одного з найперспективніших підходів до одержання нових цікавих молекулярних об'єктів – високоядерних нанорозмірних обмінних кластерів – використання процесів ієрархічної самоорганізації у розчині.

The paper is dedicated to review of possibilities of application of one of the most perspective approaches for new interesting molecular objects – nano-sized exchange clusters of high nuclearity – use of processes of hierarchical self-assembly in solution.

В останні роки спостерігається все більше зростання інтересу до поліядерних координаційних сполук. Це насамперед пов'язано з бурхливим розвитком таких напрямків сучасної хімії, як біоорганічне моделювання [6; 10; 15], молекулярний магнетизм [12; 13], металокомплексний катализ [4] та інженерія кристалів [16; 3]. Саме в зазначених галузях науки поліядерні металокомплекси найбільш інтенсивно вивчаються і є найбільш затребуваними. Особливо цікаву групу поліядерних сполук складають комплекси, які містять велику кількість ядер (чотири і більше). Такі системи за своїми розмірами можуть розглядатися як справжні наноб'єкти, а їхні властивості можуть бути насправді унікальними. Наприклад, високоядерні металокомплекси, які містять кілька парамагнітних іонів металів, з'єднаних містковими молекулами, можуть виявляти дуже специфічні магнітні властивості, у зв'язку з чим розглядаються як перспективні речовини для одержання молекулярних магнітних матеріалів [12; 13]. Крім цього, такі сполуки в багатьох повідомлених випадках виявили цікаві каталітичні, фото- та електрохімічні властивості, які можуть суттєво відрізнятися від відповідних властивостей їхніх менш високоядерних аналогів [16; 2]. Нарешті, високоядерні нанорозмірні кластери ще чекають свого визнання як потенційно перспективна група унікальних фармацевтичних засобів. Слід підкреслити, що дослідження, які проводяться в цьому напрямку, фактично тільки розпочинаються, і немає жодних сумнівів, що найближчими роками буде багато нових результатів, які відкриють нові аспекти цікавих функціональних властивостей високоядерних кластерів, які, у свою чергу, можуть стати підґрунтям для їхнього подальшого практичного застосування.

На сьогоднішній день найважливішим питанням у хімії високоядерних координаційних сполук залишається питання про розробку раціональних методів синтезу таких речовин. Необхідність одержання нових молекулярних топологій і виразна тенденція до все більшого ускладнення об'єктів дослідження в цій галузі стимулюють зусилля

дослідників щодо розробки все витонченіших підходів до створення високоядерних металокомплексів [20; 17].

Нами не ставилося за мету подати в даній статті детальний огляд методів синтезу поліядерних координаційних сполук, оскільки ця тема невичерпна і, слід сказати, досить погано висвітлена в монографічній та оглядовій літературі. Нам лише хотілося би дати загальну класифікацію відомих синтетичних підходів до одержання поліядерних сполук, аби зробити висновки, які з цих підходів можуть бути успішно застосовані для цілеспрямованого синтезу високоядерних нанорозмірних обмінних кластерів і, зокрема, представити короткий опис методу ієрархічної самоорганізації як одного з найперспективніших сучасних підходів до одержання високоядерних сполук.

Методи синтезу поліядерних координаційних сполук можна умовно поділити на дві групи:

- методи, що базуються на свідомому молекулярному дизайні;
- методи, в яких використовуються процеси самоорганізації, що призводять до утворення поліядерних структур.

До першої групи належать дві розповсюджені синтетичні стратегії: дизайн і синтез *полінуклеативних лігандів*, тобто таких лігандів, в яких присутні два або більше окремих донорних вузла, здатних незалежно координувати два або більше іонів металів, а також використання *моноядерних комплексів з вакантними донорними групами та/або хелатними вузлами як конструкторських блоків* для одержання поліядерних комплексів шляхом екзокоординації додаткових іонів металів (іноді цей підхід коротко називають *використання моноядерних комплексів як лігандів*).

Застосування *дизайну полінуклеативних лігандів* нерідко дозволяє заздалегідь спланувати просторову організацію лігандів, яка б задовольняла певним стереохімічним перевагам іонів металів, певному взаємному розташуванню координаційних сфер, очікуваним міжметалевим відстаням, певним конформаційним

особливостям комплексів. Як правило, молекулярний дизайн полінуклеативних лігандів вимагає значних синтетичних зусиль для одержання відповідних органічних сполук, тобто суто органічний синтез складає основний внесок в загальну трудомісткість цього підходу [15; 20; 17]. Лігандний дизайн найширше застосовувався в біонеорганічному моделюванні поліядерних активних центрів металоензимів та в супрамолекулярній координаційній хімії [6; 10; 15–17; 20].

При використанні *моноядерних комплексів як конструкторних блоків для одержання поліядерних* загальна донорна ємність (тобто сумарна кількість донорних атомів, здатних до одночасної монодентатної координації) повинна перевищувати максимально можливе за даних умов координаційне число іона металу. Прикладом таких лігандів можуть бути полікарбоксилати, амінополікарбоксилати, полігетероциклічні ліганди низкової будови, деякі типи пендантних краун-етерів та поліазамакроциклічних лігандів [9; 14, 21]. За таких умів "вільні" донорні атоми можуть координувати інші йони металів з реалізацією місткової функції ліганду. Найширше цей метод використовувався в *молекулярному магнетизмі* [12], оскільки він дозволяє спланувати синтез мультіядерних координаційних сполук, у тому числі різнометалевих, зі специфічною топологією металевих центрів (іноді це досягається двома або трьома послідовними процесами "нарощування" екзокоординованих іонів металів сплатку на моно-, а на другому й наступних етапах – на поліядерні матриці [12]). Більшість поліядерних сполук, отриманих таким способом, базується на полідентатних лігандах, у складі яких присутні дво- або багатоатомні місткові групи, здатні ефективно опосередковувати обмінну взаємодію між іонами металів (карбоксилатні, амідні, оксамідні, гідроксаматні, оксимні тощо). Очевидно, при використанні даного підходу топологічні особливості, а також у певній мірі структурні та конформаційні параметри поліядерних сполук, можуть бути спланованими та передбаченими.

До синтетичних підходів, в яких використовуються процеси спонтанної самоорганізації, належать власне метод *"самозбирання" або самоорганізації (self-assembly)* у розчині, а також деякі його різновиди, зокрема метод *прямого синтезу* [14; 18; 26; 27] та *гідротермальний синтез*. На відміну від групи методів, що застосовують раціональний дизайн, при застосуванні методів, які базуються на процесах самоорганізації, використовують комбінації лігандів, що можуть виявляти кілька різних способів координації, з металами, які здатні варіювати свою координаційну геометрію. У рамках методу самоорганізації особливої уваги заслуговує *"аніон-дефіцитний"* підхід [14; 28], який полягає в тому, що за умов стехіометричної нестачі аніонних лігандів частина з них "вимушена" координуватися містковим способом. Очевидно, для успішного застосування цього підходу треба використовувати специфічні співвідношення солей металів і лігандів при синтезі, а також приділяти увагу підбору придатних для цього інертних розчинників, які би не могли виступати в ролі лігандів [14; 28].

До очевидних переваг методу *спонтанної самоорганізації* можна віднести велике різноманіття можливих типів поліядерних сполук, а також можливість отримання комплексів з високим ступенем ядерності. Так, перші "молекулярні магніти" $[Mn_{12}O_{12}(O_2CR)_{16}(H_2O)_4]$ (рис. 1.) були отримані в 1993 р. випадково в результаті спонтанного самозбирання [23]. Їхнє відкриття спонукало численні синтетичні дослідження, які призвели до одержання великої кількості мультіядерних сполук. Слід зазначити, що переважна частина високоядерних металокомплексів була отримана саме з використанням методів, які базуються на процесах спонтанної самоорганізації.

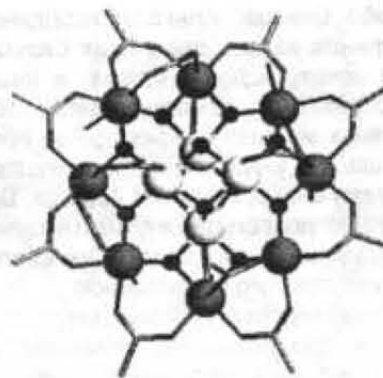


Рис. 1. Молекулярна будова $[Mn_{12}O_{12}(CH_3COO)_{16}(H_2O)_4]$

Незважаючи на цікаві й важливі результати, отримані в останні роки, слід усе ж таки зазначити, що використання препаративних методів, які базуються на спонтанній самоорганізації, обмежене через високу питому частину негативних синтетичних результатів (що насамперед звучує коло об'єктів дослідження лише до комерційно доступних лігандів або таких, що можуть бути легко синтезовані у відносно великих кількостях), а також через неможливість проведення тонких варіацій та налагодження (*"fine tuning"*) структурних параметрів. Це особливо важливий недолік у контексті біонеорганічного моделювання металоферментів, де, як правило, не потрібно отримувати високоядерні комплекси, але принципово важливо мати певні засоби регулювання структурних параметрів та функціональної активності.

Дослідження, проведені з останні 10 років, дозволили з'ясувати багато важливих особливостей перебігу реакцій спонтанної самоорганізації поліядерних сполук і зробити здійснення відповідних синтезів набагато передбачуванішим. На сьогоднішній день у літературі з'явилося кілька термінів, які підкреслюють саме можливість передбачати характер продуктів таких реакцій, зокрема розрізняють *"програмовану"* і *"адаптивну"* самоорганізацію. Один з найвідоміших дослідників у цій галузі, англійський хімік Р.Е.П. Вінпенні, який досяг насправді визначних успіхів у синтезі високоядерних комплексів, навіть запропонував термін *"інтуїтивна самоорганізація" (serendipitous assembly)*, підкреслюючи тим самим високий ступінь передбачуваності можливості отримання цільових сполук [28]. Один з отриманих ним високоядерних нанорозмірних комплексів подано на рис. 2 [28].

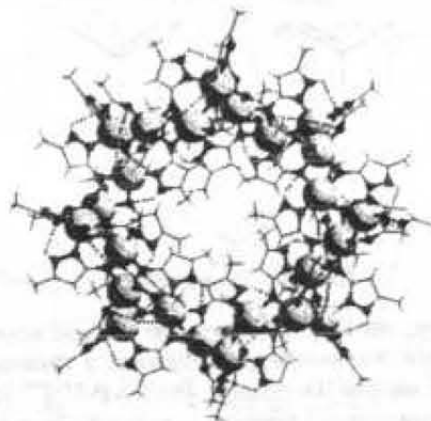


Рис. 2. Молекулярна будова $[Ni_{24}(OH)_8(mpo)_{16}(O_2CMe)_{24}(Hmpo)_{16}]$

У супрамолекулярній хімії в останні роки з метою отримання дискретних високоядерних координаційних сполук, а також координаційних полімерів почали широко застосовувати різноманітні комбіновані синтетичні підходи, які нерідко полягають у послідовному викорис-

танні двох або більшої кількості координаційних або супрамолекулярних актів, одні з яких базуються на дизайні певних конструкційних блоків, а інші – на їхній подальшій спонтанній самоорганізації, або навпаки. Прикладом таких методів є агрегація за принципом нарощування "шар за шаром" [19], молекулярне панелювання [8] та деякі інші оригінальні підходи. Використання подібних методів дозволило отримати цілий ряд дуже цікавих і оригінальних високоядерних сполук зі складною супрамолекулярною організацією.

Одним з найперспективніших методів одержання високоядерних нанорозмірних обмінних кластерів є використання процесів ієрархічної агрегації в розчині [22; 5]. При цьому підході як реагенти використовують заздалегідь синтезовані "конструкційні блоки", які при агрегації можуть утворювати високоядерні дискретні молекули. Ієрархічна самоорганізація в розчині може проходити у двох основних напрямках: надбудова (*Aufbau*) за принципом "шар за шаром" та агрегація відносно великих блоків у мультіядерну структуру. Таким чином, ієрархічна самоорганізація дискретних мультіядерних комплексів передбачає реалізацію декількох послідовних координаційних та/або супрамолекулярних актів, одні з яких базуються на дизайні конструкційних блоків, а інші – на їхній подальшій самоорганізації (або навпаки).

Ієрархічна самоорганізація нанорозмірних об'єктів є досить поширеним явищем у природі, зокрема в біології. Прикладами таких процесів у живій природі є утворення клітинних мембран, багатокомпонентних ензимів, вірусів (наприклад, вірус тютюнової мозаїки, який збирається з однієї низки РНК і 2130 протеїнів).

Протягом останніх років на кафедрах неорганічної та фізичної хімії Київського національного університету імені Тараса Шевченка було одержано цілий ряд нових оригінальних високоядерних координаційних сполук з використанням методу ієрархічної самоорганізації у розчині. Нижче представлено результати синтезу та структурних досліджень дискретних мультіядерних молекулярних систем, одержаних за участю авторів.

Серію нових поліядерних сполук, що виявили дуже цікаві магнітні, електрохімічні та каталітичні властивості, було одержано на основі тетрадентатного відкрито-ланцюгового ліганду PAP (схема 1) [11; 7].

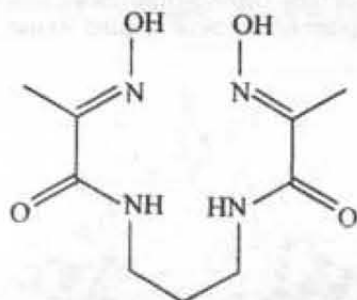
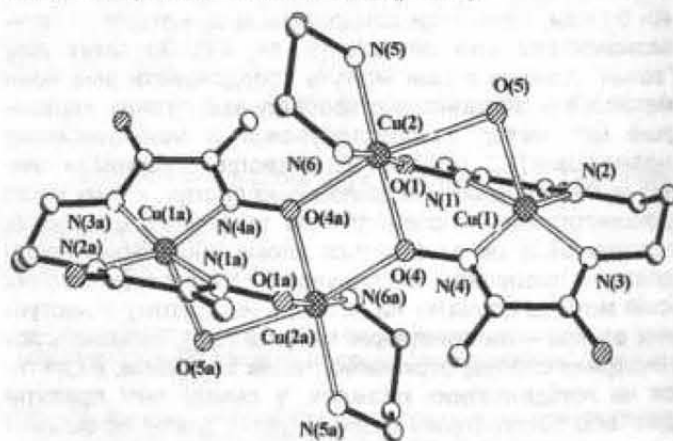


Схема 1. Ліганд PAP

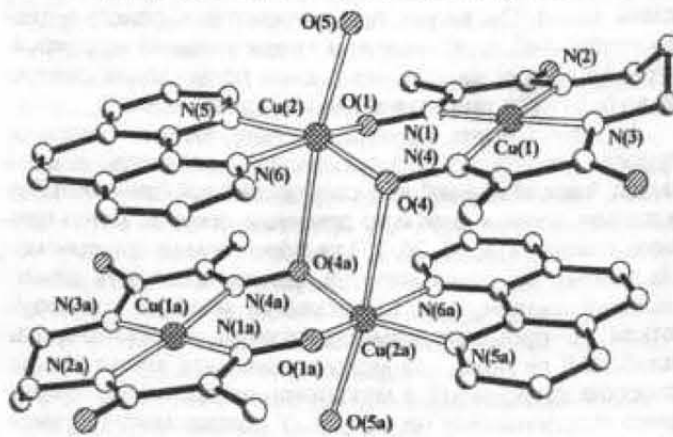
Цей ліганд легко утворює стійкі аніонні комплекси у водному та метанольному середовищі з такими іонами, як мідь(II) і нікель(II) складу $[M(PAP-H)]^-$. Зазначені моноядерні комплекси містять *cis*-розташовані оксимні донорні атоми кисню, які формують вакантний хелатний вузол, що може зв'язувати йони металів при заміщенні оксимного атома водню. Тому при синтезі бі- та поліядерних сполук використовували реакції аніонних комплексів із солями металів (міді(II) і цинку(II)) або катіонними комплексами з лабільними місцями в координаційній сфері. З метою контролю ступеня ядерності утворених комплексів шляхом блокування двох або

чотирьох місць у координаційній сфері другого йону металу використовували бі- та тетрадентатні аліфатичні та ароматичні аміни.

Виходячи з моноядерних комплексів на основі тетрадентатних відкритоланцюгових лігандів було отримано сполуки двох типів: біядерні μ_2 -оксиматні та тетраядерні μ_3 -оксиматні комплекси. Останні утворюються з біядерних у процесі спонтанної димеризації останніх, яка відбувається через те, що вакантні місця в координаційній сфері додаткових іонів міді(II) та цинку(II) займаються оксиматними атомами кисню іншого біядерного комплексу. У кристалічному стані біядерні фрагменти об'єднуються в тетраядерні димери завдяки потрійній містковій функції однієї з оксимних груп, яка таким чином виявляється включеною в утворення як площинних, так і ортогональних містків (рис. 3).



а – $[Cu(PAP-4H)Cu(1,3-pn)(H_2O)_2]_2 \cdot 6H_2O$



б – $[Cu(PAP-4H)Cu(phen)(H_2O)_2]_2 \cdot 2H_2O$

Рис. 3. Молекулярна будова тетраядерних оксиматних комплексів

У комплексах, які містять ароматичні ліганди, площини останніх практично копланарні екваторіальній площині $Cu(1)$ сусіднього біядерного фрагменту завдяки існуванню специфічної π - π взаємодії між ароматичними системами молекул фенантроліну або дипіридилу та оксимними групами (рис. 3, б). Ці нековалентні взаємодії визначають конформацію біядерних фрагментів. Синтезовані тетраядерні комплекси виявили цікаві магнітні властивості (в усіх одержаних сполуках реалізується дуже сильна антиферромагнітна взаємодія між парамагнітними йонами), а також каталітичну активність у ряді реакцій окиснення біологічно важливих субстратів киснем повітря [11; 7].

Іншим цікавим прикладом є утворення високоядерних координаційних сполук на основі полідентатного ліганду біс(ретарил)амідного типу PPPn (схема 2) [24; 25].

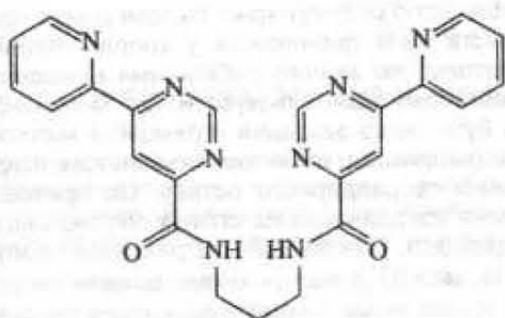


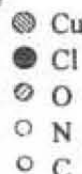
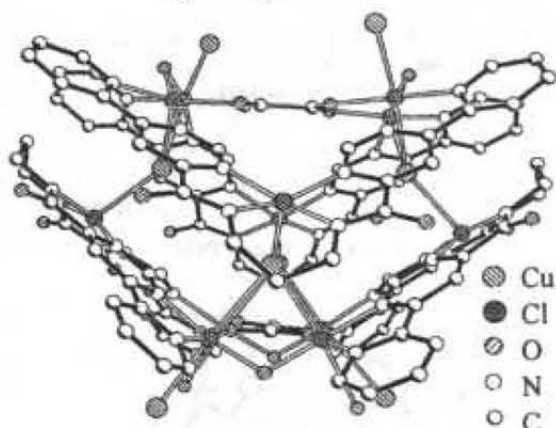
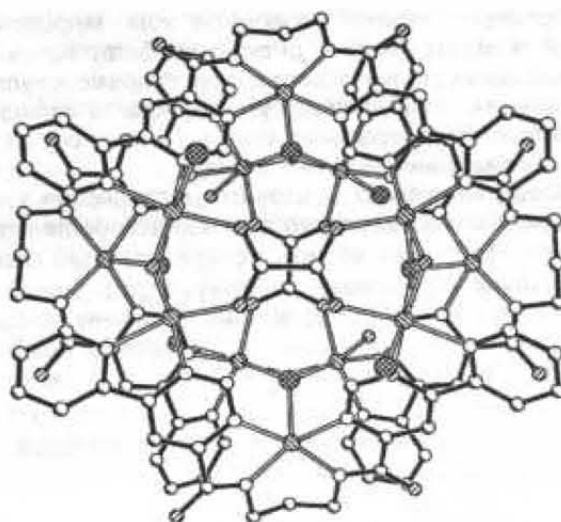
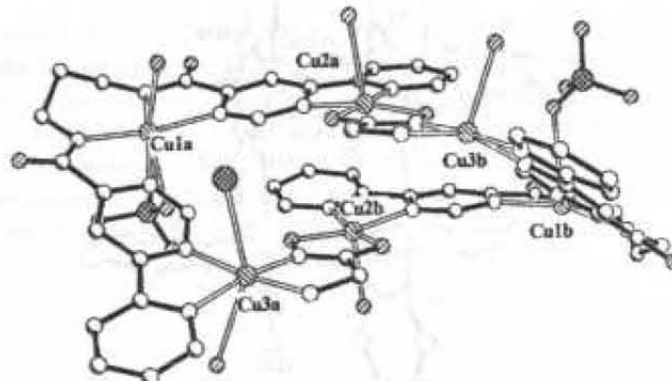
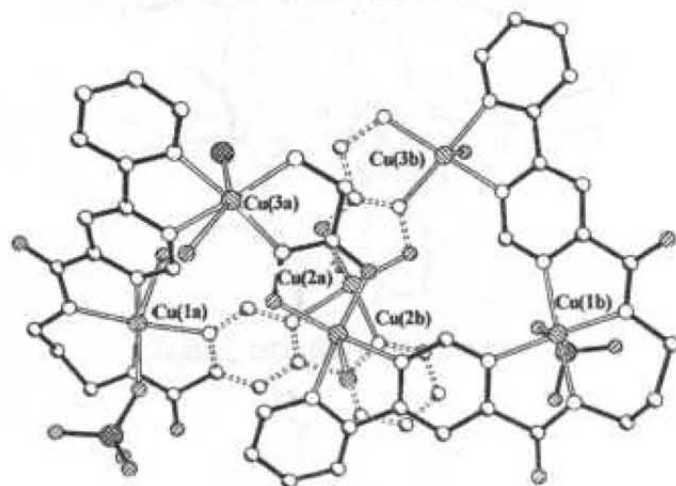
Схема 2. Ліганд PPPn

Спочатку цей ліганд було використано з метою створення триядерних біоміметичних каталізаторів, які імітують каталітичну активність металовмісних фосфодіестераз. З цієї метою було синтезовано серію гомо- і гетерометалевих триядерних комплексів з іонами міді(II), в яких іони металів займають внутрішній тетрадентатний і два зовнішні бідентатних донорних вузла. Оскільки координаційна сфера двох іонів металів, що займають зовнішні вузли, залишається ненасиченою (тобто, у триядерних комплексах оточення цих металів доповнюється до октаедричного аніонами або молекулами монодентатних лігандів або розчинника), було зроблено припущення, що ці комплекси можна використати як будівельні блоки в реакціях спонтанної самоорганізації з потенційно містковими лігандами. До того ж рентгеноструктурні дослідження моноядерних комплексів з PPPn, в яких метал займає центральний тетрадентатний донорний вузол, виявили, що досліджені сполуки виявляють спіральну конформацію (тобто є моногелікатами) і тому можуть бути використані як хіральні конструкційні блоки при синтезі поліядерних сполук.

З метою отримання високоядерних сполук на основі PPPn було проведено численні спроби кристалізації зазначених триядерних комплексів у присутності різноманітних місткових аніонів. Зокрема, у результаті реакції триядерного комплексу міді(II) з 0,5 еквівалентами оксалату натрію було ізольовано монокристали 12-ядерного комплексу, рентгеноструктурний аналіз якого підтвердив присутність 1,4-місткового оксалату, ендокординованого до двох іонів міді, що займали зовнішні вузли у триядерних блоках (рис. 4).

У комплексі присутні місткові групи п'яти типів: μ -піримідинова, μ_4 -оксалатна, μ -гідроксо та μ_2 - і μ_3 -хлорид [24]. Одержаний комплекс являє собою перший приклад μ_4 -координації оксалат-аніону в сполуках 3d-металів. У результаті агрегації двох триядерних модулів відбувається об'єднання їх у гексаядерні домени, що виявляють сідлоподібну конформацію. У наступному акті ієрархічної супрамолекулярної агрегації за рахунок реалізації додаткової місткової функції хлорид-іонів відбувається подальше об'єднання гексаядерних доменів у додекаядерний агрегат, який до того ж є естетично привабливою конструкцією (рис. 4) [24].

Реакція триядерного комплексу міді(II) на основі PPPn з аніоном гліцилгідроксамової кислоти призвела до утворення топологічно цілком відмінного продукту (рис. 5), в якому гідроксамат-аніон виявляє екзо-місткову функцію, зв'язуючи "зовнішні" атоми міді, що належать різним триядерним фрагментам. У результаті утворений гексаядерний агрегат містить циклічну послідовність, але при цьому виявляє не циклічну, а хіральну петлеподібну конформацію у формі "цифри вісім", що є першим прикладом самоорганізованої молекулярної вісімки (рис. 5) [25].

Рис. 4. Молекулярна будова 12-ядерного комплексу $[Cu_{12}(PPPn)_4(\mu_4-C_2O_4)_2(\mu-OH)_4(\mu-Cl)_2Cl_4(H_2O)_2] \cdot 34.83H_2O$ (дві різні проекції)Рис. 5. Молекулярна будова 6-ядерного комплексу $[Cu_6(PPPn-2H)_2(GHA-2H)_2(OH)_{0.5}(ClO_4)_{1.5}(Cl_2ClO_4)(H_2O)_4] \cdot 10.64H_2O$ (дві різні проекції)

Проведені реакції дозволили нам запропонувати новий підхід до дизайну дискретних багатоядерних координаційних сполук з ієрархічною супрамолекулярною організацією, який полягає у використанні поліядерних моногелікатів як хіральних блоків у реакціях самоорганізації з лігандами місткового типу.

Нещодавно було розпочато дослідження координаційно-хімічних властивостей нового полідентатного ліганду POP, який містить чотири альтернативні донорні групи: піридинову, оксимину, гідразидну і азометинову (схема 3). Ліганд виявив виражену тенденцію до спонтанного утворення тетраядерних комплексів з іонами 3d-металів складу 4:4 з топологією молекулярної ґратки [2 x 2]. Ряд комплексів цього типу було ізолювано, і їхню будову досліджено методом рентгеноструктурного аналізу (рис. 6).

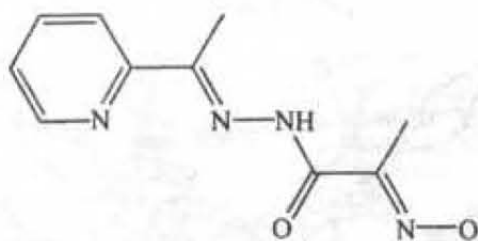
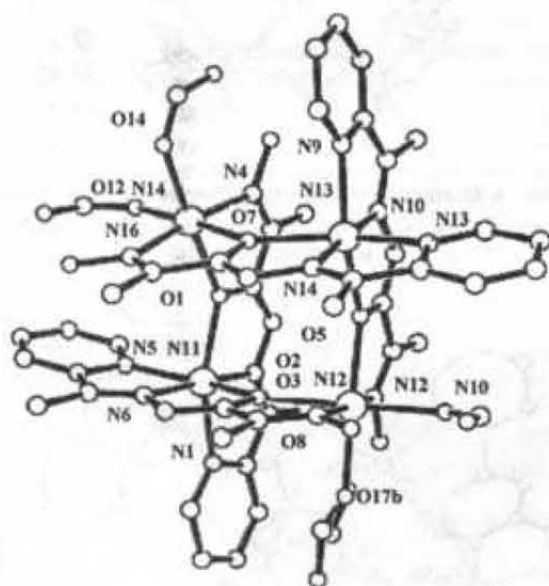
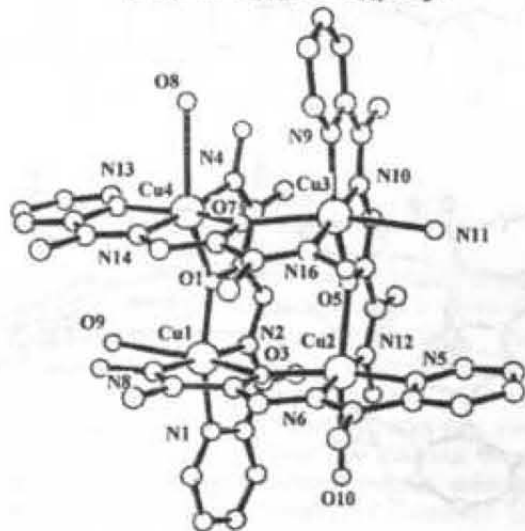


Схема 3. Ліганд POP



а – $[Ni_4(POP-H)_4(HCOO)_4] \cdot 9H_2O$



б – $[Cu_4(POP-2H)_4(H_2O)_4]$

Рис. 6. Молекулярна будова тетраядерних комплексів

Особливістю молекулярної будови даних комплексів є наявність двох *цис*-позицій у координаційній сфері іонів металів, які зайняті лабільними монодентатними лігандами. Тому можна очікувати, що зазначені ліганди можуть бути легко заміщені потенційно містковими лігандами (наприклад, ціанатом, тiocіанатом, азидом) без руйнування тетраядерного остову. Це призвело б до одержання координаційних сполук значно вищого ступеня ядерності. Синтезовані тетраядерні сполуки нікелю(II) та міді(II) виявили цікаві магнітні властивості. Знаменно, що якщо в комплексі нікелю спостерігається помірна антиферромагнітна взаємодія, то у випадку комплексу міді реалізується помітна ферромагнітна взаємодія між іонами міді, що є досить рідкісним явищем для поліядерних сполук міді(II). Таким чином, тетраядерні комплекси міді можна розглядати як зручні конструкційні ферромагнітні блоки для одержання високоядерних нанорозмірних кластерів шляхом проведення реакцій супрамолекулярної агрегації з використанням підходу, описаного вище. Можна очікувати, що одержані таким способом сполуки будуть виявляти тотальне ферромагнітне упорядкування і, таким чином, можуть являти собою молекули з високим сумарним спіном, що, у свою чергу, дозволить розглядати їх як перспективні речовини для створення молекулярних магнітів. Роботи із синтезу таких сполук нині ведуться в наших лабораторіях.

Наведені приклади наочно демонструють великі можливості використання методу ієрархічної самоорганізації для одержання координаційних сполук високого ступеня ядерності. Даний метод дозволяє отримати різноманітні за своєю будовою та особливостями ієрархічної надмолекулярної організації комплекси, що можуть виявляти оригінальні функціональні властивості та розглядатися як перспективні об'єкти дослідження в нанохімії. Проведення подальших досліджень у цій галузі, очевидно, сприятиме розвитку одного з найважливіших напрямків сучасної хімії – координаційної хімії поліядерних комплексів [1].

1. Скопенко В.В., Домасевич К.В., Козозей В.Н., Фрицкій І.О. // Укр. хім. журн. – 2004 – Т. 70, № 11–12. – С. 3–23. 2. Balzani V., Juris A., Ventury M. et al. // Chem. Rev. – 1996. – Vol. 96, № 2. – P. 759–833. 3. Braga D., Grepioni F., Desiraju G.R. // Chem. Rev. – 1998. – Vol. 98, № 8. – P. 1375–1405. 4. Catalysis by Di- and Polynuclear Metal complexes / Eds. F.A. Cotton, R. Adams. – N. Y., 1997. 5. Childs L.J. // Angew. Chem. – 2001. – Vol. 40, № 6. – P. 1079–1083. 6. Fenton D.E. // Chem. Soc. Rev. – 1999. – Vol. 28, № 3. – P. 159–168. 7. Fritsky I.O., Kozłowski H., Kanderál O.M. et al. // Chem. Commun. – 2006. – № 39. – P. 4125–4127. 8. Fujita M. // Struct. Bond. – 2000. – Vol. 96. – P. 177–201. 9. Goodwin J.C., Sessoli R., Gatteschi D. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. – 2000. – № 12. – P. 1835–1840. 10. Kaim W., Schwederski B. Bioinorganic Chemistry: Inorganic Elements in the Chemistry of Life. An Introduction and Guide. – Chichester (UK), 1994. 11. Kanderál O.M., Kozłowski H., Dobosz A. et al. // Dalton Trans. – 2005. – № 8. – P. 1428–1437. 12. Kahn O. Molecular Magnetism. – New York, 1994. 13. Kanh O. // Adv. Inorg. Chem. – 1995. – Vol. 73. – P. 49–77. 14. Kokozay V.N., Vassilyeva O.Yu. – 2002. – Vol. 27. – P. 693–699. 15. Kramer R. // Coord. Chem. Rev. – 1999. – Vol. 182, № 2. – P. 243–261. 16. Lehn J.M. Supramolecular Chemistry. – Weinheim, 1995. 17. Leininger S., Olonyuk B., Stang P.J. // Chem. Rev. – 2000. – Vol. 100, № 3. – P. 853–907. 18. Makhankova V.G., Vassilyeva O.Yu., Kokozay V.N. et al. // New. J. Chem. – 2001. – Vol. 25, № 5. – P. 685–689. 19. Narayanan V.V., Newkome G.R. // Top. Curr. Chem. – 1998. – Vol. 197. – P. 19–77. 20. Piguel C., Bernardinelli G., Hopfgartner G. // Chem. Rev. – 1997. – Vol. 97, № 12. – P. 2005–2062. 21. Powell A.K., Heath S.L., Gatteschi D. et al. // J. Am. Chem. Soc. – 1995. – Vol. 117, № 9. – P. 2491–2502. 22. Schütte M., Kurth D.G., Linford M.R. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. – 1998. – Vol. 37, № 20. – P. 2891–2893. 23. Sessoli R., Gatteschi D., Caneschi A., Novak M.A. // Nature. – 1993. – Vol. 365, № 6442. – P. 141–143. 24. Strotmeyer K.P., Fritsky I.O., Ott R. et al. // Supramol. Chem. – 2003. – Vol. 15, № 7–8. – P. 529–547. 25. Strotmeyer K.P., Fritsky I.O., Pritzkow H., Krämer R. // Chem. Commun. – 2004. – № 1. – P. 28–29. 26. Vassilyeva O.Yu., Kokozay V.N., Zhukova N.I., Kovbasyuk L.A. // Polyhedron. – 1997. – Vol. 16, № 2. – P. 263–266. 27. Vinogradova E.A., Vassilyeva O.Yu., Kokozay V.N. et al. // New. J. Chem. – 2001. – Vol. 25, № 7. – P. 949–953. 28. Winpenny R.E.P. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. – 2002. – № 1. – P. 1–10.