

УДК 541.49

## РАЗВИТИЕ ХИМИИ КЛАСТЕРОВ, СУПРАМОЛЕКУЛЯРНОЙ ХИМИИ И ХИМИИ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КООРДИНАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ В НАУЧНОЙ ШКОЛЕ ЧЛ.-КОРР. РАН В.П. ФЕДИНА

© 2024 г. М.Н. Соколов<sup>1,\*</sup>, Д.Н. Дыбцев<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: caesar@niic.nsc.ru

\*\*e-mail: dan@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 12.07.2024 г.

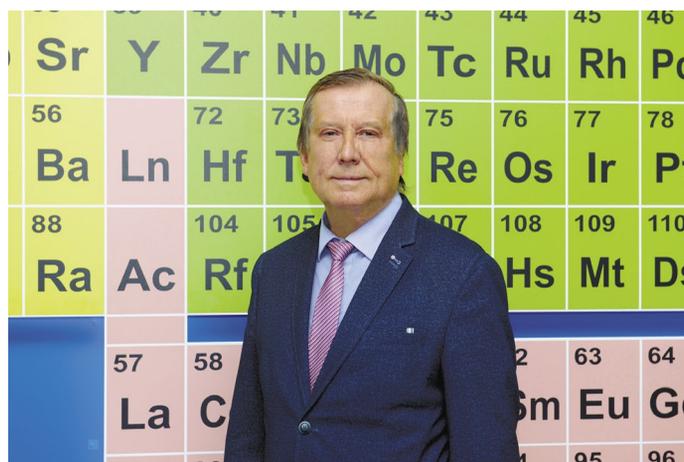
После доработки 01.08.2024 г.

Принята к публикации 02.08.2024 г.

В статье кратко описано становление основных научных направлений, развитых выдающимся ученым — специалистом в области координационной химии, химии кластеров, супрамолекулярной химии и химии металл-органических координационных полимеров, членом-корреспондентом Российской академии наук Владимиром Петровичем Фединым.

*Ключевые слова:* химия кластеров, супрамолекулярная химия, металл-органические координационные полимеры

DOI: 10.31857/S0132344X24090017, EDN: LXUZED



Путь в науку Владимира Петровича Федина начался с первого курса химфака Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), когда он пришел студентом в Лабораторию металлоорганических соединений кафедры органической химии МГУ, чтобы заниматься научной работой в свободное от учебы время. Темой его кандидатской диссертации, выполненной под научным руководством академика А.Н. Несмеянова, в группе Д.А. Леменовского в той же лаборатории, была химия металлоорганических соединений ниобия. В этой

работе В.П. Федину удалось доказать существование ниобоцена,  $(C_5H_5)_2Nb$ , неуловимого аналога ферроцена [1]. Для этого пришлось освоить технику работы с крайне неустойчивыми соединениями в высоком вакууме и при низких температурах. Ниобоцен оказался крайне реакционноспособным соединением, которое ведет себя то как свободный радикал, то как карбеноподобная частица, а при комнатной температуре димеризуется необычным образом. При этом возникает соединение со связью ниобий–ниобий (схема 1).

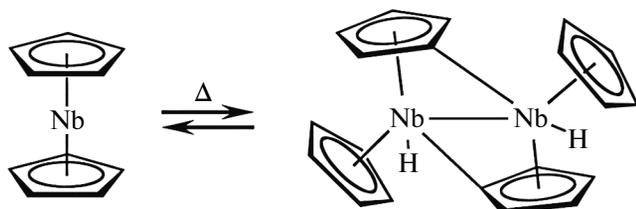


Схема 1

После защиты кандидатской диссертации в 1980 г. последовало короткое интермеццо — работа в аналитической лаборатории Института биохимии и физиологии микроорганизмов в г. Пушкино. Уже в конце 1981 г. по приглашению тогдашнего директора Института неорганической химии (ИНХ) СО РАН С.П. Губина В.П. Федин переезжает в Новосибирск в качестве м.н.с. Лаборатории химии кластерных соединений, которую тогда возглавлял С.П. Губин, а позднее — В.Е. Федоров. С этого времени вся научная жизнь В.П. Фебина тесно связана с Институтом неорганической химии.

Еще во время работы над кандидатской диссертацией, заинтересовавшись соединениями со связями металл–металл, в ИНХ СО РАН В.П. Федин активно включается в работы по новой тематике — химии кластерных соединений. Объектами его научного поиска становятся галогенидные, халькогенидные и халькогалогенидные кластеры ранних переходных металлов — ниобия, молибдена, вольфрама и рения. Первая запись в лабораторном журнале в ИНХ описывает неудачную попытку провести реакцию треугольного кластера  $Nb_3Vr_8$  с анилином. Дело в том, что эти кластерные объекты оказались, почти в прямом смысле, "крепкими орешками", из-за особенностей их кристаллических структур: они представляли собой очень прочные неорганические координационные полимеры, в которых кластерные ядра связаны между собой галогенидными или халькогенидными мостиками. Прорыв в этой области наступил во второй половине 1980-х гг., когда В.П. Фединым были разработаны оригинальные методы "вырезания" молекулярных кластерных комплексов из таких полимеров и их перевода в раствор. Для этого он использовал разные нетрадиционные подходы: реакции в расплаве лиганда, механохимические реакции между твердыми реагентами в вибрационной мельнице и даже радиолиз. А в растворе с помощью филигранных манипуляций, скорее напоминающих органическую,

чем традиционную неорганическую химию, были изучены особенности их реакционной способности. В эту область В.П. Федин привнес много оригинального и даже изящного, например, использование стабильных изотопов тяжелых элементов для отслеживания маршрутов химических превращений [2]. Уже в это время научные доклады молодого научного сотрудника занимают призовые места на институтских конкурсах, и в 1985 г. фотография м.н.с. В.П. Фебина помещается на Доску почета ИНХ.

Обобщением исследований в указанной области стала защита в 1994 г. докторской диссертации на тему "Синтез, строение и химические свойства тио- и селенокомплексов молибдена и вольфрама". Ученики В.П. Фебина — О.А. Герасько, Ю.В. Миронов, М.Н. Соколов — сделали свои первые шаги в науке и защитили кандидатские диссертации под его руководством, работая в этой сложной, но плодотворной и интересной области. После защиты докторской диссертации В.П. Федин продолжает работать в области кластерных соединений, в том числе в зарубежных лабораториях профессоров А. Мюллера (ФРГ, стипендия Фонда Гумбольдта), Дж. Сайкса (Великобритания), Т. Саито (Япония, стипендия Японского общества содействия науке). Показательно, что в непростые 1990-е гг. именно кластерная тематика, которую некоторые авторитетные (тогда) сотрудники ИНХ поначалу рассматривали как чужеродную и чуть ли не "еретическую", оказалась очень востребованной нашими зарубежными коллегами и даже "грантопривлекающей". Напротив, некоторые другие тематики ИНХ, к сожалению, не пережили это время, в том числе из-за пресловутого "человеческого фактора". А в том, что кластерная тематика до сих пор является одной из визитных карточек ИНХ, безусловно, есть большая заслуга В.П. Фебина. За цикл фундаментальных исследований "Химия кластерных комплексов молибдена, вольфрама и рения" научный коллектив сотрудников ИНХ в составе В.Е. Федорова, В.П. Фебина и Ю.В. Миронова в 2015 г. удостоился Премии РАН им. Л.А. Чугаева "за выдающиеся работы в области химии комплексных соединений".

Показательно, что В.П. Федин никогда не замыкался лишь на получении и изучении новых кластерных комплексов. Еще до того, как понятия "аддитивные" и "нанотехнологии" вошли в привычный обиход, он увлекся концепцией дизайна крупных химических структур, соче-

тая полиядерные кластеры и комплексы в качестве строительных блоков — практически как при строительстве зданий из готовых кирпичей. Удалось не только впервые "поженить" классические кластеры и полиядерные оксометаллатные комплексы [3], но и построить нанометровые аддукты, состоящие из нескольких кластерных и полиоксометаллатных субъединиц, содержащих более 50 атомов металлов (рис. 1) [4, 5].

Предельным развитием такой концепции является конструирование координационных полимеров — непрерывных кристаллических архитектур, построенных на основе кластерных строительных блоков. Так, соединяя халькоцианидные кластеры вольфрама через катионы переходных металлов в трех направлениях, удалось получить каркасные структуры с кубической топологией и чрезвычайно рыхлой упаковкой (рис. 2) [6,7]. Размер поло-

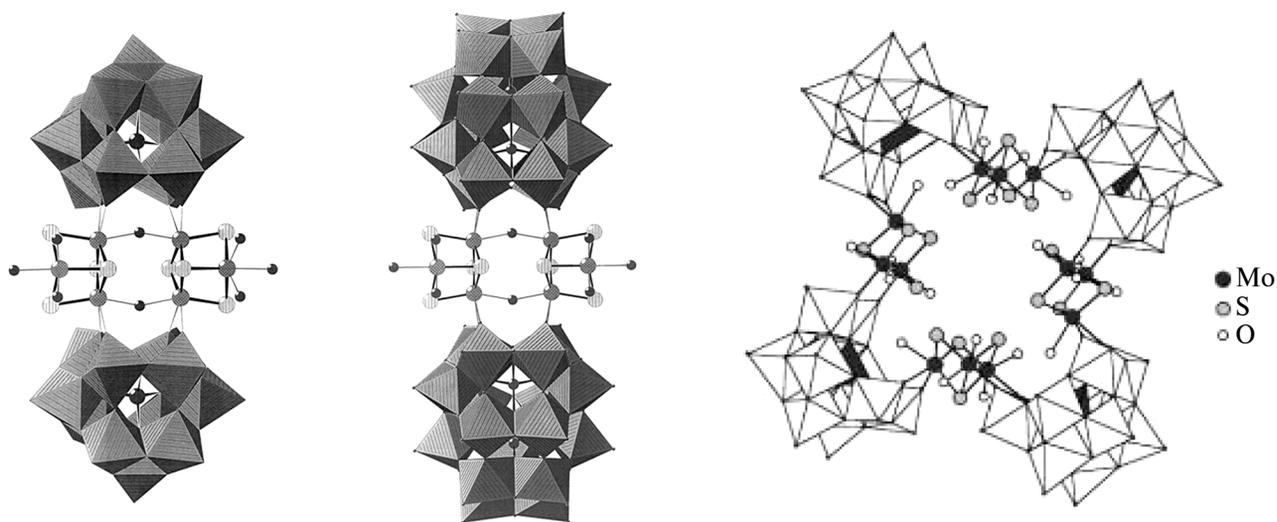


Рис. 1. Кристаллические структуры аддуктов  $\{[\text{SiW}_{11}\text{O}_{39}]_2[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_2]\}^{10-}$  (слева),  $\{[\text{P}_2\text{W}_{17}\text{O}_{61}]_2[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_2]\}^{14-}$  (в центре) и  $\{[\text{Mo}_3\text{S}_4(\text{H}_2\text{O})_5]_4[\text{SiW}_{10}\text{O}_{36}]_4\}^{16-}$  (справа).

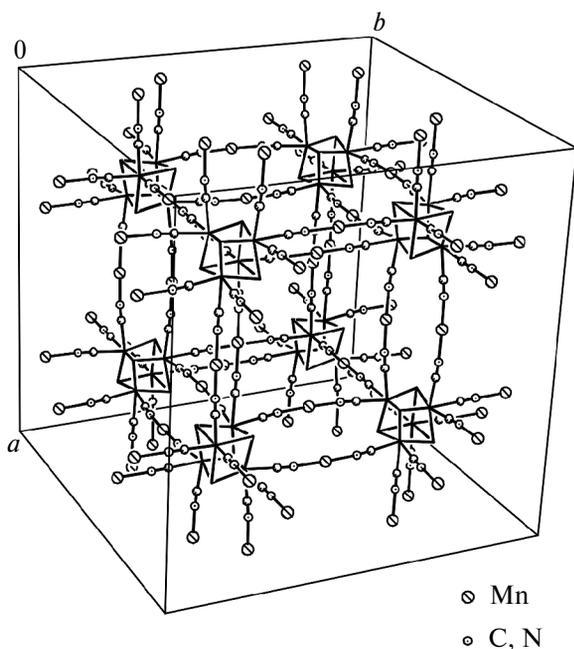


Рис. 2. Вид пористого координационного каркаса, построенного с помощью халькоцианидных кластеров  $[\text{W}_4\text{Q}_4(\text{CN})_{12}]^{6-}$  ( $\text{Q} = \text{S}, \text{Te}$ ; кластерные фрагменты показаны в виде кубов).

стей в таких структурах составляет  $\sim 1$  нм, а объемная доля пустот достигает 75% — больше, чем в любом микропористом цеолите!

Владимира Петровича всегда отличал широкий научный кругозор и стремление выйти за рамки одной, пусть даже и интересной, но довольно узкой сферы научной деятельности. Одной из областей, которая неизменно вызывала у него большой интерес, была супрамолекулярная химия, в частности, молекулы с большими внутренними полостями — кавитанды — и их способность включать в эти полости молекулы — "гости" и таким образом влиять на их реакционную способность. Так, в 1998 г. во время краткосрочного визита в лабораторию профессора А. Мюллера в г. Билефельд (ФРГ) В.П. Федин обратил внимание на удивительно красивую и симметричную молекулу — кукурбитурил (рис. 3). Это макроциклическая бочкообразная молекула-кавитанд с двумя порталами, геометрия и полярность которых хорошо соответствовали кластерным аквакомплексам. Сразу родилась оригинальная идея создания

молекулярных контейнеров путем закрытия одного или обоих порталов "бочки" подходящими по размеру "крышками". Уже первые примеры показали образование устойчивых супрамолеку-

лярных ассоциатов за счет образования системы комплиментарных водородных взаимодействий между порталами кукурбитурила и кластерными аквакомплексами (рис. 4) [8].

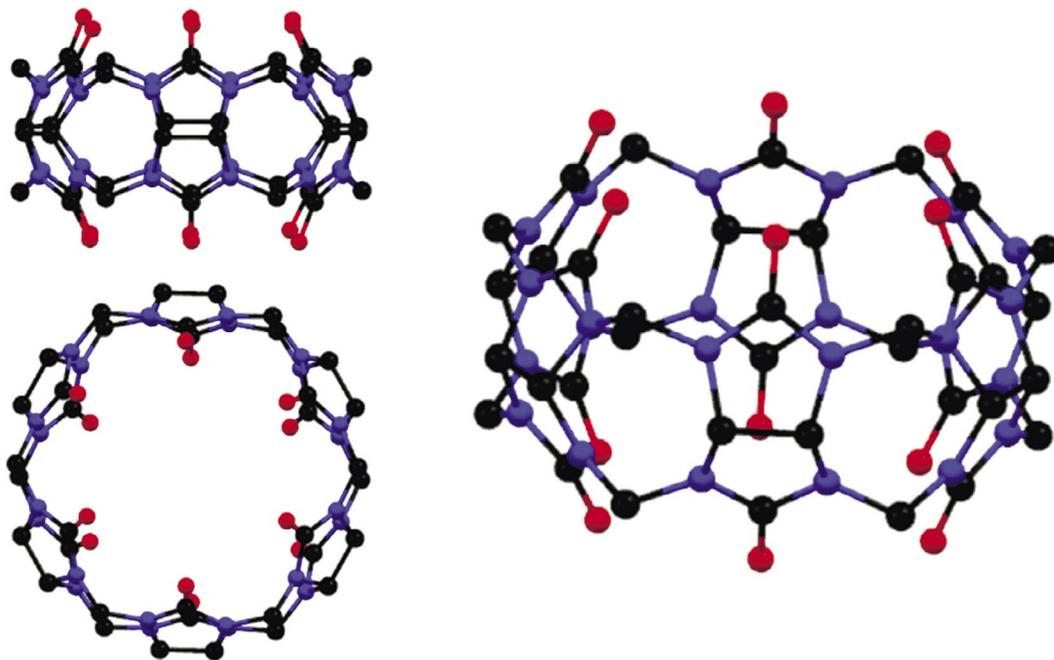


Рис. 3. Молекула кукурбитурила  $C_{36}O_{36}N_{24}O_{12}$ .

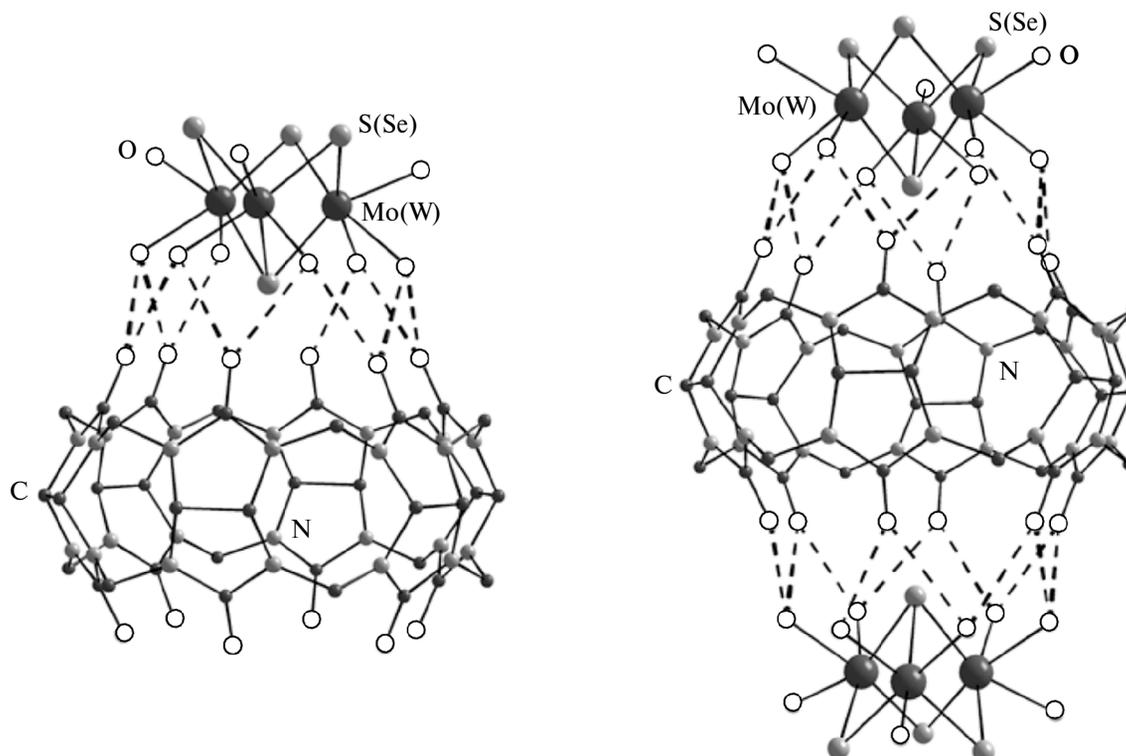


Рис. 4. Супрамолекулярные ассоциаты кукурбитурила с одним (слева) или двумя (справа) кластерными аквакомплексами  $[M_3Q_4(H_2O)_9]^{4+}$  ( $M = Mo, W; Q = S, Se$ ).

"Эlegantная" идея В.П. Фебина вылилась в большой цикл работ на стыке супрамолекулярной и кластерной химии и привела к защите нескольких кандидатских диссертаций следующим поколением его учеников: И.В. Калининой, Д.Н. Дыбцевым, Д.Г. Самсоненко, Е.В. Чубаровой, Т.В. Митькиной, Е.А. Коваленко, и двух докторских — М.Н. Соколовым и О.А. Герасько. Под это многообещающее направление в 2002 г. в ИНХ СО РАН была организована Лаборатория химии кластерных и супрамолекулярных соединений, которую и возглавил Владимир Петрович. Кукурбитурил оказался не только макроциклическим контейнером, но и уникальным лигандом для конструирования крупных супрамолекулярных агрегатов типа "многопалубных сэндвичей" [9], а также для выделения ранее неизвестных полиядерных аквакомплексов из водных растворов даже в малых концентрациях, подобно 32-ядерному комплексу галлия (рис. 5) [10].

Удивительным образом химия супрамолекулярных ассоциатов кукурбитурила с халькогенидными кластерами нашла пересечение с интеркалятами — соединениями включения на основе слоистых материалов. Дело в том, что в ходе работ были получены две кристаллические структуры, в одной из которых кластерные фрагменты образовали узкий зазор за счет специфических ван-дер-ваальсовых контактов между атомами халькогена. В другом соединении между этими контактами оказался атом ртути, что

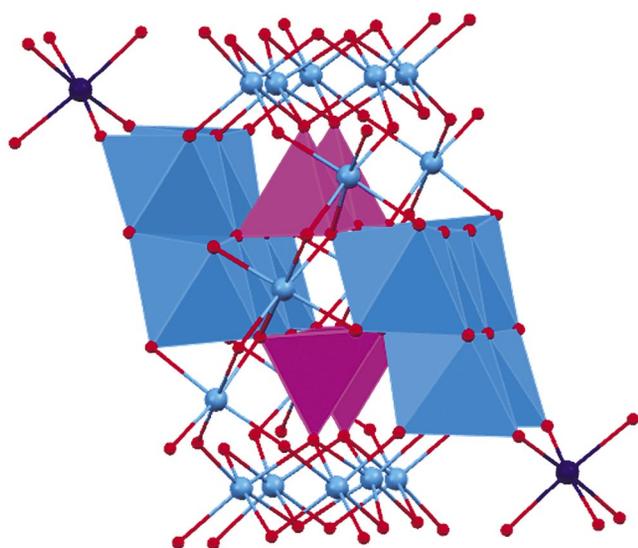
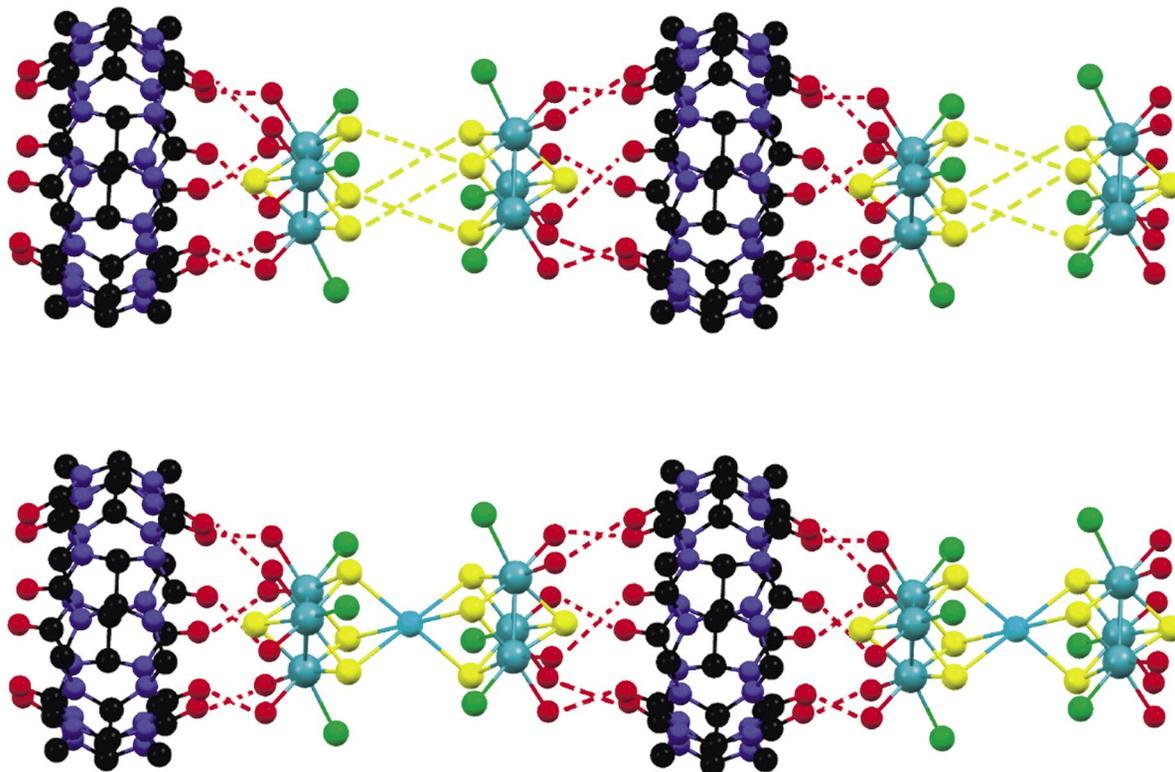


Рис. 5. 32-ядерный аквакомплекс Ga(III), выделенный благодаря образованию супрамолекулярного аддукта с кукурбитурилом.

сделало его структурным аналогом интеркалятов слоистых дихалькогенидов ранних переходных металлов (рис. 6) [11]. Высокой оценкой несомненных научных заслуг В.П. Фебина в химии кластерных комплексов и супрамолекулярных соединений стало его избрание членом-корреспондентом РАН в 2011 году.

На рубеже XX–XXI вв. В.П. Фебин одним из первых (если не первый!) в России заинтересовался металл-органическими координационными полимерами (МОКП), работы зарубежных коллег по синтезу которых стали появляться в ведущих научных журналах с конца 1990-х годов. На лабораторных литературных семинарах Владимир Петрович начал обращать внимание на работы групп О. Яги, С. Китагавы по синтезу МОКП, которые поражали воображение большими полостями и рекордными адсорбционными характеристиками [12, 13]. Одним из первых объектов, выбранных для изучения, был мезопористый терефталат хрома (III), из-за огромных внутренних полостей обладающий способностью включать наноразмерные объекты типа кластеров и полиоксометаллатов, обладающих каталитической активностью [14]. Одновременно с этим стали активно изучаться пористые металл-органические координационные полимеры, обладающие хиральностью (гомохиральные МОКП) (рис. 7) [15]. Это были пионерские работы, целью которых было создание хиральных сорбентов (хиральность появляется за счет использования легкодоступных и дешевых природных энантиоцистных веществ) для препаративного разделения смесей энантиомеров [16, 17]. Эти, а также другие исследования были обобщены в кандидатских диссертациях К.А. Коваленко, М.П. Юткина, С.А. Сапченко, а также в докторской диссертации Д.Н. Дыбцева.

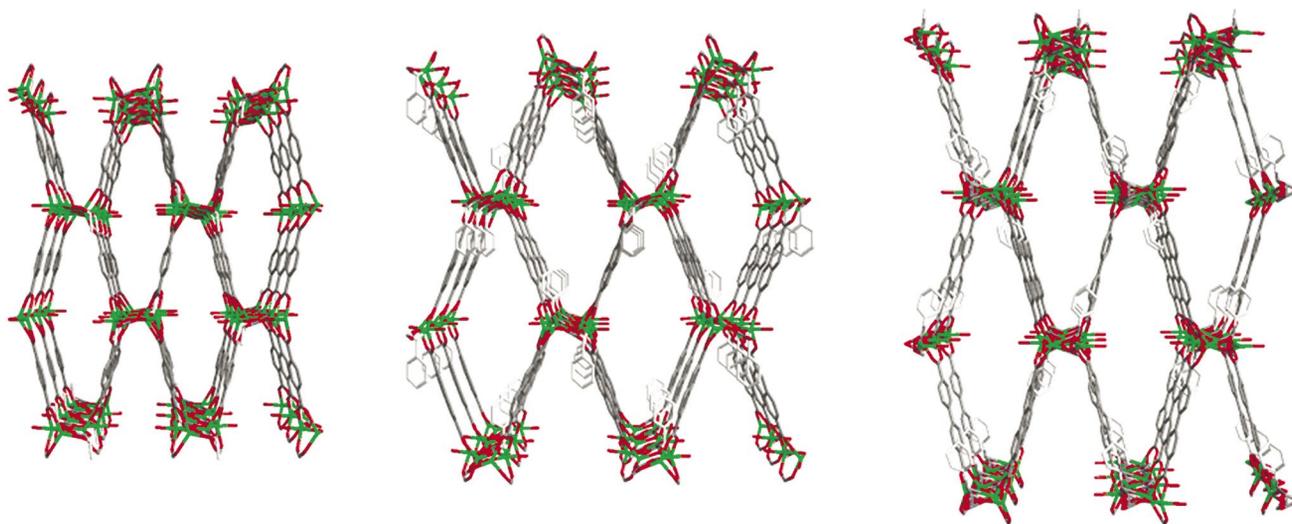
Признанием лидирующих позиций школы В.П. Фебина в области химии МОКП явилось создание в ИНХ СО РАН в 2014 г. тематической лаборатории в рамках престижной программы мегагрантов с участием приглашенного ученого — профессора Мартина Шредера из Великобритании, специалиста мирового уровня, стоявшего у истоков химии МОКП [18]. Профессор М. Шредер с большим энтузиазмом участвовал в работе лаборатории и сотрудничал с В.П. Фебиным в рамках мегагранта. Молодые аспиранты лаборатории С.Б. Алиев, А.А. Сапьяник, А.М. Чеплакова впоследствии образовали уже четвертую волну воспитанников В.П. Фебина, успешно защитивших кандидатские диссер-



**Рис. 6.** Образование аналогов слоистых дихалькогенидных материалов (сверху) и интеркалятов с атомом ртути (внизу) на основе супрамолекулярных цепочек кукурбитурила и халькогенидных кластерных комплексов.

тации под его руководством. В 2016 г. основная команда мегагранта вместе с частью Лаборатории химии кластерных и супрамолекулярных соединений была преобразована в новую структурную единицу ИНХ СО РАН — Лабораторию металл-органических координационных поли-

меров, которую В.П. Федин возглавляет и по сей день. В этой лаборатории им был сформирован мощный и успешный коллектив, включающий большое число молодых исследователей, которые активно работают в области МОКП и ведут исследования широким фронтом — как



**Рис. 7.** Гомохиральные пористые МОКП с модулируемым размером полостей и структурой хиральных центров.

в фундаментальном плане [19–22], так и нацеленные на практическое применение МОКП (рис. 8) [23–28].

Без сомнения, В.П. Федин является ведущим специалистом в этой области химии в России и одной из ключевых фигур на мировом уровне, о чем свидетельствует высочайший уровень научных журналов и цитируемость его публикаций. Международный авторитет В.П. Фебина подтверждается плодотворным сотрудничеством с учеными из КНР [29], а также недавней защитой китайским аспирантом Юй Сяолинем кандидатской диссертации под его руководством. При этом ни химия, ни жизнь не стоят на месте, и с учетом огромной эрудиции, обширных научных интересов и редкого умения ощущать "дух времени" в науке нельзя поручиться, что за химией МОКП в жизни юбиляра не последует какой-нибудь новый, не менее плодотворный этап в его многогранной научной деятельности.

Научную карьеру В.П. Фебина невозможно отделить от преподавательской деятельности и от подготовки кадров высшей квалификации. Из научной школы Владимира Петровича, счет которой идет на десятки, вышли доктора и кандидаты наук; некоторые из них сейчас сами возглавляют лаборатории и развивают свои оригинальные научные направления. Преподавательская деятельность В.П. Фебина тесно связана с Новосибирским государственным университетом (НГУ), где он на протяжении уже почти двух десятилетий читает лекции по неорганической химии. В качестве заведующего кафедрой неорганической химии НГУ он много делает для того, чтобы избежать застоя в наборе и со-

держании предлагаемых курсов и для того, чтобы студенты получали актуальную информацию в области неорганической химии и смежных научных областях. В.П. Федин был инициатором введения в учебный процесс НГУ координационной химии как самостоятельной дисциплины в качестве общего курса для всех студентов-химиков.

С 2005 по 2019 г. В.П. Федин являлся директором ИНХ им. А.В. Николаева СО РАН и успешно сочетал плодотворную научную деятельность с неослабными усилиями по развитию Института и по его превращению в один из ведущих центров химической науки в Российской Федерации. Для этого была проделана поистине титаническая работа по развитию кадрового потенциала путем привлечения и закрепления талантливой молодежи, развития международного сотрудничества, обновления и расширения приборной базы, повышения качества научных исследований, в том числе качества и количества научных публикаций. Будучи при необходимости жестким и требовательным администратором, В.П. Федин добился того, чтобы службы Института перестали быть "государством в государстве", а действительно помогали научным сотрудникам в решении финансовых, юридических и других вопросов. Отлаженный административный механизм позволил заведующим лабораториями сосредоточиться на решении научных проблем, сведя к минимуму бюрократическую нагрузку на научные подразделения. Вклад В.П. Фебина в развитие и организацию химической науки в России был отмечен присуждением ему в 2023 г. почетного звания "Заслуженный деятель науки Российской Федерации".

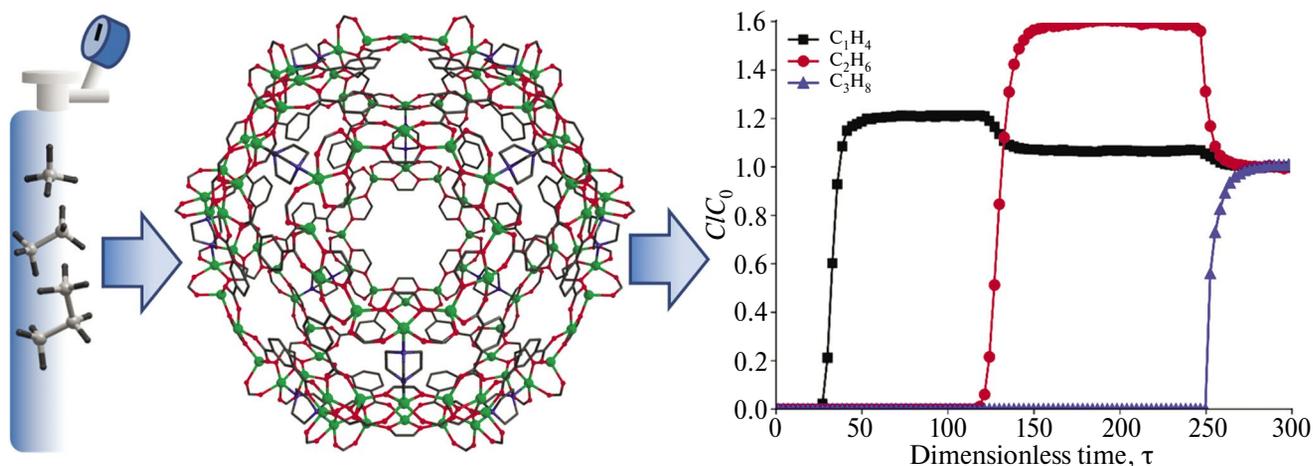


Рис. 8. Разделение компонентов природного газа (метан, этан, пропан) на мезопористом металл-органическом координационном полимере серии НИС-20.

В личном плане для нас В.П. Федин был и остается Учителем с большой буквы, оказавшим огромное влияние на наше становление как ученых. В связи с 70-летием желаем вам, дорогой Владимир Петрович, активного творческого долголетия на благо российской и мировой химической науки!

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lemenovskii D.A., Fedin V.P.* // *J. Organometal. Chem.* 1977. V. 132. P.11
2. *Müller A., Fedin V., Hegetschweiler K., Amrein W.* // *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1992. N. 24. P. 1795–1796.
3. *Sokolov N.M., Kalinina I.V., Peresyphkina E.V. et al.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008. V. 47. P. 1465–1468.
4. *Müller A., Fedin V.P., Kuhlmann C. et al.* // *Chem. Commun.* 1999. P. 1189–1190.
5. *Изарова Н.В., Соколов М.Н., Кадо Э. и др.* // *Изв. АН, Сер. Хим.* 2004. № 7. С. 1445–1448.
6. *Fedin V.P., Virovets A.V., Kalinina I.V. et al.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2000. P. 2341–2343.
7. *Федин В.П., Калинина И.В., Вировец А.В. и др.* // *Изв. АН, Сер. Хим.* 2001, № 9, С. 1451–1454.
8. *Соколов М.Н., Дыбцев Д.Н., Федин В.П.* // *Изв. АН, Сер. Хим.* 2003. № 5. С. 987–1004.
9. *Samsonenko D.G., Lipkowksi J., Gerasko O.A. et al.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2002. P. 2380–2388.
10. *Gerasko O.A., Mainicheva E.A., Naumov D.Yu. et al.* // *Inorg. Chem.* 2005. V. 44. P. 4133–4135.
11. *Sokolov M.N., Virovets A.V., Dybtsev D.N. et al.* // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2000. V. 39. P. 1659–1661.
12. *Eddaoudi M., Kim J., Rosi N. et al.* // *Science.* 2002. V. 295, P. 469–472.
13. *Noro S., Kitagawa S., Kondo M. et al.* // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2000. V. 39 P. 2081–2084.
14. *Férey G., Mellot-Draznieks C., Serre C. et al.* // *Science.* 2005. V. 309. P. 2040–2042.
15. *Юткин М.П., Дыбцев Д.Н., Федин В.П.* // *Успехи химии.* 2011. Т. 80. С. 1061–1086.
16. *Dybtsev D.N., Nuzhdin A.L., Chun H. et al.* // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2006. V. 45. P. 916–920.
17. *Nuzhdin A.L., Dybtsev D.N., Bryliakov K.P. et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2007. V. 129. P. 12958–12959.
18. *Blake A.J., Champness N.R., Hubberstey P. et al.* // *Coord. Chem. Rev.* 1999. V. 183. P. 117–138.
19. *Dybtsev D.N., Sapiyanik A.A., Fedin V.P.* // *Mendeleev Commun.* 2017. V. 27. P. 321–331.
20. *Sapiyanik A.A., Fedin V.P.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2020. V. 46. P. 443–457.
21. *Dybtsev D.N., Samsonenko D.G., Fedin V.P.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2016. V. 42. P. 557–573.
22. *Agafonov M.A., Alexandrov V.E., Artyukhova N.A. et al.* // *J. Struc. Chem.* 2022. V. 63. P. 671–843.
23. *Lysova A.A., Samsonenko D.G., Dorovatovskii P.V. et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2019. V. 141. P. 17260–17269.
24. *Lysova A.A., Samsonenko D.G., Kovalenko K.A. et al.* // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2020. V. 59. P. 20249–20710.
25. *Yu X., Ryadun A.A., Pavlov D.I. et al.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023. V. 62. P. 202306680.
26. *Yu X., Ryadun A.A., Potapov A.S., Fedin V.P. et al.* // *J. Hazard. Mater.* 2023. V. 452. P. 131289.
27. *Lysova A.A., Kovalenko K.A., Nizovtsev A.S. et al.* // *Chem. Eng. J.* 2023. V. 453. P. 139642.
28. *Yu X., Ryadun A.A., Pavlov D.I. et al.* // *Adv. Mater.* 2024. V. 36. P. 2311939.
29. *Gao E., Wu S., Wang J. et al.* // *Adv. Opt. Mater.* 2020. V. 8. P. 1901659.

## Development of the Cluster Chemistry, Supramolecular Chemistry and Chemistry of Metal-Organic Frameworks by Professor Vladimir P. Fedin and His School

M. N. Sokolov<sup>a,\*</sup> and D. N. Dybtsev<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup> *Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

\**e-mail: caesar@niic.nsc.ru*

\*\**e-mail: dan@niic.nsc.ru*

The article briefly summarizes the main scientific directions contributed to and developed by the outstanding scientist—a leader in the field of coordination chemistry, cluster chemistry, supramolecular chemistry and chemistry of metal-organic coordination polymers, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Vladimir Petrovich Fedin.

*Keywords:* cluster chemistry, supramolecular chemistry, metal-organic coordination polymers

## REFERENCES

1. *Lemenovskii D.A., Fedin V.P.* // J. Organometal. Chem. 1977. V. 132. P. 11.
2. *Müller A., Fedin V., Hegetschweiler K., Amrein W.* // J. Chem. Soc. Chem. Commun. 1992. № 24. P. 1795.
3. *Sokolov N.M., Kalinina I.V., Peresyphkina E.V. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2008. V. 47. P. 1465.
4. *Müller A., Fedin V.P., Kuhlmann C. et al.* // Chem. Commun. 1999. P. 1189.
5. *Izarova N.V., Sokolov M.N., Kado E. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2004. V. 53. № 7. P. 1503.
6. *Fedin V.P., Virovets A.V., Kalinina I.V. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2000. P. 2341.
7. *Fedin V.P., Kalinina I.V., Virovets A.V. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2001. V. 50. № 9. P. 1525.
8. *Sokolov M.N., Dybtsev D.N., Fedin V.P.* // Russ. Chem. Bull. 2003. V. 52. № 5. P. 1041.
9. *Samsonenko D.G., Lipkowksi J., Gerasko O.A. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2002. P. 2380.
10. *Gerasko O.A., Mainicheva E.A., Naumov D.Yu. et al.* // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 4133.
11. *Sokolov M.N., Virovets A.V., Dybtsev D.N. et al.* // Angew. Chem., Int. Ed. 2000. V. 39. P. 1659.
12. *Eddaoudi M., Kim J., Rosi N. et al.* // Science. 2002. V. 295, P. 469.
13. *Noro S., Kitagawa S., Kondo M. et al.* // Angew. Chem., Int. Ed. 2000. V. 39 P. 2081.
14. *Férey G., Mellot-Draznieks C., Serre C. et al.* // Science. 2005. V. 309. P. 2040.
15. *Yutkin, M.P., Dybtsev, D.N., and Fedin, V.P.* // Usp. Khim. 2011. V. 80. P. 1061.
16. *Dybtsev D.N., Nuzhdin A.L., Chun H. et al.* // Angew. Chem., Int. Ed. 2006. V. 45. P. 916.
17. *Nuzhdin A.L., Dybtsev D.N., Bryliakov K.P. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2007. V. 129. P. 12958.
18. *Blake A.J., Champness N.R., Hubberstey P. et al.* // Coord. Chem. Rev. 1999. V. 183. P. 117.
19. *Dybtsev D.N., Sapiyanik A.A., Fedin V.P.* // Mendeleev Commun. 2017. V. 27. P. 321.
20. *Sapiyanik A.A., Fedin V.P.* // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. P. 443.
21. *Dybtsev D.N., Samsonenko D.G., Fedin V.P.* // Russ. J. Coord. Chem. 2016. V. 42. P. 557.
22. *Agafonov M.A., Alexandrov V.E., Artyukhova N.A. et al.* // J. Struc. Chem. 2022. V. 63. P. 671.
23. *Lysova A.A., Samsonenko D.G., Dorovatovskii P.V. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. P. 17260.
24. *Lysova A.A., Samsonenko D.G., Kovalenko K.A. et al.* // Angew. Chem., Int. Ed. 2020. V. 59. P. 20249.
25. *Yu X., Ryadun A.A., Pavlov D.I. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2023. V. 62. P. 202306680.
26. *Yu X., Ryadun A.A., Potapov A.S., Fedin V.P. et al.* // J. Hazard. Mater. 2023. V. 452. P. 131289.
27. *Lysova A.A., Kovalenko K.A., Nizovtsev A.S. et al.* // Chem. Eng. J. 2023. V. 453. P. 139642.
28. *Yu X., Ryadun A.A., Pavlov D.I. et al.* // Adv. Mater. 2024. V. 36. P. 2311939.
29. *Gao E., Wu S., Wang J. et al.* // Adv. Opt. Mater. 2020. V. 8. P. 1901659.