



УДК 547.922.5+532.783
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.9.2024.10>

СИНТЕЗ НОВИХ ФОСФОРВМІСНИХ ХОЛЕСТЕРИЛОВИХ ЕСТЕРІВ АЦИЛЮВАННЯМ ФОСФОНІЄВИХ СОЛЕЙ

В. В. Листван¹, Н. В. Кусяк², О. Ю. Кичкирук³

Досліджувався процес ацилювання алкіліденфосфоранів, що містять різні функціональні групи у молекулах, залежність реакції від умов, середовища, характеру реагентів тощо. Вивчалась можливість введення у молекулу фосфоріліду залишку холестеролу та використання такої реакції для отримання нових холестерилвмісних похідних, що можуть мати практично цінні властивості (зокрема, як рідкі кристали), а також слугувати вихідними сполуками для подальшого отримання нових ненасичених похідних холестеролу з різними структурними фрагментами, зокрема, за реакцією Віттіга.

Досліджено взаємодію фосфорілідів з холестерилхлороформіатом, що призводить до утворення алкіліденфосфоранів з холестерилвим залишком, встановлено умови та особливості проходження цієї реакції в однофазній та двофазній системі, із застосуванням різних основ. Отримано низку нових ацильованих ілідів фосфору, що містять різні аліфатичні і ароматичні залишки, у тому числі фрагменти, притаманні деяким відомим біологічно активним сполукам. Показано, що проблема недостатньої стійкості деяких алкіліденфосфоранів може бути розв'язана застосуванням як вихідних сполук фосфонієвих солей, без проміжного виділення відповідних ілідів в індивідуальному стані. Для уникнення процесу переілювання реакцію проводили в присутності триетиламіну (однофазна система) чи натрій гідроксиду (двофазна система). Даний метод має істотні переваги перед відомими з літературних джерел, оскільки не вимагає застосування високої порівняно дорогих і складних у роботі реагентів, як металоорганічні сполуки, і знижує вимоги щодо техніки експерименту. Деякі з отриманих ацильованих ілідів фосфору містять структурні фрагменти, що роблять перспективними подальші дослідження їх біологічної активності. Характер поведінки деяких отриманих сполук вказує на утворення мезофази при плавленні, що свідчить про можливі рідкокристалічні властивості.

Ключові слова: ілід, алкіліденфосфоран, фосфонієва сіль, ацилювання

¹ кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: listvan@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8366-2813

² кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: nkusyak@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0143-3399

³ кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: ranova_o_yu@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0558-1647

SYNTHESIS OF THE NEW PHOSPHORUS CONTAINING CHOLESTERYL ESTERS BY ACYLATION OF PHOSPHONIUM SALTS

V. V. Lystvan, N. V. Kusiak, O. Yu. Kychkyruk

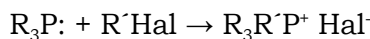
The process of acylation of alkylidenephosphoranes, which contain different functional groups in molecules, the dependence of the reaction on the conditions, the pH level, the nature of the reagents etc have been investigated. The possibility of introducing of cholesterol fragment into the ylid molecule and application of the reaction for obtaining of the new cholesterol-containing derivatives that can have practically valuable properties (particularly liquid crystals) and can be used as initial compounds for further obtaining of new unsaturated cholesterol derivatives with extended structural fragments have been investigated. The interaction of phosphorylides with cholesteryl chloroformate, which leads to the formation of alkylidene phosphoranes with a cholesteryl fragment have been studied, conditions and features of this reaction in one-phase and two-phase systems, with application of the different bases, have been established. A number of new acylated phosphorus ylides containing various aliphatic and aromatic structural fragments, including ones of some known biologically active compounds have been obtained. It is shown that the problem of insufficient stability of some alkylidenephosphoranes can be solved by application of phosphonium salts as initial compounds without intermediate isolation of the corresponding ylides in the individual state. To avoid the re-ylidation process, the reaction was carried out in the presence of triethylamine (one-phase system) or sodium hydroxide (two-phase system). This method has significant advantages over those known from literary sources as it does not require an application of such expensive and exigent for experimental conditions reagents as organometallic compounds. Some of the obtained acylated phosphorus ylides contain structural fragments, which make further studies of their biological activity promising. The behavior of some obtained compounds indicates the formation of a mesophase during melting, that can be a sign of liquid crystal properties.

Key words: ylid, alkylidenephosphorane, phosphonium salt, acylation.

Вступ

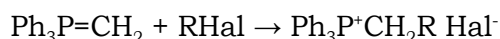
Фосфонієві солі. Фосфонієві солі можуть бути окреслені як похідні катіону фосфонію PH_4^+ , але один або декілька атомів Н заміщені на алкільні, алкоксильні, ацильні, аромільні тощо групи.

Для отримання фосфонієвих солей найчастіше застосовується алкілування чи арилювання третинних фосфінів відповідними галогенопохідними, хоча даний процес може ускладнюватись побічними нуклеофільними процесами за наявності алкілгалогенідів електроноакцепторних груп.

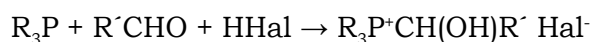


Кватернізація третинних фосфінів відбувається у безводному середовищі.

Фосфонієві солі можна також отримувати з фосфорілідів, зокрема, приєднанням до них алкілгалогенідів, хоча частіше вони навпаки слугують вихідними речовинами для отримання відповідних ілідів.



Фосфонієві солі, що містять гідроксильні групи в α -положенні, можуть бути отримані з фосфінів та альдегідів у присутності кислот:



Фосфонієві солі відзначаються досить високою і різнобічною хімічною активністю, зокрема, завдяки здатності фосфору до утворення пентакоординованих перехідних комплексів, чому сприяє його великий атомний радіус і можливість участі d-орбіталей. Це дає змогу активно їх використовувати в органічному синтезі (Noroosi-Shad et al., 2022). Даний клас сполук використовують, зокрема, для отримання ілідів фосфору, що в свою чергу можуть слугувати напівпродуктами для отримання алкенів. Фосфонієві солі використовують також у виробництві інсектицидів і фунгіцидів. Деяким із них притаманна також корисна фізіологічна дія, зокрема антимікробна активність (Nunes et al., 2024).

Алкіліденфосфорани. Алкіліденфосфорани, які ще називають фосфорілідами чи метиленфосфінами) – сполуки, що містять подвійний зв'язок $\text{P}=\text{C}$. Для отримання цих сполук можна також використовувати третинні фосфіни, однак більш розповсюджений метод ґрунтуються на відщепленні гідрогенгалогенідів від фосфонієвих солей під дією основ. Характер зв'язку $\text{P}=\text{C}$ наближається до семіполярного, електронна густина значною мірою зсунута від атома Фосфору до ілідного атома Карбону.

Результати та їх обговорення

Метою роботи було дослідження реакції фосфорілідів з холестерилхлороформіатом, синтез алкіліденфосфоранів з холестериловим залишком, встановлення умов та особливостей проходження цієї реакції в однофазній системі (хлороформ у присутності триетиламіну) та двофазній системі (CH₂Cl₂ – 50% водний розчин NaOH).

Нами було проведено низку реакцій між названим ацилгалогенідом і різними фосфонієвими солями, що містять різні аліфа-

тичні і ароматичні залишки, у тому числі фрагменти, притаманні деяким відомим біологічно активним сполукам.

Недостатня стійкість деяких алкіліденфосфоранів спонукала застосувати описаний раніше (Листван та ін., 2022) метод, що полягає на застосуванні як вихідних сполук фосфонієвих солей, без проміжного виділення відповідних ілідів в індивідуальному стані.

Реакція в однофазній системі відбувається за схемою:

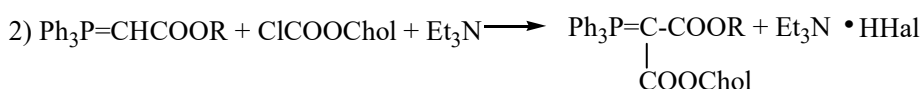
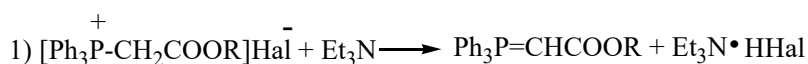


Схема реакції у двофазній системі:



Взаємодія фосфоранів з хлорангідридом йде за типом переїдування й половина взятого в реакцію фосфорану повертається у вигляді фосфонієвої солі. Саме для уникнення цього реакцію проводили в присутності триетиламіну (однофазна система) чи натрій гідроксиду (двофазна система), що як основи зв'язують HCl чи HBr. Перевагою даного методу є доступність реагентів і простота проведення синтезу, оскільки описані в літературі реакції даного типу із застосуванням алкоголятів або металоорганічних сполук (феніллітій чи бутиллітій) висуває дуже жорсткі вимоги до осушування розчинників і навіть застосування інертної атмосфери.

З'ясувалось, що для одержання ілідів із солей достатньо таких основ як луки, з якими безумовно зручніше працювати, ніж з чутливими до вологи алкоголями чи тим більше металоорганічними основами. Разом з тим, використання натрій гідроксиду дає можливість проводити ацилювання в одну стадію з використанням фосфонієвих солей без попереднього виділення з них алкіліденфосфоранів.

В умовах міжфазного каталізу легко ацилюються передусім ариаметилентрифенілфосфорани, що іноді називають напівстабільними чи «помірними» ілідами. Вони утворюються в органічній фазі при перемі-

шуванні фосфонійгалогенідів бензильного типу в CH₂Cl₂ з 50-% водним розчином NaOH під дією іонів OH⁻, що переносяться в органічну фазу самим фосфоній-катионом. Тому в застосовуванні спеціального каталізатора немає потреби. При додаванні до цього розчину ацилгалогеніду відразу розпочинається реакція ацилювання.

Вдалось також встановити, що в умовах МФК ароматичні хлорангідриди типу бензоїлхлориду чи близькі до нього за реакційною здатністю або більш активні легко ацилюють фосфорани і дають продукти з задовільним чи хорошим виходом. Дія хлорангідридів зі зниженою реакційною здатністю не призводить в цих умовах до утворення ацильованих фосфоранів. Це стосується, зокрема, і о-бромобензоїлхлориду через просторові затруднення, зумовлені наявністю атома бромову в о-положенні.

Хлорангідриди аліфатичних кислот також не дають ацильованих фосфоранів в умовах МФК або утворюють їх в незначних кількостях. Можливо, це пов'язано з великою їх розчинністю у водному середовищі. Ангідриди карбонових кислот та інші, менш активні порівняно з хлорангідридами ацилюючі засоби, не здатні ацилювати фосфоріліди в цих умовах. Стеричні фактори також ускладнюють реакцію ацилювання.

Важливим фактором у застосуванні цього методу є слабкість фосфонієвих солей в ролі основ, порівняно з натрій гідроксидом.

При проведенні реакції в однофазній системі послідовність процесів наступна: фосфонієву сіль та холестерилхлороформіат розчиняють у хлороформі і додають триетиламін як основу. Розчин залишають при кімнатній температурі на добу для остаточного завершення реакції. Після випаровування розчинника продукт реакції промивали і висушували, а далі очищували перекристалізацією з гептану, метанолу, 2-пропанолу тощо.

У випадку двофазної системи після розчинення еквімолярних кількостей фосфонієвої солі та холестерилхлороформіату в метиленхлориді до реакційної суміші додають розчин натрій гідроксиду. Суміш інтенсивно перемішували протягом однієї-двох годин та залишали при кімнатній температурі на добу для остаточного завершення реакції. Процедура виділення та очищення продукту реакції аналогічна до попередньо описаної.

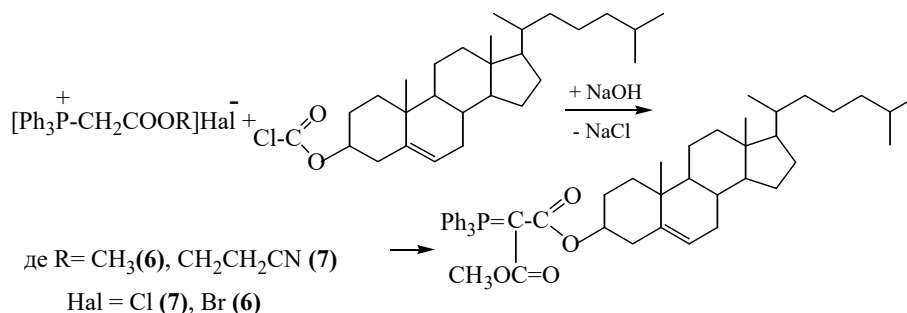
Багатостадійний процес ацилювання фосфонієвої солі з перетворенням її під дією триетиламіну чи натрій гідроксиду в ацильований фосфорилід дозволив отримати нові фосфориліди, що містять холестеринний залишок. Встановлено, що реакція повністю проходить протягом 1–2 днів при кімнатній температурі. В реакцію потрібно брати фосфонієву сіль, холестерилхлороформіат та основу в мольному співвідношенні 1:1:2.

Описані методики дозволили провести ефективно ацилювання фосфонієвих солей 4, 5 з естеровими групами у складі катіону. Вихідні солі отримували взаємодією трифенілфосфіну з естерами хлоро- чи бромової кислоти:



де Hal=Cl (5), Br (4); R= -CH₃ (4), -CH₂CH₂-CN (5)

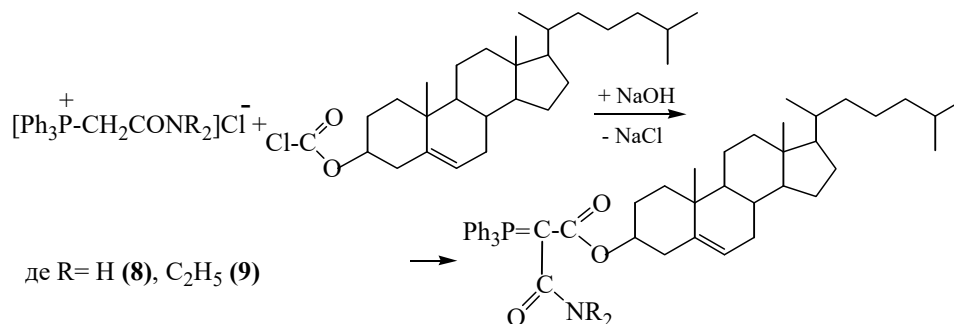
Їх реакція з холестерилхлороформіатом дозволила отримати ацильовані фосфорани 6, 7.



Будова фосфорилідів 6 та 7 підтверджена даними ІЧ-спектроскопії (рис. 1).

Амідні групи, як і естерові, активують фосфонієву сіль достатньою мірою для про-

тікання реакцій ацилювання в аналогічних умовах, що дозволило на основі фосфонієвих солей з незаміщеною та заміщеною амідними групами 8, 9:



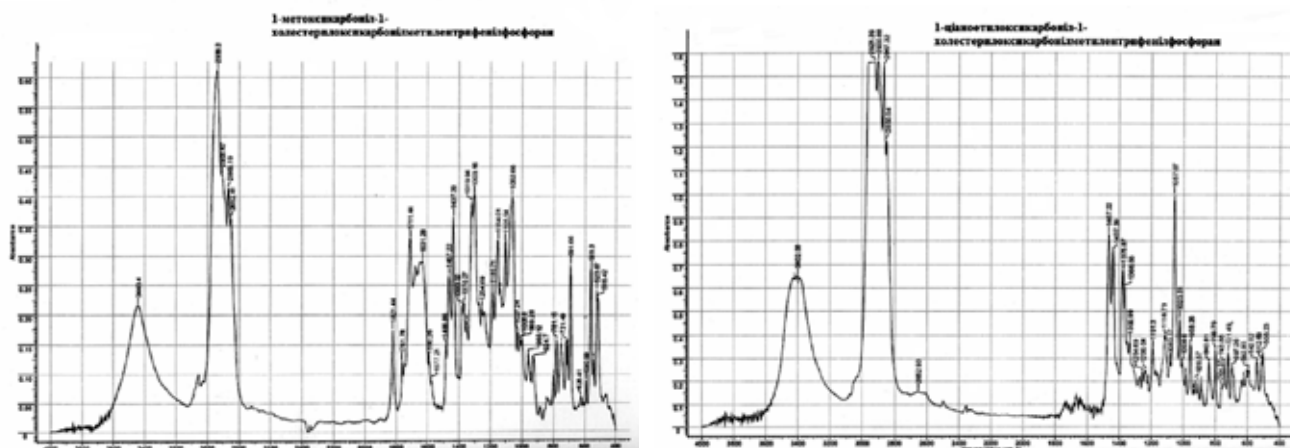
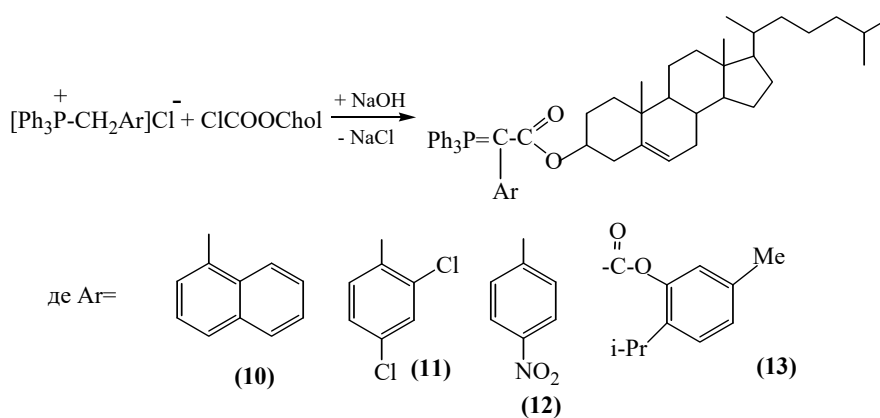


Рис. 1. ІЧ-спектр фосфорлідів 6, 7

Слід відзначити, що характер плавлення фосфорана 8 вказує на утворення мезофази, що свідчить про наявність у сполуки рідкокристалічних властивостей (Sykes, 1996).

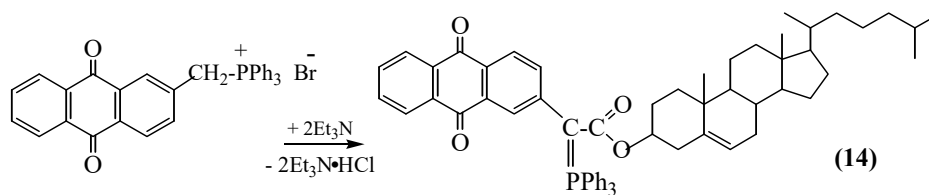
Наступні використані нами фосфонієві солі бензильного типу виявилось неможливим ацилювати в умовах однофазної системи, оскільки основність триетиламіну недостатня для перетворення цих солей у відповідні фосфорани.



Проведені перетворення дозволили отримати фосфорани 10–13 з ароматичними залишками, у тому числі залишок терпеноїду тимоли, що дає підстави прогнозувати наявність біологічної активності отриманого

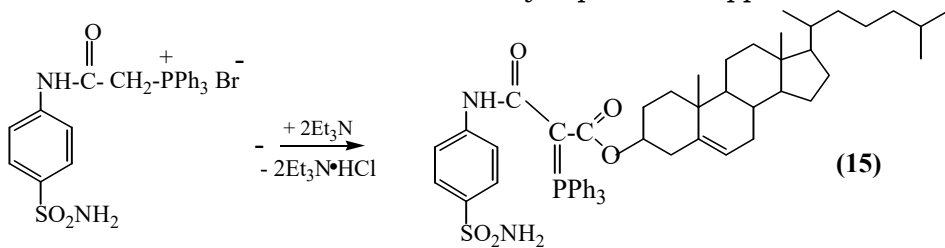
іліду 13. Будова останнього підтверджена даними ІЧ-спектроскопії (рис. 2).

Окремо слід відзначити отримання фосфорану 14, що містить залишок антрахінону:



Речовина 14, як і багато інших похідних холестеролу, плавиться з утворенням мезофази.

Нами отримано також ілід фосфору 15, що містить, окрім холестерилового, ще і сульфамідний фрагмент:



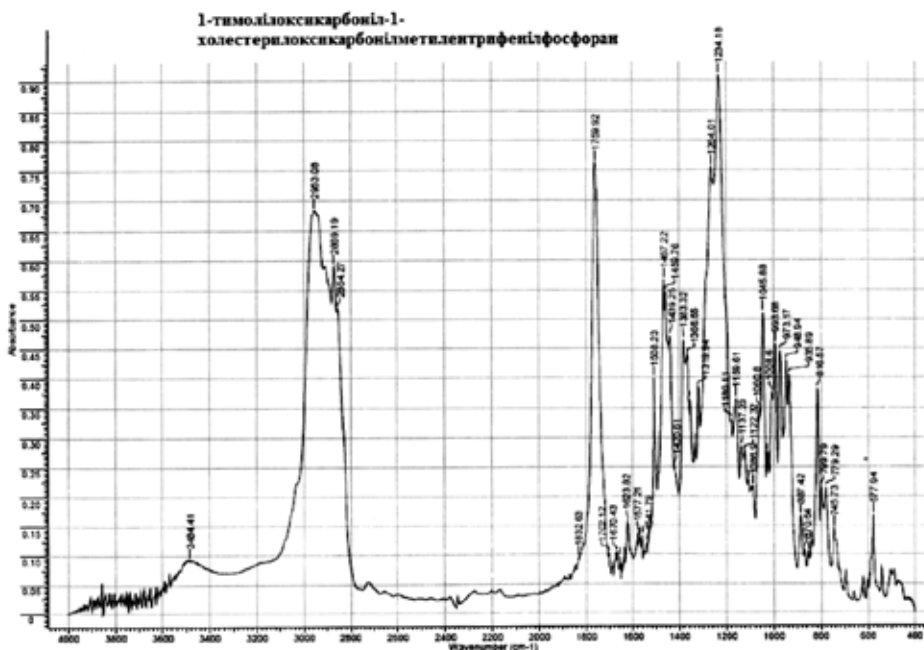


Рис. 2. ІЧ-спектр фосфоріду 13.

Оскільки аміди сульфанілової кислоти становлять окремий і широко відомий клас антимікробних препаратів, наявність відповідного структурного фрагменту в складі молекули робить перспективними подальші дослідження отриманої сполуки з огляду на їх можливу антибактеріальну активність.

Експериментальна частина

1-метоксикарбоніл-1-олестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (6),

Мг-747; $m - 2,29$ г; $T_{пл} 169^\circ$; $\eta - 93\%$

$n(ФС) = 0,002$ моль; $n(Ххф) = 0,002$ моль

0,74 г фосфонієвої солі та 0,9 г холестерилхлороформіату розчинили у 15мл метиленхлориду, додали 2 мл 1н розчину натрій гідроксиду, спостерігали пожовтіння розчину. Реакційну суміш залишили на 24 год при кімнатній температурі, після чого відділили органічний шар, промили, випарували. Продукт кристалізували з метанолу. Утворилась біла кристалічна речовина, будову якої було досліджено за допомогою інфрачервоної спектроскопії.

1-ціаноетилоксикарбоніл-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (7)

Мг - 786; $m - 0,7$ г; $T_{пл} 140-149^\circ$; $\eta - 80\%$

$n(ФС) = 0,002$ моль; $n(Ххф) = 0,002$ моль

Методика отримання аналогічна реч. 6

1-амінокарбоніл-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (8)

$m - 0,4$ г; $T_{пл} 210-215^\circ$; $\eta - 60\%$

$n(ФС) = 0,002$ моль $n(Ххф) = 0,002$ моль

В конічну колбу до 1,07 г фосфонієвої солі та 1,5 г холестерилхлороформіату додали 20 мл метиленхлориду. Після додавання 3 мл 1н розчину натрій гідроксиду відбулось розчинення ФС. Розчин залишили при кімнатній температурі на 24 год. Після випаровування розчинника та промивання продукт очищували перекристалізацією з 2-пропанолу,

1-діетиламінокарбоніл-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (9)

Мг - 788.1; $m - 0,25$ г; $T_{пл} 150^\circ$; $\eta - 77\%$

$n(ФС) = 0,002$ моль; $n(Ххф) = 0,002$ моль

0,82 г фосфонієвої солі та 0,9 г холестерилхлороформіату розчинили в 15 мл метиленхлориду з доданням 2 мл 1 н розчину натрій гідроксиду. Суміш залишили на добу в закритій колбі. Після промивання органічного шару розчинник випарували, продукт промили водою, висушили та перекристалізували з пропанолу.

1-арил-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфорани (10-12),

1-тимолілоксикарбоніл-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (13)

До суспензії 0,002 моль фосфонієвої солі та 0,002 моль холестерилхлороформіату в 15 мл метилхлориду додавали при перемішуванні 2 мл 1н розчину NaOH. Утворення продукту реакції супроводжувалось появою інтенсивного забарвлення, від жовтого до червоно-оранжевого. Реакційну суміш перемішували протягом 2 год, розчинник випаровували, сирий продукт очищували перекристалізацією з метанолу.

1-(1-нафтил)-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (10)

Mr – 815; m – 0,25 г; T_{пл} 145°; η – 77%

n(Фс) = 0,002 моль; n(Ххф) = 0,002 моль

1-(2,4-дихлорофеніл)-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (11)

Mr – 834; m – 0,45 г; T_{пл} 145°; η – 87%

1-(4-нітрофеніл)-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (12)

Mr – 809,9; m – 0,31 г; T_{пл} 188°; η – 57%

1-тимолілоксикарбоніл-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (13)

Mr – 865,1; m – 0,56 г; T_{пл} 142°; η – 72%

1-(2-антрахіноніл)-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (14)

Mr – 895; m – 0,66 г; T_{пл} 251-255°; η – 47%

n(Фс) = 0,002 моль; n(Ххф) = 0,002 моль

1,13 г фосфонієвої солі та 0,9 г холестерилхлороформіату розчинили в 25 мл хлороформу, після додавання 2 мл триетиламіну утворився темно-зелений розчин, який залишили на 2 доби при кім-

натній температурі. Жовтий драглистий осад відфільтрували та висушили. Після перекристалізації з 2-пропанолу отримали 0,66 г продукту.

1-(4-амідосульфаниламінокарбоніл)-1-холестерилоксикарбонілметилентрифенілфосфоран (15)

Mr – 887; m – 1,66 г; T_{пл} 315°; η – 97%

n(Фс) = 0,002 моль; n(Ххф) = 0,002 моль

Синтез проводили в однофазній системі. 1,11 г фосфонієвої солі та 0,9 г холестерилхлороформіату розчинили в 15 мл хлороформу і додали 2 мл триетиламіну; реакційний розчин залишили на 24 год при кімнатній температурі. Після випаровування розчинника осад очищували перекристалізацією.

Висновки

Досліджено реакцію ацилювання алкіліденфосфоранів дією холестерилхлороформіату. Показано перевагу двофазного синтезу, що забезпечує кращий вихід продукту і вищу швидкість реакції.

Синтезовано низку нових сполук, що поєднують функцію естерів холестеролу з фрагментом ацильованих алкіліденфосфоранів та іншими функціональними групами.

З'ясовано, що безпосередня взаємодія між фосфонієвими солями та ацилюючими реагентами у присутності основ дозволяє уникнути проміжного виділення відповідних ілідів, скоротивши процес до однієї стадії.

Показано, що деякі отримані ацильовані алкіліденфосфорани при плавленні схильні до утворення мезофази, що може свідчити про наявність у них рідкокристалічних властивостей.

Список використаної літератури

- Листван В.В., Жмурчук А.В., Листван В.М. Синтез потенційних рідких кристалів з холестеринним фрагментом за реакцією Віттіга. *Український журнал природничих наук*. 2022. № 2. С. 143–154. <https://doi.org/10.35433/naturaljournal.2.2023.144-154>.
- Abell A.D., Doyle I.R., Massy-Weslrop R.A. The Wittig Reaction with Glutaric and Succinic Anhydrides. *Aust. J. Chem.* 1982. V. 35. P. 2277–2287. <https://doi.org/10.1071/CH9822277>.
- Comprehensive organic chemistry. Edited by Sir D. Barton and W. D. Ollis. Pergamon, Oxford, England. 1979. 1227 p. <https://doi.org/10.1002/jps.2600690651>.
- Freidzon J.S., Kharitonov A.V., Shibaev V.P., Plate N.A. Liquid-Crystalline State of Cholesterol-Containing Monomers. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1982. V. 88. № 1/4. P. 87–97. <https://doi.org/10.1080/00268948208072588>.
- Guo M. (Ed.) Cellulose-derived cholesteric liquid crystal: Towards smart and sustainable colorimetric sensors. *Ind. Crop. Prod.* 2023. V. 192. P.116007. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116007>.
- Heravi M.M., Zadsirjan V., Daraie M., Ghanbarian M. Applications of Wittig Reaction in the Total Synthesis of Natural Macrolides. *Chemistry Select.* 2020. V. 5. I. 31. P. 9654-9690. <https://doi.org/10.1002/slct.202002192>.

Huang R. (Ed.) Remotely Controlling Drug Release by Light-Responsive Cholesteric Liquid Crystal Microcapsules Triggered by Molecular Motors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. V. 49. I. 13. P. 59221–59230. <https://doi.org/10.1021/acscami.1c16367>.

Karanam P., Reddy G.M., Lin W. Strategic exploitation of the Wittig reaction: Facile synthesis of heteroaromatics and multifunctional olefins. *Synlett*. 2018. V. 29 (20). P. 2608–2622. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1610486>.

Noroozi-Shad N., Gholizadeh M., Sabet-Sarvestani H. Quaternary phosphonium salts in the synthetic chemistry: Recent progress, development, and future perspectives. *J. Mol. Struct.* 2022. P. 1257. 132628. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132628>

Nunes B. (Ed.) Antimicrobial activity and cytotoxicity of novel quaternary ammonium and phosphonium salts. *J. Mol. Liq.* 2024. V. 401. P. 124616. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124616>.

Scarangella A., Soldan V., Mitov M. Biomimetic design of iridescent insect cuticles with tailored, self-organized cholesteric patterns. *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17884-0>.

Oxygen-Containing compounds. Edited by Stoddart J.F. *Comprehensive organic chemistry*. Pergamon, Oxford, England. 1979. <https://doi.org/10.1002/jps.2600690651>.

Sykes P. *Guidebook to Mechanism in Organic Chemistry*. 6th edition. Pearson Education, 1996. 428 p.

Takeda T. Modern carbonyl olefination-methods and applications. *Synthesis*. 2004. V. 09. P. 1532–1532.

Zhang W. (Ed.) Temperature Responsive Photonic Devices Based on Cholesteric Liquid Crystals. *Adv. Photonics. Res.* 2021. V. 2. I. 7. <https://doi.org/10.1002/adpr.202100016>.

References

Lystvan, V.V., Zhmurchuk, A.V., & Lystvan, V.M. (2022). Syntez potentsiynych ridkych krystaliv z kholesterylovym frahmentom za reaktsiyeyu Vittiha [Synthesis of potential liquid crystals with cholesteryl fragment by Wittig reaction]. *Ukrayinskyj zhurnal pryrodnychuyh nauk [Ukrainian journal of natural sciences]*, 2, 143–154. <https://doi.org/10.35433/naturaljournal.2.2023.144-154> [in Ukrainian].

Abell, A.D., Doyle, I.R., & Massy-Weslropp, R.A. (1982). The Wittig Reaction with Glutaric and Succinic Anhydrides. *Aust. J. Chem*, 35, 2277–2287. <https://doi.org/10.1071/CH9822277> [in English].

Comprehensive organic chemistry. (1979). Edited by Sir D. Barton and W.D. Ollis. Pergamon, Oxford, England. <https://doi.org/10.1002/jps.2600690651> [in English].

Freidzon, J.S., Kharitonov, A.V., Shibaev, V.P., & Plate, N.A. (1982). Liquid-Crystalline State of Cholesterol-Containing Monomers. *Mol. Cryst. Liq. Cryst*, 88 (1/4), 87–97. <https://doi.org/10.1080/00268948208072588> [in English].

Guo, M. (Ed.) (2023). Cellulose-derived cholesteric liquid crystal: Towards smart and sustainable colorimetric sensors. *Ind. Crop. Prod*, 192, 116007. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116007> [in English].

Heravi, M.M., Zadsirjan, V., Daraie, M., & Ghanbarian, M. (2020). Applications of Wittig Reaction in the Total Synthesis of Natural Macrolides. *Chemistry Select*, 5 (31), 9654–9690. <https://doi.org/10.1002/slct.202002192> [in English].

Huang, R. (Ed.) (2021). Remotely Controlling Drug Release by Light-Responsive Cholesteric Liquid Crystal Microcapsules Triggered by Molecular Motors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 49 (13), 59221–59230. <https://doi.org/10.1021/acscami.1c16367> [in English].

Karanam, P., Reddy, G.M., & Lin, W. (2018). Strategic exploitation of the Wittig reaction: Facile synthesis of heteroaromatics and multifunctional olefins. *Synlett*, 29 (20), 2608–2622. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1610486> [in English].

Noroozi-Shad, N., Gholizadeh, M., & Sabet-Sarvestani, H. (2022). Quaternary phosphonium salts in the synthetic chemistry: Recent progress, development, and future perspectives. *J. Mol. Struct*, 1257, 132628. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132628> [in English].

Nunes, B., Cagide, F., Borges, F., & Simões, M. (2024). Antimicrobial activity and cytotoxicity of novel quaternary ammonium and phosphonium salts. *J. Mol. Liq*, 401, 124616. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124616> [in English].

Scarangella, A., Soldan, V., & Mitov, M. (2022). Biomimetic design of iridescent insect cuticles with tailored, self-organized cholesteric patterns. *Nat. Commun*, 11, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17884-0> [in English].

Oxygen-Containing compounds. (1979). Edited by Stoddart J.F. *Comprehensive organic chemistry*. Pergamon, Oxford, England. <https://doi.org/10.1002/jps.2600690651>. [in English].

Sykes, P. (1996). *Guidebook to Mechanism in Organic Chemistry*. 6th edition. Pearson Education [in English].

Takeda, T. (2004). Modern carbonyl olefination-methods and applications. *Synthesis*, 09, 1532–1532 [in English].

Zhang, W. (Ed.) (2021). Temperature Responsive Photonic Devices Based on Cholesteric Liquid Crystals. *Adv. Photonics. Res*, 2 (7). <https://doi.org/10.1002/adpr.202100016> [in English].

Отримано: 12.06.2024

Прийнято: 09.08.2024