

ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по специальности

02.00.08 - Химия элементоорганических соединений,

отрасли наук Химические науки,

аспиранта Ощепковой Елены Сергеевны,

выполняющего научно-исследовательскую работу по теме:

«Диастереоселективные реакции циклоприсоединения фосфолов как новый метод получения хиральных каркасных фосфинов»

1. Теоретические представления о природе химических связей и электронном строении элементоорганических соединений. Реакционная способность элементоорганических соединений

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 полуэмпирических 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 энергий и π -МО аллила, бутадиена, аниона цикlopентадиенила, бензола, циклооктатетраена.

Концепция ароматичности в химии ЭОС. Примеры металлоорганических 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, цикlopентадиенильных 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, цикlopентадиенильных и ареновых комплексах. Химические связи в электронодефицитных молекулах (на примерах простейших и полизадрических 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 -цикlopентадиенильными, π -ареновыми лигандами.

2. Реакционная способность элементоорганических соединений

Основные типы реагентов (электрофилы, нуклеофилы, протофилы, радикофилы, карбеноиды). Классификация основных типов реакций с участием ЭОС. 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 вращение 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, влияние строения СН-кислот на равновесную СН-кислотность, кинетическая кислотность СН-кислот.

3. Физические методы исследования структуры и электронного строения ЭОС

Спектроскопия ЯМР (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, изотоний анализ, измерение термохимических 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 гентгенофотоэлектронная (ЭСХА) спектроскопии. Физические и теоретические основы методов. 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.

Органические соединения натрия и калия.

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 металлоорганическом синтезе.

Органические производные элементов XII группы.

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

Органические соединения ртути: получение, строение, свойства. Меркурирование ароматических соединений. Реакция Несмейнова.

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

Органические соединения элементов III группы.

Бороганические соединения. Основные типы соединений, синтез, свойства, реакции. Гидроборирование ненасыщенных соединений, региоселективность реакции. Применение бороганических соединений в органическом синтезе.

Карбораны, металлокарбораны, 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 элементов XIII группы.

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

Применение талийорганических соединений в органическом синтезе.

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

Сравнительная реакционная способность органических производных элементов XIII группы.

Органические соединения элементов XIV группы.

Кремнийорганические соединения: получение, строение, свойства.

Гидросилирирование 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 XIV группы.

Соединения элементов XIV группы с σ -связью элемент-элемент: синтез, строение, свойства.

Соединения элементов XIV группы с кратными связями элемент-элемент: синтез, строение, свойства. Проблема двоесвязанности в химии ЭОС непереходных элементов.

Органические производные элементов XV группы.

Органические производные фосфора и мышьяка, основные типы соединений высшей и низшей степеней окисления, методы синтеза, строение, свойства. Гетероциклические соединения фосфора. Реакция Виттига. Применение органических производных элементов V группы в промышленности, сельском хозяйстве, медицине.

Сурьма- и висмутогорганические соединения.

5. Органические производные переходных металлов

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

Карбонильные комплексы переходных металлов.

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

Металлкарбонильные кластеры переходных металлов. Основные типы, получение. Стереохимическая нежесткость: миграция карбонильных, гидридных, углеводородных лигандов и металлического остова. Превращения углеводородов на кластерных карбонилах металлов.

Практическое применение карбонилов металлов.

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 -Ацетиленовые производные переходных металлов.

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

Гидридные комплексы переходных металлов.

Основные типы водородных комплексов переходных металлов. Соединения с водородным атомом: моно-, би- и полиядерные. Соединения с терминальным и мостиковым атомами водорода. Соединения с молекулярным водородом: синтез, строение, свойства. Характер связи металл-водород, ее полярность, возможность диссоциации. Взаимные превращения водородных комплексов и σ -органических соединений переходных металлов. Роль водородных комплексов в металлоорганическом синтезе и катализе.

Карбеновые и карбиноевые комплексы переходных металлов.

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

Реакции карбеновых комплексов Фишера (нуклеофильное присоединение к C(α), депротонирование связей C(β)-Н). Роль карбеновых комплексов в катализе (метатезис олефинов). Использование в тонком органическом синтезе. Реакция Детца. Метатезис циклических алkenов.

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

π -Комpleксы переходных металлов

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

π-Комплексы металлов с олефинами

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.

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.

Аллильные комплексы

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

Цикlopентадиенильные комплексы

Типы комплексов. Строение.

Металлоцены: ферроцен, никелецен, кобальтоцен. Синтез. Реакционная способность (замещение в лиганде, реакции с разрывом связи металл-кольцо, редокс-реакции). Металлоциенилалкильные катионы.

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

Цикlopентадиенилкарбонильные комплексы. Синтез. Химия цикlopентадиенилмарганецтрикарбонила (цимандрена).

Цикlopентадиенилкарбонильные комплексы железа, кобальта, молибдена.

Ареновые комплексы

Типы ареновых комплексов.

Бис-ареновые комплексы хрома. Методы получения и реакции.

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

Катионные ареновые комплексы железа и марганца. Синтез и реакции.

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. Кластерные (каркасные) соединения переходных металлов. Важнейшие структурные типы кластеров, их минимальные и максимальные размеры. Электронное строение. Свойства и динамика молекул.

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 тетramerизация ацетиленов (синтез производных бензола и циклооктатетраэна).

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

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

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

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

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

Аллильное алкилирование CH-, NH- и OH-органических соединений в условиях металлокомплексного катализа. Моно-, ди- и полидентатные лигандаe. Хиральные лигандаe и асимметрический синтез.

Метатезис олефинов и ацетиленов. Реакция кросс-сочетания.

Основные представления биометаллоорганической химии

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

Органические соединения f-элементов

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

6. Дополнительная программа по теме НИР

■ 1. Электронное строение и реакционная способность органических соединений фосфора.

Номенклатура соединений фосфора. Электронное строение соединений трехвалентного фосфора. Электронное строение атомов азота и фосфора в сравнении. Энергии возбуждения. Гибридизация атома Р(III). Энергия σ - и π -связей. Валентные углы. Проблема p_{π} - d_{π} -сопряжений. Ориентирующее влияние группировок с Р(III). Бифильность. Амбидентность.

Электронное строение соединений четырех- и пятикоординированного фосфора. Структура соединений фосфониевого, квазифосфониевого и фосфоранового типов. Фосфорильные и тиофосфорильные соединения. Природа связей Р=О и Р=S. Форма и симметрия d -орбиталей. Проблема образования σ - и π -связей с участием d -орбиталей. Электронные эффекты групп, содержащих четырехкоординированный фосфор. Пяти- и шестикоординированные соединения фосфора.

Корреляционные уравнения Кабачника. σ -Константы.

Вопросы таутомерии и двойственной реакционной способности в химии фосфорорганических соединений.

■ 2. Фосфины.

Номенклатура фосфинов. Основные методы синтеза фосфинов – синтез из йодистого фосфона, алки-лирование фосфидов металлов, металлоорганический синтез, реакции разложения и диспропорционирования, реакции восстановления. Свойства фосфинов. Основность фосфинов.

Реакции окисления и присоединения серы, галогенов, галогеноводородов, алкилгалогенидов. Реакции присоединения по кратным С=С связям: присоединение без катализатора; присоединение в присутствии кислых и основных катализаторов; присоединение в присутствии радикалов при облучении УФ-светом.

Присоединение по карбонильной группе. Присоединение к гетерокумуленам. Хиральные фосфины. Фосфиновые комплексы переходных металлов. Асимметрический синтез. Синтез хиральных фосфорорганических лигандов. Методы получения энантиомерно чистых фосфинов.

3. Органические соединения низкооординированного фосфора

Соединения одно- и двухкоординированного фосфора

Фосфоалкины, фосфаалкены: синтез, строение, реакционная способность. Синтез комплексов переходных металлов, содержащих фосфорные гетероциклы, на основе фосфаалкинов. Сходство и различие химического поведения фосфаалкенов и фосфаалкинов.

Фосфабензол (Фосфорин). Основные методы синтеза. Электронные свойства, вопрос об ароматичности. Производные фосфининов. Реакции комплексообразования с переходными металлами, применение в гомогенном катализе.

Фосфинидены. Свободные фосфиниденовые частицы. Реакции комплексообразования с переходными металлами. Электрофильные и нуклеофильные фосфиниденовые комплексы: основные методы получения, реакционная способность (реакции присоединения по кратным связям C=C, реакции внедрения по связям C=O, C=N).

Трехчленные циклы, содержащие один атом фосфора: фосфираны и фосфирены. Основные методы синтеза. Реакции, протекающие с сохранением и раскрытием цикла. Реакции увеличения цикла.

Фосфациклопентадиены

Получение 1*R* и 2*R* фосфациклопентадиенов (фосфолов), их реакционная способность, реакции циклоприсоединения 1*R* и 2*R* фосфолов. [1,5]-сигматропный сдвиг, стабильность двух таутомерных форм, вопрос об ароматичности. Химические свойства фосфациклопентадиенов: нуклеофильные и электрофильные свойства атома фосфора в кольце 1*R* и 2*R* фосфолов, реакции Дильса-Альдера, трансформации под действием температуры и УФ-излучения. Получение 1- и 7-фосфанорборнадиенов и фосфанорборнадиенов, применение в катализе.

Фосфолы, как синтоны для получения других фосфорсодержащих гетероциклов. Синтез монофосфациклопентадиенидов щелочных металлов и их комплексообразующие свойства. Фосфаметаллоцены.

Полифосфациклопентадиены

Синтез полифосфациклопентадиенидов щелочных, щелочноземельных и переходных металлов, их строение и ароматичность. Химические свойства полифосфолид

анионов: с органическими и элементорганическими электрофилами, протонирование, окисление.

Комплексообразующие свойства полифосфолид анионов, типы координации. Полифосфаметаллоцены и их комплексообразующие свойства.

Практическое применение ФОС.

Биоактивность ФОС: ОВ, инсектициды, лекарственные препараты, присадки к смазочным маслам, растворители, флотореагенты, комплексоны, биохимия ФОС, антихолинэстеразное действие. Органические соединения фосфора в природе. Промышленное получение производных фосфора.

Рекомендуемая литература (к разделам 1-5)

1. Белецкая И.П., Реутов О.А., Соколов В.И. Механизмы реакций металлоорганических соединений. "Химия", Москва, 1972.
2. Биометаллоорганическая химия / под ред. Ж. Жуэна; пер. с англ. В.П. Дядченко, К.В. Зайцева. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 494 с.
3. Граймс Р.Н. Карбораны. М.: Мир, 1974, 264 с.
4. Грин М. Металлоорганические соединения переходных элементов / Пер. с англ. под ред. Губина С.П. - М.: Мир, 1972. - 456 с.
5. Гринвуд Н.Н. и др. Химия элементов: В 2 т. - М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2008.
6. Губин С.П., Шульпин Г.Б.. Химия комплексов со связями металл-углерод. "Наука", Новосибирск, 1984, 282 с.
7. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. 'Мир", Москва, 1984 г. – 478 с.
8. Драго Р. Физические методы в химии. Т.1,2, М., "Мир", 1981.
9. Егорочкин А.Н. и др. Электронное строение органических соединений кремния, германия и олова. - Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2000. - 614 с.
10. Кабачник М. И. и др. Межфазный катализ в фосфорорганической химии. - М.: УРСС, 2002. - 319 с.
11. Кабачник М.И. и др. Химия фосфорорганических соединений: Избр. тр.: В 3 т. / Ин-т элементоорганич. соед. им. А.Н. Несмеянова РАН. – М.: Наука, 2008.
12. Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Основы неорганической химии. "Мир", Москва, 1979, 677 с.
13. Методы элементоорганической химии / Под редакцией А.Н. Несмеянова и К.А. Кочешкова, Москва, 1963-1976 гг.
14. Минкин В.И., Симкин Б.Я., Миняев Р.М.. Теория строения молекул. М.: Высш. школа, 1979. – 467 с.
15. Михайлов Б.М. Химия бороводородов. "Наука", Москва, 1967. – 520 с.
16. Неорганическая химия. Химия элементов: Учебник: в 2-х т. / Под ред. Ю.Д. Третьякова; – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ: Академкнига, 2007. – 2 т.
17. Нефедов В.И. и др. Электронная структура органических и элементоорганических соединений. - М.: Наука, 1989. - 199 с.
18. Низамов И.С. Биологически активные синтетические и природные элементоорганические соединения: учеб. пособие / И.С. Низамов. – Казань: КФУ, 2012. – 204 с.
19. Низамов И.С. Органические соединения четырёхкоординированного атома фосфора / И.С. Низамов; ГОУ ВПО ТГГПУ. – Казань: Тат. гос. гуманитарно-пед. ун-т, 2010. – 205 с.
20. Общая органическая химия. М., т.5-7,10, 1983-1986 гг.
21. Органикум, т. 1,2, "Мир", Москва, 1992.
22. Темкин О.Н. Гомогенный металлокомплексный катализ. Кинетические аспекты / О.Н. Темкин. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. – 918 с.
23. Хенрици-Оливэ Г., Оливэ С. Координация и катализ. "Мир". Москва, 1980. – 421 с.

24. Хенрици-Оливэ Г., Оливэ С. Химия каталитического гидрирования CO. “Мир”. Москва, 1987. – 245 с.
25. Шульпин Г.Б. Органические реакции, катализируемые комплексами металлов. “Наука”, Москва, 1988. – 285 с.
26. Эльшенбройх, К. Металлоорганическая химия: пер. с нем. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2011. – 746 с.: ил.

Рекомендуемая литература (к разделу 6)

1. Пурдела Д., Вылчану Р. Химия органических соединений фосфора. - М.: Химия, 1972.
2. Кирби Р., Уорен С. Органическая химия фосфора. - М.: Мир, 1971.
3. Хадсон Р. Структура и механизм реакций фосфорорганических соединений - М.: Мир, 1967.
4. Нифантьев Э.Е. Химия фосфорорганических соединений. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971.
5. Кормачев В.В., Федосеев М.С. Препартивная химия фосфора. - Пермь: 1992.
6. Ерастов О.А., Никонов Г.Н. Функциональнозамещенные фосфины и их производные. М.: Наука, 1986.
7. Corbridge D.E.C. Phosphorus 2000. Chemistry, Biochemistry & Technology - Elsevier, 2000.
8. Mathey F. Phospha-Organic Chemistry: Panorama and Perspectives. Angewandte Chemie International Edition. 2003, V. 42, p. 1578-1604.
9. Muller C., Vogt D. Phosphinines as ligands in homogeneous catalysis: recent developments, concepts and perspectives. Dalton Transactions. 2007, p. 5505-5523.
10. Mathey F. Chemistry of 3-membered carbon-phosphorus heterocycles. Chemical Review, 1990, V.90, p.997-1025.
11. Mathey F. The organic chemistry of phospholes. Chemical Review. 1988, V. 88, p. 429-453.
12. Quin L. The continuing development of the chemistry of phospholes. Current Organic Chemistry. 2006, V. 10, p. 43-78.
13. Mathey F., Mercier F. The chemistry of 2-H phospholes. Organic and organometallic synthesis. 1997, 324 (II b), p. 701-716.
14. F. Mathey (ed.), Phosphorus-Carbon Heterocyclic Chemistry, Pergamon, 1992.
15. K. B. Dillon, F. Mathey, J. F. Nixon. Phosphorus, the Carbon Copy. John Willey & Sons, Chichester, 1998.
16. Mathey F. The chemistry of phospha- and polyphosphacyclopentadienide anions. Coordination chemistry reviews. 1994, V. 137, p. 1-52.
17. Mathey F. From phosphorus heterocycles to phosphorus analogues of unsaturated hydrocarbon-transition metal π -complexes. Journal of Organometallic Chemistry. 1990. V. 400, p. 149-164.
18. J. F. Nixon Phospha-alkynes: New building blocks in inorganic and organometallic chemistry. Chemical Society Reviews. 1995. V. 24 (5), p. 319-328.

19. J. F. Nixon The coordination chemistry of compounds containing phosphorus-carbon multiple bonds. *Chemical Review*. 1988. V. 88, p. 1327 – 1362.
20. Mathey F. Transient 2H-Phospholes as powerful synthetic intermediates in organophosphorus chemistry. *Accounts of Chemical Research*, 2004, V.37, p.954-960.
21. Lammertsma K. Phosphinidenes. *Topics in Current Chemistry*. 2003. V. 229, p. 95-119.
22. Mathey F. Developing the chemistry of monovalent phosphorus. *Dalton Transactions*. 2007, p. 1861-1868.
23. Bansal R., Kumawat S., Diels-Alder reactions involving C=P functionality. *Tetrahedron*. 2008, V. 64, p. 10945-10976.
24. Kollar L., Keglevich G. P-heterocycles as ligands in homogeneous catalytic reactions. *Chemical Review*. 2010. V. 110, p. 4257 – 4302.
25. I. Kolodiaznyi, *Tetrahedron: Asymmetry*, 1998, 9, p. 1279–1332

Научный руководитель:

к.х.н.,

ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН

Загидуллин А.А.

Рецензент:

д.х.н.,

ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН

Альфонсов В.А.