

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

кандидатского экзамена по специальности

02.00.08 «Химия элементоорганических соединений»

по химическим и техническим наукам

Введение

Настоящая программа представляет собой адаптацию типовой программы ВАКа коллективом учёных в составе дхн В.Н. Калинина, дхн А.С. Перегудова, кф-мн И.В. Станкевича, дхн К.А. Лысенко, дхн Н.А. Устынюка и дхн В.Б. Шура к проблематике ИНЭОС РАН (2005г., 2016г.) и является программой-минимум для сдачи кандидатского экзамена по специальности «Химия элементоорганических соединений» (02.00.08) аспирантами и экстернами Института.

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: теоретические представления о природе химических связей и электронном строении элементоорганических соединений (ЭОС), физические методы исследования структуры и электронного строения ЭОС, органические производные непереходных элементов, органические производные переходных металлов.

1. Теоретические представления о природе химической связи и электронном строении элементоорганических соединений (ЭОС)

Классификация элементоорганических соединений (ЭОС). Основные этапы развития химии ЭОС. Ее влияние на теорию химического строения молекулярных систем.

Основные положения квантовой химии. Уравнение Шредингера для атомно-молекулярной системы как основа для теоретического исследования ее структуры и электронного строения. Электронное строение атомов и их ионов. Атомные орбитали и их классификация.

Теоретические методы моделирования структуры и электронного строения молекул. Адиабатическое приближение. Понятие о поверхности потенциальной энергии молекулы. Метод молекулярных орбиталей (МО) как основа современной квантовой химии. Основные принципы построения неэмпирических и полумэмпирических квантово-химических методов. Использование методов квантовой химии для расчетов наблюдаемых свойств молекул. Анализ электронного строения молекул в терминах эффективных зарядов на атомах и заселенностей (порядков) связей.

Сопряженные молекулы как лиганды в ЭОС. Электронное строение сопряженных молекул в π -электронном приближении. Метод Хюккеля. Схемы π -электронных уровней энергии и π -МО аллила, бутадиена, аниона циклопентадиенила, бензола, циклооктатетраена.

Концепция ароматичности в химии ЭОС. Примеры металлорганических ароматических систем.

Природа химических связей в ЭОС. Гибридные орбитали и принципы их использования в качественной теории химического строения. Классификация типов химических связей в ЭОС. Природа связи в олефиновых, ацетиленовых, циклопентадиенильных и ареновых комплексах переходных металлов. Кратные связи элемент-углерод и элемент-элемент. Многоцентровые связи.

Симметрия молекул и ее использование в теории химического строения ЭОС.

Молекулярные орбитали в олефиновых, аллильных, циклопентадиенильных и ареновых комплексах. Химические связи в электронодефицитных молекулах (на примерах простейших и полиэдрических гидридов бора и карборанов).

Качественные способы оценки стабильности ЭОС. Правило эффективного атомного номера. Принцип изолобальной аналогии и его приложения.

Теоретические основы стереохимии ЭОС. Понятие о конформациях и конфигурациях. Координационные полиэдры, характерные для координационных чисел 4, 5, 6. Хиральность полиэдров с моно- и бидентатными лигандами. Планарная хиральность и оптическая активность металлокомплексов с π -олефиновыми, π -циклопентадиенильными, π -ареновыми лигандами.

2. Реакционная способность элементоорганических соединений

Основные типы реагентов (электрофилы, нуклеофилы, радикалы, карбены). Типы реакций. Реакции по связи металл-лиганд (реакции замещения, присоединения, элиминирования, фрагментации, внедрения, окислительного присоединения, восстановительного элиминирования). Превращения лигандов в координационной сфере металлов (структурно нежесткие соединения, внутримолекулярные перегруппировки и молекулярная динамика ЭОС, таутомерия, металлотропия, внутренние вращения вокруг связи металл-лиганд). Окислительно-восстановительные превращения металлоорганических соединений.

Различия в строении и свойствах ЭОС в газовой, жидкой и твердой фазах. Роль полярности среды и специфической сольватации. Ионы и ионные пары, их реакционная способность.

Равновесная СН-кислотность, шкалы СН-кислотности, шкала МСЭД, влияние строения СН-кислот на равновесную СН-кислотность, кинетическая кислотность СН-кислот.

3. Физические методы исследования структуры и электронного строения ЭОС

ЯМР-спектроскопии (импульсная ЯМР-фурье спектроскопия, динамический ЯМР) в исследовании строения и реакционной способности ЭОС. Физические и теоретические основы метода. Понятие об основных ЯМР-параметрах: химическом сдвиге, константах спин-спинового взаимодействия, временах релаксации. Области применения в химии ЭОС: изучение строения и динамики молекул, определение примесей.

Масс-спектрометрия. Физические и теоретические основы метода. Области применения в химии ЭОС: установление состава и строения молекул, качественный и количественный анализ смесей (хромато-масс-спектрометрия), определение микропримесей, изотопный анализ, измерение термодинамических параметров (энергии ионизации молекул, энергии появления ионов, энергии диссоциации связей), изучение ионно-молекулярных реакций, газофазная кислотность и основность молекул.

Метод рентгеноструктурного анализа (РСА). Физические и теоретические основы метода. Области применения в химии ЭОС: установление строения молекул и кристаллов, исследование природы химических связей.

Фото- (ФЭС) и рентгенофотоэлектронная (РФЭС) спектроскопии. Физические и теоретические основы метода. Магнитная восприимчивость. Применение в химии ЭОС: изучение электронного строения молекул, измерение энергий ионизации.

Оптическая спектроскопия (ИК, УФ, КР). Физические и теоретические основы методов. Применение в химии ЭОС: установление строения молекул, изучение динамики молекул, измерение концентрации. Применение симметрии при интерпретации экспериментальных спектров.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Физические и теоретические основы методов. Применение в химии ЭОС: установление строения радикалов, изучение динамики молекул и механизмов радикальных реакций.

4. Органические производные непереходных элементов

Органические производные щелочных металлов (I группа).

Литийорганические соединения, их свойства, строение, методы получения и применение в органическом синтезе. Функциональные производные литийорганических соединений.

Органические соединения натрия и калия.¹

Реакции металлирования. Ароматические анион-радикалы: образование, строение, свойства.

Органические производные элементов II группы.

Магнийорганические соединения: получение, строение, свойства. Роль растворителя в синтезе магнийорганических соединений. Реакционная способность магнийорганических соединений и их применение в органическом и металлорганическом синтезе. Функциональные производные магнийорганических соединений.

Органические производные элементов подгруппы цинка.

Цинк- и кадмийорганические соединения: получение, строение, свойства. Реакция Реформатского.

Органические соединения ртути: получение, строение, свойства. Меркурирование ароматических соединений. Реакция Несмеянова в синтезе органических соединений непереходных металлов.

Симметризация и диспропорционирование ртутьорганических соединений. Ртутьорганические соединения в синтезе органических производных других металлов и органическом синтезе.

Органические соединения элементов III группы.

Борорганические соединения. Основные типы соединений, синтез, свойства, реакции. Аллилбораны. Гидроборирование ненасыщенных соединений, региоселективность реакции. Применение борорганических соединений в органическом синтезе.

¹ Всё выделенное курсивом предлагается изучать в случае включения данной темы в дополнительную программу в соответствии с проблематикой диссертационного исследования.

Карбораны, металлокарбораны, металакарбораны. Получение, свойства. Основные типы карборанов. Икосаэдрические карбораны, основные реакции.

Алюминийорганические соединения. Основные типы соединений, синтез, свойства, реакции. Катализаторы Циглера-Натта. Применение алюминийорганических соединений в промышленности и органическом синтезе.

Органические соединения галлия, индия и таллия.

Галлий-, индий- и таллийорганические соединения: получение, строение, свойства.

Применение таллийорганических соединений в органическом синтезе.

Получение полупроводниковых материалов методом газофазного разложения галлий- и индийорганических соединений.

Сравнительная реакционная способность органических производных галлия, индия и таллия.

Органические соединения элементов подгруппы кремния.

Кремнийорганические соединения: получение, строение, свойства.

Гидросилилирование ненасыщенных производных. Полиорганосилоксаны. Силиловые эфиры. Кремнийорганические соединения в органическом синтезе и промышленности.

Германий-, олово- и свинецорганические соединения. Основные типы соединений, получение, строение, свойства и реакции. Представление о гипервалентных соединениях.

Практическое использование органических производных элементов подгруппы кремния.

Металлкатализируемое присоединение соединений со связью Si-Si; Si-Sn; Si-B по кратным связям.

Соединения элементов подгруппы кремния с кратными связями элемент-элемент: синтез, строение, свойства. Проблема двосвязанности в химии ЭОС непереходных элементов.

Органические производные элементов V группы.

Органические производные фосфора и мышьяка, основные типы соединений высшей и низшей степеней окисления, методы синтеза, строение, свойства. Соединения P(III) в качестве моно- и полидентатных лигандов в комплексах переходных металлов и катализе. Бидентатные P,P-; P,N-лиганды. Гетероциклические соединения фосфора. Реакция Виттига. Применение органических производных элементов V группы в промышленности, сельском хозяйстве, медицине.

Сурьма- и висмуторганические соединения.

5. Органические производные переходных металлов

Классификация металлоорганических соединений переходных металлов по типу лигандов, координированных с металлом.

([11], том 1, глава 2)

Гидридные комплексы переходных металлов.

Основные типы гидридных комплексов переходных металлов: моно-, би- и полиядерные. Соединения с терминальным и мостиковым атомами водорода. Характер связи металл-водород, ее полярность, возможность диссоциации. Реакции внедрения алкенов и алкинов по связи металл-водород. Роль гидридных комплексов в металлорганическом синтезе и катализе. Соединения с молекулярным водородом: синтез, строение, свойства.

([11]: том 1, глава 3, стр.86-98; [12]: chapter 3.3)

Соединения с σ -связью металл-углерод

Основные типы σ -органических производных переходных металлов: синтез, строение, свойства. Факторы, влияющие на их устойчивость. Роль стабилизирующих n - и π -лигандов. *σ -Ацетиленидные производные переходных металлов.*

Реакции σ -производных переходных металлов: расщепление σ -связи М-С, внедрение ненасыщенных молекул, восстановительное элиминирование, σ, π -перегруппировки.

([7]; [10]: chapter 13, p.p.193-205; [11]: том 1, глава 3, стр. 98-113; [12]: chapters 3.1-3.3)

Пинцерные комплексы. Применение в катализе.

([34], [35])

Реакции циклометаллирования комплексами переходных металлов. Металлациклы ([36])

Карбонильные комплексы переходных металлов.

Основные типы карбониллов металлов. Методы синтеза, строение и реакции. Карбонилат анионы, карбонил галогениды, карбонилгидриды. Природа связи металл-карбонил.

Металлкарбонильные кластеры переходных металлов. Основные типы, получение. Превращения углеводородов на кластерных карбонилах металлов.

Практическое применение карбониллов металлов.

Стереохимическая нежесткость: миграция карбонильных, гидридных, углеводородных лигандов и политопальные перегруппировки металлического остова.

([10]: chapter 14, p.p.220-238; [11]: том 1, глава 3, раздел 6, стр. 113-122; [12]: chapter 4)

Карбеновые и карбиновые комплексы переходных металлов.

Карбеновые комплексы переходных металлов. Электронное строение. Карбеновые комплексы Фишера. Карбеновые комплексы Шрока. Методы синтеза карбеновых комплексов (по Фишеру, по Лэпперту, из диазоалканов и σ -комплексов переходных металлов).

Реакции карбеновых комплексов Фишера (нуклеофильное присоединение к С(α), депротонирование связей С(β)-Н). Использование в тонком органическом синтезе. Реакция Дётца.

Роль карбеновых комплексов в катализе (метатезис олефинов и циклических алкенов).

([10]: глава 14; [11]: том 1, глава 3, раздел 6, стр. 122-137; том 2, раздел 11.7; [12]: chapters 11.1, 11.3, 11.4; [37]; [38]).

Карбиновые комплексы переходных металлов. Электронное строение. Карбиновые комплексы Фишера. Карбиновые комплексы Шрока. Синтез карбиновых комплексов действием кислот Льюиса на карбеновые комплексы Фишера. Реакции карбиновых комплексов с нуклеофильными реагентами. Роль карбиновых комплексов в катализе: метатезис и полимеризация алкинов.

([10]: chapter 14, стр. 318-324; [11]: том 1, глава 3, раздел 6, стр. 137-146; [12]: chapters 11.2, 11.3; [31])

π -Комплексы переходных металлов

Общая характеристика строения и устойчивости. Различные типы связей металл-лиганд. Структурно нежесткие соединения. Внутренняя динамика молекул.

([6]: v. 3, chapter 19, p.p. 1-88; chapter 20, p.p. 89-172)

π -Комплексы металлов с олефинами и диенами

Типы комплексов с линейными и циклическими моно- и полиолефинами. Методы получения, строение, свойства. Природа связи олефина с металлом. Реакции π -координированных лигандов. Циклобутадиенжелезотрикарбонил. Роль олефиновых комплексов в катализе.

([7]; [1] том «Типы соединений», книга «Переходные металлы» гл. 1, стр. 7-126 – С.П. Губин « π -Комплексы переходных металлов с четырехэлектронными диеновыми лигандами»; том «Типы соединений», книга 1, гл. 46, стр. 217-383 – М.И. Рыбинская « π - Комплексы моноолефинов»; [10]: глава 15.1; [11]: том 1, глава 3, раздел 7а, стр. 149-156; [12]: chapters 5.1, 5.3; [30]).

π -Ацетиленовые комплексы

Типы ацетиленовых комплексов. Методы получения, строение, свойства. Моно- и биметаллические комплексы. Ацетилен-винилиденовая перегруппировка в координационной сфере металлов как метод синтеза винилиденовых комплексов. Ацетиленовые комплексы в катализе.

([10]: глава 15.2, p.p. 388-400; [11]: том 1, глава 3, раздел 7б, стр. 156-158; [12]: chapters 5.1; [40]; [41]: a; b).

Аллильные комплексы

Типы аллильных комплексов. Методы синтеза, строение, реакции. Роль в катализе.

([2]: vol. 1, chapter 8 – P. Powell “Synthesis of η^3 -allyl complexes; [10]: глава 15.3, стр. 400-409; [11]: том 1, глава 3, раздел 7д, стр. 175-181; [12]: chapter 5.2)

Циклопентаденильные комплексы

Типы комплексов. Строение.

Металлоцены: ферроцен, никелоцен, кобальтоцен. Синтез. Реакционная способность (замещение в лиганде, реакции с разрывом связи металл-кольцо, редокс-реакции). Ферроценилкарбениевые и родственные катионы.

Циклопентадиенильные производные титана и циркония. Типы комплексов. Синтез, применение в катализе процессов полимеризации.

Циклопентадиенилкарбонильные комплексы. Синтез. Химия циклопентадиенилмарганецтрикарбонила (цимантрена).

Циклопентадиенилкарбонильные комплексы железа, кобальта, молибдена.

([2]: vol. 1, chapter 10 p.p. 443-462; [10]: глава 15.4. стр. 443-486; [11]: том 1, глава 3, раздел 7г, стр. 165-175; [12]: chapter 5.4)

Ареновые комплексы

Типы ареновых комплексов.

Бис-ареновые комплексы хрома. Методы получения и реакции.

([1]: Том «Типы соединений», книга «Переходные металлы», гл. 2, стр. 127-228 –Н.А. Волькенау «π-Комплексы переходных металлов с аренами»; [42]).

Аренхромтрикарбонильные комплексы. Методы получения и реакции. Применение в органическом синтезе.

([1]: Том «Типы соединений», книга «Переходные металлы», гл. 2, стр. 127-228 –Н.А. Волькенау «π-Комплексы переходных металлов с аренами»; [26]).

Катионные ареновые комплексы железа и марганца. Синтез и реакции. Реакция Несмеянова-Волькенау-Болесовой.

Том «Типы соединений», книга «Переходные металлы», гл. 2, стр. 127-228 –Н.А. Волькенау «π- Комплексы переходных металлов с аренами»; [2]: vol. 1, part 11 – G. Marr, B.W. Rockett)

Би- и полиядерные соединения переходных металлов.

Линейные би- и полиядерные соединения переходных металлов: синтез, строение, свойства. Природа связи металл-лиганд.

Соединения с кратными связями металл-металл ([43]).

Кластерные (каркасные) соединения переходных металлов. Треугольные карбонильные кластеры подгруппы железа. Важнейшие структурные типы кластеров. Электронное строение. Свойства и динамика молекул.

([12]: chapter 13; [44], [45]).

Каталитические процессы с участием металлоорганических соединений переходных металлов

Олигомеризация олефинов и ацетиленов. Никелевые комплексы в катализе олигомеризации этилена. Циклоолигомеризация (системы, содержащие никель (0)) и линейная олигомеризация бутадиена (системы, содержащие палладий (0)). Циклическая тримеризация и тетрамеризация ацетиленов (синтез производных бензола и циклооктатетраена).

([2]: v. 3, chapters 4, 5; [6]: Vol. 8, pp. 372-463 and pp. 671-711; [11]: том 2, глава 11, раздел 11.9-11.11; [12]: chapter 5.4; [41d]).

Полимеризация олефинов: катализаторы Циглера-Натта, полиэтилен, полипропилен. Стереоспецифическая полимеризация бутадиена.

([11]: том 2, глава 11, разделы 11.1 - 11.6, 11.10; [32]: vol.1, chapter 2.3).

Изомеризация олефинов: миграция двойной связи с участием металлалкильных и металлаллильных интермедиатов.

([12]: chapter 9.1).

Гомогенное гидрирование: механизмы активации водорода; комплексы с молекулярным водородом; родиевые, кобальтовые и рутениевые катализаторы. Селективное гидрирование. Асимметрическое гидрирование.

([11]: том 2, разделы 10.1 – 10.9; [12]: chapter 9.2).

Каталитические превращения моноуглеродных молекул; оксо-синтез: кобальтовые и родиевые катализаторы. Синтез Фишера-Тропша. Конверсия водяного газа. Карбонилирование и гидрокарбонилирование.

([11]: том 2, глава 12; [32]: v.1 chapters 2.1; v.2 chapters 3.1.8).

Карбонилирование органических галогенидов и спиртов. Получение кислот, сложных эфиров, амидов. Двойное карбонилирование.

Окисление олефинов: эпоксирирование, катализируемое переходными металлами. Получение ацетальдегида и винилацетата из этилена.

([12]: chapter 8.2; [32]: v. 1 part 2, chapters 2.4.1- 2.4.3).

Реакции кросс-сочетания (Кумада-Коррю, Негиши, Стиле, Сузуки-Мияура, Соногашира, Хек-Мизароки). Процессы β -элиминирования в каталитических реакциях [33].

Аллильное алкилирование СН-, NH- и OH- органических соединений в условиях металлокомплексного катализа. Моно-, ди- и полидентатные лиганды. Хиральные лиганды и асимметрический синтез [33].

Основные представления биометаллорганической химии [46, 47, 48]

Понятие о металлоферментах: хлорофилл, цитохромы, ферредоксины, витамин B₁₂, строение и биологические функции. Применение металлорганических соединений в медицине.

Органические соединения f-элементов

Представления об органических соединениях f-элементов. Важнейшие структурные типы, методы синтеза, природа связи, динамика молекул.

Основная литература

1. Методы элементоорганической химии / Под ред. А.Н. Несмеянова и К.А. Кочешкова. М.: Наука, 1973.
2. The chemistry of the metal-carbon bond (ed. F.R.Hartley, S.Patai, John Wiley & Sons, 1982-1987) volumes 1-4. (Имеется в библиотеке ИНЭОС)
3. Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Основы неорганической химии. Гл. 28-31. М.: Мир, 1979.
4. Гамбарян Н.П., Станкевич И.В. Развитие концепции химической связи от водорода до кластерных соединений // Успехи химии, **1989**, Т.58.
5. Соколов В.И. Теоретические основы стереохимии. М.: Наука, 1979.
6. Comprehensive organometallic chemistry. The synthesis, reactions and structures of organometallic compounds. Eds. G. Wilkinson, F.G.A. Stone, E.W. Abel, v. 1-9, Pergamon Press, 1982.
7. Грин М. Металлоорганические соединения переходных металлов. М.: Мир, 1972.
8. Губин С.П., Шульпин Г.Б. Химия комплексов со связями металл-углерод. Новосибирск: Наука, 1984.
9. Общая органическая химия. Под ред. Н.К. Кочеткова. М., «Химия». Т. 4,5. 1983; Т. 6,7. 1984.
10. К.Эльшенбройх. Металлоорганическая химия. Москва, БИНОМ, 2011.
11. Дж.Колмен, Л.Хигедас. Дж.Нортон, Р.Финке, Металлоорганическая химия переходных металлов. М.: Мир, Т. 1, 2. 1989. (Имеется в библиотеке ИНЭОС)
12. R.H.Crabtree, The Organometallic Chemistry of the Transition Metals. John Wiley & Sons, 1988 (Имеется в библиотеке ИНЭОС)
13. Органикум, Т. 1, 2. М.: Мир, 1992.

Дополнительная литература к разделу 1

14. Хьюи Ж. Неорганическая химия. Строение вещества и реакционная способность. М.: Химия, 1987.
15. Минкин В.И., Симкин Б.Я., Миняев Р.М. Теория строения молекул. М.: Высш. шк., 1979.

Дополнительная литература к разделу 2

16. Белецкая И.П., Реутов О.А, Соколов В.И. Механизмы реакций металлоорганических соединений. М.: Химия, 1972.
17. Реутов О.А., Белецкая И.П., Бутин К.П. СН-кислотность. М.: Наука, 1980.

Дополнительная литература к разделу 3

18. Драго Р. Физические методы в химии. Т.1,2. М.: Мир, 1981.
19. Драго Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1984.
20. Некрасов Ю.С. Методологические аспекты масс-спектрометрического анализа органических веществ // ЖАХ, 1991. Т.46, N 9.
21. Шашков А. Спектроскопия ЯМР // Органическая химия. Гл. 5. М.: Химия, 2000.

Дополнительная литература к разделу 4

22. Б. М. Михайлов. Химия борородов. М.: Наука, 1967.
23. Пурдела Д., Вылчану Р. Химия органических соединений фосфора. М.: Химия, 1972.
24. Граймс Р.Н. Карбораны. М.: Мир, 1974.

Дополнительная литература к разделу 5

25. Хенрици-Оливэ Г., Оливэ С. Координация и катализ. М.: Мир, 1980.
26. Калинин В.Н. Аренхромтрикарбонилы в органическом синтезе. Успехи химии. 1987. Т. 56 №7, стр. 1190.

27. Шульпин Г.Б. Органические реакции, катализируемые комплексами металлов. М.: Наука, 1988.
28. Коридзе А.А. Ацетиленовые производные кластерных карбониллов переходных металлов // Изв. РАН. Сер. хим. 2000. №7.
29. Хенрици-Оливэ Г., Оливэ С. Химия каталитического гидрирования СО. М.: Мир, 1987.
30. Э.Фишер, Г.Вернер, π-Комплексы Металлов. Москва, Мир, 1968
31. H.Fischer et al., Carbyne Complexes, VCH, 1988. (Написана к 70-летию Э.О.Фишера его учениками, имеется в библиотеке ИНЭОС)
32. Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Compounds. A comprehensive Handbook in Two Volumes. Ed. B.Cornils, W.A.Herrmann, VCH, 1996
33. J.Tsujii, Transition Metal Reagents and Catalysts, John Wiley & Sons, 2001. (Имеется в библиотеке ИНЭОС)
34. I. D.Morales-Morales, C.M. Jensen, «The Chemistry of Pincer Compounds», Elsevier, 2007
35. C. Gunanathan, D.Milstein, Chem.Rev., 2014, 114, 12024
36. I. Omae “Intramolecular five-membered ring compounds and their applications” Coord. Chem. Rev., 2004, **248**, 995.
37. S.J. Connon, S. Blechert, Angew. Chem. Intern. Ed., 2003, **42**, 1900.
38. R.R. Schrock, A.H. Hoveyda, Angew. Chem. Intern. Ed., 2003, **42**, 4592.
39. D. Seyferth, (Cyclobutadiene)IronTricarbonyl. A Case of Theory before Experiment, Organometallics, 2003, **22** (N1), p.p. 2-20.
40. M.I. Bruce, “Organometallic Chemistry of Vinylidene and Related Unsaturated Carbenes”, Chem. Rev., 1991, **91**, p.p. 197-257.
41. a) J.L. Templeton, Advances in Organometallic Chemistry, 29 (1989) 1; b) S. Otsuka, A. Nakamura, Advances in Organometallic Chemistry, 14 (1976) 245;
42. D. Seyferth, Bis(benzene)chromium. Its Discovery by E.O. Fischer and Subsequent work by the Research Groups of E.O. Fischer, H.H.Zeiss, F.Hein, Ch.Elschenbroich and Others, Organometallics, 2002, 21, 2800.
43. Reactivity of Metal-Metal Bonds, ed. by M.H.Chisholm, American Chemical Society, 1981 (Имеется в библиотеке ИНЭОС).
44. Transition Metal Clusters, ed. by B.F.G. Johnson, John Wiley & Sons, 1980. (Имеется в библиотеке ИНЭОС).
45. С.П. Губин. Химия кластеров. Основы классификации и структуры. М., Наука, 1987.
46. Яцимирский К.Б. Введение в биоорганическую химию. Киев: Наукова думка, 1976.
47. Хьюз М. Неорганическая химия биологических процессов. М.: Мир, 1983.
48. Биометаллоорганическая химия. Под редакцией Ж. Жауэна. М., БИНОМ, 2009.