

УДК 546.18+547.1-8

ДЕЯКІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ ФОСФОР-ВУГЛЕЦЬ*

О.М.Костюк, Є.В.Зарудницький, А.С.Меркулов, О.М.Пінчук

Інститут органічної хімії НАН України
02094, м. Київ-94, вул. Мурманська, 5. E-mail: pinchuk@ioch.kiev.ua

Ключові слова: зв'язок С-Р; фосфорилування; галогеніди фосфору; енаміни; гідразони; амідини; гетероцикли

Узагальнені результати робіт відділу хімії фосфороорганічних сполук за останні 20 років спрямовані на створення С-Р зв'язку методом нуклеофільного полігалогеналкілування, каталітичного фосфорилування адамантанів, некаталітичного фосфорилування енамінів, гідразонів, амідинів та електронозбагачених гетероциклів галогенідами фосфору.

SOME ASPECTS OF CREATING PHOSPHORUS-CARBON BOND

A.N.Kostyuk, Ye.V.Zarudnitsky, A.S.Merkulov, A.M.Pinchuk

The results of work of the Organophosphorus Compounds Chemistry Department for the last twenty years have been reviewed. The work is directed to creation of C-P bond by the nucleophilic polyhalogenalkylation, catalytic phosphorylation of adamantanes, non-catalytic phosphorylation of enamines, hydrazones, amidines and electron-rich heterocycles with phosphorus halides.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ СВЯЗИ ФОСФОР-УГЛЕРОД

А.Н.Костюк, Е.В.Зарудницкий, А.С.Меркулов, А.М.Пинчук

Обобщены результаты работ отдела химии фосфорорганических соединений за последние 20 лет, направленные на создание С-Р связи методом нуклеофильного полигалогеналкилирования, каталитического фосфорилирования адамантанов, некаталитического фосфорилирования енаминов, гидразонов, амидинов и электронообогатенных гетероциклов галогенидами фосфора.

Хімія фосфороорганічних сполук (ФОС) є одним з напрямків хімії елементоорганічних сполук, який найбільш широко і динамічно розвивається. По багатогранності структур, асортименту одержаних на сьогоднішній день ФОС, значенню їх у біохімічних процесах фосфор поступається лише вуглецю. Неослабний теоретичний інтерес до ФОС поєднується з розширенням спектра галузей їх практичного застосування.

Однією з фундаментальних проблем фосфороорганічної хімії є розробка препаративних методів синтезу сполук зі зв'язком фосфор-вуглець. Серед них особливе місце займають функціональнозаміщені фосфіни та їх похідні. Вирішенню цієї проблеми приділялась особлива увага у відділі хімії ФОС НАН України за весь час його існування. Варто згадати фундаментальні дослідження з хімії йодидів фосфору, проведені О.В.Кірсановим та Н.Г.Фещенко [1, 2], які лягли в основу створення технології алкілування червоного фосфору йодистими алкілами. В результаті стали промислово доступними будь-які триалкілфосфіноксиди — найбільш ефективні екстрагенти в гідрометалургії важких металів. Останні 20 років під керівництвом

проф. О.М.Пінчука продовжувався пошук як нових методів створення зв'язку фосфор-вуглець, так і розширення уже відомих методів на нові класи органічних сполук. В основу методу нуклеофільного полігалогеналкілування покладена розроблена у відділі хімії фосфороорганічних сполук реакція заміщення атома хлору на трихлорометильну групу в умовах трикомпонентної системи [3]. Найпростішим прикладом утворення зв'язку С-Р є каталітичне фосфорилування органічних сполук п'ятихлористим фосфором, в якому атакуючою частиною є досить сильний електрофільний катіон PCl_4^+ , що було використано для синтезу фосфорильованих адамантанів. Галогеніди тривалентного фосфору — менш активні електрофіли, однак у 80-ті роки було встановлено, що вінілові етери [4, 5] та енаміни [6] легко фосфорилуються галогенідами тривалентного фосфору в присутності органічних основ. У подальшому метод електрофільного фосфорилування був значно розповсюджений на нові типи ненасичених, ароматичних та гетероароматичних сполук. Це дозволило отримати ряд нових галогенофосфінів — ключових реагентів для синтезу фосфороорганіч-

* За матеріалами робіт відділу хімії ФОС ІОХ НАН України в період 1989-2009 рр.

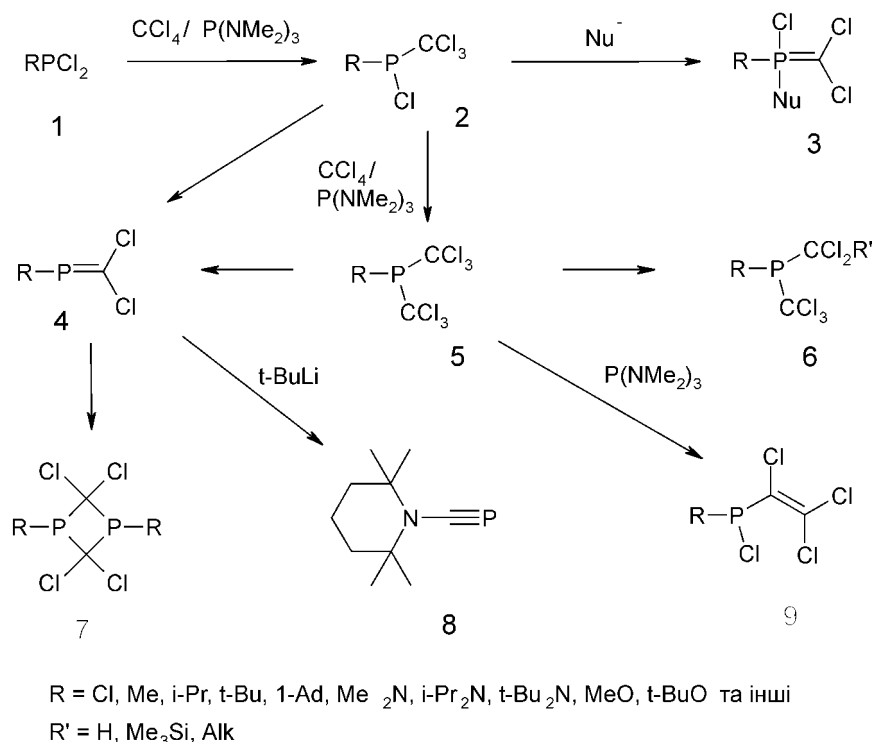


Схема 1

них сполук різної координації. Зайдені закономірності використані для синтезу нових типів фосфоромісних гетероциклів.

Нуклеофільне полігалогеналкілювання

Суть методу А.П.Марченка полягає у взаємодії монозаміщених похідних трихлористого фосфору з бінарною системою триамідофосфіт/чотирихлористий вуглець, що генерує трихлорометанід-іон та приводить до введення однієї [7, 8] чи двох [9-13] трихлорометильних груп до атома тривалентного фосфору. Для методу характерна простота, доступність реагентів, м'які умови реакції. Однією з цікавих властивостей одержаних α -галогеналкілфосфінів є перетворення їх на високореакційноздатні Р-галогеніліди **3**. Проведені детальні дослідження цієї реакції, встановлено вплив електронних і стеричних ефектів замісників, природи галогену на її напрямок і межі застосування [8]. Хлорангідриди трихлорометилфосфониної кислоти дехлоруються триамідом фосфору з утворенням сполук двокоординованого фосфору **4** [14], які в залежності від об'єму замісника можуть димеризуватися в дифосфетани **7** [15-17]. Також на основі хлорангідридів **2** одержано "стерично перевантажені" фосфіни з двома трихлорометильними групами **5** [9-13]. Ці сполуки, як і хлорангідриди **2**, легко реагують з еквімолярною кількістю трис(трет-бутил)фосфіну або гексаєтилтриамідофосфіту, утворюючи з високим виходом λ^3 -фосфаєтилені **4** [18-20]. Використовуючи доступність С,С-дигалогензаміщених амінофосфалкелнів **4**, було синтезовано перший стабільний представник діалкіламінофосфаєтинів **8** [21]. Реакція

біс-(трихлорометил)фосфінів **5** з триамідофосфітом супроводжується нарощуванням вуглецевого ланцюга з sp^2 -гібридизованим атомом вуглецю і утворенням перхлоровінілхлорофосфінів **9** [22, 23]. На першій стадії цієї реакції утворюється аніон $\text{RP}(\text{CCl}_3)\text{CCl}_2^-$, завдяки чому стає можливою модифікація CCl_3 -групи (сполуки **6**) [23] (схема 1).

Використання трикомпонентної системи внесло значний вклад не тільки в хімію ФОС, а й в органічну хімію, тому що дозволило ввести трихлорометильну групу до атомів вуглецю і кремнію [24-26].

Фосфорилування похідних адамантану

Перше систематичне дослідження в галузі фосфоромісних похідних адамантану проведено Р.І.Юрченко. Синтезовані симетричні та змішані естери фосфористої кислоти виявились цінними сполуками при вивченні механізму деяких добре відомих, але недостатньо вивчених реакцій, наприклад, реакції Арбузова змішаних фосфітів, реакції Штаудінгера, диспропорціонування змішаних фосфітів під впливом трихлористого фосфору [27].

За допомогою реакції Клея-Кіннера-Перрена [28], а також фосфорилуванням похідних адамантану хлорангідридами кислот тривалентного фосфору в середовищі сірчаної кислоти був синтезований ряд заміщених адамантилдихлорофосфонатів **11**, які було використано для синтезу функціонально заміщених адамантилфосфінів **12**, а також для вивчення електронного впливу дихлорофосфорильної групи на передачу індукційних ефектів у системі адамантану (схема 2).

Вперше для синтезу фосфорильованих похідних адамантану були використані реакції елек-

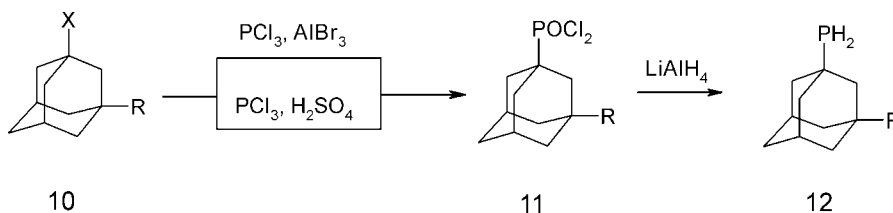


Схема 2

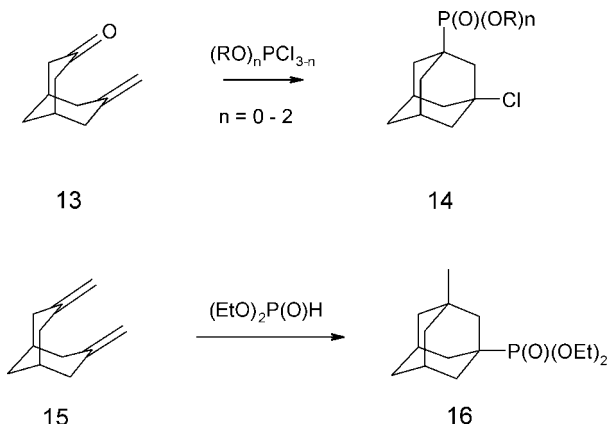


Схема 3

трофільної циклізації ненасичених похідних біцикло[3.3.1]нонану **13** під впливом фосфорних реагентів (схема 3).

Виявлені фактори, які регулюють процеси ізомеризації в реакціях фосфорилування алкіладамантанів. Розроблено зручний препаративний метод одержання первинних фосфінів, який можна застосовувати не лише для синтезу адамантилфосфінів, але і для одержання фосфінів з довгим ланцюгом алкільного радикалу лінійної будови [29].

Електрофільне фосфорилування галогенідами фосфору

Першим об'єктом для систематичного вивчення фосфорилування були вибрані енаміни, які широко використовуються в органічному синтезі як зручні С-нуклеофіли. В.П.Кухарем і співробітниками на прикладі 2-морфолінопроп-1-ену було показано, що фосфорилування відбувається досить легко, але фосфорильовані сполуки виявились нестійкими [6]. Пізніше продемонстрували, що менш активні енаміни можуть утворювати стабільні фосфорильовані похідні. Так, з'ясува-

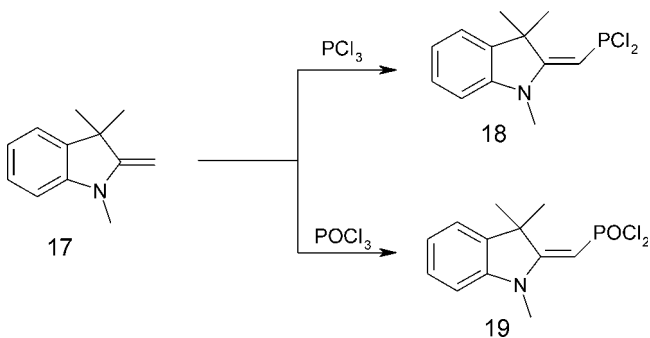


Схема 4

лось, що основа Фішера — 1,3,3-триметил-2-метилєндолін фосфорильється галогенідами як три-, так і п'ятивалентного фосфору з утворенням стабільних похідних **18**, **19** [30-32] (схема 4).

Класичні енаміни — похідні циклопентанону та циклогексанону **20** [33-35], а також спряжені енаміни **23** [36,37] легко фосфорильються галогенідами тривалентного фосфору. Виявлена суттєва залежність стабільності фосфорильованих енамінів як від кетонної компоненти, так і від аміну. Показано, що фосфорильовані енаміни легко гідролізуються до фосфорильованих кетонів **22**, **25** з препаративними виходами [35, 38] (схема 5).

Порівняльний аналіз фосфорильованих похідних енамінів циклопентанону та циклогексанону, а також результати фосфорилування основи Фішера чітко вказували на зростання стабільності С-Р зв'язку при зниженні активності енаміну. Саме тому подальший пошук об'єктів для фосфорилування серед енамінів збувся до пуш-пульних енамінів **26**. Дійсно, вони виявились достатньо активними для фосфорилування та утворювали стабільні похідні. Діалкіламінокротонітрили та діалкіламінокротонати загалом фосфорильються по класичному β-положенню (схема 6).

Дифенілгалогенофосфіни, на відміну від інших вивчених галогенофосфінів, реагують по метильній групі енаміноестерів з утворенням метилєнфосфорильованих енамінів **29**, для яких запропоновані методи синтезу γ-фосфорильованого ацетоцтового естеру, нових типів фосфорильованих дієнамінів, ряду метилєнфосфорильованих азотистих гетероциклів та поліфункціональних фосфорильованих бензолів **31** [39]. На основі β-фосфорильованих діалкіламінокротонітрилів **30** розроблений метод синтезу λ⁵-фосфінінів **32** [40, 41] (схема 7).

N,N-Диметилгідрозони альдегідів все частіше в літературі порівнюють з енамінами та називають їх "азаенамінами", що підтверджується їх схожою поведінкою в реакціях з електрофілами. Фосфорилування N,N-диметилгідрозонів форми **33** [42] та кротонових альдегідів **35** [43] є ще одним прикладом справедливості цього порівняння. В результаті одержано перші представники гідрозонів **34**, **36**, в яких атом тривалентного фосфору зв'язаний з азометиновим або вінілогічним йому атомами вуглецю (схема 8).

Іншим структурним азааналогом енамінів є формамідини. На відміну від гідрозонів прикладів електрофільного заміщення біля азометинового атома вуглецю не було. Однак, N,N-диметил-N'-

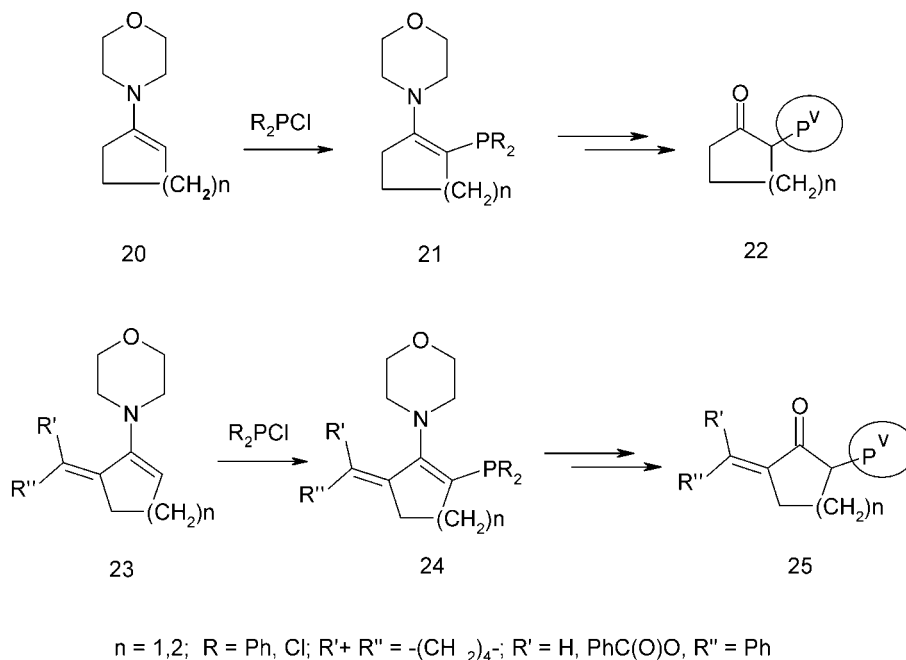


Схема 5

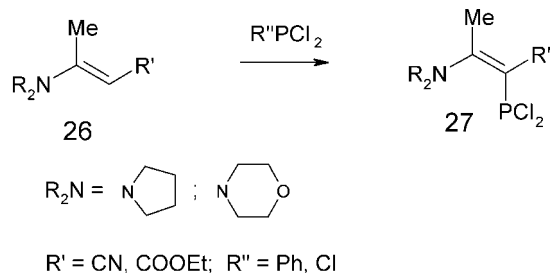


Схема 6

арилформамідини **37** реагують з трибромистим фосфором з утворенням дибромофосфінів **38** [44], однією з особливостей яких є циклізація в 3Н-1,3-бензазафосфоли **39** [45] (схема 9).

По азометиновому атому вуглецю фосфорилуються також N,N'-діарилформамідини **40**. Однак за наявності ще одного нуклеофільного центру відбувається циклізація [46] (схема 10).

Взаємодія N,N-діалкіланілінів з трихлоридом фосфору з утворенням 4-діалкіламінофенілдихло-

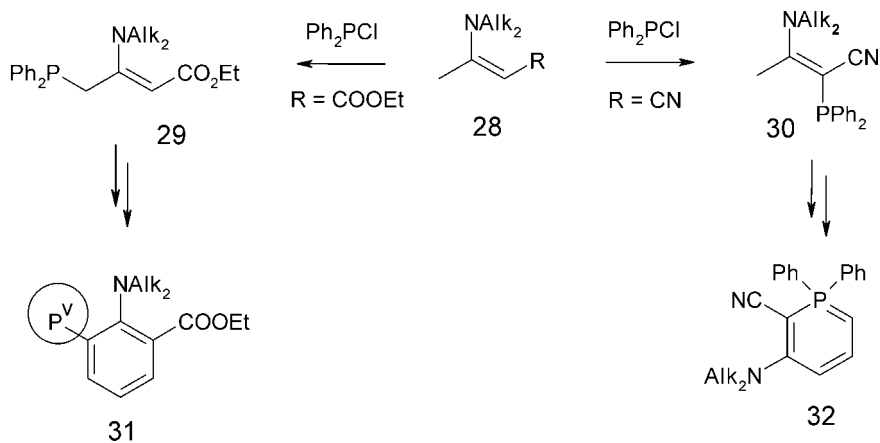
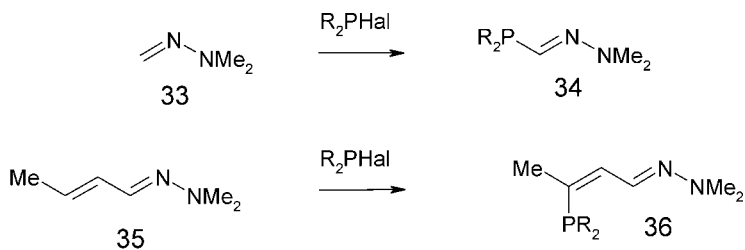


Схема 7



$R = \text{Hal, Ph}$

Схема 8

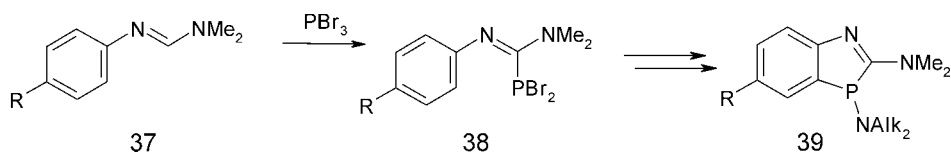


Схема 9

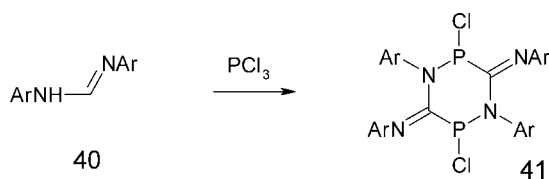
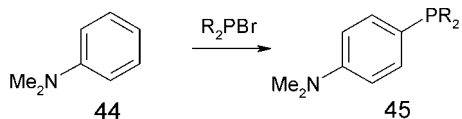
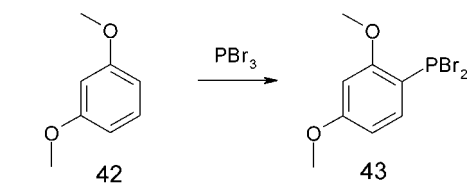
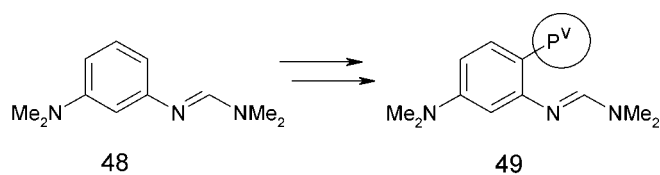
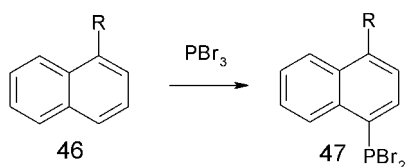


Схема 10



R = Br, C₆H₄(4-NMe₂)



R = EtO, Me₂N

Схема 11

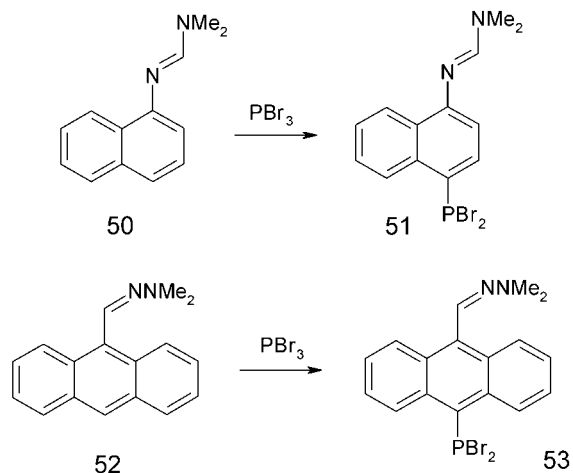


Схема 13

рофосфінів тривалий час була єдиним прикладом некаталітичного фосфорилування ароматичних сполук галогенідами фосфору (III). Застосування в цій реакції більш активного триброміду фосфору дозволило синтезувати широкий ряд фосфорильованих ароматичних сполук. Так взаємодіють диметиланий етер резорцину **42** [47], диметиланіліні **44** [48, 49], нафталіні з метоксильною та диметиланіногрупами **46** [50] (схема 11).

У гетероциклічних системах: феназин, фенксазин, фентіазин, дибензоазепін гетероатом виступає як електроннодонорний замісник і направляє фосфорилування до *para*-положення бензольного кільця. Але внаслідок меншого спряжен-

ня неподіленої електронної пари азоту з фенільними ядрами вони менш активні в реакції електрофільного фосфорилування, ніж дифеніламін [51] (схема 12).

Як електроннодонорні замісники можуть використовуватися також формамідинова та менш активна диметилгідрозонна групи [52]. Активності останньої вистачає лише у випадку антрацену, ароматичність якого менша, ніж бензолу та нафталіну. Важливо зауважити, що азотиний атом вуглецю в цих реакціях не зачіпається (схема 13).

У результаті систематичного вивчення реакції електрофільного фосфорилування в ряду π -електроннозбагачених гетероциклів **54**, **56** розроблені препаративні методи синтезу галогено-, дигалогено- та третинних фосфінів гетероциклічного ряду [53-55]. Вперше вивчено вплив електронної природи замісників у π -електроннозбагачених гетеро-

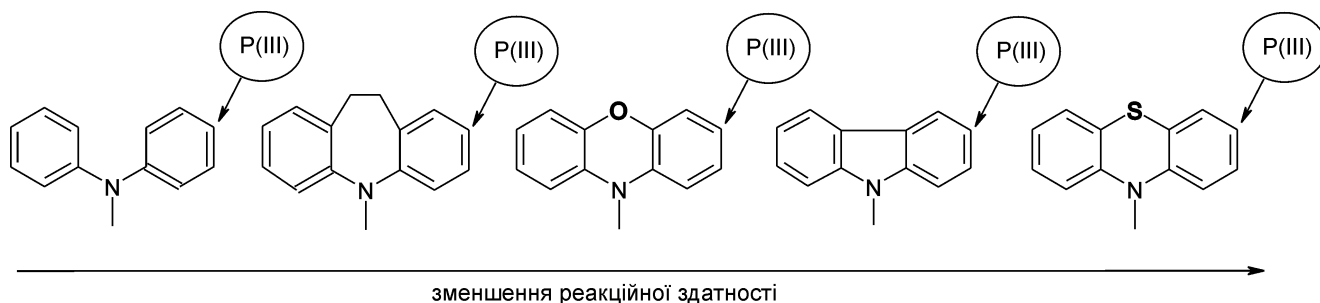


Схема 12

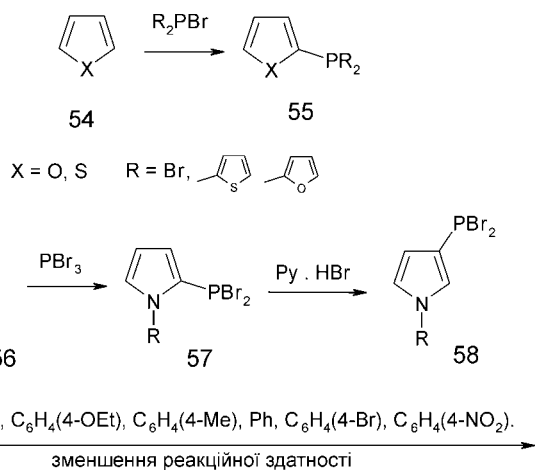


Схема 14

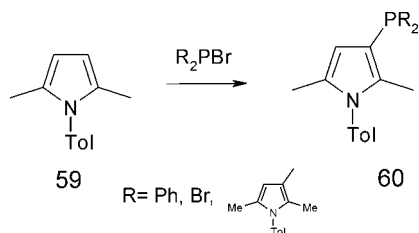


Схема 15

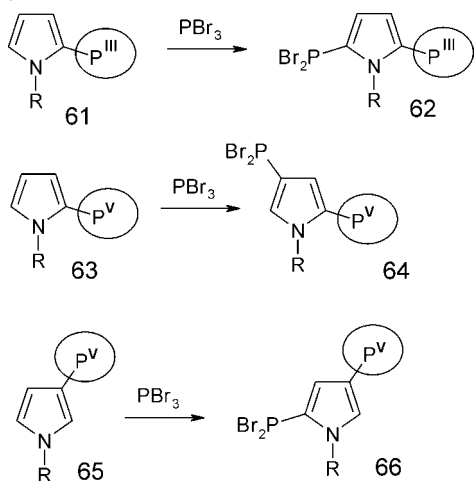


Схема 16

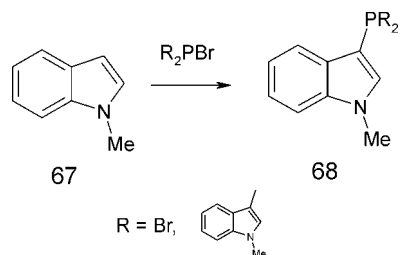


Схема 17

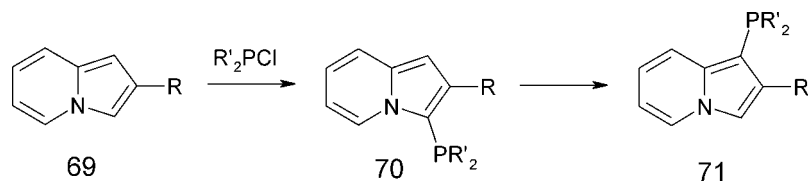


Схема 18

циклах на напрямок і регіоселективність реакції електрофільного фосфорилування [56]. Показано, що 4-диалкіламінопіриди́ни є ефективними каталізаторами в реакції електрофільного фосфорилування. Відкрита кислотно-каталізована α,β -міграція дибромофосфіногрупи в N-алкіл-(арил)піроліл-2-дибромофосфінах [57] (схема 14).

По β -положенню відбувається фосфорилування в 2,5-диметилпіролах **59** [58] (схема 15).

Активність піролу дозволяє отримати дифосфорильовані похідні **62**, **64**, **66** [59], при цьому виявлено, що тривалентний атом фосфору не дезактивує інше α -положення. Група з п'ятивалентним атомом фосфору виступає в ролі *meta*-орієнтанту (схема 16).

Індол реагує з бромідами фосфору, утворюючи 3-фосфорильовані похідні **68** [60] (схема 17).

Інший бензогомолог піролу — індолізін **69** повністю подібний до піролу в реакції фосфорилування. Він спочатку утворює 1-фосфорильовані похідні **70** [61-64], які в умовах кислого каталізу зазнають 1,3-міграції [63] (схема 18).

Галогеніди тривалентного фосфору реагують з N-метил-, а також менш активним N-фенілпіразолом **72** з утворенням дигалогенофосфінів **73** [65]. Цікавою особливістю фосфорильованих 5-алкоксипіразолів **73** ($R' = OEt$) є легке перетворення їх на іліди фосфору **74** [66-68], завдяки чому був синтезований перший трихлорілід **74** [69]. Іліди типу **74** є зручними реагентами для синтезу нових фосфоровмісних гетероциклічних систем **75** [70] (схема 19).

Менш активний в реакціях електрофільного заміщення індазол **76** регіоселективно фосфорилується трибромідом фосфору та бромодифенілфосфіном у положення 3 гетероциклу [71] (схема 20).

Для всіх вищенаведених прикладів фосфорилування ароматичних та гетероароматичних сполук спостерігаються всі закономірності, характерні для електрофільного ароматичного заміщення. Відомо, що гетероцикли з 1,3-азольним фрагментом можуть реагувати з електрофілами за двома різними механізмами — класичною схемою S_EAr та так званим "ілідним" (карбеновим) по положенню 2 [72]. Дійсно, фосфорилування імідазолів, оксазолів, тіазолів, їх бензоаналогів, 1,3,4-окса- та тіадіазолів, 1,2,4-триазолів та тетразолу перебігає з утворенням фосфінів **80** [73-77]. Реакційна здатність 1,3-азолів насамперед залежить від природи гетероатома та зменшується в ряду: 1-метилімідазол \approx оксазол $>$ тіазол. Вперше пока-

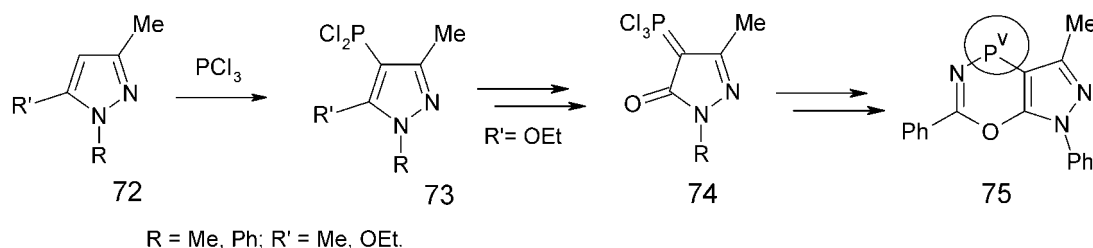


Схема 19

зано, що азолі з трьома гетероатомами більш активні по відношенню до галогенідів тривалентного фосфору, ніж азолі з двома та чотирма гетероатомами. Встановлено, що природа гетероатома в азолах з трьома гетероатомами мало впливає на їх реакційну здатність при фосфорилуванні (схема 21).

сим-Триазолі фосфорилуються двічі, утворюючи похідні **82** [78] (схема 22).

При наявності в положенні 2 азольного циклу електрондонорної групи фосфорилування відбувається в положенні 5 гетероциклу [79] (схема 23).

Конденсовані гетероцикли на основі 1,3-азолів: імідазо[2,1-*b*]тіазол **85** [79, 80], імідазо[1,2-*a*]піридин **87** [81] також фосфорилуються по положенню 5 імідазольного фрагменту (схема 24).

Результати проведених досліджень з фосфорилування галогенідами тривалентного фосфору бу-

ли використані для синтезу фосфоровмісних гетероциклічних систем. Так, взаємодія функціоналізованих ароматичних [82, 83] та п'ятичленних гетероциклів [84-88], які містять екзоциклічні С-, О- або N-центри, приводить до утворення невідомих раніше біциклічних гетероконденсованих систем **90, 93, 96, 98, 101, 103, 106, 108**. Такими центрами стали амідна, амідинова, уреїдна, сечова та гідразонна групи. Необхідно відмітити, що зв'язок Р-гетероатом в одержаних циклах — лабільний і під дією нуклеофільних реагентів розривається з відновленням функціонального замісника (схема 25, 26).

На прикладі N-(*o*-амінофеніл)-імідазолів та триазолів **109** показано, що циклоутворююча група може знаходитися не тільки в *орто*-положенні до місця фосфорилування, а навіть в іншому циклі. Синтезовані похідні чотирьох нових фос-

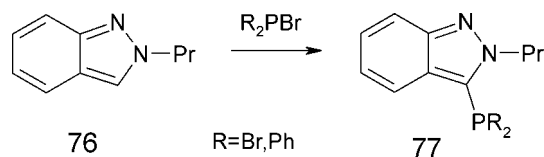
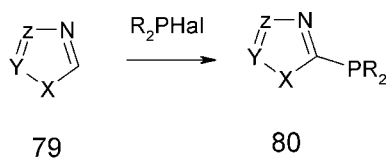
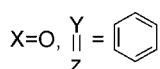


Схема 20

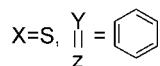


X= NMe, Y=Z=CH.

R=Hal, Ph



X=S, Y=CH, CCH₂CH₂OC(=O)CH₃, Z=CMe



X=O, Y=CPh, Z=N

X=S, Y=CPh, Z=N

X=NMe, Y=CPh, Z=N

X=NMe, Y=N, Z=CH

X=NMe, Y=Z=N

Схема 21

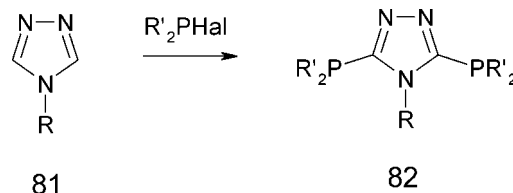


Схема 22

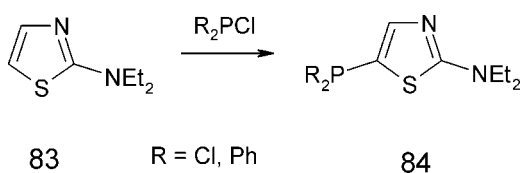


Схема 23

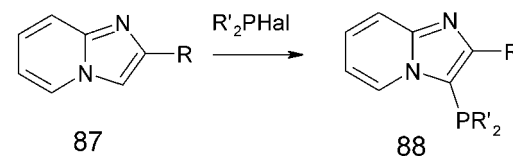
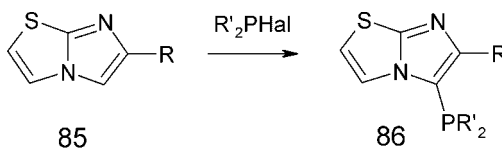


Схема 24

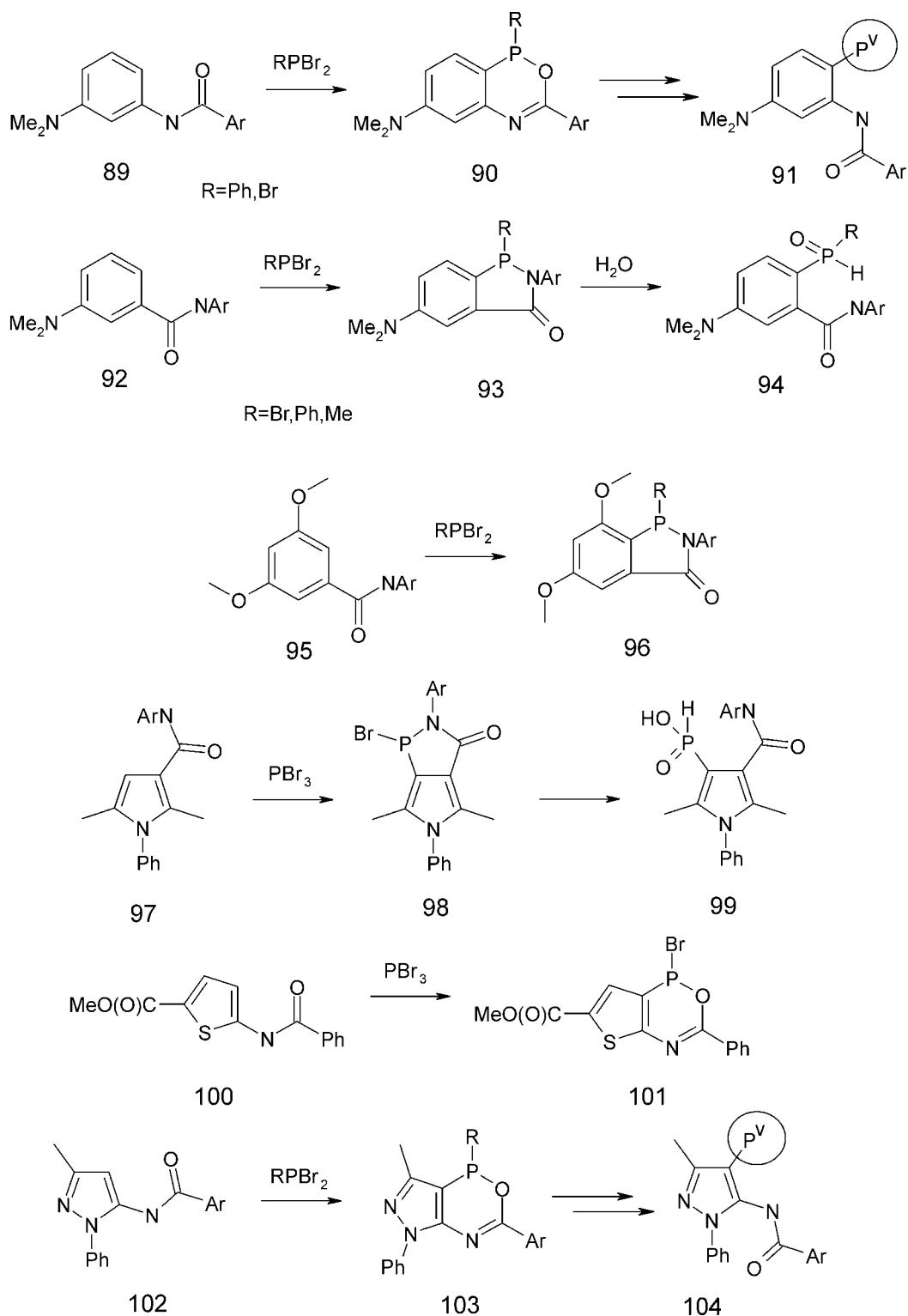


Схема 25

форовмісних конденсованих гетероциклічних систем, які мають імідазольний та 1,2,4-триазольний цикли, анельовані як з 1,4,2-діазафосфіновим циклом **110**, **113**, у тому числі і з вузловим атомом фосфору **113**, так і з 1,5,2-діазафосфепіновим циклом **115** [89] (схема 27).

Фосфорилюванням двох електронозбагачених азотовмісних п'ятичленних гетероциклів, з'єдна-

них одно- або двоатомним містком, синтезовані фосфоровмісні гетероциклічні системи, що містять два ендотрициклічні зв'язки вуглець-фосфор — дипіролофосфініни та піразолопіролоазафосфепіни **117** [90-92] (схема 28).

Інший підхід до реакції циклізації був реалізований у випадку гетериламідинів. У цих сполуках амідинова група виступає не тільки як електроно-

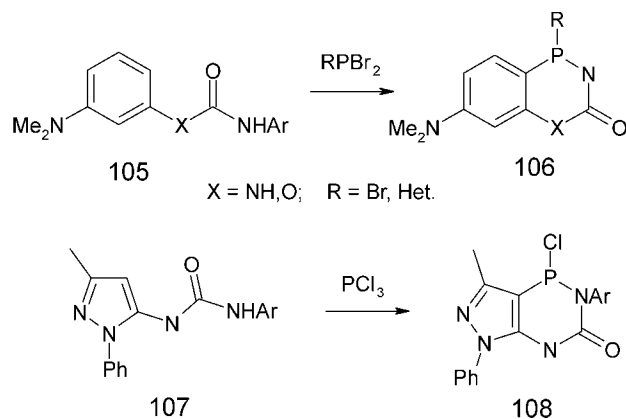


Схема 26

донорний замісник, але і як будівельний блок для синтезу гетероциклічного фрагменту в подальших перетвореннях [93-95] (схема 29).

З метою синтезу функціональнозаміщених похідних ФОС було досліджено можливість використання класичних захисних груп при фосфорилюванні галогенідами тривалентного фосфору. Так, N,N-диметилгідразонна [96-100], N,N-диметилформамідинова [101-103] та естерна групи [102,

103] залишаються незмінними в результаті реакції і успішно використовуються для синтезу ряду альдегідів, амінів та кислот як з три-, так і п'яти-валентним атомом фосфору (схема 30).

Таким чином, роботи виконані у відділі хімії ФОС за останні два десятиріччя внесли значний вклад у розвиток хімії низькокоординованого фосфору, хімії ілідів, хімії функціональнозаміщених фосфінів та хімії гетероциклічних сполук фосфо-

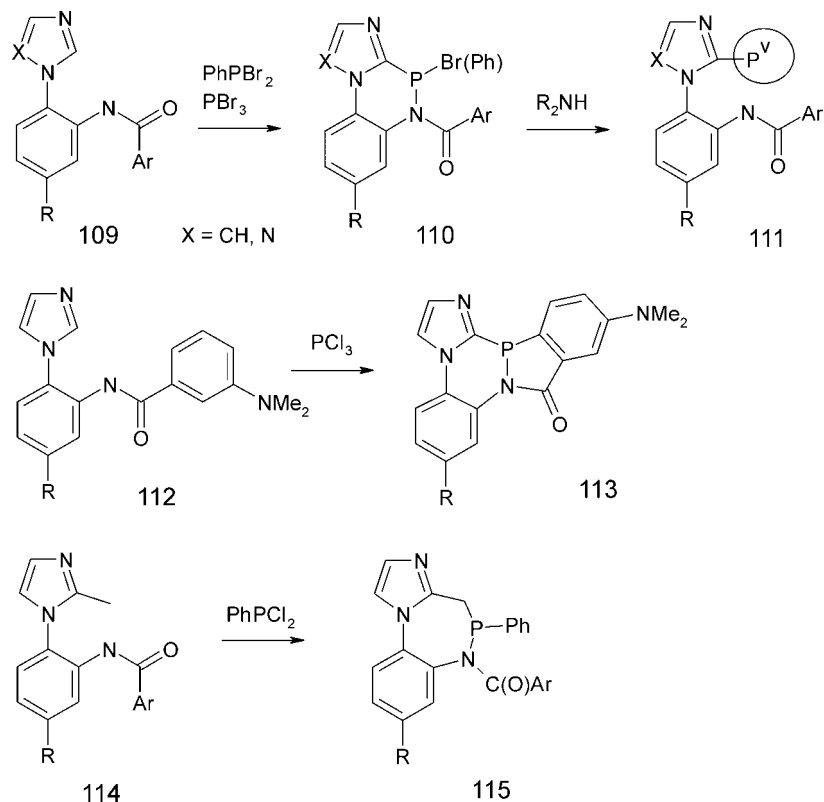


Схема 27

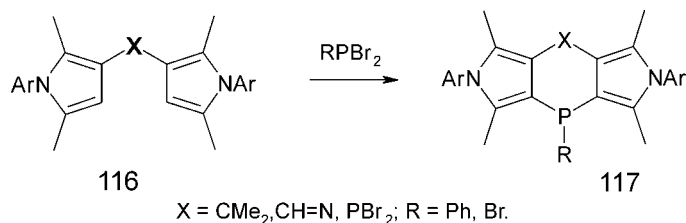


Схема 28

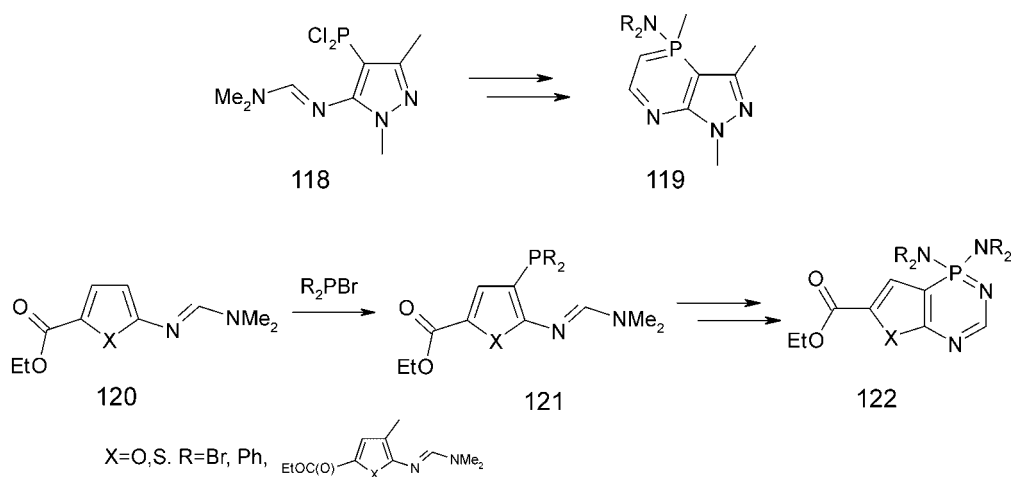


Схема 29

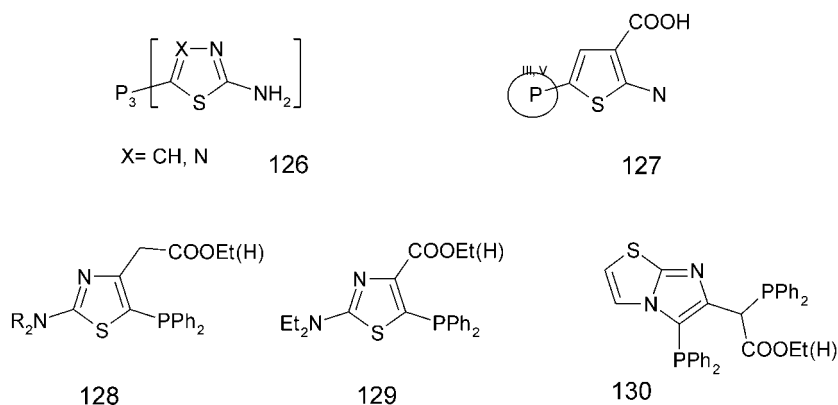
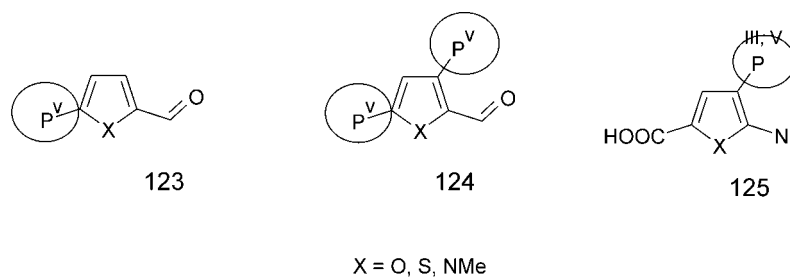


Схема 30

ру. Зокрема, синтезовані перші представники діалкіламінофосфаєтинів, трихлороїлідів та багатьох типів фосфоровмісних гетероциклів. Одержано ряд нових галогенофосфінів з перхлороалкільними,

адамантильними, гетероароматичними замісниками та безліч функціональнозаміщених фосфоорганічних сполук, які, безперечно, цікаві для синтетичної хімії та практичного застосування.

Література

1. Кирсанов А.В., Фещенко Н.Г. Химия и применение фосфорорганических соединений: Тр. 4-й конф. / Отв. ред. Н.П.Гречкин. — М.: Наука, 1972. — С. 140-151.
2. Кирсанов А.В., Фещенко Н.Г. Химия и применение фосфорорганических соединений: Тр. 5-й конф. / Отв. ред. М.И.Кабачник, Э.Е.Нифантьев. — М.: Наука, 1974. — С. 37-45.
3. Марченко А.П., Беспалько Г.К., Козлов Э.С., Пинчук А.М. // ЖОХ. — 1981. — Т. 51, вып. 7. — С. 1669-1670.
4. Казанкова М.А., Тростянская И.Г., Кудинов А.Р., Луценко И.Ф. // ЖОХ. — 1979. — Т. 49, вып. 2. — С. 469.
5. Тростянская И.Г., Ефимова И.В., Казанкова М.А., Луценко И.Ф. // ЖОХ. — 1983. — Т. 53, вып. 1. — С. 236-237.
6. Лазукина Л.А., Кухарь В.П., Песоцкая В.Г. // ЖОХ. — 1974. — Т. 44, вып. 10. — С. 2355-2356.
7. Олейник В.А., Койдан Г.Н., Марченко А.П., Пинчук А.М. // ЖОХ. — 1988. — Т. 58, вып. 2. — С. 482-483.
8. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Олейник В.А., Пинчук А.М. // ЖОХ. — 1988. — Т. 58, вып. 7. — С. 1461-1468.
9. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Барам Г.О. и др. // ЖОХ. — 1990. — Т. 60, вып. 4. — С. 961-963.
10. Койдан Г.Н., Барам Г.О., Романенко Е.А. и др. // ЖОХ. — 1990. — Т. 60, вып. 6. — С. 1423-1425.
11. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Барам Г.О. и др. // ЖОХ. — 1992. — Т. 62, вып. 4. — С. 948-950.

12. Marchenko A.P., Koidan G.N., Baram G.O., Pinchuk A.M. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1993. — Vol. 77, №1-4. — P. 161.
13. Барам Г.О., Койдан Г.Н., Марченко А.П., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 6. — С. 1240-1246.
14. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Олейник В.А., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1988. — Т. 58, вып. 8. — С. 1923-1925.
15. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Шевченко В.А. и др. // *ЖОХ.* — 2002. — Т. 72, вып. 1. — С. 160-161.
16. Чернега А.Н., Койдан Г.Н., Марченко А.П. // *Журн. структурной химии.* — 1992. — Т. 33, вып. 5. — С. 155-156.
17. Чернега А.Н., Койдан Г.Н., Шевченко В.А., Марченко А.П. // *Журн. структурной химии.* — 1992. — Т. 33, вып. 5. — С. 156-158.
18. Романенко Е.А., Марченко А.П., Койдан Г.Н., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1990. — Т. 60, вып. 10. — С. 2229-2934.
19. Литвинов И.А., Болдескул И.Е., Койдан Г.Н. и др. // *Журн. структурной химии.* — 1992. — Т. 33, вып. 2. — С. 174-177.
20. Пацановский И.И., Ишмаева Э.А., Койдан Г.Н., Марченко А.П. // *ЖОХ.* — 1994. — Т. 64, вып. 8. — С. 1372.
21. Марковский Л.Н., Койдан Г.Н., Марченко А.П. и др. // *ЖОХ.* — 1989. — Т. 59, вып. 9. — С. 2133.
22. Койдан Г.Н., Барам Г.О., Кудрявцев А.А. и др. // *ЖОХ.* — 1992. — Т. 62, вып. 2. — С. 282-288.
23. Марченко А.П., Койдан Г.Н., Барам Г.О. и др. // *ЖОХ.* — 1994. — Т. 64, вып. 6. — С. 913-925.
24. Марченко А.П., Мирошниченко В.В., Койдан Г.Н., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1980. — Т. 50, вып. 8. — С. 1897.
25. Койдан Г.Н., Марченко А.П., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1990. — Т. 60, вып. 3. — С. 709-710.
26. Марченко А.П., Шапошников С.И., Койдан Г.Н. и др. // *ЖОХ.* — 1988. — Т. 58, вып. 10. — С. 2230-2237.
27. Юрченко Р.И., Клепа Т.И., Мишак М.И., Тихонов В.П. // *ЖОХ.* — 1980. — Т. 50, вып. 11. — С. 2443-2447.
28. Юрченко Р.И., Войцеховская О.М., Пинчук А.М. и др. // *ЖОХ.* — 1982. — Т. 52, вып. 3. — С. 558-561.
29. Юрченко Р.И., Лаврова Е.Э., Лукьянова С.М., Верповский Н.С. // *ЖОХ.* — 1983. — Т. 53, вып. 1. — С. 242-243.
30. Толмачев А.А., Костюк А.Н., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1989. — Т. 59, вып. 3. — С. 719-720.
31. Толмачев А.А., Костюк А.Н., Козлов Э.С., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1990. — Т. 60, вып. 8. — С. 1752-1756.
32. Толмачев А.А., Костюк А.Н., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 6. — С. 1333-1341.
33. Tolmachev A.A., Kostyuk A.N., Kozlov E.S. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1992. — Vol. 3, №2. — P. 163-176.
34. Толмачев А.А., Костюк А.Н., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 8. — С. 1912-1913.
35. Tolmachev A.A., Kostyuk A.N., Kozlov E.S., Pinchuk A.M. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1993. — Vol. 77. — P. 158.
36. Tolmachov A.A., Kostyuk A.N., Dovgopoly S.I. et al. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1997. — Vol. 123. — P. 125-140.
37. Kostyuk A.N., Lysenko N.V., Marchenko A.P. et al. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1998. — Vol. 139. — P. 209-229.
38. Толмачев А.А., Костюк А.Н., Козлов Э.С. и др. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 7. — С. 1607-1617.
39. Kostyuk A.N., Svyaschenko Y.V., Volochnyuk D.M. et al. // *Tetrahedron Lett.* — 2003. — Vol. 44, №34. — P. 6487-6491.
40. Kostyuk A.N., Svyaschenko Y.V., Volochnyuk D.M. // *Tetrahedron.* — 2005. — Vol. 61, №39. — P. 9263-9272.
41. Svyaschenko Y.V., Kostyuk A.N., Varnych B.V., Volochnyuk D.M. // *Tetrahedron.* — 2007. — Vol. 63, №25. — P. 5656-5664.
42. Толмачев А.А., Потиха Л.М., Юрченко А.А. и др. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 10. — С. 2358-2360.
43. Ошовский Г.В., Толмачев А.А., Меркулов А.С., Пинчук А.М. // *Изв. РАН, серия хим.* — 1998. — №9. — С. 1797-1810.
44. Толмачев А.А., Меркулов А.С., Ошовский Г.В., Роженко А.Б. // *ЖОХ.* — 1996. — Т. 66, вып. 11. — С. 1930.
45. Толмачев А.А., Меркулов А.С., Ошовский Г.В. // *ХГС.* — 1997. — №7. — С. 1000-1001.
46. Oshovsky G.V., Pinchuk A.M., Chernega A.N. et al. // *Mendeleev Commun.* — 1999. — Vol. 9, №1. — P. 38-39.
47. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1989. — Т. 59, вып. 5. — С. 1193-1194.
48. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 4. — С. 859-863.
49. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1992. — Т. 62, вып. 5. — С. 1060-1064.
50. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1990. — Т. 60, вып. 12. — С. 2674-2679.
51. Ivonin S.P., Kopteva S.D., Serdyuk V.N. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2001. — Vol. 12, №7. — P. 652-657.
52. Толмачев А.А., Меркулов А.С., Юрченко А.А., Пинчук А.М. // *ЖОХ.* — 1997. — Т. 67, вып. 6. — С. 1033-1034.
53. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 4. — С. 863-867.
54. Tolmachev A.A., Ivonin S.P., Pinchuk A.M. // *Heteroatom. Chem.* — 1995. — Vol. 6, №5. — P. 407-413.
55. Tolmachev A.A., Chaikovskaya A.A., Kopteva S.D. et al. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1999. — Vol. 147. — P. 483-488.
56. Ivonin S.P., Tolmachev A.A., Pinchuk A.M. // *Heteroatom. Chem.* — 2002. — Vol. 13, №3. — P. 223-238.
57. Ivonin S.P., Terikovskaya T.E., Chaikovskaya A.A. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1999. — Vol. 10, №3. — P. 213-221.
58. Tolmachev A.A., Ivonin S.P., Terikovskaya T.E. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1999. — Vol. 10, №3. — P. 223-230.
59. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Чайковская А.А., Териковская Т.Е. // *ЖОХ.* — 1995. — Т. 65, вып. 12. — С. 2059-2060.
60. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1990. — Т. 60, вып. 7. — С. 1668-1669.
61. Толмачев А.А., Юрченко А.А., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 6. — С. 1480-1481.
62. Толмачев А.А., Юрченко А.А., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1992. — Т. 62, вып. 5. — С. 1188-1190.
63. Толмачев А.А., Юрченко А.А., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1992. — Т. 62, вып. 5. — С. 1190-1192.

64. Tolmachev A.A., Yurchenko A.A., Kozlov E.S., Shulezhko V.A. // *Heteroatom. Chem.* — 1993. — Vol. 4, №4. — P. 343-360.
65. Tolmachev A.A., Sviridon A.I., Kostyuk A.N. // *Heteroatom. Chem.* — 1995. — Vol. 6, №5. — P. 449-459.
66. Толмачев А.А., Свиридон А.И., Костюк А.Н. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 6. — С. 1437-1438.
67. Толмачев А.А., Свиридон А.И., Костюк А.Н. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 8. — С. 1904-1906.
68. Tolmachev A.A., Chernega A.N., Konovets A.I. // *Heteroatom. Chem.* — 1998. — Vol. 9, №1. — P. 41-49.
69. Marchenko A.P., Koidan G.N., Kostyuk A.N. et al. // *J. Org. Chem.* — 2006. — Vol. 71, №22. — P. 8633-8636.
70. Konovets A.I., Kostyuk A.N., Pinchuk A.M. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2003. — Vol. 14, №3. — P. 452-458.
71. Толмачев А.А., Семенова М.Г., Свиридон А.И. и др. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 6. — С. 1344-1349.
72. Беленький Л.И., Чувылкин Н.Д. // *ХГС.* — 1996. — №11/12. — С. 1535-1563.
73. Толмачев А.А., Юрченко А.А., Семенова М.Г., Феценко Н.Г. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 3. — С. 714-716.
74. Tolmachev A.A., Yurchenko A.A., Merculov A.S. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1999. — Vol. 10, №7. — P. 585-597.
75. Толмачев А.А., Зарудницкий Е.В., Юрченко А.А., Пинчук А.М. // *ХГС.* — 1999. — №9. — С. 1261-1263.
76. Kotarov I.V., Strizhak A.V., Kornilov M.Yu. et al. // *Synthetic Commun.* — 2000. — Vol. 30, №2. — P. 243-252.
77. Pinchuk A.M., Yurchenko A.A., Oshovsky G.V. et al. // *Polish. J. Chem.* — 2001. — Vol. 75. — P. 1137-1146.
78. Толмачев А.А., Зарудницкий Е.В., Довгопольный С.И. и др. // *ХГС.* — 1999. — №10. — С. 1432-1433.
79. Зарудницкий Е.В., Первак И.И., Чеботило А.А. и др. // *Укр. хим. журн.* — 2002. — Т. 68, №11. — С. 38-42.
80. Zarudnitskii E.V., Yurchenko A.A., Merkulov A.S. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2005. — Vol. 16, №7. — P. 648-655.
81. Tolmachev A.A., Yurchenko A.A., Kozlov E.S. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1995. — Vol. 6, №5. — P. 419-432.
82. Pushchikov A.O., Krotko D.G., Volochnyuk D.M., Tolmachov A.A. // *Synlett.* — 2001. — №6. — P. 860-862.
83. Чеботило А.А., Юрченко А.А., Толмачев А.А. // *ХГС.* — 2001. — №4. — С. 569.
84. Tolmachov A.A., Kostyuk A.N., Dovgopoly S.I. et al. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 1997. — Vol. 123. — P. 125-140.
85. Ивонин С.П., Чайковская А.А., Кудря Т.Н. и др. // *ХГС.* — 1998. — №8. — С. 1275.
86. Ivonin S.P., Tolmachev A.A., Chaikovskaya A.A. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2001. — Vol. 12, №7. — P. 658-664.
87. Pinchuk A.M., Ivanov V.V., Zarudnitskii E.V. et al. // *Phosphorus, Sulfur and Silicon and Relat. Elem.* — 2002. — Vol. 177. — P. 1767-1769.
88. Chekotilo A.A., Kostyuk A.N., Pinchuk A.M., Tolmachev A.A. // *Heteroatom. Chem.* — 2003. — Vol. 14, №1. — P. 23-28.
89. Zarudnitskii E.V., Ivanov V.V., Yurchenko A.A. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2002. — Vol. 13, №2. — P. 146-152.
90. Толмачев А.А., Пушечников А.О., Кротко Д.Г. и др. // *ХГС.* — 1998. — №9. — С. 1275-1278.
91. Tolmachev A.A., Dovgopoly S.I., Kostyuk A.N. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 1999. — Vol. 10, №1. — P. 1-8.
92. Ivonin S.P., Pushchikov A.O., Tolmachev A.A. // *Heteroatom. Chem.* — 2002. — Vol. 13, №2. — P. 107-114.
93. Oshovsky G.V., Pinchuk A.M., Tolmachev A.A. // *Mendeleev Commun.* — 1999. — Vol. 9, №4. — P. 161-162.
94. Ковалева С.А., Чубарук Н.Г., Пинчук А.М., Толмачев А.А. // *ХГС.* — 2001. — №9. — С. 1287-1289.
95. Volochnyuk D.M., Kovaleva S.A., Chernega A.N. et al. // *Synthesis.* — 2006. — №10. — P. 1613-1624.
96. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Харченко А.В., Козлов Э.С. // *ЖОХ.* — 1991. — Т. 61, вып. 12. — С. 2780-2781.
97. Толмачев А.А., Ивонин С.П., Козлов Э.С., Харченко А.В. // *ЖОХ.* — 1993. — Т. 63, вып. 1. — С. 222-224.
98. Tolmachev A.A., Ivonin S.P., Anishchenko A.A., Pinchuk A.M. // *Heteroatom. Chem.* — 1998. — Vol. 9, №5. — P. 1-10.
99. Ivonin S.P., Anishchenko A.A., Kurochkin A.F., Tolmachev A.A. // *Heteroatom. Chem.* — 1999. — Vol. 10, №6. — P. 559-563.
100. Ivonin S.P., Terikovskaya T.E., Tolmachev A.A. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2003. — Vol. 14, №3. — P. 258-261.
101. Ошовский Г.В., Толмачев А.А., Юрченко А.А. и др. // *Изв. РАН, серия хим.* — 1999. — №7. — С. 1353-1358.
102. Ковалева С.А., Ивонин С.П., Пинчук А.М., Толмачев А.А. // *ХГС.* — 2001. — №9. — С. 1285-1287.
103. Pinchuk A.M., Kovalyova S.A., Ivonin S.P. et al. // *Heteroatom. Chem.* — 2001. — Vol. 12, №7. — P. 641-651.