

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**О. В. ШАБЛИКІНА
О. О. ГРИГОРЕНКО**

**СТЕРЕОХІМІЯ.
ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ
(з прикладами розв'язку)**

Навчальний посібник
для студентів хімічного факультету

Київ 2025

УДК 54.022

Рецензенти:

д-р хім. наук, проф. П. П. Онисько
(Інститут органічної хімії НАН України),
д-р хім. наук, проф. М. С. Фрасинюк
(Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України ім. В. П. Кухаря),

*Рекомендовано до друку вченою радою хімічного факультету
(протокол № 11 від 19 березня 2025 року)*

*Ухвалено науково-методичною радою
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
(протокол № 06-25 від 24 квітня 2025 року)*

Стереохімія. Практичні завдання (з прикладами розв'язку): навч. посібник для студ. хім. ф-ту / О. В. Шабликін, О. О. Григоренко. – К., 2025. – 114 с.

Видання орієнтоване на студентів бакалаврату хімічного факультету та рекомендується для вивчення курсів вільного вибору "Загальна стереохімія", "Сtereохімія органічних сполук" та "Сtereохімія природних сполук". Посібник містить практичні завдання зі стереохімії різного рівня складності, які згруповано у тематичні розділи; розділ починається з розв'язку репрезентативної задачі з поясненнями щодо застосування теоретичних положень стереохімії на практиці. Для студентів природничих факультетів закладів вищої освіти.

УДК 54.022

ВСТУП

Стрімкий розвиток хімії спричинив появу безлічі різноманітних сполук, часто складної структури. З кожним роком все більше речовин переходить із категорії "екзотичних" конструкцій у розряд практично значущих матеріалів. Певна річ, властивості речовини визначаються її будовою, і не лише порядком сполучення атомів, але й розміщенням їх у просторі. Саме тому для сучасного спеціаліста-хіміка надзвичайно важливим є розуміння багатьох аспектів просторової будови молекул: від номенклатури стереоланок до стереоселективності хімічних перетворень, – усього того, що складає предмет *стереохімії*.

Це видання має на меті доповнити базові знання студентів зі стереохімії, викладені у класичних підручниках, шляхом застосування теоретичних положень до розв'язку актуальних практичних задач. Представлені в посібнику завдання різного рівня складності згруповано у відповідні розділи, і кожен розділ починається з розв'язку репрезентативної задачі з розгорнутими поясненнями основних положень та додатковою інформацією, яка може бути корисною для кращого розуміння розглянутого аспекту стереохімії.

Посібник орієнтований на студентів бакалаврату хімічного факультету та рекомендується для вивчення курсів вільного вибору "Загальна стереохімія", "Сtereохімія органічних сполук" та "Сtereохімія природних сполук".

Автори висловлюють вдячність професорам кафедри органічної хімії Володимиру Олексійовичу Ковтуненку та Володимиру Петровичу Хилі, чий лекції зі стереохімії стали концептуальним підґрунтям цього видання, а також Євгену Крохмалюку та Ярославу Петлінському за допомогу в підготовці та перевірці задач.

ЧАСТИНА 1

Молекулярна симетрія

Завдання

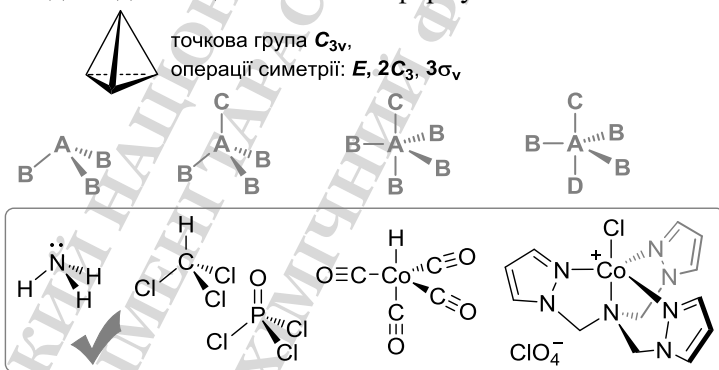
Наведіть приклади молекул, що належать до вказаних точкових груп симетрії.

1-1. а) C_{3v} ; б) D_{3h} ; в) T_d .

Відповідь

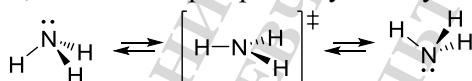
а)

Геометрична фігура, яка унаочнює цю точкову групу симетрії, – тригональна піраміда. Відповідно, для того, щоб молекула належала до цієї групи, потрібно виконати наступні умови: 1) три ідентичні атоми (групи) розташовані в площині у вершинах правильного трикутника; 2) "верх" і "низ" цієї умовної площини відрізняються. Нижче зображені можливі варіанти просторового розташування атомів у молекулах симетрії C_{3v} (різні атоми позначені А, В, С; зв'язки можуть мати будь-яку кратність), а також приклади сполук, які відповідають цим загальним формулам.



Віднесення певної молекули до тієї чи іншої загальної структури, чи навіть до точкової групи, певною мірою умовне та залежить від контексту. Гарним прикладом є молекула NH_3 . В основному стані атоми цієї молекули розташовані в кутах піраміди; проте атом Нітрогену можна розглядати як трикоординований, так і тетракоординований – якщо вважати пару

електронів четвертим замісником (цей прийом використовується в номенклатурі стереоланок). З іншого боку, потрібно врахувати, що молекула аміаку (як і переважної більшості органічних амінів) зазнає дуже швидкого конформаційного перетворення, яке називають пірамідальною інверсією. Молекула ніби "вивертається", унаслідок чого пара електронів Нітрогену по черговому опиняється то над, то під умовною площиною, яку утворюють атоми Гідрогену. Відбувається ця інверсія з частотою близько 30 мільярдів разів на секунду через планарний перехідний стан. На практиці це означає, що стереохімію перетворень аміаку найкраще описувати, якщо прийняти за основу суперпозицію усіх конформацій, тобто планарне розташування усіх атомів.



Уточнимо, що геометрія планарного перехідного стану молекули NH_3 відповідає точковій групі симетрії D_{3h} .

Цікаво також порівняти стереохімічні характеристики NH_3 та PH_3 . Через більший розмір атому Фосфору пірамідальна інверсія PH_3 досить повільна навіть за кімнатної температури, тому фосфіни доцільно розглядати лише як молекули пірамідальної будови. Важливий наслідок такої відмінності: аміни загальної формули $\text{NR}^1\text{R}^2\text{R}^3$ – ахіральні, а фосфіни $\text{PR}^1\text{R}^2\text{R}^3$ – хіральні.

Зауважимо, що це загальна тенденція: з метою оцінки стереохімічної поведінки молекули, яка зазнає дуже швидких конформаційних перетворень, за основу слід брати найбільш симетричну її конформацію, навіть якщо ця конформація найменш стабільна.

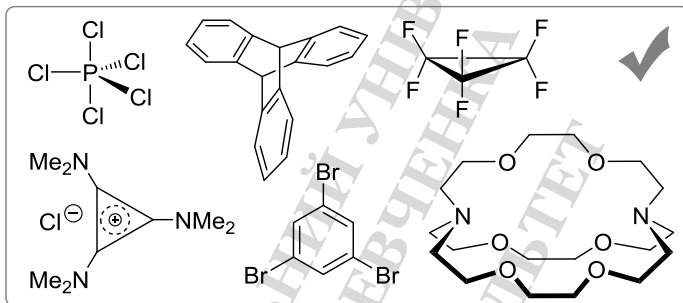
б)

Є щонайменше два різних варіанти розташування атомів у молекулах групи симетрії D_{3h} : 1) три ідентичні атоми (групи) знаходяться в площині у вершинах правильного трикутника, і ця площина є площиною симетрії молекули загалом (геометричні фігури – правильний трикутник та правильна тригональна біпіраміда); 2) шість ідентичних атомів (груп)

розташовані у вершинах тригональної призми. Групу симетрії D_{3h} мають, зокрема, планарний катіон CH_3^+ , молекула BF_3 , а також більш складні структури:



точкова група D_{3h} ,
операції симетрії: E , $2C_3$, $3C_2$, σ_h , $3\sigma_v$, $2S_3$

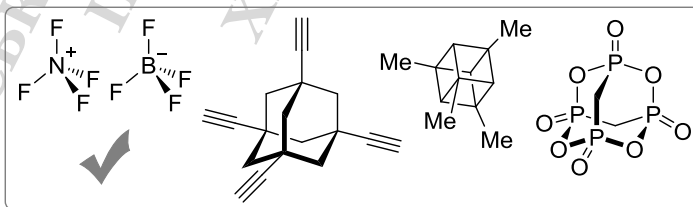


в)

Основним елементом будови структур, які відносяться до точкової групи симетрії T_d , є правильний тетраедр. Це, наприклад, такі молекули як метан та тетраметилсилан, аніони ClO_4^- та PO_4^{3-} (через делокалізацію в цих аніонах усі чотири зв'язки між центральним атомом і атомами Оксигену ідентичні), комплекс $\text{Ni}(\text{CO})_4$ тощо. Симетрію тетраедра мають також молекули з каркасом адамантану: власне адамантан, його похідні з чотирма ідентичними замісниками у положеннях 1,3,5,7, а також P_4O_{10} .



точкова група T_d ,
операції симетрії: E , $8C_3$, $3C_2$, $6\sigma_d$, $6S_4$



1-2. а) D_2 ; б) D_{2d} ; в) C_s .

1-3. а) $C_{\infty v}$; б) D_{6h} ; в) C_1 .

1-4. а) $D_{\infty h}$; б) D_{5h} ; в) C_{2v} .

1-5. а) C_{5v} ; б) O_h ; в) C_i .

1-6. а) D_{2d} ; б) D_3 ; в) S_4 .

1-7. а) D_{8h} ; б) D_{3h} ; в) C_{2h} .

1-8. а) D_{2h} ; б) D_{3d} ; в) C_{4v} .

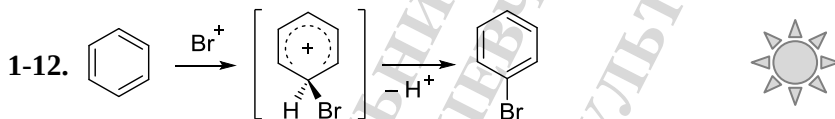
1-9. а) D_{4h} ; б) D_3 ; в) C_{5v} .

1-10. а) D_{5h} ; б) C_3 ; в) S_4 .

1-11. а) D_{4d} ; б) C_2 ; в) C_{3v} .

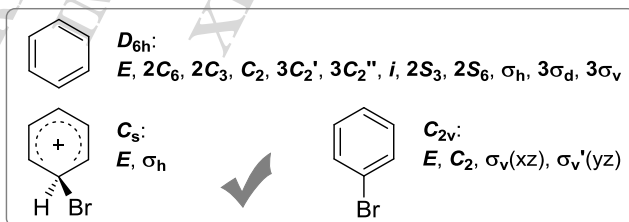
Завдання

Як змінюється точкова група симетрії молекули унаслідок хімічного чи конформаційного перетворення?

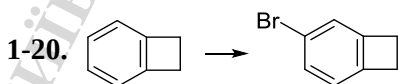
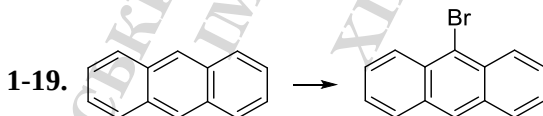
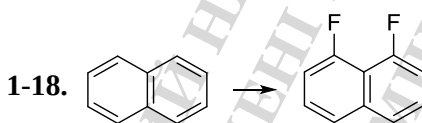
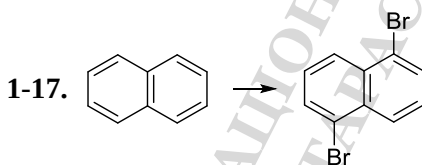
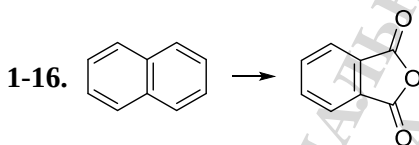
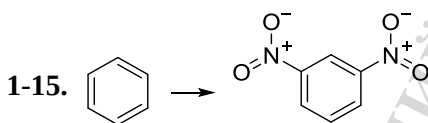
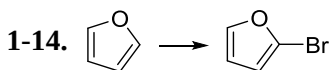
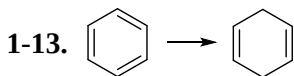


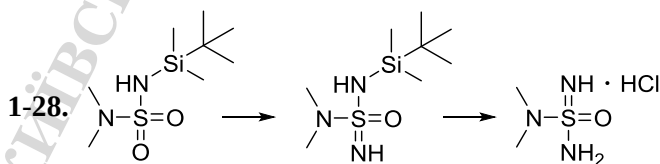
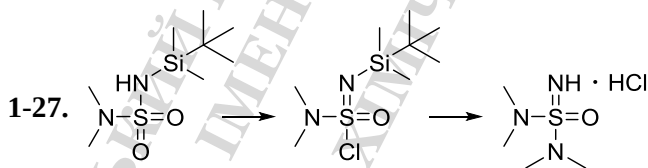
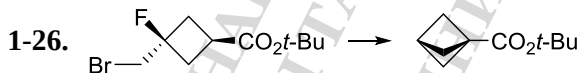
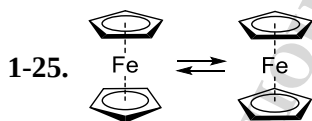
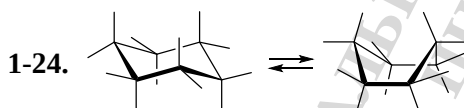
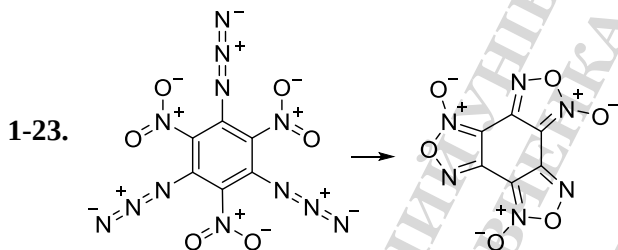
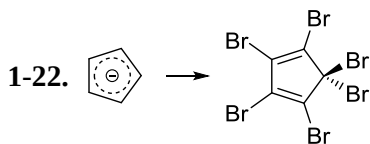
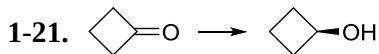
Відповідь

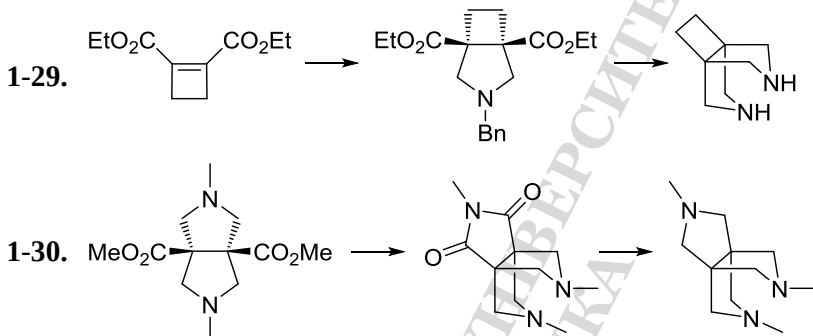
Геометрія вихідної сполуки – бензену – відповідає просторовій групі симетрії D_{6h} , за будовою вона подібна до правильної гексагональної призми. Це – високосиметричний об'єкт із багатьма операціями симетрії. На практиці це означає, що усі атоми Гідрогену знаходяться в однаковому оточенні та матимуть однакові властивості; це можна сказати також про атоми Карбону. Але приєднання катіону Броду призводить до зникнення більшості елементів симетрії, залишаючи лише одну дзеркальну площину, яка проходить перпендикулярно до площини циклу через його центр та атом Br. Отже, будова інтермедіату відповідає просторовій групі симетрії C_s .



Після ароматизації до молекули повертається площина симетрії, яка співпадає з площиною циклу, а також вісь другого порядку, яка проходить в площині циклу через його центр та атом Броду: це точкова група C_{2v} .

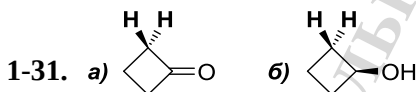






Завдання

Якими операціями симетрії можна перевести позначені атоми Гідрогену один у інший?



Відповідь

а)

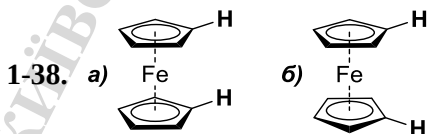
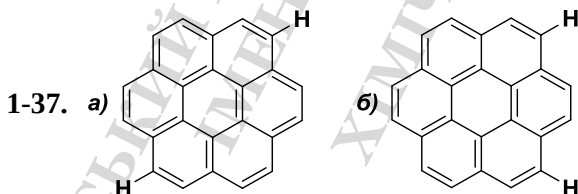
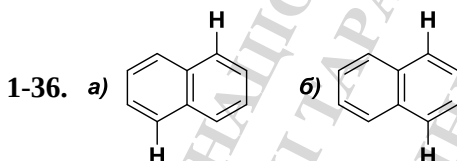
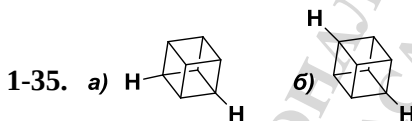
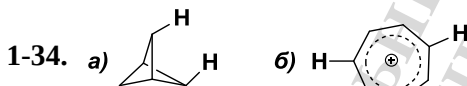
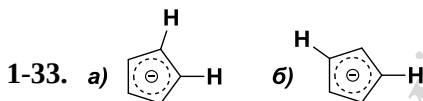
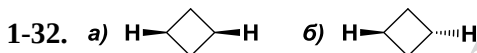
Насичений чи частково насичений чотиричленний цикл переважно набуває непланарної конформації. Але альтернативні конформації швидко змінюють одна одну, тому, як було вказано вище, для практичного вжитку доцільно визначати елементи симетрії планарної конформації, яка має їх найбільше. У цій молекулі, окрім операції ідентичності, є дві взаємно перпендикулярні дзеркальні площини та вісь другого порядку: це точкова група C_{2v} . Якщо здійснити операцію дзеркального відбиття за допомогою площини симетрії, що співпадає з умовною площиною циклу, два атоми, які позначені на рисунку, взаємно відобразяться один у інший.

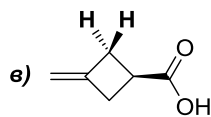
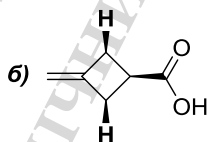
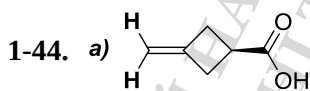
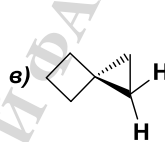
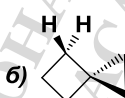
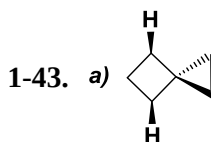
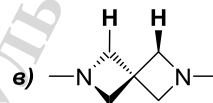
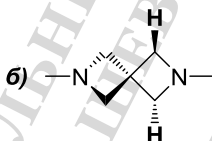
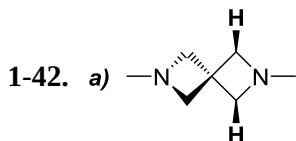
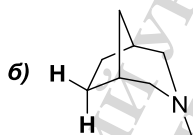
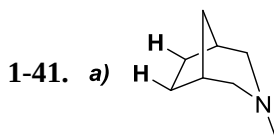
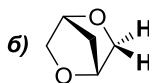
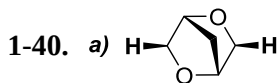
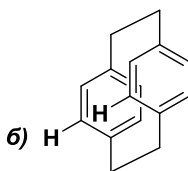
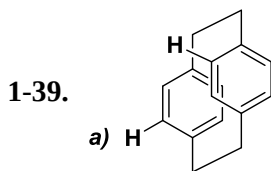
б)

Будова молекули описується як просторова група симетрії C_s . У молекулі є лише одна дзеркальна площина, яка проходить перпендикулярно до площини циклу через центр та

ОН-групу. Позначені атоми знаходяться по один бік від цієї площини, отже, не існує операцій симетрії, які могли б відобразити ці атоми один у інший. Це означає, зокрема, що оточення та властивості таких атомів, незалежно від середовища, будуть відрізнятись.

Детальніше про це явище і пов'язану з ним термінологію мова йтиме нижче в розділі 13.



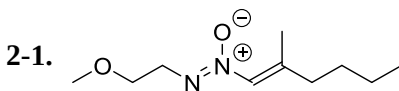


ЧАСТИНА 2

Ізомерія подвійного зв'язку. Z- та E-конфігурація

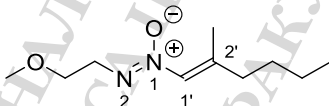
Завдання

Визначте конфігураційний індекс Z / E для кожного з подвійних зв'язків молекули.



Відповідь

У зображеній молекулі є два подвійних зв'язки: C=C та N=N; для визначення конфігураційних індексів Z / E кожного з них потрібно визначити порядок старшинства в чотирьох парах замісників згідно з правилами Кана – Інгольда – Прелого (КІП).



Розглянемо оточення зв'язку C=C. Один із замісників біля Карбону з локантом 1' – атом Гідрогену, інший – азокси-група, приєднана атомом Нітрогену; вочевидь, масове число Нітрогену більше за масове число Гідрогену, і старшим буде нітрогеновмісний замісник.



Замісники біля Карбону 2' – метильна та n-бутильна групи; перша сфера обох замісників складається з атому Карбону, тому будемо порівнювати другі сфери:

-n-Bu :	I сфера	C
	II сфера	C H H

-Me :	I сфера	C
	II сфера	H H H

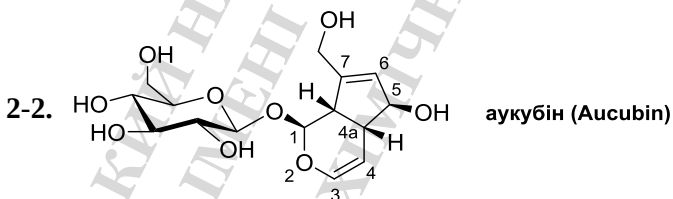
У другій сфері бутильного замісника атом Карбону та два Гідрогени, а у метильного – лише атоми Гідрогену, тому бутильний замісник старший за метильний.

Два старших замісники – азоксигрупа та бутильний залишок – знаходяться по різні боки від лінії зв'язку C=C, отже, конфігурація цього зв'язку – (E) (від нім. *entgegen* – "навпроти").

Перейдемо до розгляду оточення зв'язку N=N. До атому Нітрогену з локантом 1 приєднано атом Карбону (гексенільного залишку) та атом Оксигену; масове число останнього більше, отже старшим буде оксигеновий замісник. До атома N-2 приєднано атомом Карбону метоксистильну групу, а другий його замісник – це неподілена електронна пара. За домовленістю, під час визначення старшинства замісників електронній парі присвоюється фіктивне масове число 0, тому вона є наймолодшим замісником узагалі.



У підсумку: два старших замісники – атом Оксигену та метоксистильна група – знаходяться по один бік від лінії зв'язку N=N, тому конфігурація цього зв'язку – (Z) (від нім. *zusammen* – "разом").



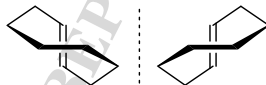
Відповідь

Визначення конфігурації ендциклічних подвійних зв'язків органічних молекул у випадку невеликих циклів, звісно, є зайвою формальністю, актуальною хіба що для навчальної мети, оскільки такі зв'язки можуть мати лише *цис*-конфігурацію. Найменший цикл, подвійний зв'язок у складі

якого може набувати *транс*-конфігурації, – восьмичленний (хоча назву "*транс*-циклооктен" не можна вважати вичерпною, оскільки їй відповідають дві енантімерні структури – це різновид планарної хіральності).



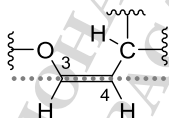
цис- або (*Z*)-циклооктен



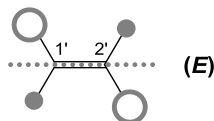
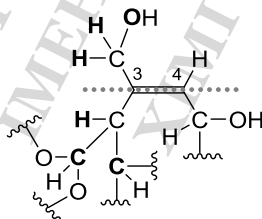
транс- або (*E*)-циклооктен

Індекси *цис* та *транс* – відносні, тому часто доводиться уточнювати, до яких саме замісників їх застосували. У випадку ендоциклічних подвійних зв'язків, вочевидь, мова йде про розташування основного ланцюга циклу. Тому тут індексу *цис* відповідає індекс (*Z*), а *транс* – (*E*); але це достеменно правильно тільки якщо біля подвійного зв'язку немає додаткових замісників.

Зв'язок між С-3 та С-4 аукубіну не містить додаткових замісників (тобто, ці замісники – атоми Гідрогену), і його конфігурація, безсумнівно, (*Z*).



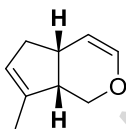
Інша ситуація з конфігурацією зв'язку С-6–С-7. Біля С-6 є атом Гідрогену, який і буде молодшим замісником, але біля С-7 розташована гідроксиметильна група, і потрібно визначити порядок її старшинства стосовно фрагменту циклу.



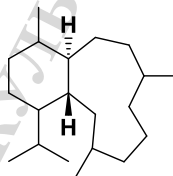
У першій сфері обох фрагментів – атом Карбону, тому будемо порівнювати другі сфери. Друга сфера гідроксиметильної групи – Оксиген і два Гідрогени, а у фрагменту циклу

– два Карбони та Гідроген; Оксиген – атом з найбільшим масовим числом, тому замісник CH_2OH – старший, і цей зв'язок має (*E*)-конфігурацію.

Аукубін – представник монотерпеноїдів, точніше, іридоїдів, структура яких базується на насиченому або частково насиченому скелеті циклопентан[с]пірану. У назвах таких сполук може траплятись індекс *цис*, але він стосується не конфігурації подвійних зв'язків, а зв'язку, спільного для обох циклів: у іридоїдах позначені атоми Гідрогену спрямовані по один бік умовної площини циклу. Для порівняння: у дитерпеноїдів групи 6/10-еуніцеланів розташування атомів Гідрогену біля спільного зв'язку – *транс* (хоча десятичленний цикл еуніцеланів може містити також і подвійний зв'язок з *транс*-конфігурацією).

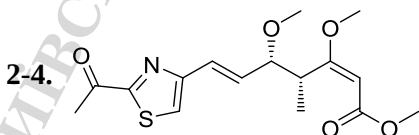
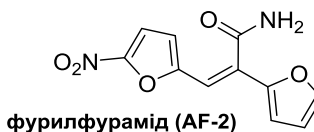
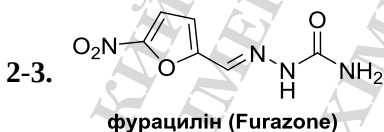


цис-конденсована біциклічна система іридоїдів

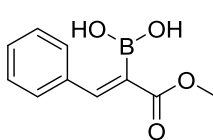
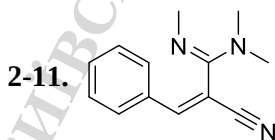
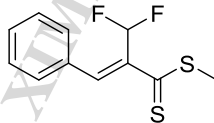
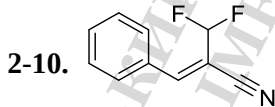
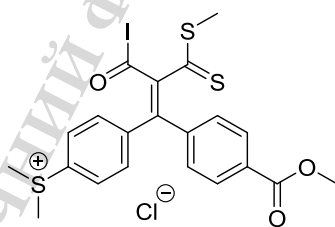
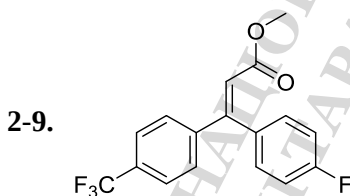
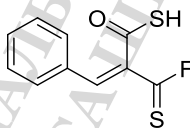
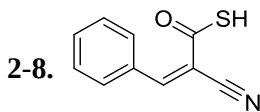
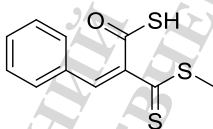
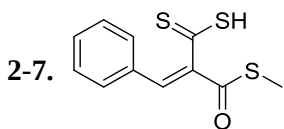
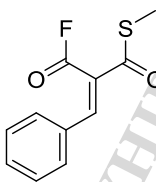
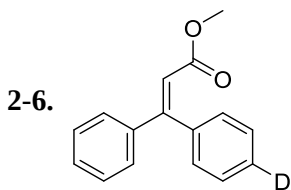
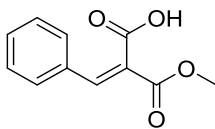
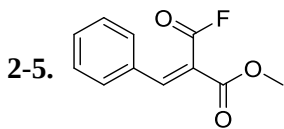


транс-конденсована біциклічна система еуніцелланів

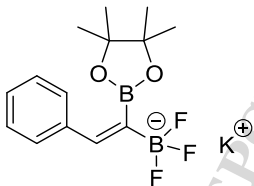
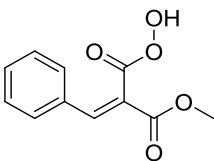
З огляду на те, що дескриптори *цис* / *транс* застосовуються не лише для позначення конфігурації подвійних зв'язків, але й для опису відносного просторового розташування замісників у насичених циклах, для характеристики подвійних зв'язків краще користуватись номенклатурою *Z* / *E*.



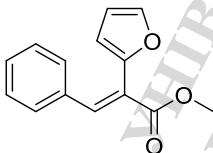
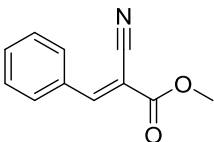
мелітіазол С,
міксобактеріальний антибіотик



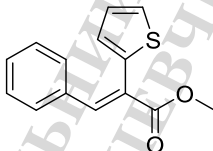
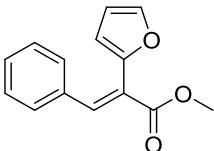
2-12.



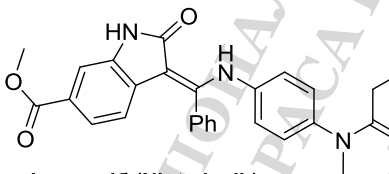
2-13.



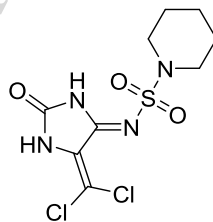
2-14.



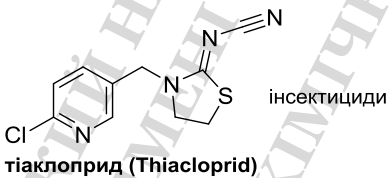
2-15.



нінтеданіб (Nintedanib),
лікування фіброзної дисплазії легень

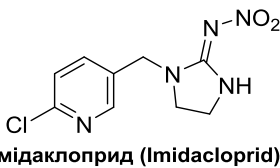


2-16.



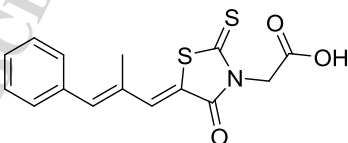
тіаклоприд (Thiacloprid)

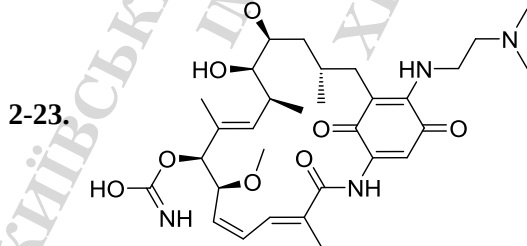
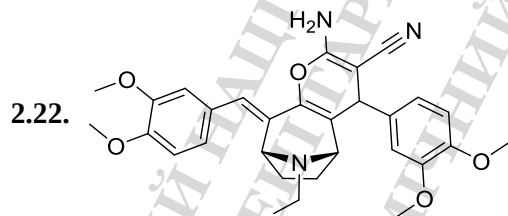
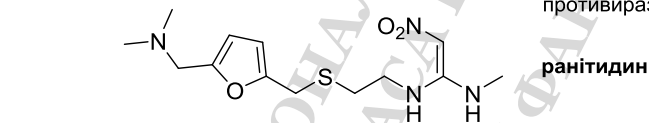
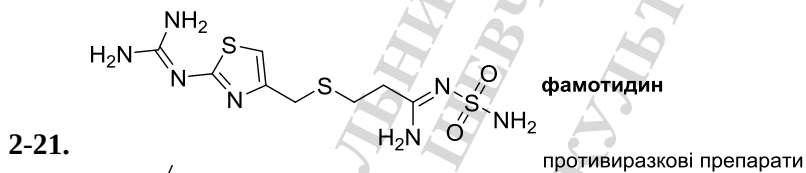
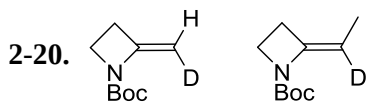
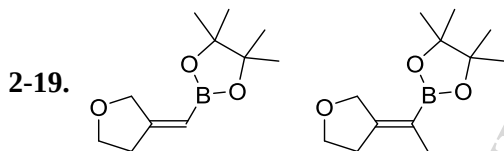
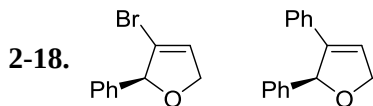
інсектициди



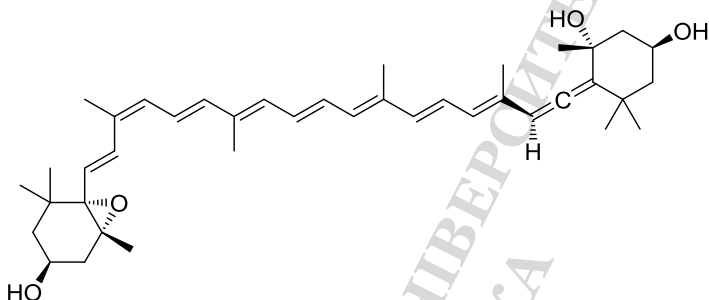
імідаклоприд (Imidacloprid)

2-17.

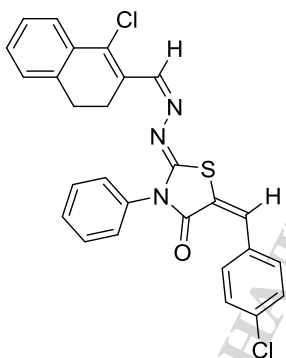




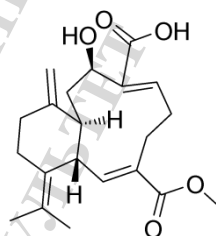
2-24.



2-25.

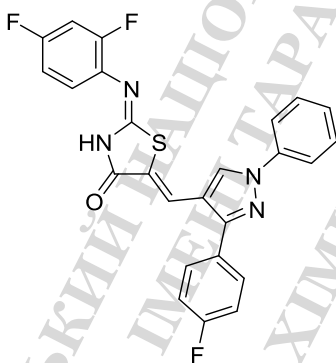


2-28.

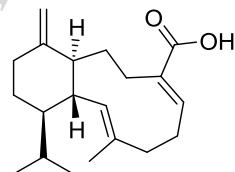


Microeunicellol A

2-26.

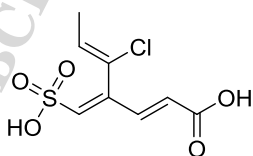


2.29.

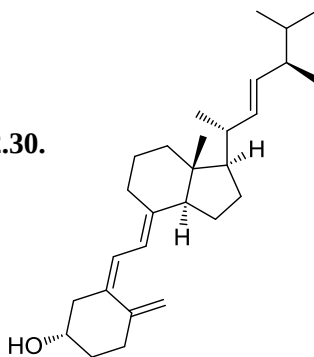


Magdalenic acid

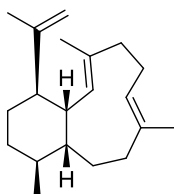
2-27.



2.30.

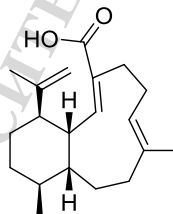


2-31.



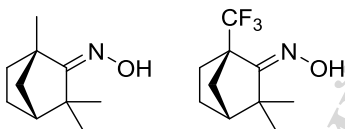
бендитерп-2,6,15-трієн

2-32.

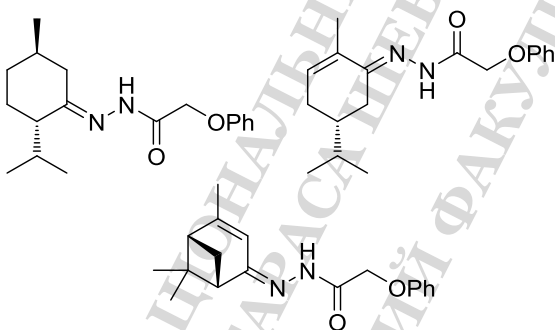


бендитерпенова
кислота

2-33.



2-34.



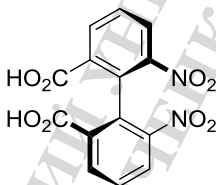
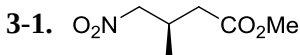
ЧАСТИНА 3

Елементи хіральності.

Центральна та аксіальна хіральність

Завдання

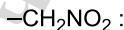
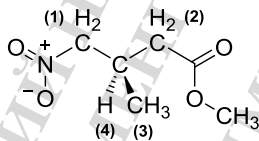
- а) Визначте індекс R / S для хірального центру;
 б) Визначте індекси R_a / S_a та P / M для хіральної осі.



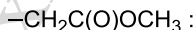
Відповідь

а)

У першій молекулі є хіральний центр (асиметричний атом Карбону). Із чотирьох замісників, які його оточують, наймолодший – атом Гідрогену – спрямований за площину малюнку (у протилежному випадку, коли наймолодший замісник спрямовано в наш бік від площини малюнку, молекулу потрібно розглядати з протилежного ракурсу). Визначимо порядок старшинства трьох інших замісників. Перша сфера усіх трьох – атом Карбону, тому порівнювати-моемо другі сфери.



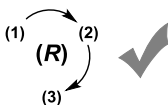
I сфера	C
II сфера	N H H



I сфера	C
II сфера	C H H

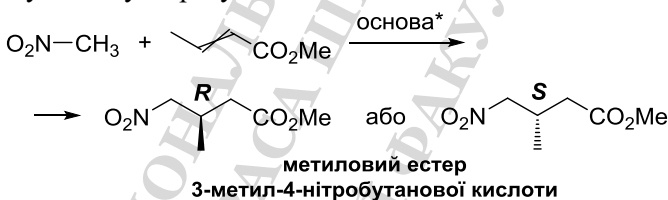


I сфера	C
II сфера	H H H



У другій сфері групи CH_3 – лише атоми Гідрогену; у групи $\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{OCH}_3$ – два атоми Гідрогену та атом Карбону; у групи CH_2NO_2 – два атоми Гідрогену та атом Нітрогену. Атом з найбільшим масовим числом – Нітроген (1), йому поступається Карбон (2), а наймолодшим із цих трьох замісників є метильна група (3), у другій сфері якої лише атоми Гідрогену. Тому конфігурація зображеної молекули – (R).

Наведена молекула може бути синтезована приєднанням за Міхаелем нітрометану до метилового естеру кротонової кислоти (каталізується основами). Для проведення цього синтезу в асиметричному варіанті, тобто, вибіркового утворення одного з енантіомерів, потрібно застосувати джерело асиметрії (хіральний індуктор), наприклад, хіральну основу. Конфігурація продукту в цій реакції визначається сукупністю впливу хіального індуктора та початкової конфігурації зв'язку $\text{C}=\text{C}$ субстрату.



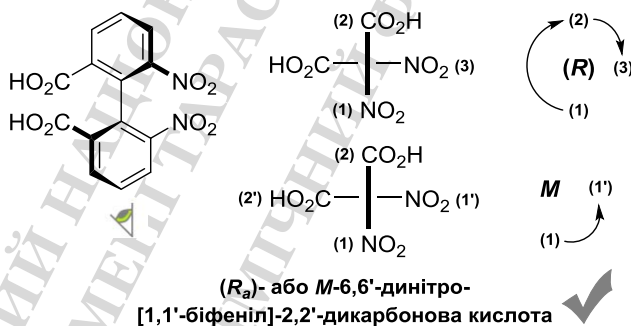
б)

Стереоізомери 6,6'-динітро-[1,1'-біфеніл]-2,2'-дикарбонової кислоти або, як її ще називають, 6,6'-динітро-2,2'-дифенової кислоти були одними з перших хіральних похідних біфенілу, розділених на окремі енантіомери.

У похідних біфенілу, що містять замісники в усіх чотирьох орто-положеннях, ароматичні кільця (і приєднані до них замісники, звісно) не знаходяться в одній площині. Також для них за звичайних умов неможливе обертання навколо одинарного зв'язку, який з'єднує ароматичні цикли. За умови, що кожен цикл заміщений несиметрично, для таких структур реалізується різновид аксіальної хіральності (елемент хіральності – вісь), який називають **атропоізомерією** (замісники розташовані в різних площинах, тому що просторові перешкоди унеможливають вільне обертання навколо одного зі

зв'язків). Уточнимо, що в кожному з циклічних фрагментів може бути один набір замісників, головне – щоб замісники було попарно різними в межах одного циклу.

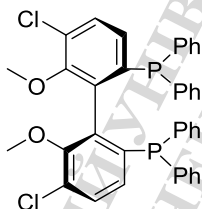
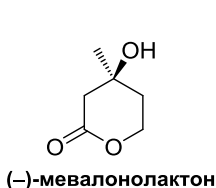
Щоб надати хіральній осі індекс R_a чи S_a ("a" – від англ. *axis* – "вісь"), потрібно побудувати проєкцію двох пар замісників на площину, перпендикулярну хіральній осі. Повернемо молекулу так, щоб верхній цикл розташувався в площині малюнку, а нижній – перпендикулярно цій площині, та поглянемо на молекулу знизу. З цього ракурсу замісники дальнього фенільного циклу розташуються на горизонтальній лінії, а ближнього – на вертикальній. Пронумеруємо спочатку ближні до нас замісники, визначивши їхнє старшинство за правилами КІП. Вочевидь, старшою буде NO_2 -група (1), оскільки містить у першій сфері атом Нітрогену з масовим числом, більшим ніж у атома Карбону, що міститься в першій сфері групи CO_2H (2). Старший із замісників дальньої пари – NO_2 -групу – позначимо номером (3). У трикутнику (1)–(2)–(3) старшинство замісників спадає за рухом годинникової стрілки, тому конфігурація хіральної осі цієї молекули – R_a .



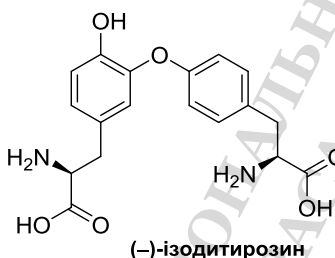
Індекси P та M походять від *plus* та *minus*. Для застосування цього типу номенклатури також потрібно побудувати аналогічну проєкцію, але позначити лише старші замісники в кожній із пар: (1) – старший замісник у ближній парі, (1') – старший замісник у дальній парі. У нашому випадку рух (1) → (1') відбувається проти руху годинникової стрілки, отже конфігурація – M (*minus*).

Можна самостійно переконатися в тому, що індекс хіральної осі не залежить від того, з якого напрямку розглядати молекулу, буде ближня пара замісників у проєкції розташована горизонтально чи вертикально, а також у тому, що у випадку однакового набору замісників у двох циклах, індексу R_a завжди відповідатиме індекс M , а індексу $S_a - P$.

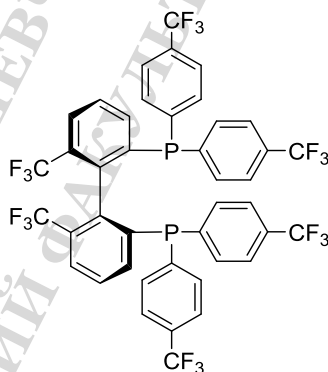
3-2.



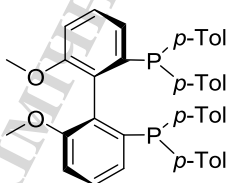
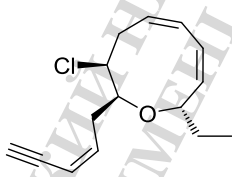
3-3.



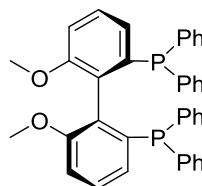
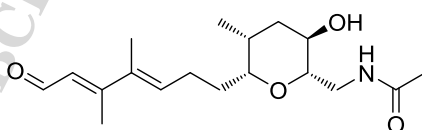
утворюється в природі окиснювальним
сполученням двох молекул тирозину



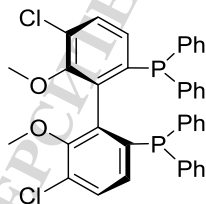
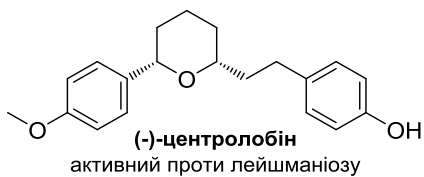
3-4.



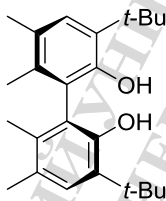
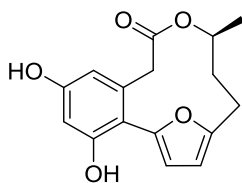
3-5.



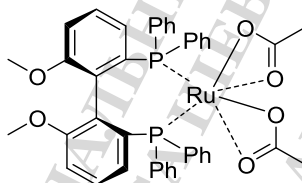
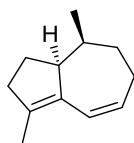
3-6.



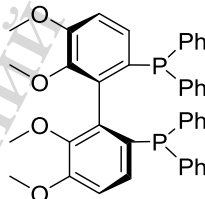
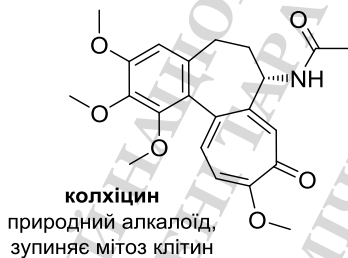
3-7.



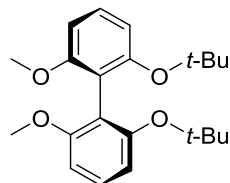
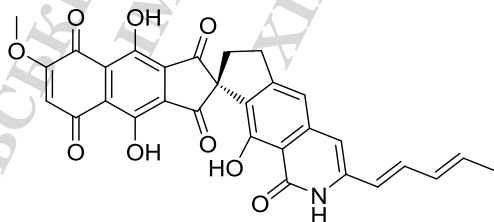
3-8.

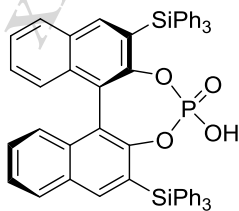
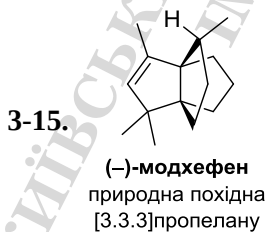
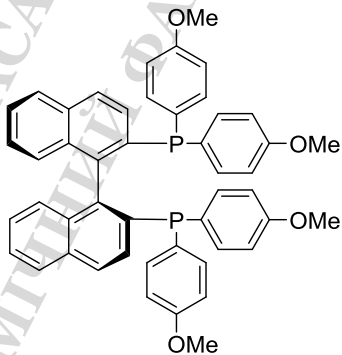
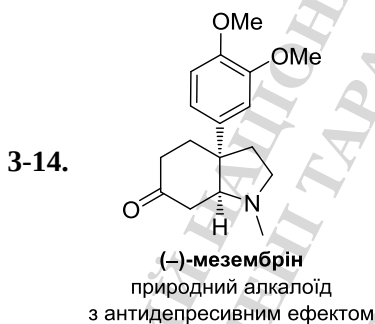
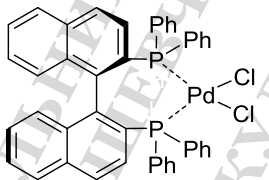
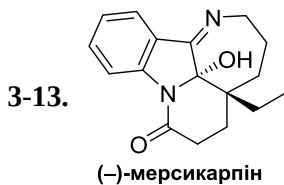
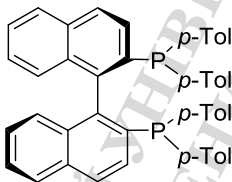
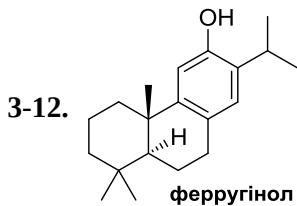
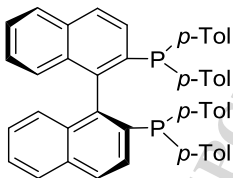
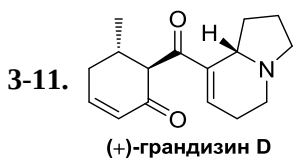


3-9.

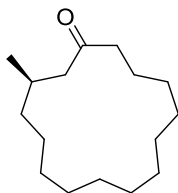


3-10.

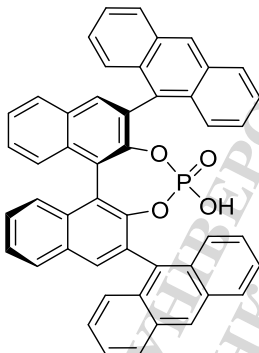




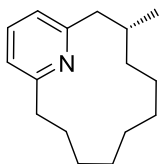
3-16.



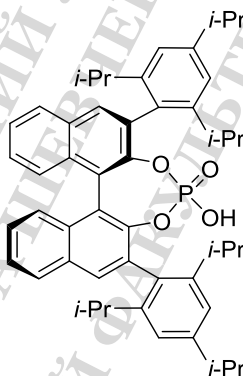
(-)-мускон
основний складник
запаху мускусу



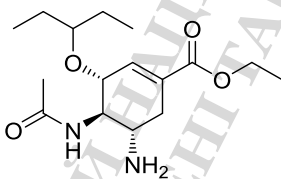
3-17.



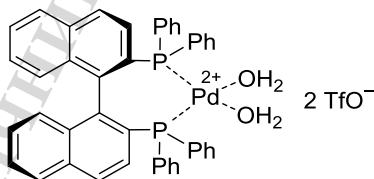
(+)-мускопіридин
складова мускусу,
природний *мета*-піридинофан



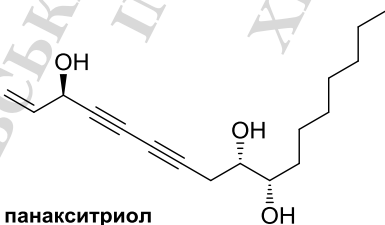
3-18.



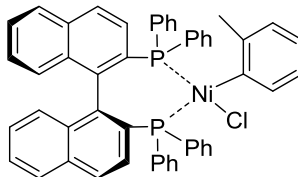
озельтамівір (Tamiflu)
протівірусний засіб

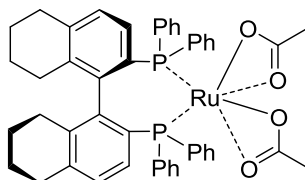
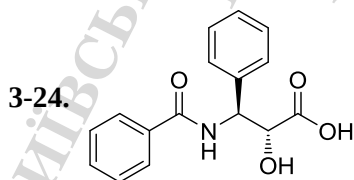
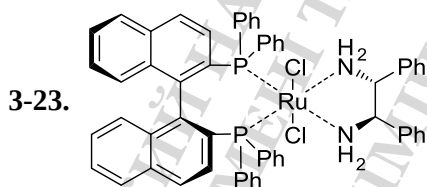
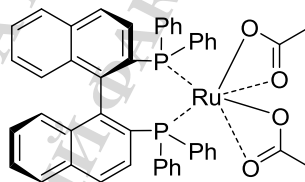
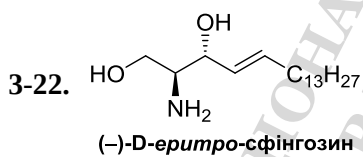
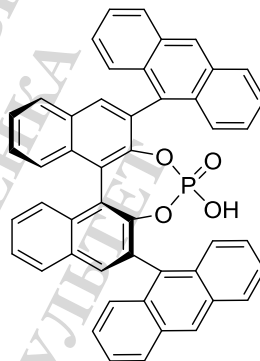
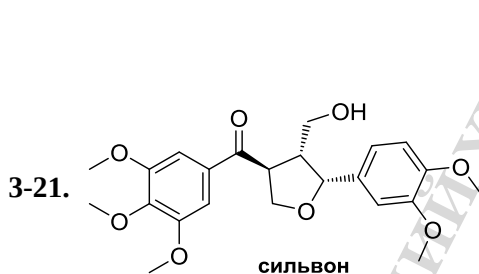
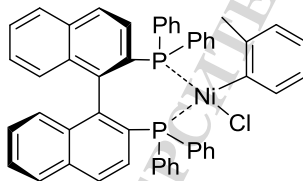
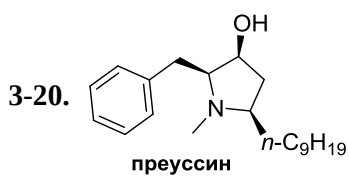


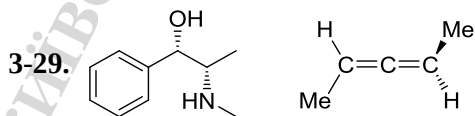
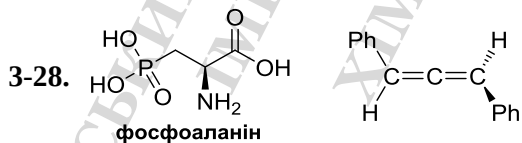
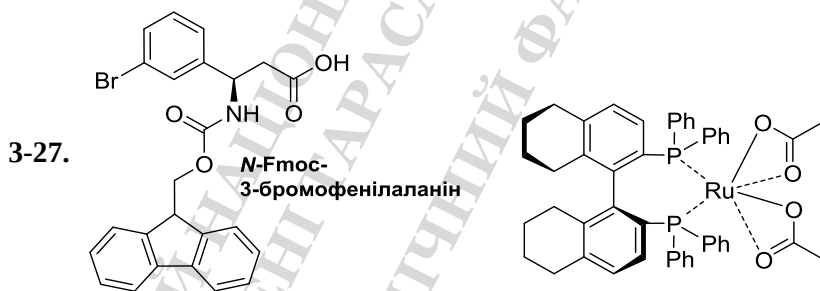
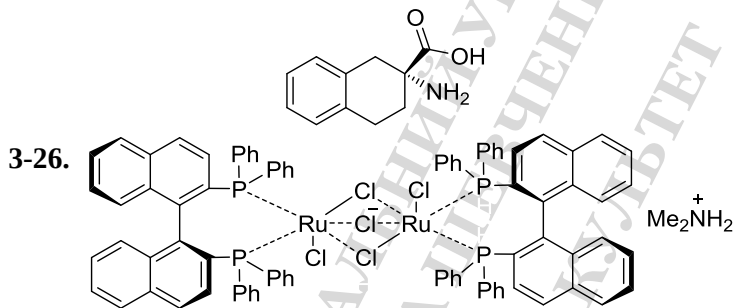
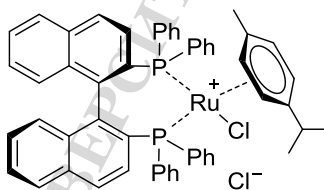
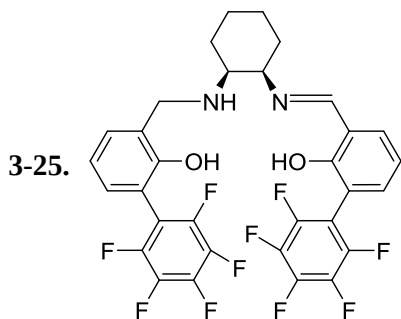
3-19.



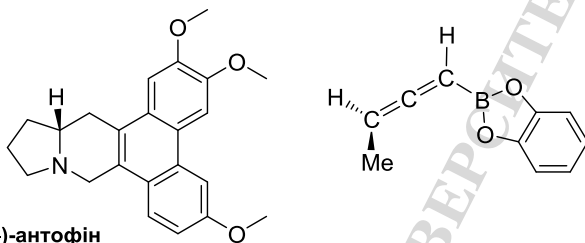
панакситриол







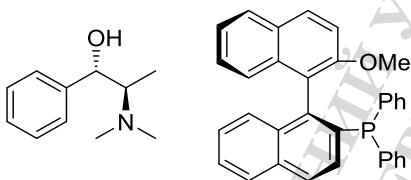
3-30.



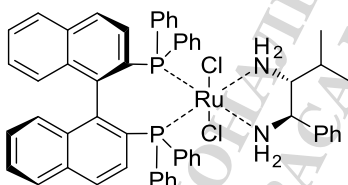
(-)-антофін

природний фенантроіндолізидиновий алкалоїд
з протираковою активністю

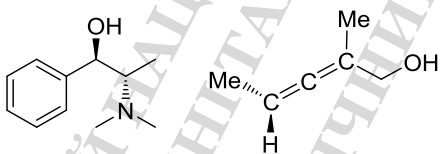
3-31.



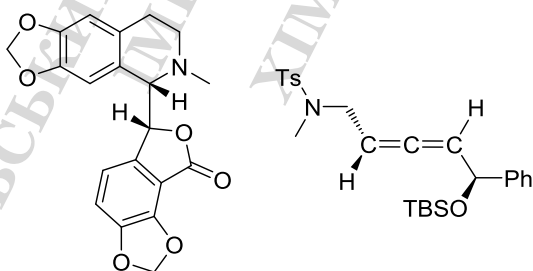
3-32.

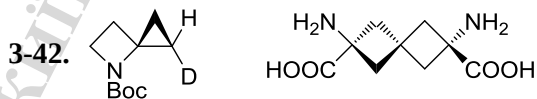
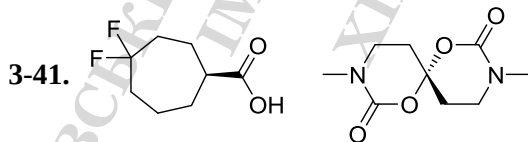
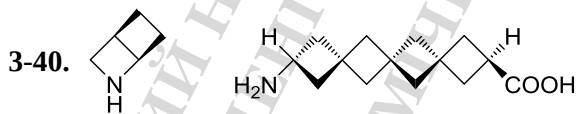
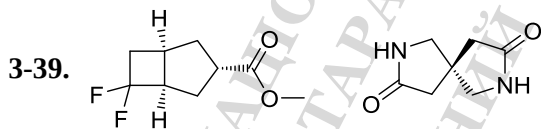
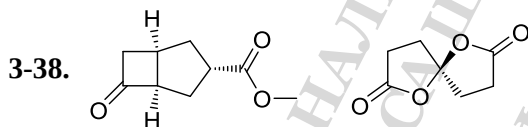
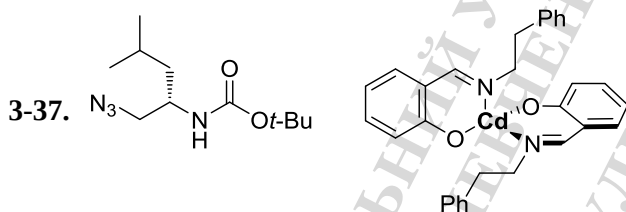
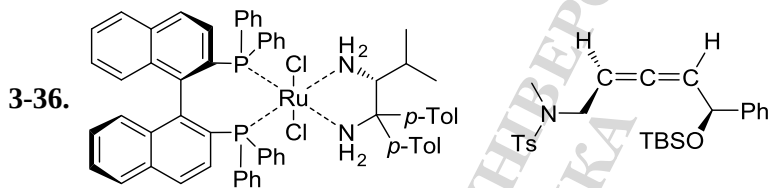
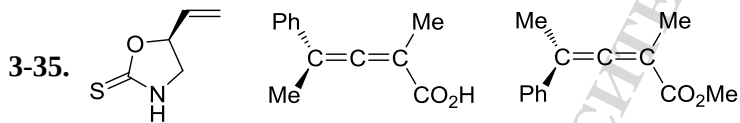


3-33.

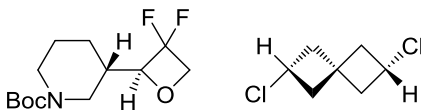


3-34.

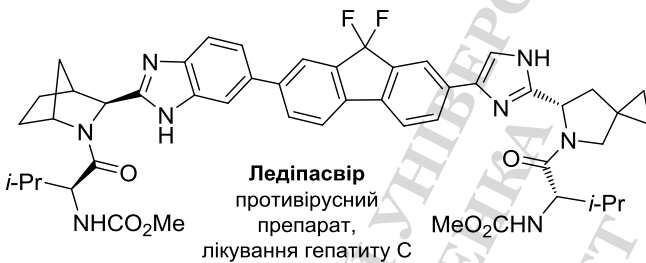




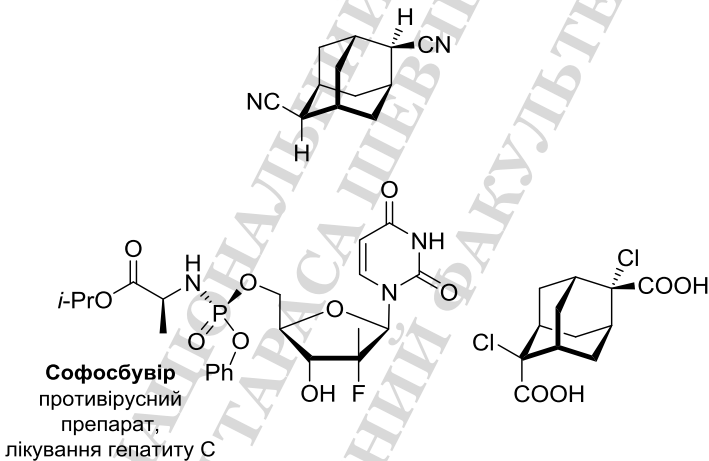
3-43.



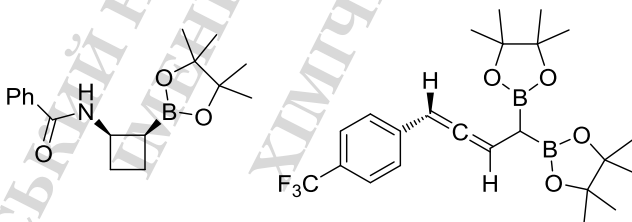
3-44.



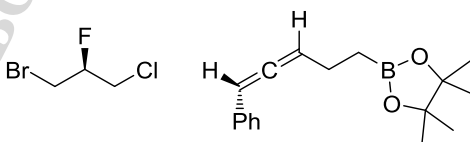
3-45.

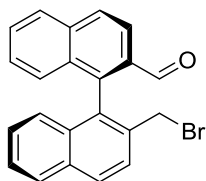
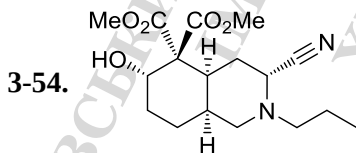
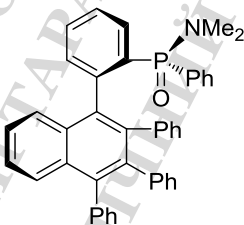
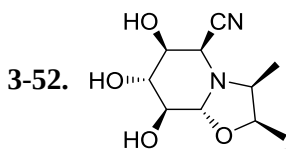
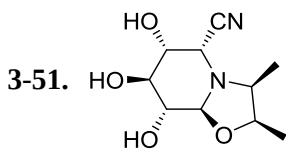
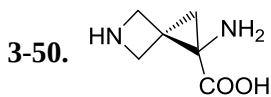
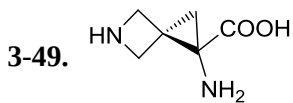
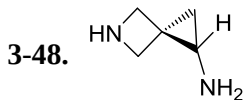


3-46.



3-47.





ЧАСТИНА 4

Створення хіральності в молекулах різної геометричної будови

Завдання

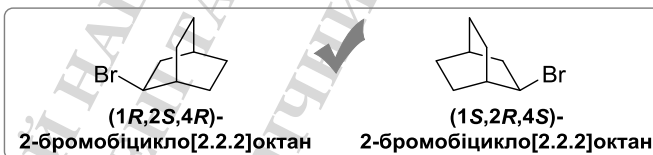
Яку мінімальну кількість ахіральних замісників (наприклад, Cl, Br, CH₃ тощо) потрібно приєднати до молекули, щоб вона набула хіральності? Зобразіть приклад пари енантіомерів.

4-1.

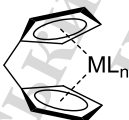


Відповідь

Зображена молекула біцикло[2.2.2]октану належить до точкової групи D_{3h} і має багато елементів симетрії, зокрема, чотири дзеркальні площини, отже, не є хіральною. Але порушити цю симетрію неважко: кожен із атомів Карбону метиленових груп має два однакові замісники (атоми Гідрогену) та по одному заміснику інших типів (метинова та метиленова групи). Тому заміна одного із атомів Н метиленової ланки на будь-який новий замісник, приміром, Br, приведе до появи в молекулі щонайменше одного асиметричного атому Карбону (а точніше – трьох), і молекула набуде хіральності.



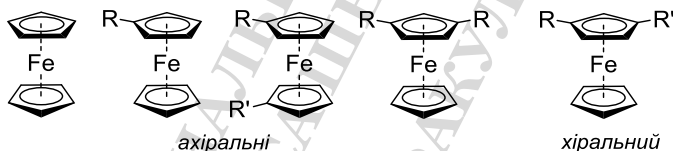
4-2.



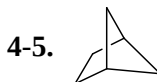
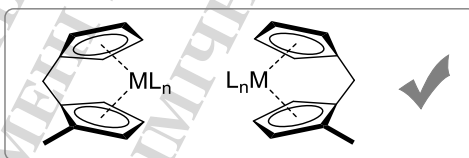
Відповідь

Зображена структура – різновид металоцену, в якому два циклопентадієнільних кільця з'єднані метиленовим фрагментом, а до центрального катіону металу приєднані деякі інші ліганди.

Найпростіший (і найбільш відомий) металоцен – незаміщений фероцен – належить до групи симетрії D_{5h} . Поява одного замісника не зробить таку структуру хіральною, оскільки залишається одна дзеркальна площина симетрії, що проходить через цей замісник і центральний катіон Fe перпендикулярно площині циклопентадієнільних циклів; це ж стосується й випадку, коли в одному із циклів є два однакові замісники – площина проходить між ними. Якщо є по одному заміснику в кожному з циклів (це можуть бути як однакові, так і різні замісники), то структура також залишається ахіральною, оскільки завдяки обертанню циклів може набути симетричної конформації, в якій замісники знаходяться один над одним. І лише коли в одному циклі є два різних замісники, матимемо об'єкт з так званою **планарною хіральністю**.



Якщо повернутися до умови задачі, стає очевидним, що така структура за типом симетрії аналогічна фероцену, в кожному з циклів якого є по одному заміснику. Отже, для досягнення хіральності достатньо додати до одного з циклів один новий замісник.



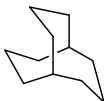
4-7.



4-8.



4-9.



4-10.



4-11.



4-12.



4-13.



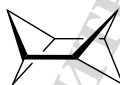
4-14.



4-15.



4-16.



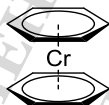
4-17.



4-18.



4-19.



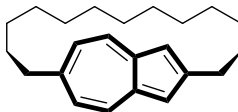
4-20.



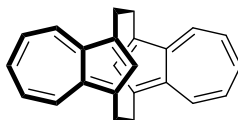
4-21.



4-22.



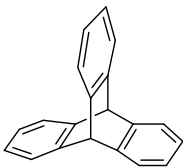
4-23.



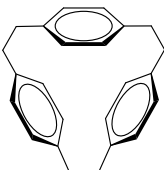
4-24.



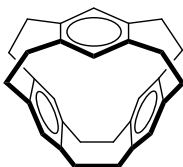
4-25.



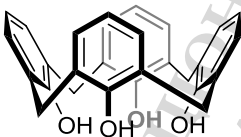
4-26.



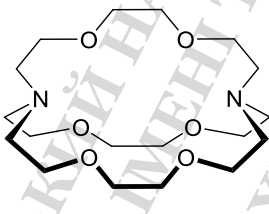
4-27.



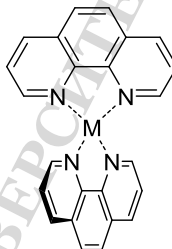
4-28.



4-29.



4-30.



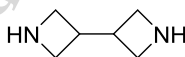
4-31.



4-32.



4-33.



4-34.

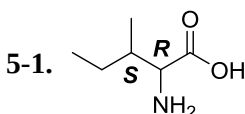


ЧАСТИНА 5

Зображення конфігурації асиметричних центрів

Завдання

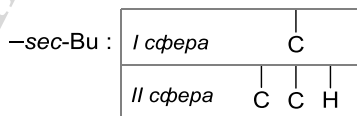
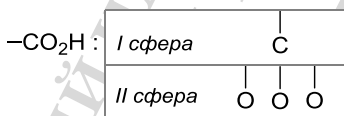
Зобразить для асиметричного центру таку конфігурацію, яка відповідатиме наведеному стереохімічному індексу.



Відповідь

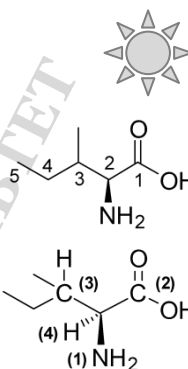
Зобразимо навмання конфігурацію 2-го атому Карбону та визначимо індекс – (R) чи (S) – для цієї конфігурації.

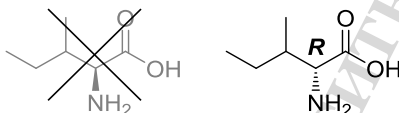
У такому ракурсі наймолодший замісник – атом Гідрогену (4) – буде за площиною малюнку. Із трьох інших замісників найстаршою буде аміногрупа (1), оскільки масове число Нітрогену більше, ніж Карбону. Якщо надалі порівнювати старшинство замісників CO₂H та *sec*-Bu, то старшою буде карбоксильна група (2). Перша сфера обох замісників – це атом Карбону, отже визначати порядок їх старшинства потрібно за другою сферою.



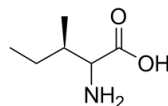
У другій сфері групи CO₂H – атоми Оксигену, а у *втор*-бутильного замісника – два атоми Карбону та атом Гідрогену. Із цього переліку найстарший атом (з найбільшим масовим числом) – Оксиген, отже, група CO₂H (2) старша за *sec*-Bu (3).

З огляду на порядок старшинства та розташування замісників, конфігурація, яку ми зобразили, – (S); таким чином, правильною відповіддю буде альтернативна конфігурація:

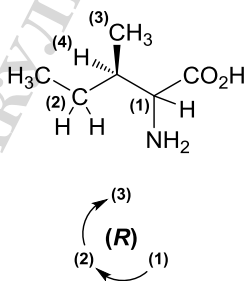
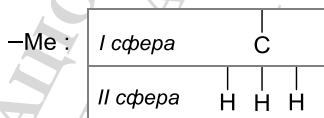
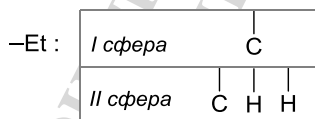
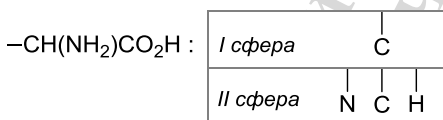




Застосуємо цей же порядок дій для визначення розташування замісників навколо 3-го атома Карбону. В обраній на вманні конфігурації наймолодший замісник – атом Гідрогену (**4**) – також направлений за площину малюнку, і ми розглядатимемо наступні замісники: амінокислотний залишок, метильну та етильну групи.

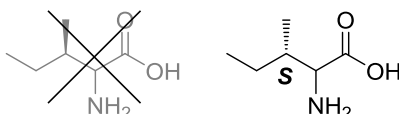


Перша сфера усіх трьох замісників складається з атому Карбону, тому будемо порівнювати другі сфери:

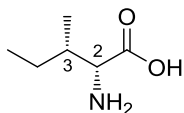


У другій сфері амінокислотного залишку є атом Нітрогену, отже цей замісник – найстарший (**1**). У другій сфері етильного замісника атом Карбону та два Гідрогени, а у метильного – лише атоми Гідрогену, тому етильний замісник (**2**) старший за метильний (**3**).

Конфігурація, яку ми зобразили, – (**R**), і правильною відповіддю буде альтернативна конфігурація:



Таким чином, остаточна відповідь:

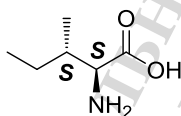


**(2R,3S)-2-аміно-
3-метилпентанова кислота**

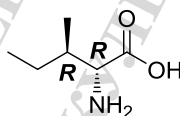


Наведена сполука – стереоізомер (а саме – діастереомер) протеїногенної амінокислоти L-ізолейцину.

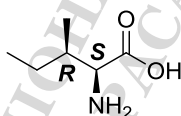
Ізолейцин – одна з двох протеїногенних амінокислот, молекула яких містить два асиметричних атома Карбону (інша – треонін). Стереохімічний індекс L у тривіальній назві ізолейцину описує конфігурацію 2-го атома Карбону; відповідно, енантіомер протеїногенного L-ізолейцину – D-ізолейцин. Діастереомери ізолейцину мають іншу тривіальну назву – алоізолейцин – і також позначаються D чи L залежно від конфігурації 2-го атома Карбону.



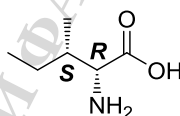
L-ізолейцин



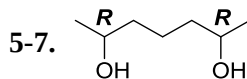
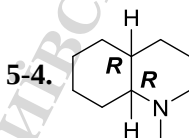
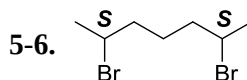
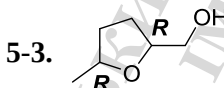
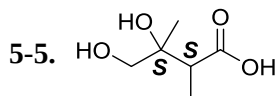
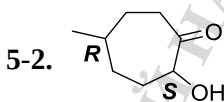
D-ізолейцин

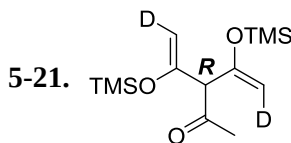
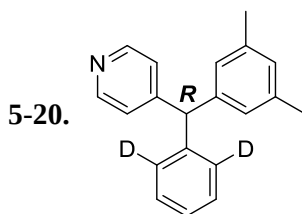
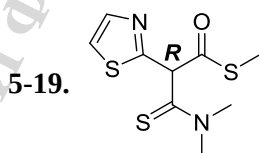
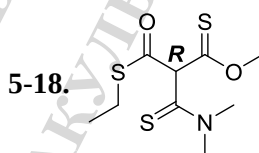
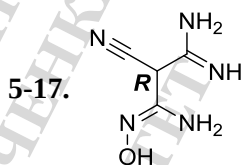
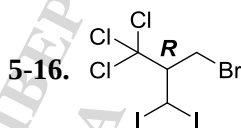
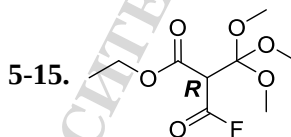
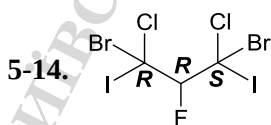
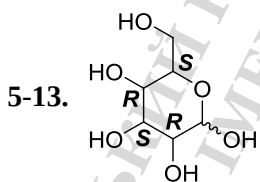
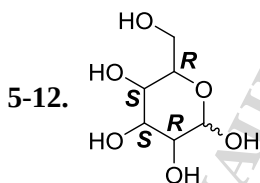
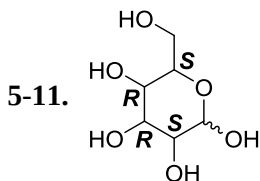
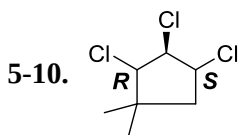
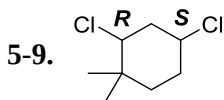
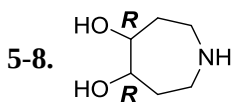


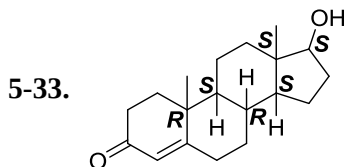
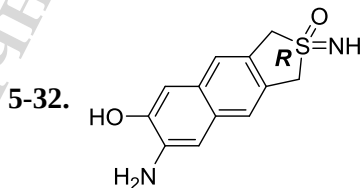
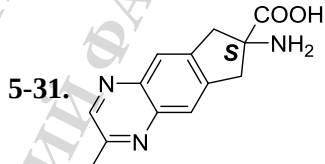
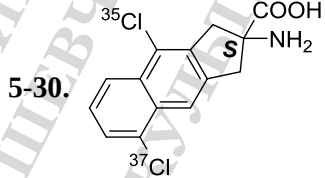
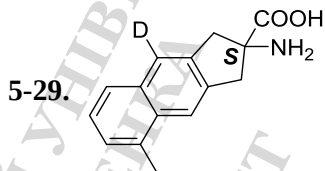
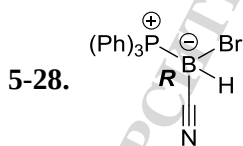
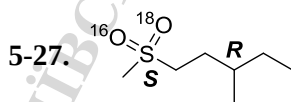
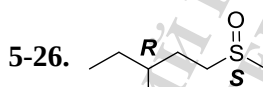
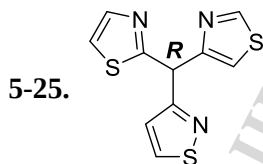
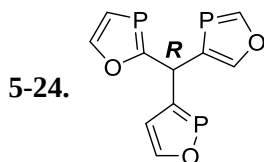
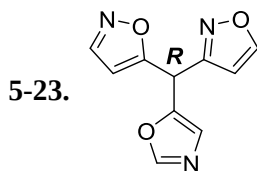
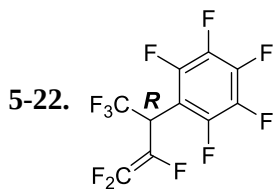
L-алоізолейцин

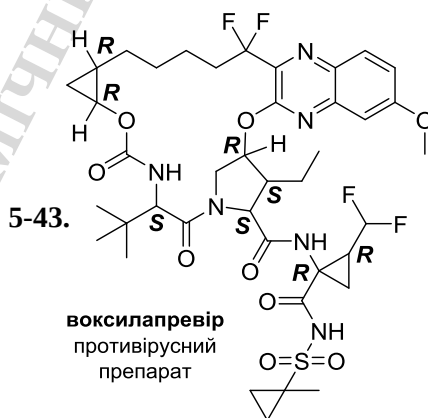
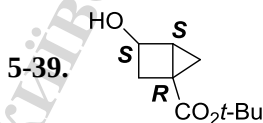
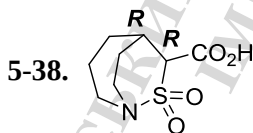
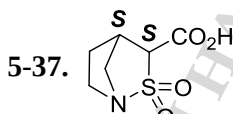
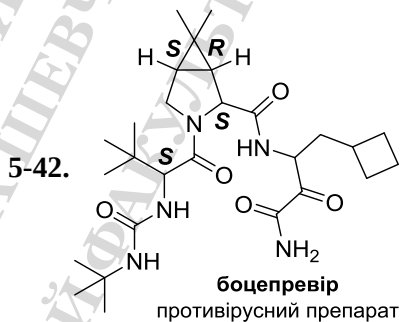
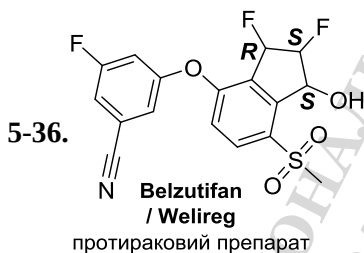
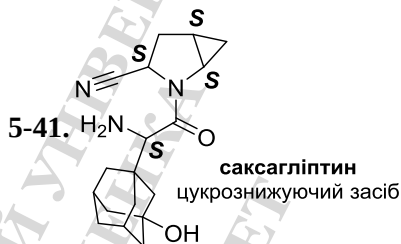
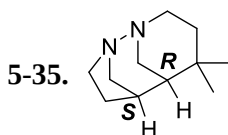
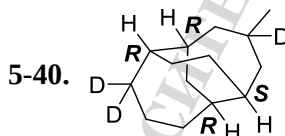
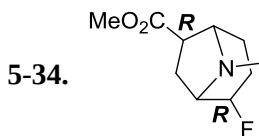


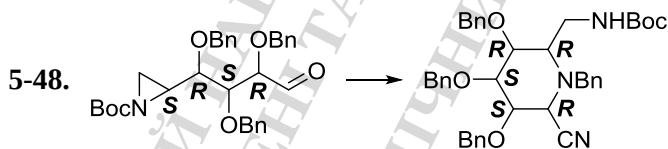
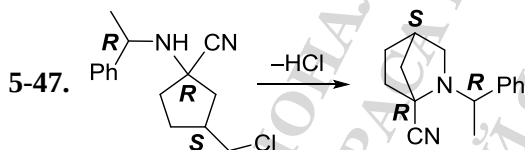
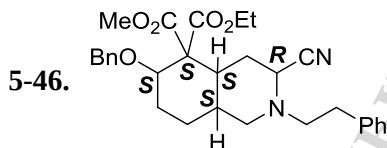
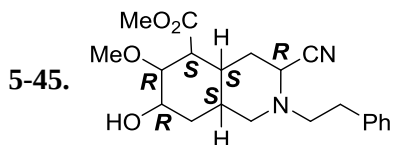
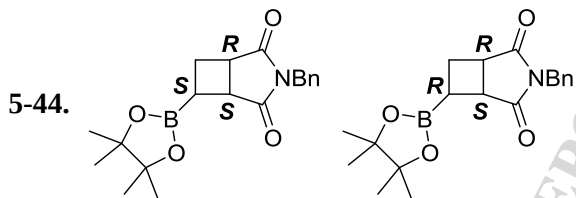
D-алоізолейцин











ЧАСТИНА 6

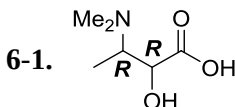
Молекули з двома сусідніми хіральними центрами.

Проекція "зиг-заг" та проекція Фішера.

Трео- та еритро-конфігурація

Завдання

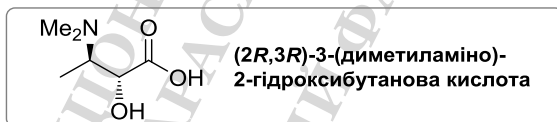
- а) Зобразить на формулі конфігурацію стереоцентрів, що відповідатимуть наведеним індексам;
- б) Зобразить формулу у проекції Фішера; вкажіть відносну конфігурацію – *трео* чи *еритро*.



Відповідь

а)

Визначимо конфігурацію двох асиметричних центрів, скориствовавшись рекомендаціями з попереднього розділу:

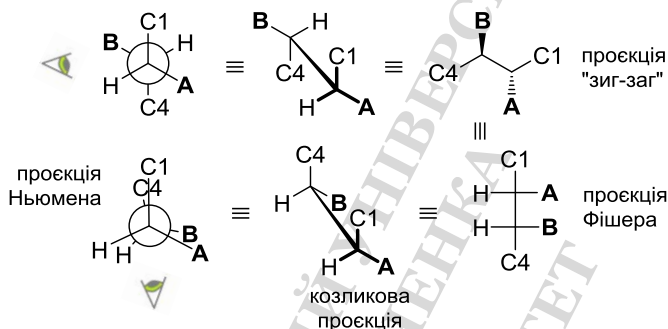


б)

Спочатку розглянемо це питання для загального випадку молекули зі щонайменше чотирма атомами Карбону в основному ланцюзі та двома різними замісниками (**A** та **B**) біля 2-го та 3-го Карбону; просторове розташування замісників зобразимо довільно. Для розуміння різниці між проекцією "зиг-заг" та проекцією Фішера нам знадобиться третій вид проекцій, а саме: проекція Ньюмана конформацій, які реалізуються унаслідок обертання навколо зв'язку C2–C3.

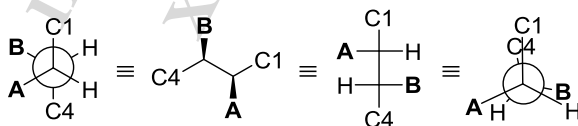
Проекція "зиг-заг" відповідає найбільш енергетично вигідній загальмованій конформації цього зв'язку, у якій фрагменти головного ланцюга знаходяться у *анти*-перипланарному розташуванні.

Для зображення проєкції Фішера молекули потрібно надати найменш вигідну затінену конформацію, у якій фрагменти ланцюга матимуть *син*-перипланарне розташування.



Проекції Фішера речовин з кількома асиметричними центрами слід розуміти так: центральний зв'язок (або центральний атом) знаходиться в площині малюнку, вертикальні зв'язки, що відходять від нього, знаходяться за площиною малюнку ("від нас"), а горизонтальні – перед площиною малюнку ("до нас"). Тому ці проєкції (на відміну від проєкції "зиг-заг") не можна повертати на 90° – тоді структура перетворюється на свій енантіомер; повертати проєкції Фішера можна лише на 180° . Якщо на проєкції Фішера поміняти місцями два замісники біля одного центру, це означатиме зміну конфігурації цього центру; якщо переставити замісники біля одного центру двічі (або будь-яку парну кількість раз) – конфігурація не зміниться. Традиційно в проєкції Фішера головний карбоновий ланцюг розташовують вертикально найстаршим атомом доверху.

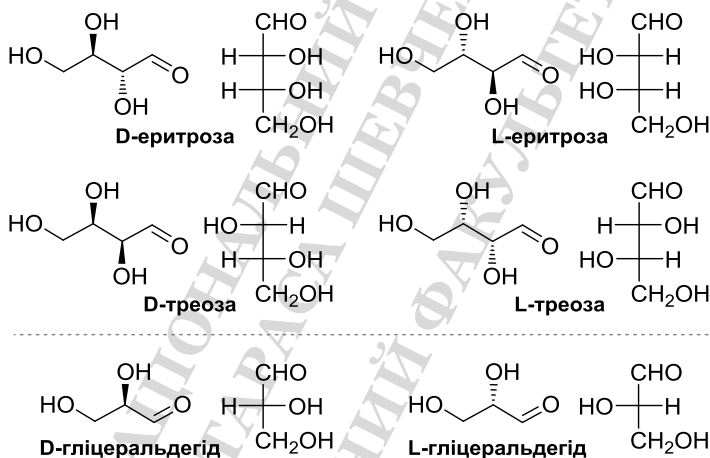
Для цієї ж загальної структури зобразимо діастереомер, змінивши конфігурацію атома C2:



Неважко помітити, що в першого діастереомера замісники А та В в проєкції "зиг-заг" знаходяться по різні боки відносно площини малюнку (*анти*-конфігурація), а в проєкції

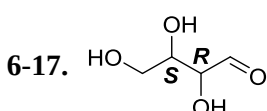
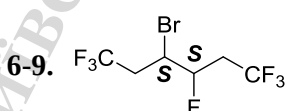
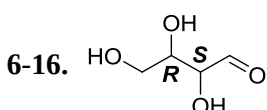
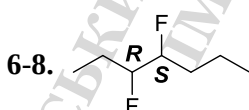
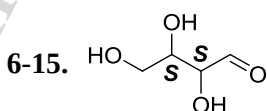
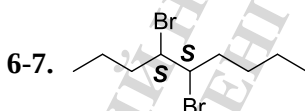
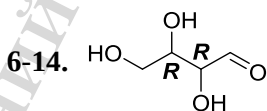
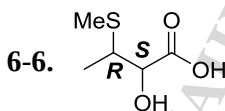
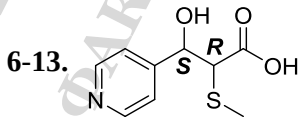
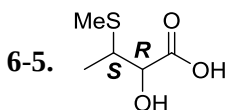
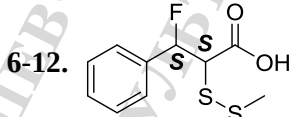
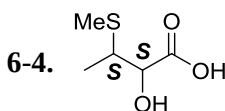
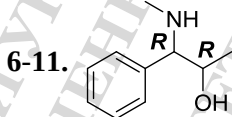
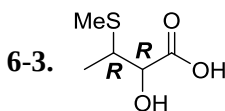
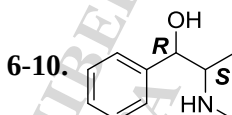
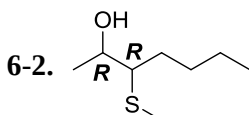
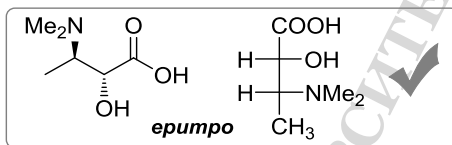
Фішера – по один бік від вертикальної лінії головного ланцюга. Такий варіант відносного розташування замісників біля сусідніх атомів Карбону називають **еритро**. Натомість у другого діастереомера замісники А та В у проєкції "зиг-заг" знаходяться по один бік відносно площини малюнку (*син*-конфігурація), а в проєкції Фішера – по різні боки від вертикальної лінії головного ланцюга. Такий варіант відносного розташування називають **трео**.

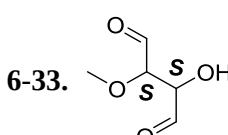
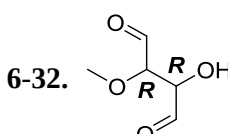
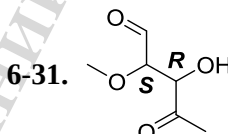
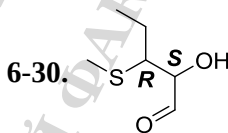
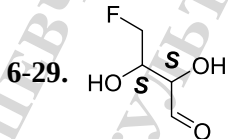
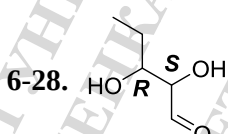
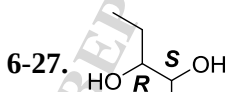
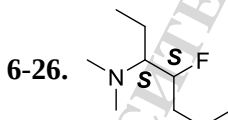
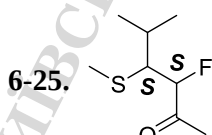
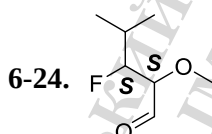
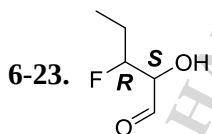
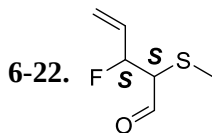
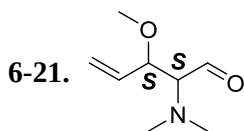
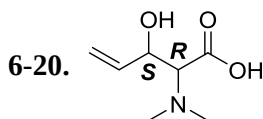
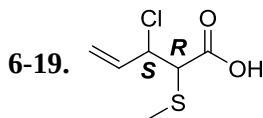
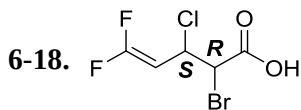
Конфігураційні індекси *еритро* та *трео* походять від назв тетроз еритрози та треози, які мають відповідне розташування вторинних спиртових груп:

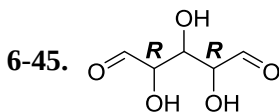
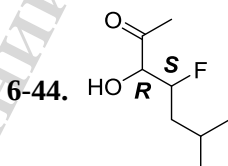
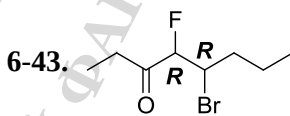
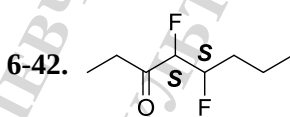
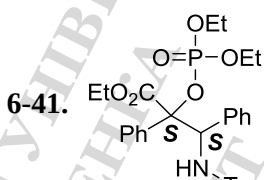
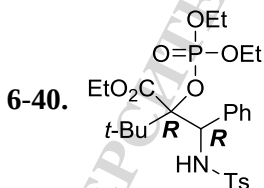
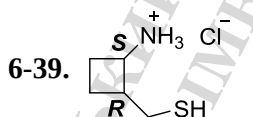
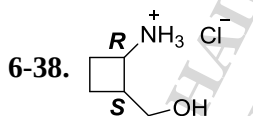
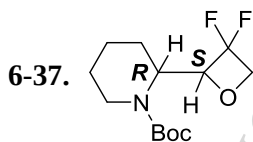
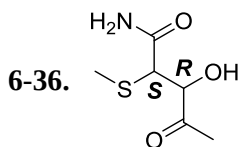
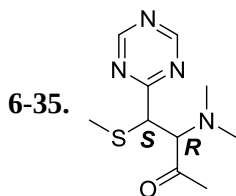
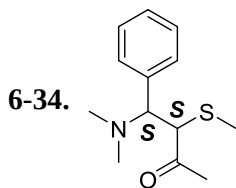


Нагадаємо, що індекси D та L надаються як результат порівняння конфігурації нижнього асиметричного центру проєкції Фішера з D- та L-гліцеральдегідом. Цей тип позначення конфігурації було запроваджено тоді, коли не було можливості визначити абсолютну конфігурацію хіральних молекул, лише відносну, порівнюючи їх зі стандартом, яким було обрано гліцеральдегід. Номенклатура D / L залишається актуальною для деяких природних молекул, передусім, – амінокислот і вуглеводів.

Застосовувавши ці правила до заданої структури, одержимо наступну відповідь:







ЧАСТИНА 7

Діастереоселективне приєднання до карбонільної групи

Завдання

Зобразіть за описом схему діастереоселективного приєднання нуклеofilу до карбонільної групи альдегиду з хіральним центром у α -положенні.

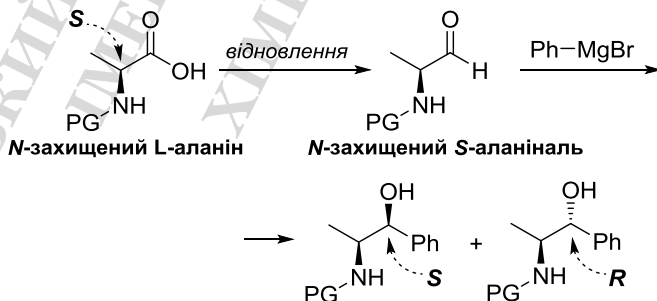
- 7-1. Унаслідок приєднання фенілмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-аланіналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.



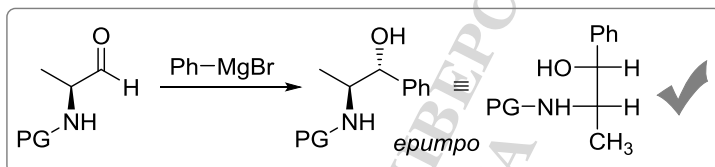
Відповідь

Хіральні амінокислоти – зручні вихідні речовини для синтезу широкого кола сполук з асиметричними атомами. Передусім це стосується природних амінокислот – доступного та практично невичерпного джерела для синтезу хіральних будівельних блоків. Зокрема, відновленням *N*-захищених амінокислот отримують альдегіди, а ті, в свою чергу, приєднуючи до карбонільної групи *C*-нуклеofil, відкривають шлях до різноманітних віцинальних аміноспиртів, які є поширеним мотивом у природних продуктах і фармацевтичних препаратах.

Унаслідок приєднання карбаніону до $C=O$ групи утворюється новий хіральний центр, тому в реакції за участю хірального альдегиду може утворитись два діастереомери.



Відносна конфігурація двох хіральних центрів першого з можливих продуктів – *трео*, другого – *еритро*; отже, остаточна відповідь:



- 7-2. Унаслідок приєднання фенілмагнійброміду до N -захищеного R -аланіналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-3. Унаслідок приєднання фенілмагнійброміду до N -захищеного R -аланіналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-4. Унаслідок приєднання фенілмагнійброміду до N -захищеного S -аланіналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-5. Унаслідок приєднання етилмагнійброміду до N -захищеного R -валіналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-6. Унаслідок приєднання етилмагнійброміду до N -захищеного S -валіналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-7. Унаслідок приєднання етилмагнійброміду до N -захищеного R -валіналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-8. Унаслідок приєднання етилмагнійброміду до N -захищеного S -валіналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-9. Унаслідок приєднання фенетилмагнійброміду до N -захищеного R -лейциналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-10. Унаслідок приєднання фенетилмагнійброміду до N -захищеного S -лейциналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.

- 7-11. Унаслідок приєднання фенетилмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-лейциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-12. Унаслідок приєднання фенетилмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-лейциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-13. Унаслідок приєднання *n*-пропілмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-норлейциналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-14. Унаслідок приєднання *n*-пропілмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-норлейциналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-15. Унаслідок приєднання *n*-пропілмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-норлейциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-16. Унаслідок приєднання *n*-пропілмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-норлейциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-17. Унаслідок приєднання ізобутилмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-метіоніналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-18. Унаслідок приєднання ізобутилмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-метіоніналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-19. Унаслідок приєднання ізобутилмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-метіоніналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-20. Унаслідок приєднання ізобутилмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-метіоніналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.

- 7-21. Унаслідок приєднання бензилмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-триптофану утворюється продукт з *ери-тро*-конфігурацією.
- 7-22. Унаслідок приєднання бензилмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-триптофану утворюється продукт з *ери-тро*-конфігурацією.
- 7-23. Унаслідок приєднання бензилмагнійброміду до *N*-захищеного *R*-триптофану утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-24. Унаслідок приєднання бензилмагнійброміду до *N*-захищеного *S*-триптофану утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-25. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *R*-ізолейцинану утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-26. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *S*-ізолейцинану утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-27. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *R*-ізолейцинану утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-28. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *S*-ізолейцинану утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-29. Унаслідок приєднання (*R*)-*втор*-бутилмагнійброміду до *N*-захищеного гліцинану утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-30. Унаслідок приєднання (*S*)-*втор*-бутилмагнійброміду до *N*-захищеного гліцинану утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.

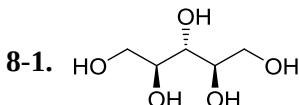
- 7-31. Унаслідок приєднання (*R*)-втор-бутилмагнійброміду до *N*-захищеного гліциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-32. Унаслідок приєднання (*S*)-втор-бутилмагнійброміду до *N*-захищеного гліциналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-33. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магній броміду до *N*-захищеного *R*-тирозиналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-34. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *S*-тирозиналю утворюється продукт з *еритро*-конфігурацією.
- 7-35. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *R*-тирозиналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.
- 7-36. Унаслідок приєднання (3-фенілпропіл)магнійброміду до *N*-захищеного *S*-тирозиналю утворюється продукт з *трео*-конфігурацією.

ЧАСТИНА 8

Мезо-форми та псевдохіральні центри

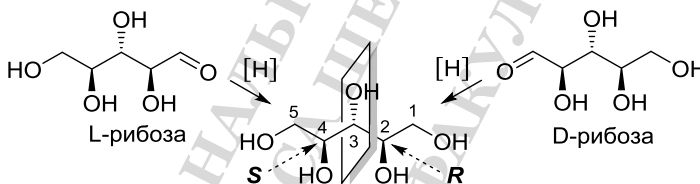
Завдання

Визначте конфігурацію хіральних та псевдохіральних центрів молекули.



Відповідь

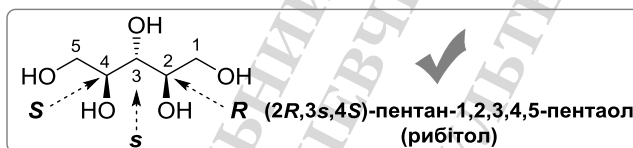
Зображений пентан-1,2,3,4,5-пентаол утворюється внаслідок відновлення рибози, причому, обох енантіомерів – D-та L-рибози; тривіальна назва цього продукту – рибітол.



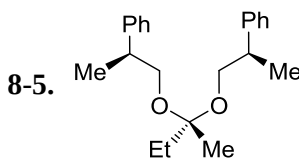
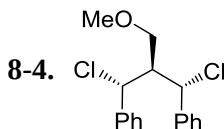
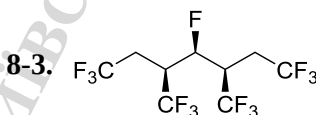
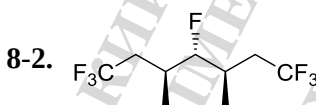
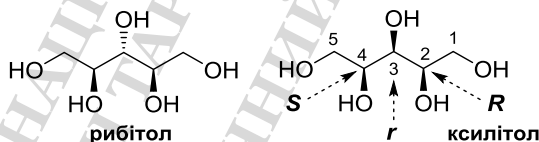
Ця молекула – ахіральна, вона має площину симетрії, що проходить через 3-ій атом Карбону. Водночас, 2-ий та 4-ий атом Карбону дійсно є асиметричними центрами, і визначення їхньої конфігурації не складає проблем. Зауважимо, що наведений на схемі напрям нумерації головного ланцюга рибітолу визначається саме конфігурацією хіральних центрів, адже атом з *R*-конфігурацією за правилами КІП вважається старшим за *S*.

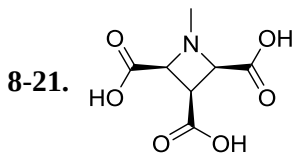
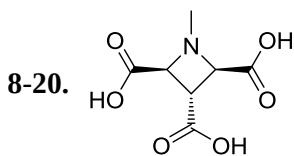
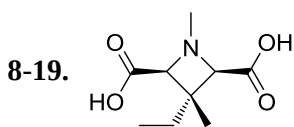
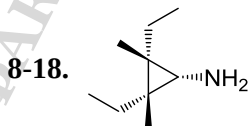
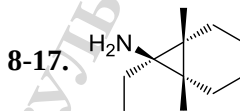
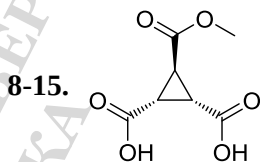
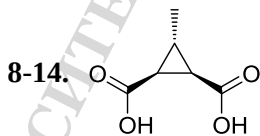
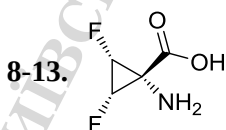
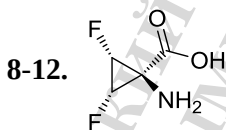
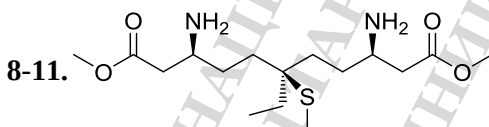
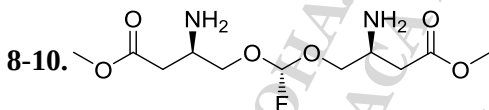
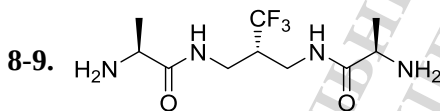
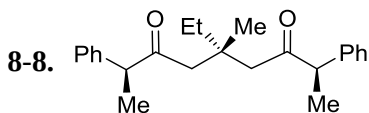
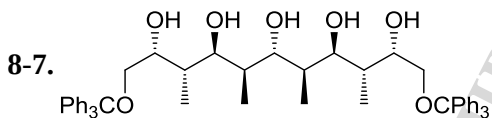
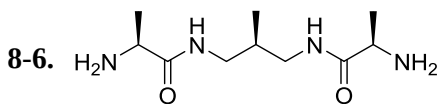
Рибітол – типовий приклад *мезо*-сполуки (також використовуються терміни "*мезо*-форма" та "*мезо*-ізомер"). Так називають молекули, які містять елементи хіральності, але загалом – ахіральні, оскільки елементи хіральності мають однаковий набір замісників і протилежні конфігурації. Загалом, ознака *мезо*-сполуки – парна кількість елементів хіральності та наявність площини симетрії чи центру інверсії між ними.

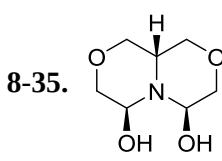
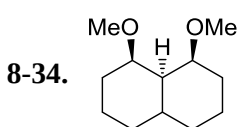
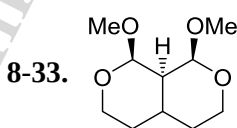
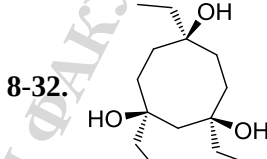
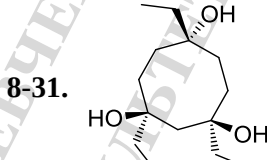
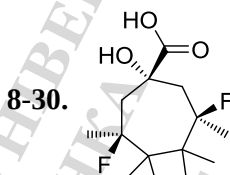
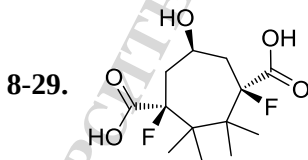
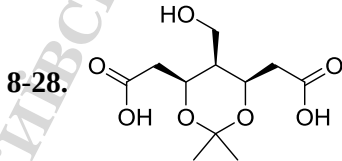
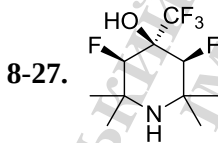
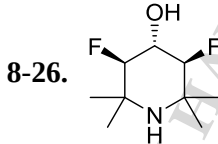
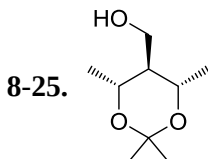
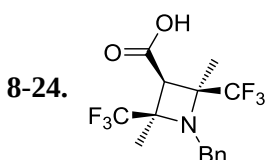
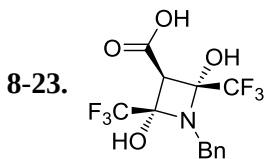
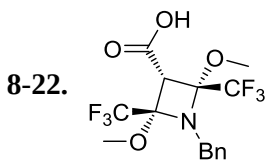
Якщо площина симетрії *мезо*-сполуки проходить не через центр зв'язку, а через атом, він може мати особливі характеристики. Так, 3-й атом Карбону рибітолу формально має чотири різних замісники, два з яких відрізняються лише конфігурацією хірального центру. Тобто, згідно з правилами КІП йому можна надати конфігураційний індекс *R* чи *S*. З іншого боку, було б дивно вважати хіральним атом, через який проходить площина симетрії. Тому такі атоми в *мезо*-сполуках називають **псевдохіральними**, і їхні конфігураційні індекси позначають маленькими літерами: *r* чи *s*. Так, псевдохіральний 3-й атом Карбону рибітолу має *s*-конфігурацію.

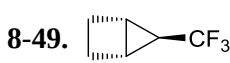
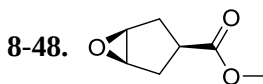
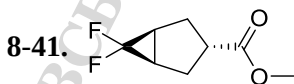
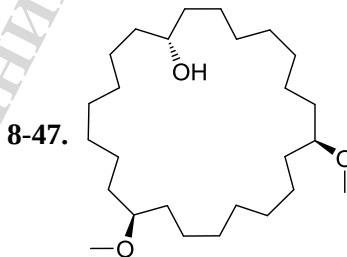
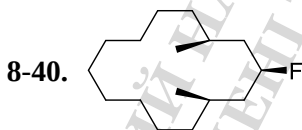
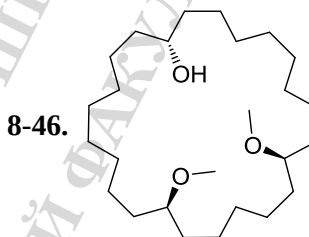
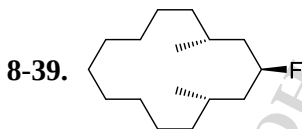
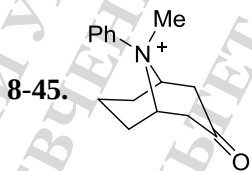
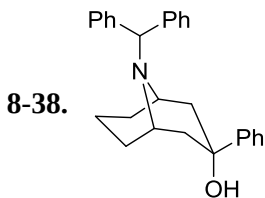
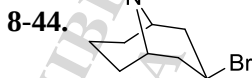
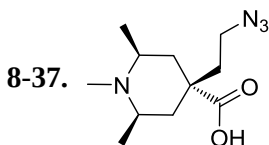
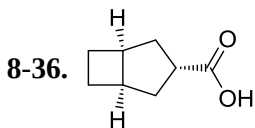


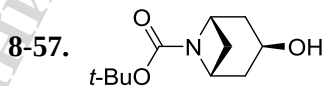
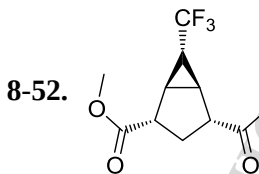
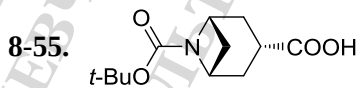
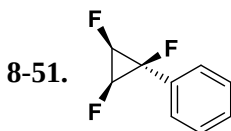
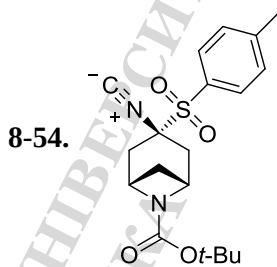
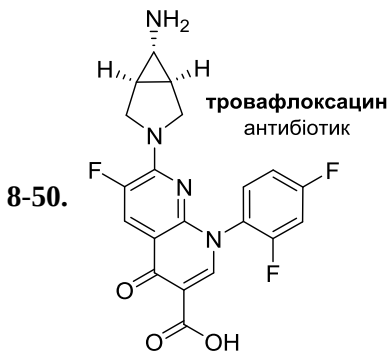
Один зі стереоізомерів рибітолу – ксилітол – також *мезо*-сполука; конфігурація його псевдохірального центру *r*. Це ілюстрація загального та очевидного правила: стереоізомери, які відрізняються конфігурацією лише псевдохірального атома, – діастереомери.









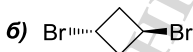
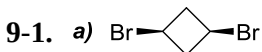


ЧАСТИНА 9

Насичені цикли з псевдохіральними центрами

Завдання

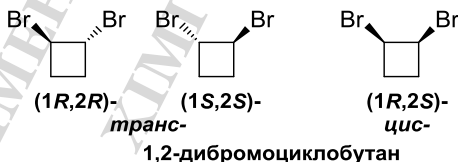
Визначте конфігурацію псевдохіральних центрів циклічної молекули.



Відповідь

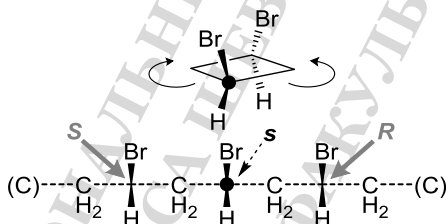
а) Раніше подібну стереоізомерію заміщених алканів відносили до категорії геометричної ізомерії (разом із ізомерією навколо подвійного зв'язку) і для позначення відносного розташування замісників користувались індексами *цис* та *транс*: відповідно по один бік від площини циклу або по різні боки. Звісно, у випадку такої простої молекули цей вид номенклатури вичерпно описує її будову, і можемо назвати її *цис*-1,3-дибромоциклобутаном. Але якщо перейти до складніших циклічних систем з більшою кількістю замісників індексів *цис* та *транс* може виявитися недостатньо; окрім того, цей тип номенклатури – умовний і не може бути уніфікований.

Для опису, наприклад, стереоізомерів 1,2-дибромоциклобутану можна без труднощів скористатись індексами *R / S*: цій назві відповідає пара енантіомерів (*транс*-розташування замісників) і *мезо*-форма (*цис*-розташування).



Але у молекулі 1,3-дибромоциклобутану С-1 та С-3 лежать у одній площині симетрії, отже, вони не є хіральними центрами. І навіть надання таким атомам псевдохіральних індексів може здатися непростою задачею, оскільки на перший погляд два з їхніх замісників видаються однаковими.

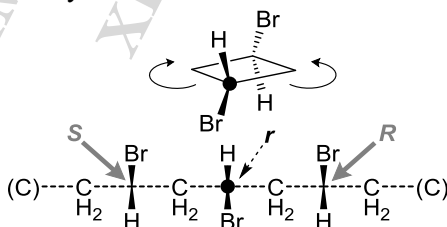
Для призначення таким атомам індексів r/s можна скористатись наступним способом. Побудуємо "розгорнуту" проекцію молекули за таким алгоритмом: розташуємо цикл горизонтально та будемо рухатись від атому, обраного для визначення індексу, спочатку справа наліво, а потім – зліва направо. "Розгортка" з обох боків закінчується тим же атомом, яким і почалась, але фантомним, без замісників. На проекції темними конусами зображено зв'язки, які спрямовано на нас, штрихами – зв'язки, які спрямовано від нас. У такій уявній молекулі стереоцентри, що позначені сірими стрілками, є дійсно хіральними, і їм можна легко надати індекси R та S . Тепер центральному атому також можна надати індекс, маючи на увазі, що замісник з R конфігурацією старший за S .



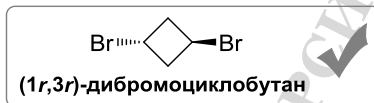
Звісно, конфігураційний індекс C-1 та C-3 буде збігатися, оскільки "розгорнуті" проекції є ідентичними.



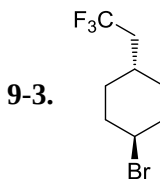
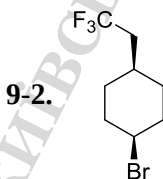
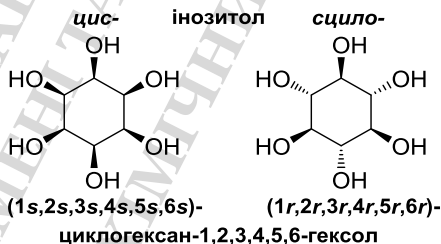
б) Розгорнута проекція, побудована для *транс*-ізомеру, виглядатиме наступним чином:

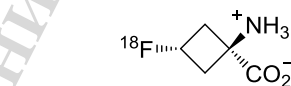
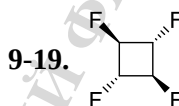
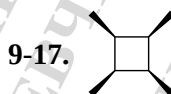
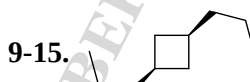
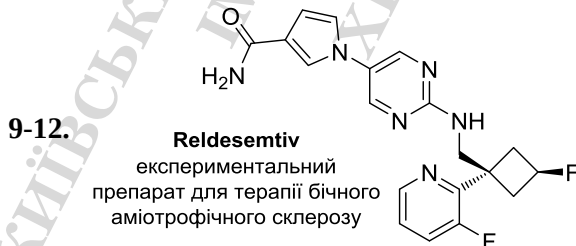
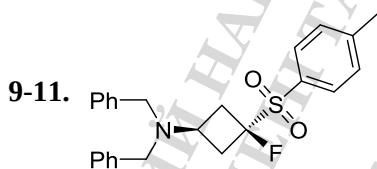
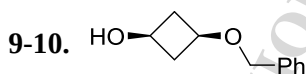
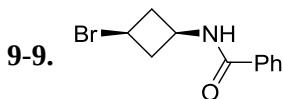
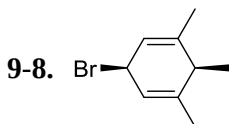
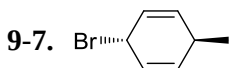
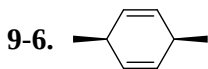
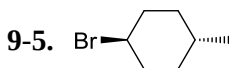
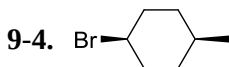


І знову конфігурації C-1 та C-3 мають збігатися, тому остаточна відповідь:

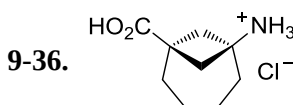
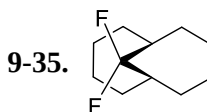
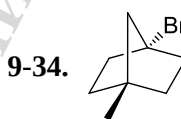
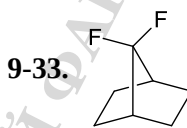
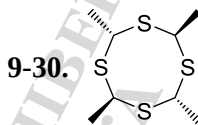
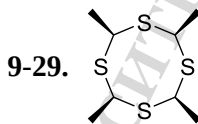
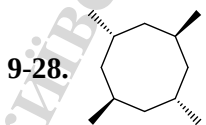
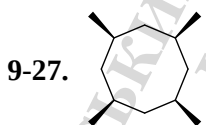
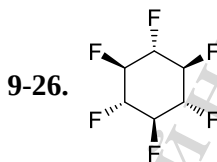
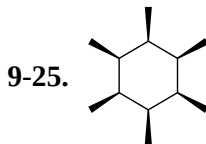
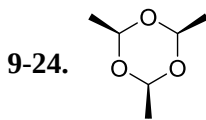
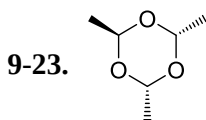
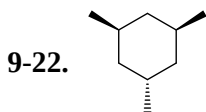
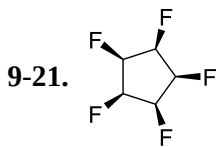


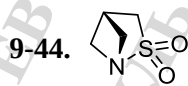
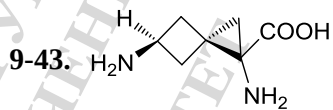
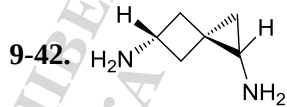
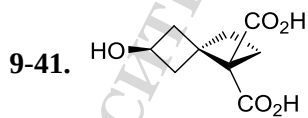
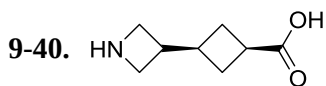
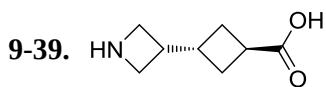
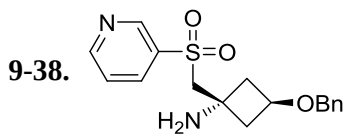
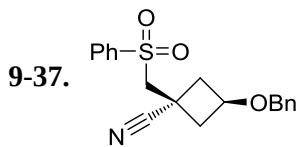
Це дійсно загальна тенденція: у таких молекулах *цис*-розташуванню замісників відповідають індекси *s,s*, а *транс* – *r,r*. Інші варіації конфігураційних індексів неможливі: ці змодельовані псевдохіральні центри не є незалежними, бо вони визначають конфігурацію один одного. Аналогічною є номенклатура стереоцентрів високосиметричних циклоalkanів з усіма однаковими замісниками: якщо кожна пара сусідніх замісників має *цис*-розташування, то конфігурація усіх центрів – *s*, якщо відносне розташування кожної сусідньої пари *транс* – *r*. Як приклад можна навести два ізомери циклогексан-1,2,3,4,5,6-гексолу (тривіальна назва – інозит чи інозитол). Усі його ізомери мають специфічний індекс, який вказує на розташування гідроксильних груп; рекомендується самостійно підрахувати кількість ізомерів інозитолу, а також визначити, чи є серед цих молекул хіральні. Цікаво, що ізомер, у якого всі OH-групи розташовані по один бік умовної площини циклу (*цис*-інозитол) – єдиний поки не знайдений у природі.





9-20. Fluciclovine (^{18}F) / Axumin
діагностичний агент у ПЕТ
(підозра на рецидив раку
передміхурової залози)



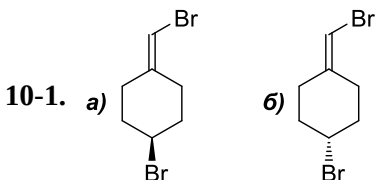


ЧАСТИНА 10

Особливості стереоізомерії сполук з екзоциклічним подвійним зв'язком

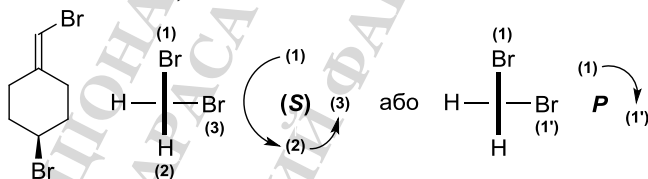
Завдання

Визначте конфігураційні індекси молекули.

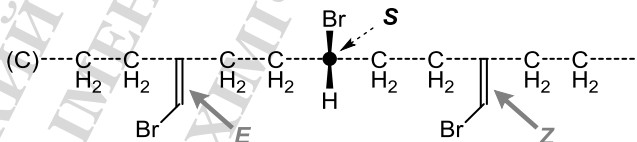


Відповідь

а) Замісники біля С-1 та біля атому Карбону метиліденового фрагменту розташовані у взаємно перпендикулярних площинах, тому цю молекулу допускається розглядати як структуру з осьовою хіральністю та відповідним індексом (див. вище, частина 3).

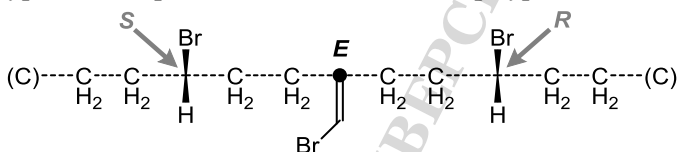


Але більш уживаним у сучасній номенклатурі є інший спосіб: надати індекс *R / S* ендоциклічному атому з замісником та індекс *Z / E* подвійному зв'язку.

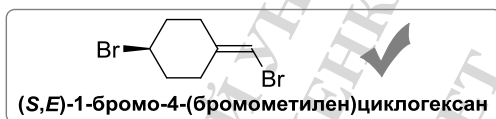


Зробити це неважко, побудувавши "розгорнуту" проєкцію молекули так, як це наведено в попередній частині. Для визначення *R / S* конфігурації атома циклу варто згадати, що замісник із конфігурацією подвійного зв'язку *Z* вважається старшим за аналогічний фрагмент, але з *E*-конфігурацією.

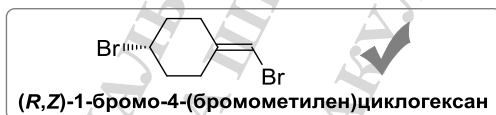
У свою чергу, визначаючи на проєкції Z/E індекс для подвійного зв'язку, маємо на увазі, що замісник з R -конфігурацією старший за замісник з S -конфігурацією.



Отже, назва сполуки, що відображає її просторову будову:



б) Побудувавши аналогічні проєкції для цього ізомеру, отримаємо наступну відповідь:

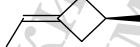


І знову можливі лише дві комбінації індексів, адже конфігурації sp^3 -гібридизованого атому з замісником та подвійного зв'язку взаємопов'язані. Це ще раз підтверджує, що в таких сполуках не дві незалежні стереоланки, а одна – вісь хіральності.

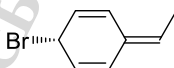
10-2.



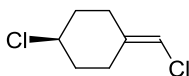
10-3.



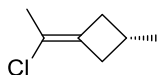
10-4.



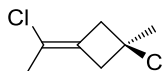
10-5.



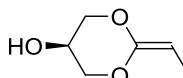
10-6.



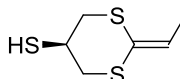
10-7.



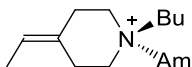
10-8.



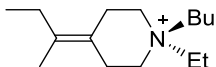
10-9.



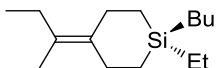
10-10.



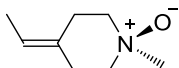
10-11.



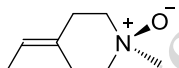
10-12.



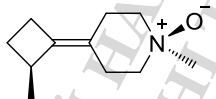
10-13.



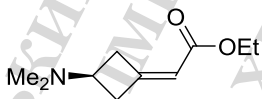
10-14.



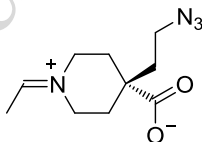
10-15.



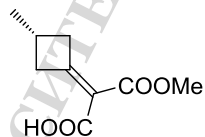
10-16.



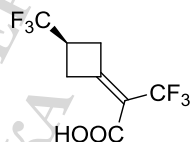
10-17.



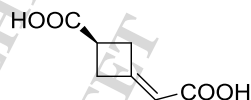
10-18.



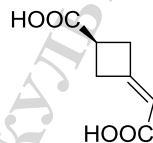
10-19.



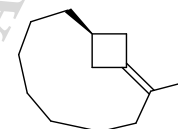
10-20.



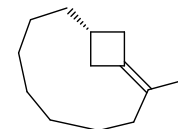
10-21.



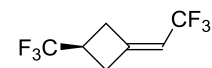
10-22.



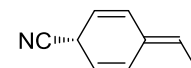
10-23.

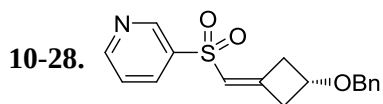
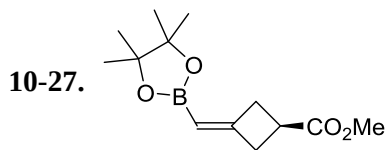
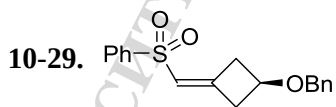
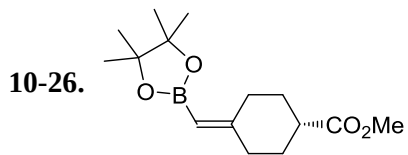


10-24.



10-25.



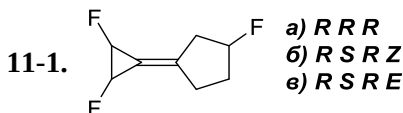


ЧАСТИНА 11

Зображення просторової будови молекул зі стереоланками різних типів

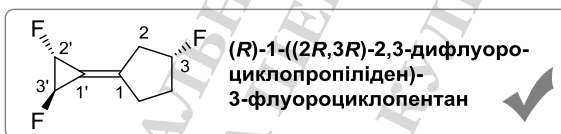
Завдання

Зобразить стереоізомери наведеної конфігурації.



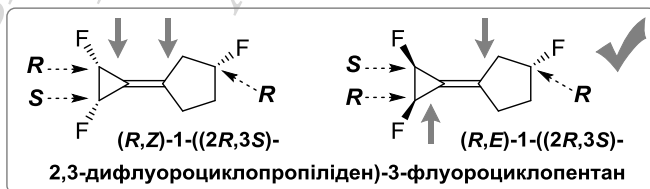
Відповідь

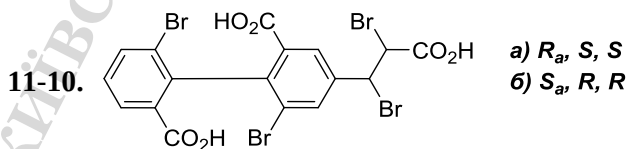
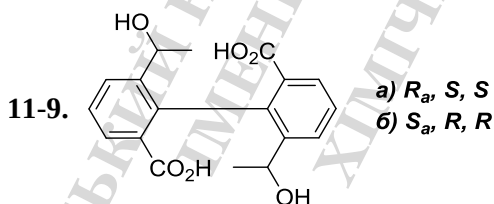
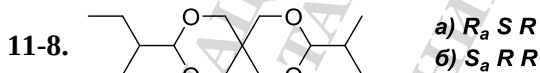
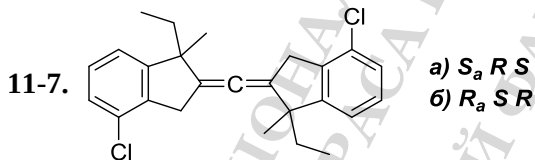
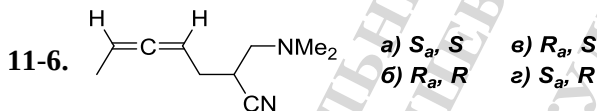
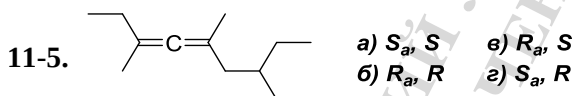
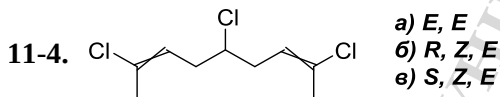
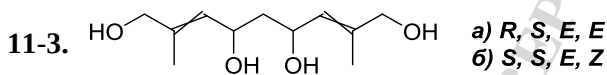
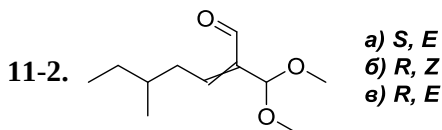
а) Skorиставшись рекомендаціями до задачі 5.1, зобразимо просторове розташування замісників біля трьох асиметричних атомів Карбону:

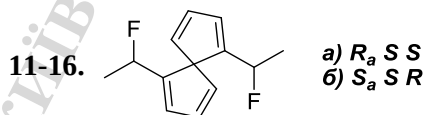
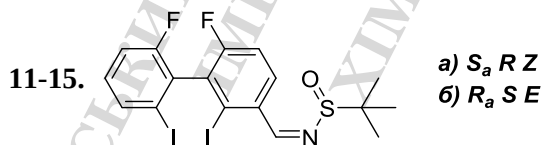
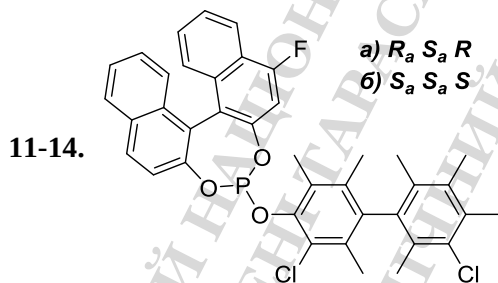
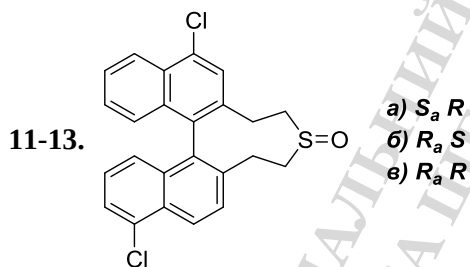
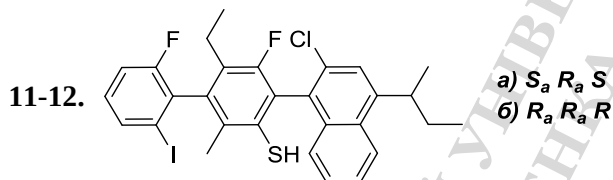
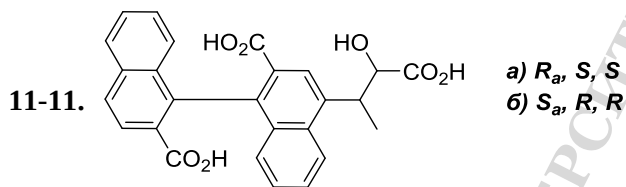


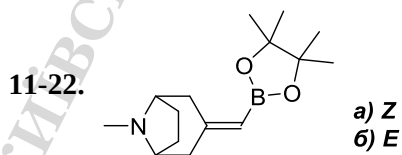
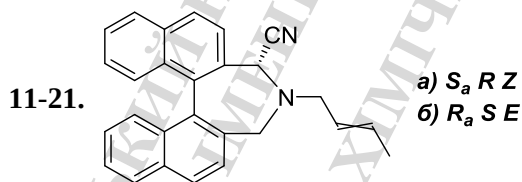
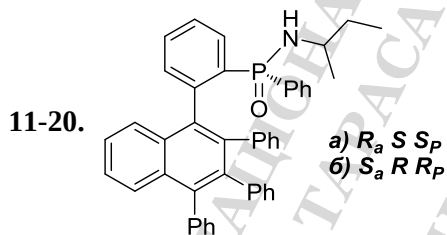
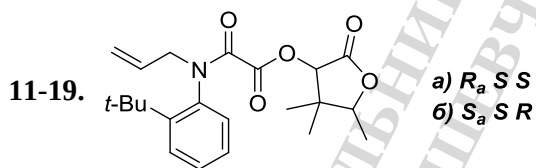
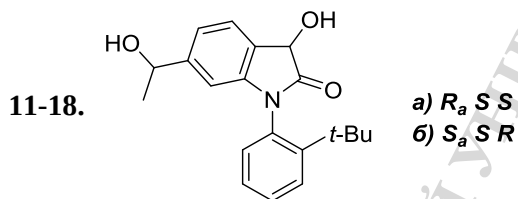
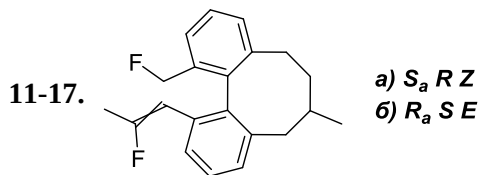
Подвійному зв'язку цього ізомеру не можна надати конфігураційний індекс, оскільки замісники біля C1' – однакові.

б) та в) Якщо атоми C2' та C3' матимуть протилежні конфігурації, то фрагменту C=C можна надати конфігураційний індекс, беручи до увазі, що за правилами КІП замісник з *R*-конфігурацією старший за замісник з *S*-конфігурацією. Нижче на рисунку сірими стрілками позначено старші замісники біля C=C; зазначимо, що напрям нумерації циклопропіліденового фрагменту залежить від конфігурації його атомів, адже атому з конфігурацією *R* потрібно надати менший номер.

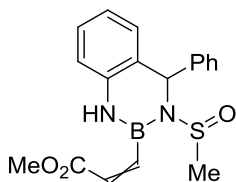






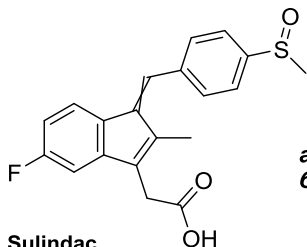


11-23.



- a) $E S S_S$
б) $Z R R_S$

11-24.

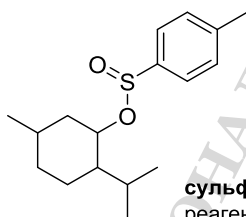


- a) $Z S S_S$
б) $Z R S_S$

Sulindac

нестероїдний протизапальний препарат

11-25.

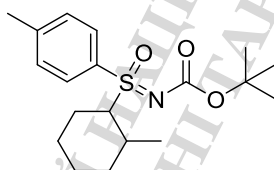


- a) $1R 2S 5R S_S$
б) $1R 2S 5R R_S$

сульфінат Андерсена

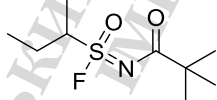
реагент для асиметричного синтезу

11-26.



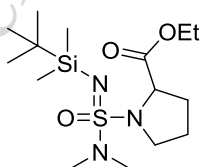
- a) $R S_S$
б) $S R_S$

11-27.

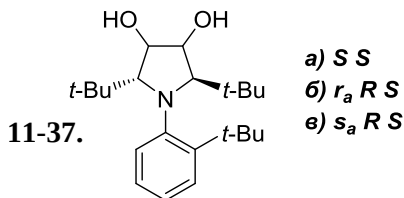
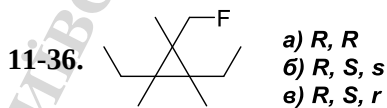
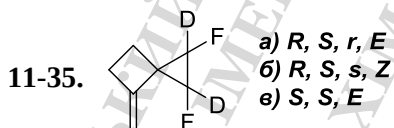
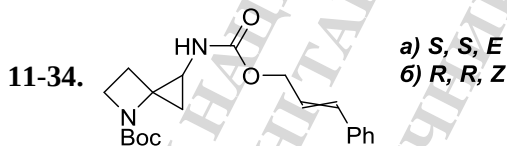
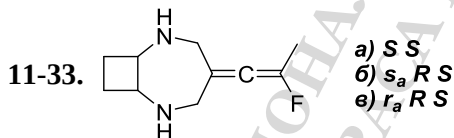
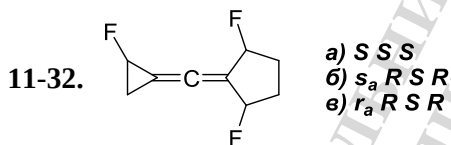
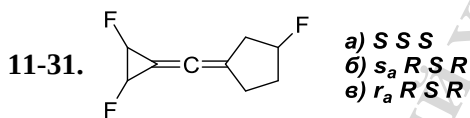
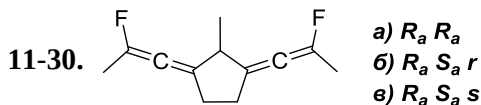
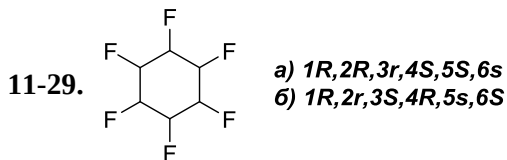


- a) $R S_S$
б) $S R_S$

11-28.



- a) $R S_S$ в) $R R_S$
б) $S R_S$ з) $S S_S$

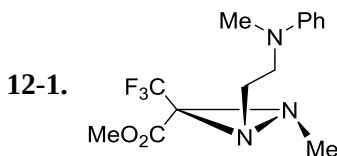


ЧАСТИНА 12

Опис просторової будови складних молекул

Завдання

Надайте опис просторової будови молекули: кількість та характер стереоланок, їхня конфігурація, кількість можливих стереоізомерів, молекула хіральна / ахіральна тощо.

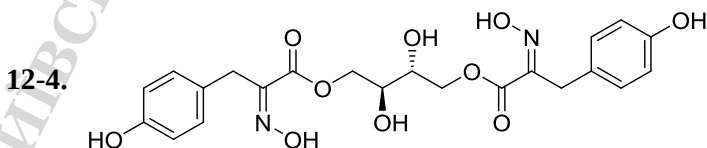
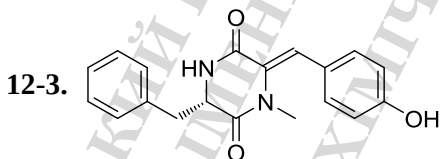
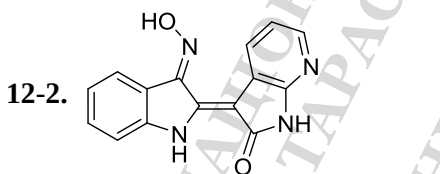
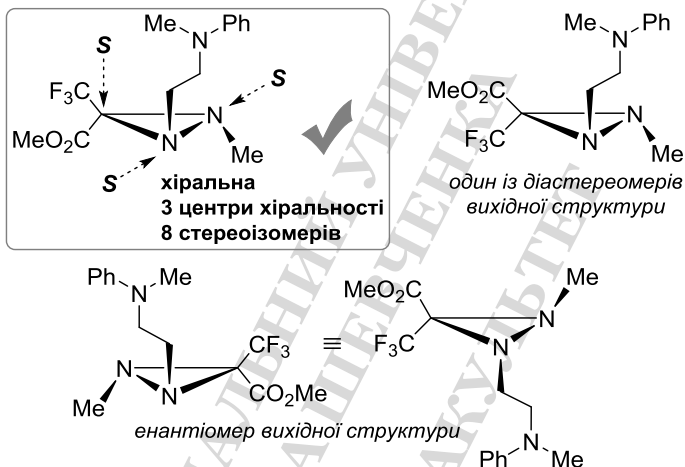


Відповідь

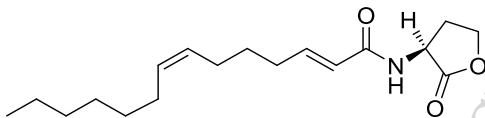
Насичені тричленні цикли з електроноакцепторними замісниками – одні з дуже небагатьох похідних, де пірамідальна інверсія sp^3 -гібридизованого Нітрогену достатньо повільна для того, щоб можна було зафіксувати його окремі стани. У цьому випадку Нітроген є хіральним центром тетраедричної конфігурації з чотирма замісниками (четвертим і наймолодшим замісником вважається пара електронів, її масове число – 0). Для позначення конфігурації хірального Нітрогену використовується звичайна *R* / *S*-номенклатура, адже ці індекси можна застосувати до будь-якого центру тетраедричної конфігурації з чотирма різними замісниками. Уточнимо, що якщо індекс *R* чи *S* показує конфігурацію гетероатома (не Карбону), до нього часто додають позначку цього атома, наприклад: S_N , R_{Si} , S_P , R_S тощо.

Наведена молекула має три центри хіральності – один атом Карбону та два Нітрогени, що складають тричленний цикл (атом Нітрогену поза циклом зазнає швидкої інверсії конфігурації та не вважається стереоцентром). Кожен стереоцентр унікальний, отже, молекула загалом хіральна, і жоден зі стереоізомерів не може бути *мезо*-формою; також стереоцентри можуть незалежно один від одного змінювати свою конфігурацію. За цих умов для розрахунку кількості стереоізомерів можна скористатись формулою 2^n . Звичайно, з

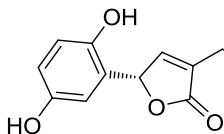
восьми теоретично можливих стереоізомерів більш стабільними будуть ті, що мають *транс*-розташування замісників біля ендоециклічних атомів Нітрогену: у них мінімальні як стеричні перешкоди замісників, так і електростатичне відштовхування електронних пар.



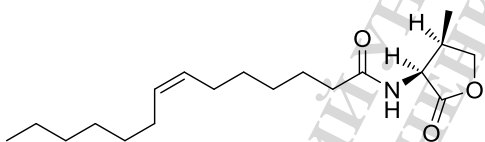
12-5.



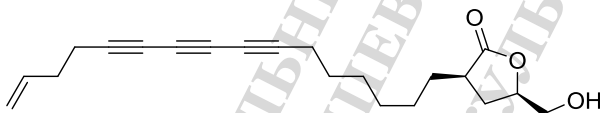
12-6.



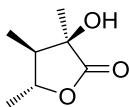
12-7.



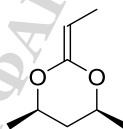
12-8.



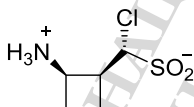
12-9.



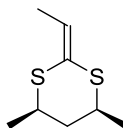
12-13.



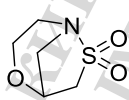
12-10.



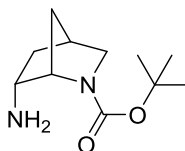
12-14.



12-11.



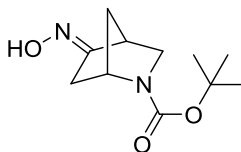
12-15.

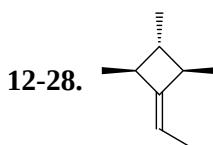
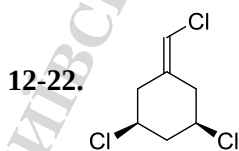
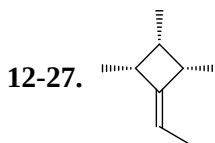
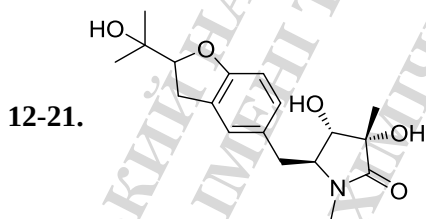
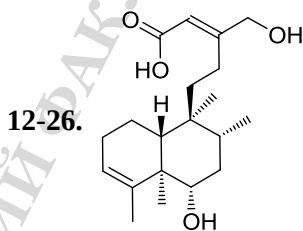
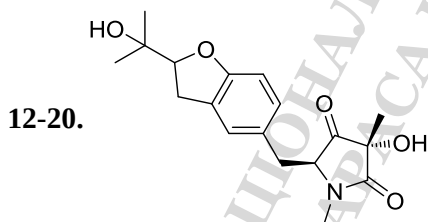
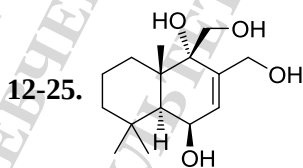
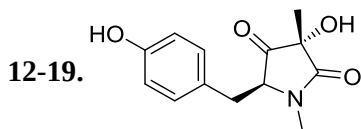
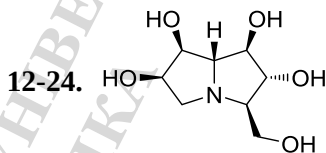
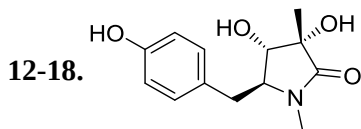
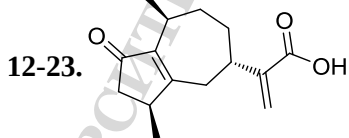
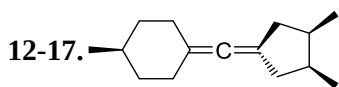


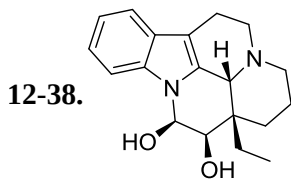
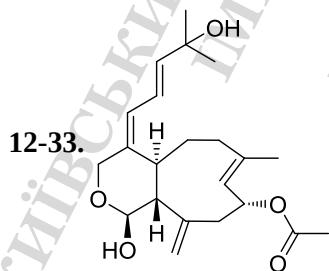
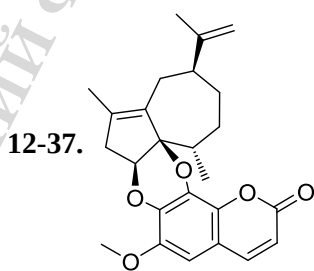
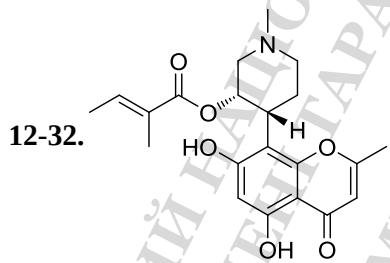
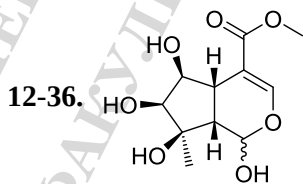
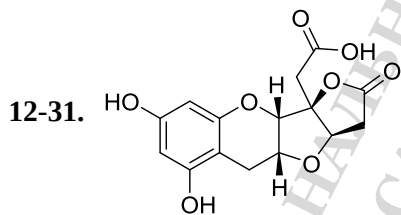
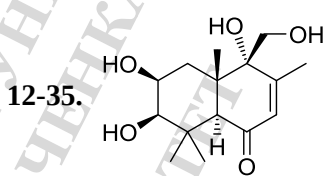
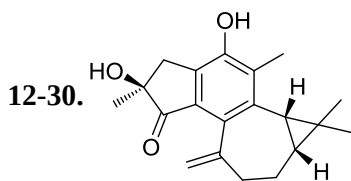
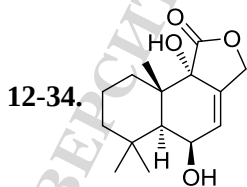
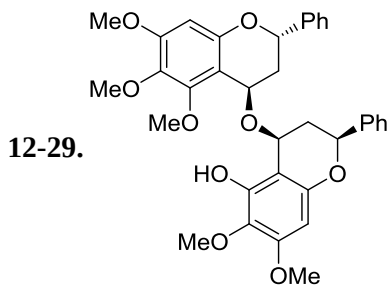
12-12.

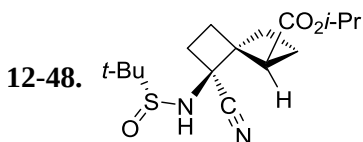
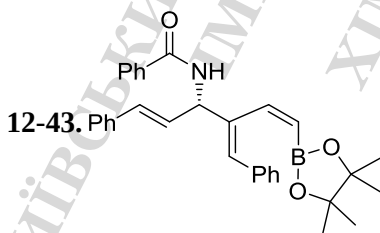
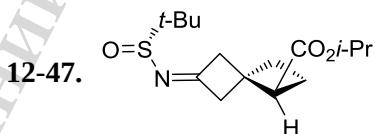
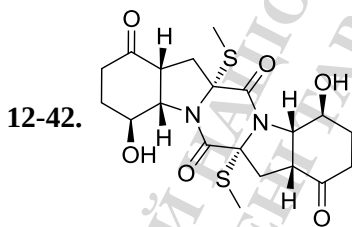
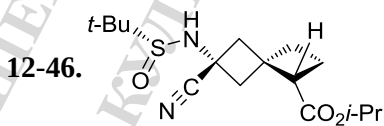
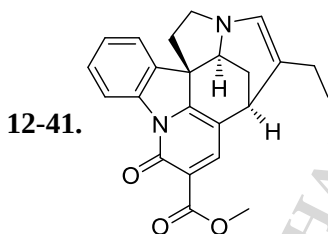
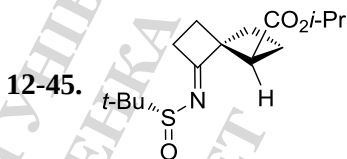
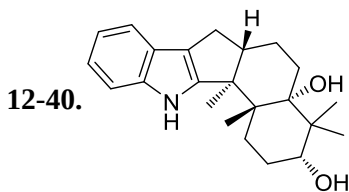
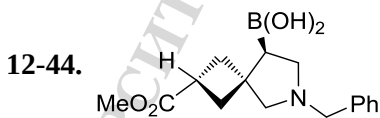
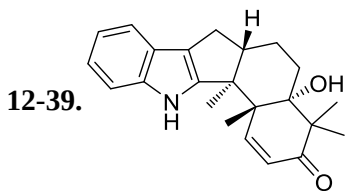


12-16.

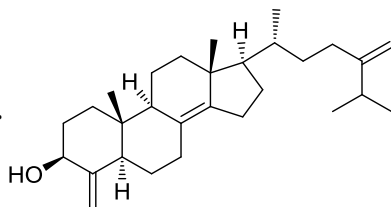




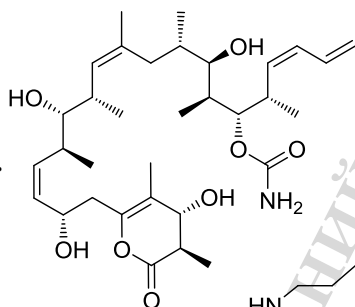




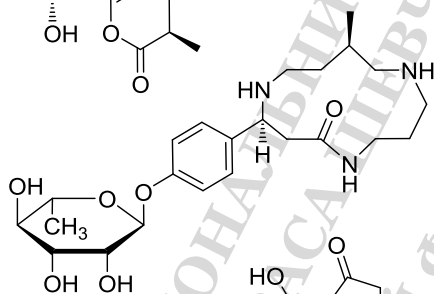
12-49.



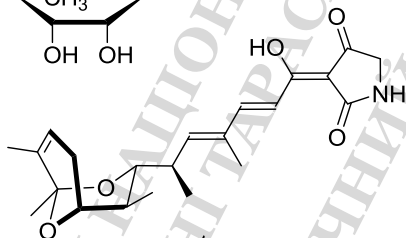
12-50.



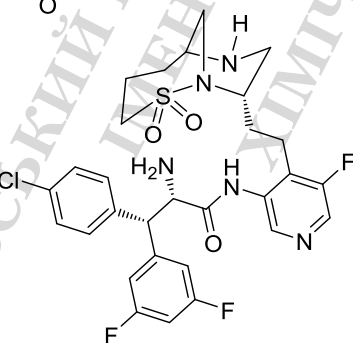
12-51.



12-52.



12-53.



ЧАСТИНА 13

Гомо- та гетеротопні атоми

Завдання

Які з атомів молекули гомо- та гетеро(енантіо/діастерео)топні?



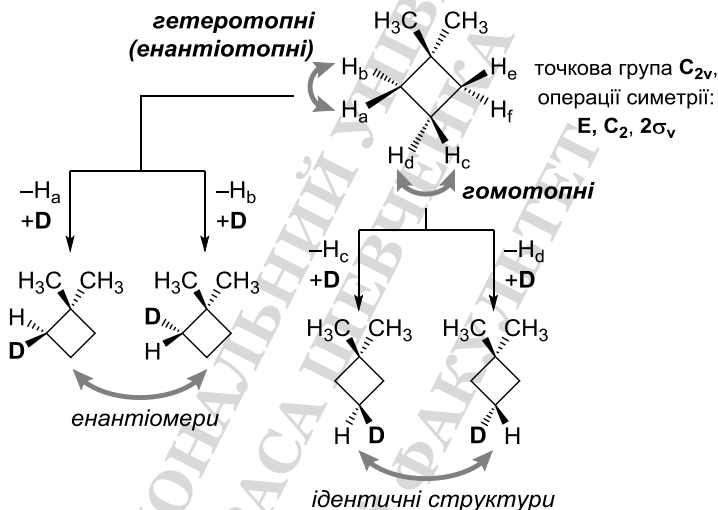
Відповідь

Терміни гомо- чи гетеротопні атоми / групи / ліганди (останній термін більш загальний) застосовують до певних фрагментів молекули тоді, коли потрібно підкреслити, яке оточення мають ці фрагменти – однакове чи різне, – та, як наслідок, чи будуть вони мати однакові спектральні характеристики, поводити себе однаково у хімічних перетвореннях. **Гомотопними** називають ліганди, оточення яких однакове, і продукти їхнього почергового заміщення у будь-яких реакціях також будуть однаковими. Відповідно, **гетеротопні** ліганди мають різне оточення, і їхнє почергове заміщення приведе до різних продуктів. Щоб пояснити ці визначення, позначимо в наведеній молекулі кожен із атомів Гідрогену метиленових груп та прослідкуємо за їхньою поведінкою під час виконання операцій симетрії та в реакціях заміщення.

У зображеному 1,1-диметилциклобутані є дві площини симетрії (одна знаходиться в умовній площині циклу, інша – проходить через C1, C3 й атоми Карбону обох метильних груп) і вісь C_2 (проходить через C1 та C3). Дзеркальна площина, яка співпадає з площиною циклу, виконує наступні трансформації: $H_a \rightarrow H_b$, $H_c \rightarrow H_d$, $H_e \rightarrow H_f$. Вісь другого порядку забезпечує переходи $H_a \rightarrow H_f$, $H_b \rightarrow H_e$, $H_c \rightarrow H_d$. Цих фактів достатньо для того, щоб зробити правильні висновки; але прийом з почерговим заміщенням є більш показовим.

Замість, наприклад, атомом Дейтерію спочатку H_c , а потім – H_d . Отримані структури повністю ідентичні, тому атоми H_c та H_d є **гомотопними**.

Якщо ж використати цей прийом до пари атомів H_a та H_b , то результуючі структури не будуть ідентичними, це – пара енантіомерів. Таким чином, атоми H_a та H_b – **гетеротопні**, а точніше – **енантіотопні**. Хімічні оточення енантіотопних атомів у молекулі є дзеркальними відображеннями один одного.

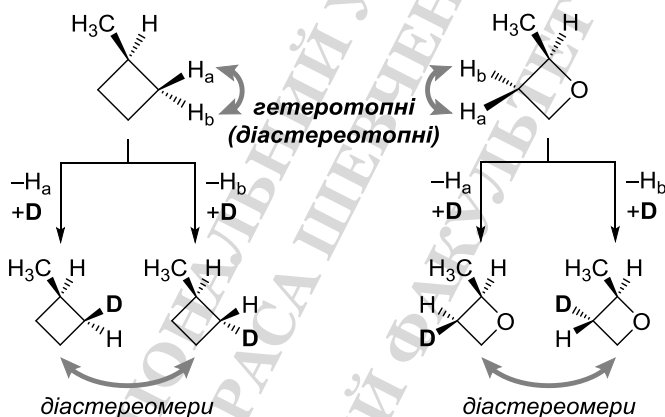


Застосовуючи метод почергового заміщення, неважко впевнитись, що пари H_a-H_f , H_b-H_e – гомотопні, а H_e-H_f , H_a-H_e , H_b-H_f , H_c-H_d – енантіотопні.

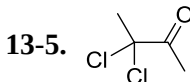
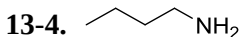
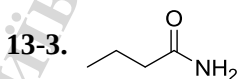
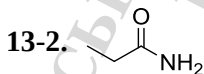
Вище згадувалось, що поняття "гомо / гетеротопний" можна вживати також для опису груп атомів. Так, у 1,1-диметилциклобутані метильні групи – гомотопні.

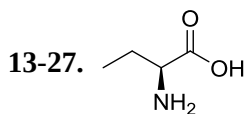
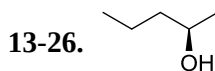
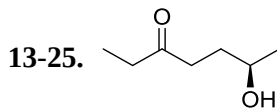
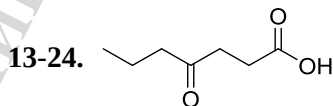
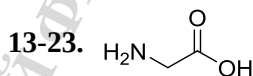
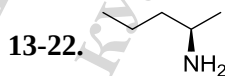
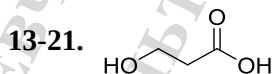
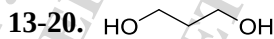
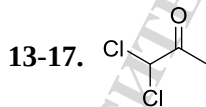
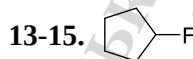
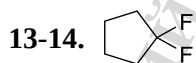
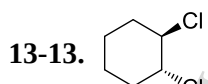
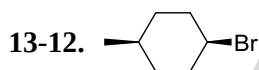
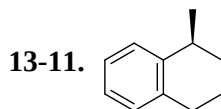
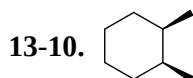
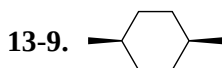
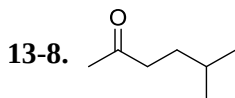
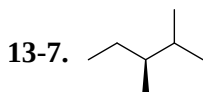
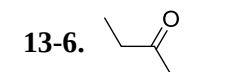
Потрібно підкреслити: інколи причиною того, що атоми чи угруповання співвідносяться як гомотопні, є можливість конформаційних змін. У нашому випадку атоми Гідрогену метильної групи – гомотопні, і метод заміщення це підтверджує: який з атомів H в групі CH_3 ми б не замістили, новий замісник можна розташувати в потрібному оточенні, обертаючи цю групу без зміни інших геометричних параметрів молекули.

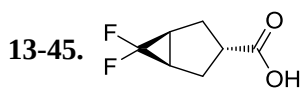
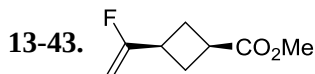
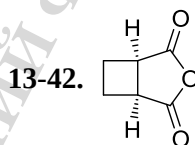
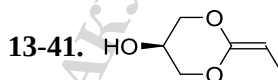
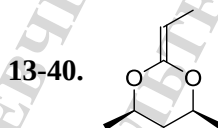
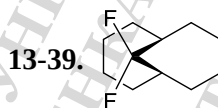
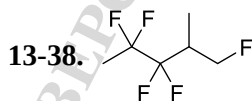
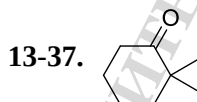
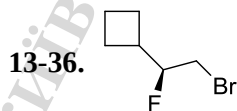
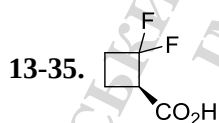
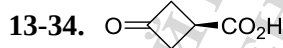
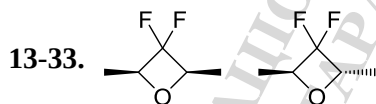
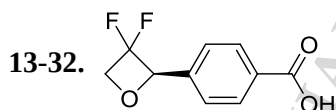
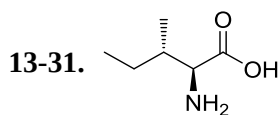
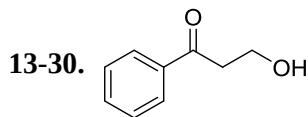
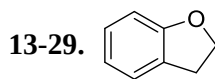
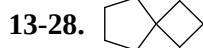
У 1,1-диметилциклобутані діастереотопних атомів немає. Але можна навести досить простий приклад молекули з діастереотопними атомами – метилциклобутан. Для цієї структури не існує операцій симетрії, які б забезпечили, наприклад, трансформацію $H_a \rightarrow H_b$ (хоча молекула має площину симетрії, ці атоми знаходяться по один її бік), що вже є достатнім показником різного оточення цих атомів. Почергово заміщуючи H_a та H_b , наприклад, атомом D, отримуємо різні молекули, а саме, діастереомери; це означає, що атоми H_a та H_b – **діастереотопні**.

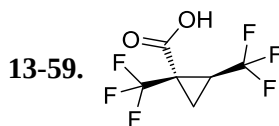
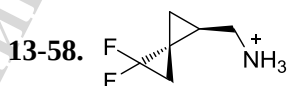
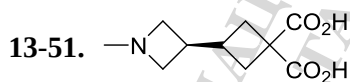
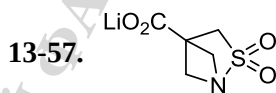
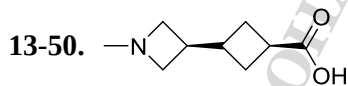
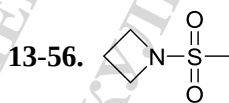
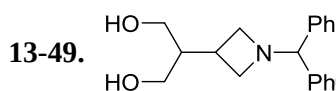
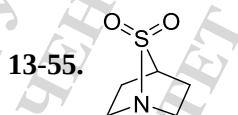
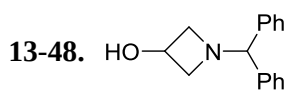
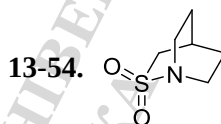
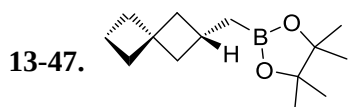
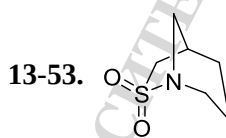
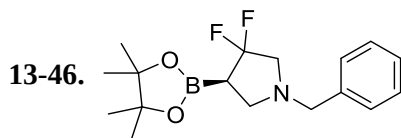


2-Метил оксетан – ще один приклад молекули з діастереотопними атомами. Ця молекула – хіральна і не має елементів симетрії, і тому протони CH_2 -груп – діастереотопні. Але зауважимо, що відсутність у молекулі елементів симетрії не означає, що в ній немає гомотопних атомів; наприклад, у 2-метил оксетані гомотопними є протони групи CH_3 .







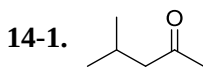


ЧАСТИНА 14

Прохіральність та енантіоселективні реакції

Завдання

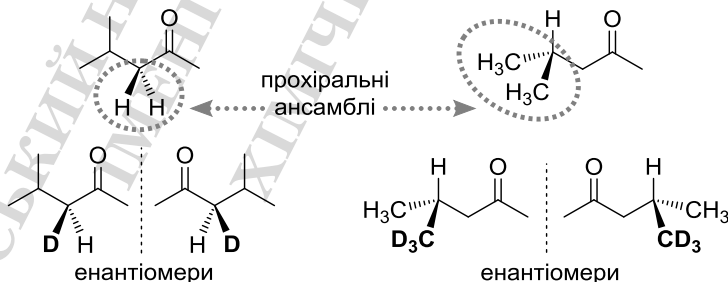
- а)** Зобразіть ізомер, що утворюється внаслідок заміни на новий замісник (A) замісника *pro-R* у прохіральному угрупованні молекули;
- б)** Зобразіть ізомер, що утворюється внаслідок заміни на новий замісник (A) замісника *pro-S* у прохіральному ансамблі;
- в)** Зобразіть ізомер, що утворюється внаслідок приєднання реагенту (H–A) до подвійного зв'язку з боку *re* поверхні;
- г)** Зобразіть ізомер, що утворюється внаслідок приєднання реагенту (H–A) до подвійного зв'язку з боку *si* поверхні.



Відповідь

а)

У зображеній ахіральній молекулі ізобутилметилкетону є два прохіральних ансамблі: це два атоми Гідрогену метиленової групи та дві метильні групи ізопропільного залишку. Якщо один із цих фрагментів замінити новим угрупованням (воно має відрізнятися від інших оточуючих замісників), молекула набуде хіральності.

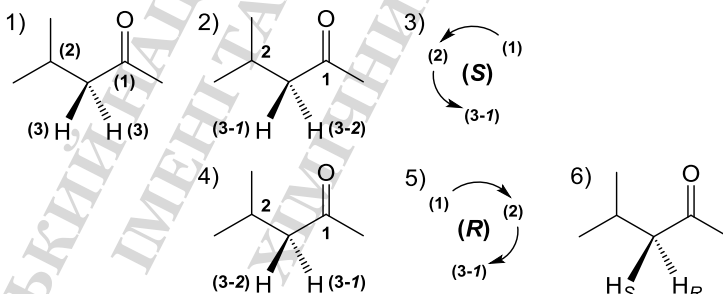


Замісники (або ліганди) прохірального ансамблю поміж собою співвідносяться як *енантіотопні*; їхні хімічні та спектральні характеристики в симетричному середовищі

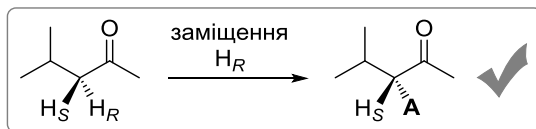
будуть ідентичними, але відрізнятимуться в хіральному середовищі. Для ілюстрації цих тез зображено результат заміни одного із Н прохіральної групи CH_2 на D, а також однієї із вказаних CH_3 груп на CD_3 .

Різницю між енантіотопними атомами чи групами помічають, зокрема, біологічні ферментні системи, переважно реагуючи лише з одним із них; для того, щоб вказати, з яким саме, застосовують індекси *pro-R* чи *pro-S*.

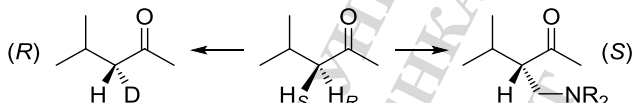
Для позначення цими індексами атомів Н біля прохірального атома Карбону метиленової групи скористаємось наступним алгоритмом: 1) визначимо старшинство замісників навколо атома Карбону групи CH_2 ; у двох Н буде однаковий порядковий номер – (3); 2) позначимо порядок старшинства ближнього до нас атома (3-1), а дальнього – (3-2), приймаючи, що (3-1) старший за (3-2); 3) оскільки ми тепер вважаємо всі 4 замісники біля Карбону різними, то можемо визначити його конфігурацію; в цьому випадку – S; тому атом, якому ми призначили більше старшинство, матиме індекс **pro-S**; 4) для перевірки призначимо дальньому від нас Н більше старшинство (3-1); 5) визначимо конфігурацію з врахуванням нового порядку старшинства – це дійсно буде R, тому атом, якому надали більше старшинство, матиме індекс **pro-R**.



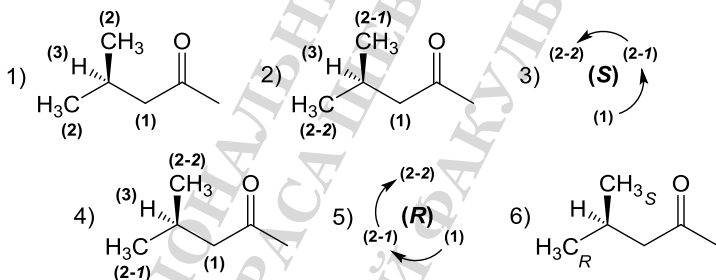
Отже, перший із можливих розв'язків задачі:



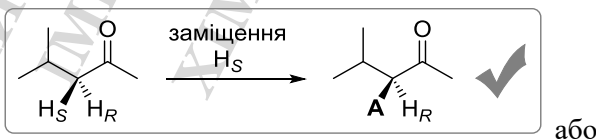
Варто уточнити, що заміщення H_R не обов'язково приведе до утворення хірального продукту з конфігурацією R – це залежить від замісників у кожному конкретному випадку і не має чітких закономірностей. Припустимо, що для прохірального фрагменту ізобутилметилкетону ми проведемо реакції дейтерообміну та амінометилування, і в обох випадках заміститься H_R , тоді дейтерована похідна матиме конфігурацію R , а амінометильна – S .



За аналогічним алгоритмом визначимо, яка із метильних груп характеризується як *pro-R*.



І ще один розв'язок задачі:

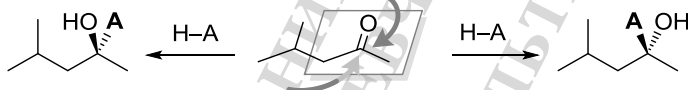


або



6)

Унаслідок приєднання до тригонального sp^2 -гібридизованого Карбону та перетворення його на тетраедричний sp^3 -гібридизований, останній може стати центром хіральності, якщо буде оточений 4 різними замісниками. Звісно, з ахіральної молекули, за відсутності будь-яких факторів асиметрії, з рівною ймовірністю утворюються обидва енантіомери, адже приєднання нового замісника з одного чи іншого боку площини симетрії тригонального Карбону рівноймовірне. Для випадку, описаного в задачі, – приєднання реагенту (H–A) до карбонільної групи ізобутилметилкетону – це виглядатиме так:

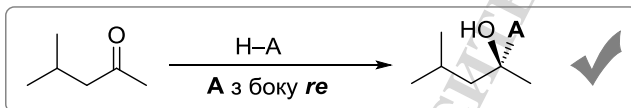


Але в асиметричному середовищі один бік площини матиме перевагу перед іншим, і, як наслідок, приєднання буде йти переважно з цього боку; буде утворюватись здебільшого один із енантіомерів. Для опису таких процесів потрібно мати спосіб позначення двох боків площини; для цього й застосовують індекси **re** та **si**.

Розглянемо один з боків планарного фрагменту молекули та позначимо старшинство замісників біля атому Карбону Карбонільної групи, не зважаючи на кратність зв'язків. Із цього боку старшинство замісників спадає проти руху годинникової стрілки, отже, ця сторона площини – **si**. Якщо розглядати інший бік площини, то старшинство замісників буде спадати в напрямку руху годинникової стрілки, тому цей бік площини – **re**.

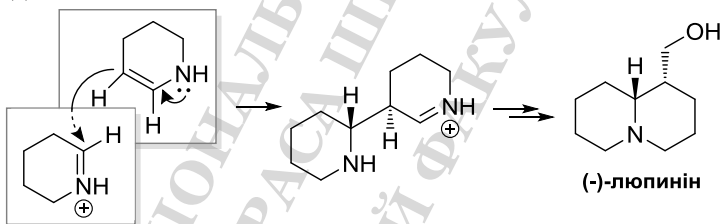


Приєднання нуклеофільного реагенту з боку **re** поверхні виглядатиме наступним чином:

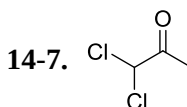
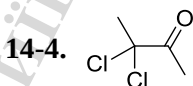
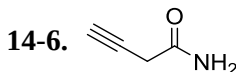
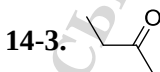
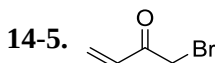
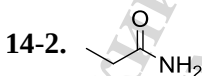
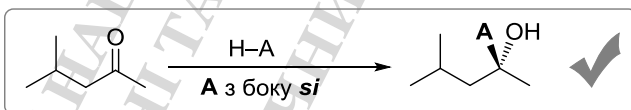


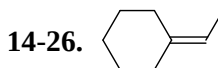
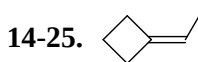
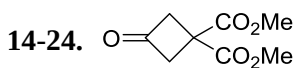
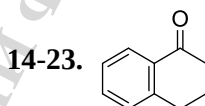
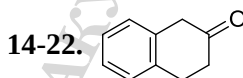
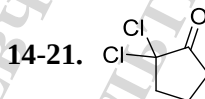
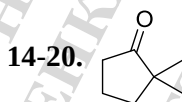
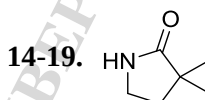
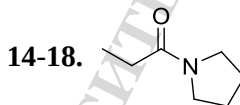
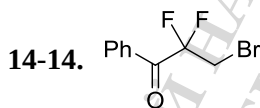
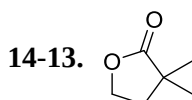
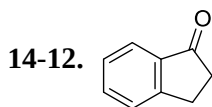
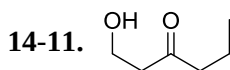
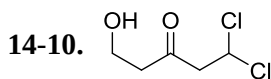
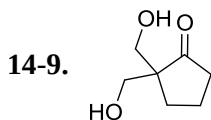
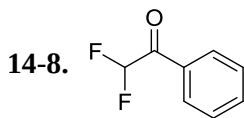
Визначення індексів *re* / *si* часто є актуальним під час опису біосинтезу органічних молекул, адже ферментні системи здатні з високою стереоселективністю утворювати з прохіральних молекул один із енантіомерів, і також вибирають один із напрямів для приєднання до тригонального Карбону – *re* чи *si*.

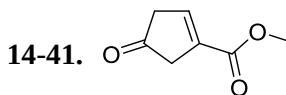
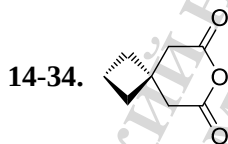
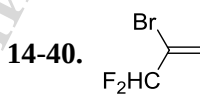
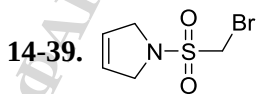
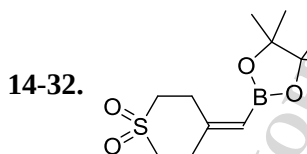
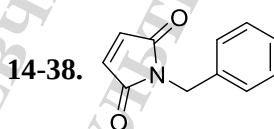
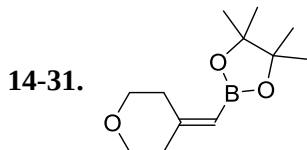
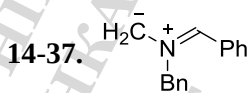
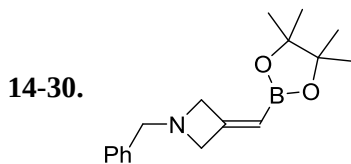
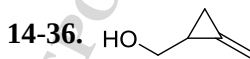
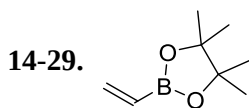
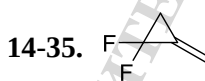
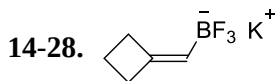
Наприклад, вважається, що однією зі стадій біосинтезу природного алкалоїду люпиніну є конденсація циклічної імінієвої солі з таутомерним їй енаміном. Обидва реакційних центри взаємодіють з боку *si*, і саме на цій стадії утворюються два асиметричних атоми Карбону, конфігурація яких надалі не змінюється.



2)





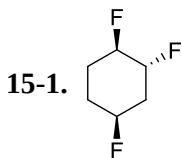


ЧАСТИНА 15

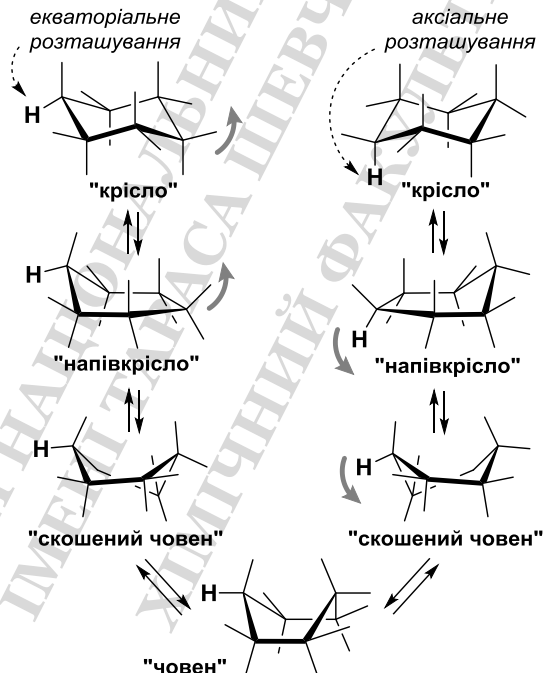
Конформації циклогексану

Завдання

Зобразіть дві альтернативні конформації "крісло" похідної циклогексану.



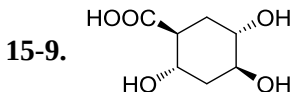
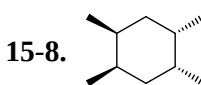
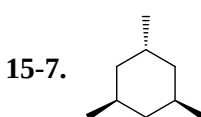
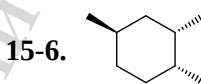
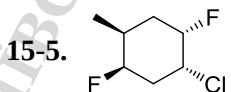
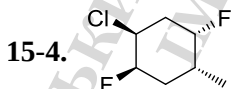
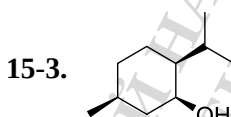
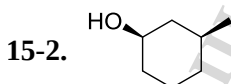
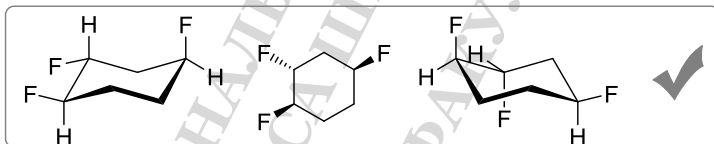
Відповідь

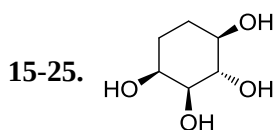
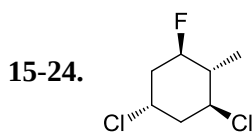
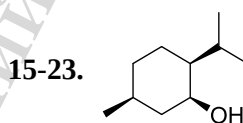
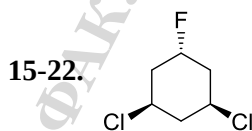
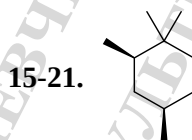
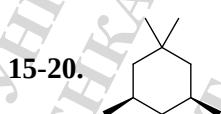
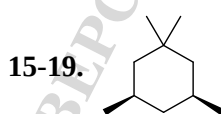
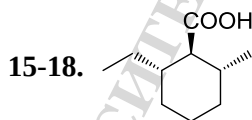
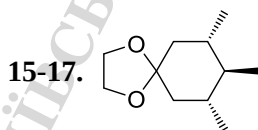
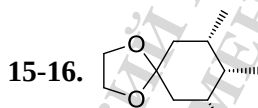
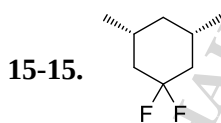
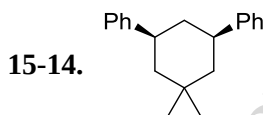
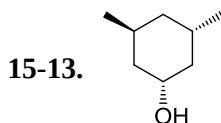
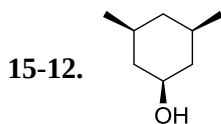
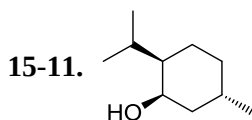
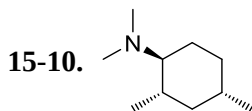


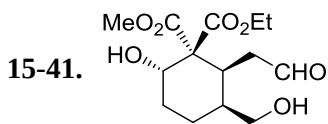
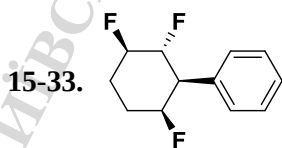
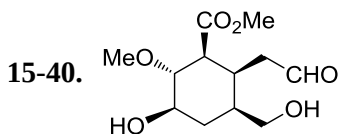
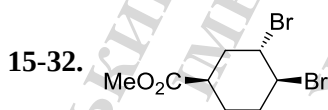
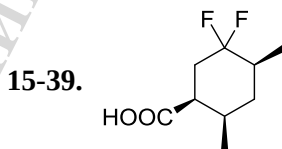
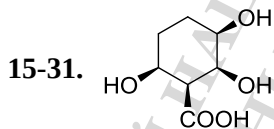
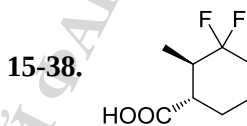
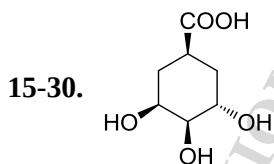
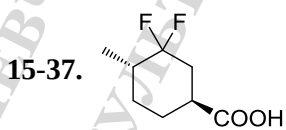
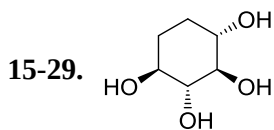
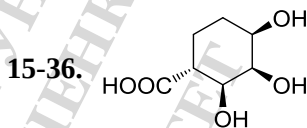
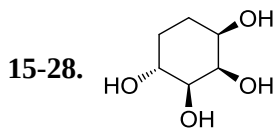
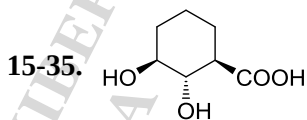
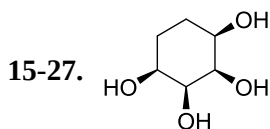
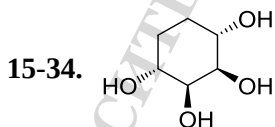
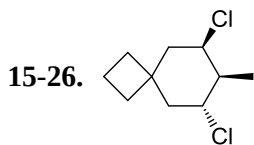
Конформація "крісло" для більшості похідних циклогексану є найбільш стабільною та енергетично вигідною, оскільки в такому випадку замісники максимально віддалені та відштовхування між ними мінімальне.

Є ще один чинник, що діє на користь конформації "крісло": у конформації плаского шестикутника кути між атомами Карбону становили б 120° , що дещо більше, ніж нормальний валентний кут для алканів.

Прослідкуємо за рухом одного із атомів Гідрогену циклогексану під час переходу із однієї конформації "крісло" в іншу через низку менш вигідних конформацій (тут і надалі: інші атоми Гідрогену не позначено). Уточнимо, що конформації "напівкрісло" та "човен" незаміщеного циклогексану є перехідними станами, оскільки їм відповідають максимуми на енергетичному профілі конформаційних перетворень молекули. Вочевидь, атом, який у одній із конформацій "крісло" займає екваторіальне положення, в альтернативній конформації "крісло" займатиме аксіальне положення – та навпаки. Для зображеної молекули це виглядатиме наступним чином:







ЧАСТИНА 16

Тактичні полімери

Завдання

Зобразіть конфігурацію стереоцентрів полімерної молекули.

- 16-1. а) Ізотактичний полібутадієн;
б) синдіотактичний полібутадієн.



Відповідь

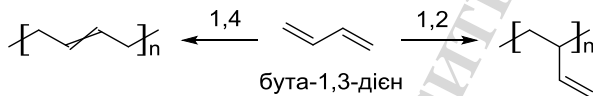
а)

Тактичними називають полімери, у яких чергування конфігурацій стереоланок має певні закономірності. Відповідно, атактичні – це полімери, у яких конфігурації стереоланок змінюються без будь-яких закономірностей. Конфігурація стереоланок у полімерах має важливі практичні наслідки, оскільки просторова будова суттєво впливає на фізичні властивості полімеру.

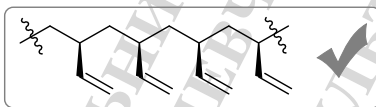
Терміни "ізо/синдіотактичний" застосовують до полімерів, основний ланцюг яких має відгалуження. Наприклад, таким є продукт полімеризації монозаміщеного етилену (точніше, один із продуктів, оскільки питання регіоселективності полімеризації ми тут не розглядатимемо):



Якщо основний ланцюг цього полімеру зобразити в площині в конформації "зиг-заг" і всі відгалуження будуть спрямовані по один бік площини – це **ізотактичний** полімер; якщо ці замісники по чергово спрямовуються в різні боки – полімер **синдіотактичний**. Пару сусідніх стереоцентрів називають **діадою**. В ізотактичному полімері будь-яка діада має однакове спрямування бічних замісників, яке позначається *m* (за аналогією з *meso*), в синдіотактичному – протилежне, яке позначається *r* (за аналогією з *rac*).

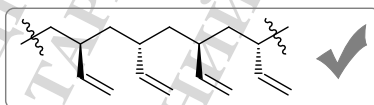


Полібутадієн – узагальнена назва продуктів полімеризації 1,3-бутадієну. Найбільш відомим типом полібутадієну є продукт 1,4-полімеризації, нерозгалужений ланцюг з подвійними зв'язками. Для цього полімеру питання стереохімії теж актуальне, він також може бути тактичним або атактичним, але ці терміни стосуватимуться *цис*- або *транс*- конфігурації подвійного зв'язку. Водночас, продукт 1,2-полімеризації – це насичений ланцюг з вінільними замісниками, тому ізотактичний полібутадієн можна зобразити так:



Варто зауважити, що реальний полімер, навіть хорошої якості, навряд чи може бути на 100% тактичним; на практиці для тактичного полімеру допускається до 5% невпорядкованих стереоланок.

б)

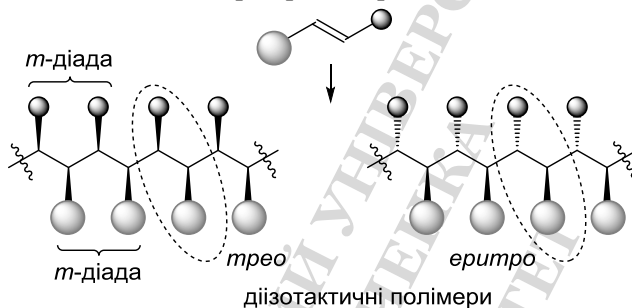


16-2. *Еритро*-діізотактичний продукт полімеризації інденону.

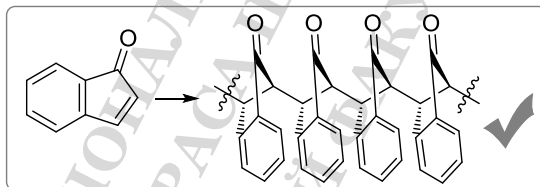


Термін "**дитактичний**" потрібен для опису будови полімерів, які містять два різних заміщених атома з визначеною конфігурацією. Такі полімери утворюються, наприклад, унаслідок полімеризації несиметричних 1,2-дизаміщених етиленів. Нижче зображено загальну структуру подібного полімеру. Усі замісники кожного виду спрямовано в один бік, тому логічно називати його діізотактичним; але цього недостатньо для вичерпного опису будови. Вочевидь, може

існувати два діізотактичних полімери з різними відносними розташуваннями замісників при двох сусідніх атомах основного ланцюга. Для опису цього явища застосовують вже знайомі нам індекси – *еритро* та *трео*.



На основі загальної формули *еритро*-діізотактичного полімеру зобразимо відповідну будову продукту полімеризації циклічного алкену інденону:



- 16-3. Ізотактичний полістирен.
- 16-4. Синдіотактичний полістирен.
- 16-5. Ізотактичний поліпропілен.
- 16-6. Синдіотактичний поліпропілен.
- 16-7. Ізотактичний полі-1,2-(4-метил-1,3-пентадієн).
- 16-8. Синдіотактичний полі-1,2-(4-метил-1,3-пентадієн).
- 16-9. Ізотактичний полі(метилметакрилат).
- 16-10. Синдіотактичний полі(метилметакрилат).
- 16-11. Ізотактичний полі(бутилметакрилат).
- 16-12. Синдіотактичний полі(бутилметакрилат).

- 16-13. Ізотактичний полі(*N*-*n*-пропілакриламід).
- 16-14. Синдіотактичний полі(*N*-*n*-пропілакриламід).
- 16-15. Ізотактичний полі(*N*-фенілакриламід).
- 16-16. Синдіотактичний полі(*N*-фенілакриламід).
- 16-17. Ізотактичний полівініловий спирт.
- 16-18. Синдіотактичний полівініловий спирт.
- 16-19. Ізотактичний полівінілацетат.
- 16-20. Синдіотактичний полівінілацетат.
- 16-21. Ізотактичний полі(бут-1-ен).
- 16-22. Синдіотактичний полі(бут-1-ен).
- 16-23. Ізотактичний полі(3-гідроксибутират).
- 16-24. Синдіотактичний полі(3-гідроксибутират).
- 16-25. Ізотактичний поліацетальдегід.
- 16-26. Синдіотактичний поліацетальдегід.
- 16-27. Ізотактичний полі(*втор*-бутилвініловий етер).
- 16-28. Синдіотактичний полі(*втор*-бутилвініловий етер).
- 16-29. Ізотактичний полі(*n*-бутиральдегід).
- 16-30. Синдіотактичний полі(*n*-бутиральдегід).
- 16-31. *транс*-Полібутадієн.
- 16-32. *цис*-Полібутадієн.
- 16-33. Ізотактичний *транс*-поліпентадієн.
- 16-34. Синдіотактичний *транс*-поліпентадієн.
- 16-35. Ізотактичний *цис*-поліпентадієн.
- 16-36. Синдіотактичний *цис*-поліпентадієн.
- 16-37. *Еритро*-діізотактичний *трет*-бутилкротонат.
- 16-38. *Трео*-діізотактичний *трет*-бутилкротонат.
- 16-39. Дисиндіотактичний *трет*-бутилкротонат.

ЧАСТИНА 17

Стереоізомерія координаційних центрів з конфігурацією, відмінною від тетраедра

Завдання

Зобразить стереоізомери комплексу заданого складу та конфігурації; вкажіть, які з них – діастереомери, а які – енантіомери.

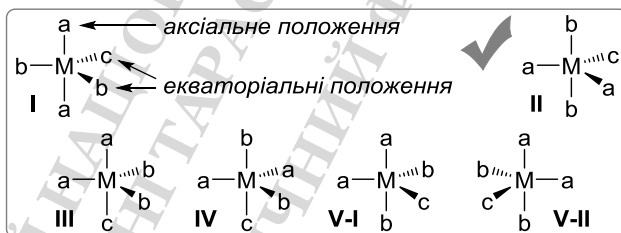
17-1. $\text{Ma}_2\text{b}_2\text{c}$, тригональна біпіраміда.



Відповідь

Геометрію тригональної біпіраміди мають, наприклад, комплекси $\text{Fe}(\text{CO})_5$ та $\text{trans-Fe}(\text{CO})_3(\text{PPh}_3)_2$ (фосфінові ліганди займають аксіальні положення), а також сполуки п'ятикоординованого Фосфору на зразок PCl_5 .

У центра, що має конфігурацію тригональної біпіраміди, є два типи розташування замісників (лігандів) – аксіальне та екваторіальне. У випадку, коли два однакових ліганди займають аксіальні положення, комплекс не є хіральним (структури **I**, **II**), адже має горизонтальну площину симетрії.



Зобразимо випадки, коли ліганди в аксіальних положеннях різні: **a/c**, **b/c**, **a/b**, – відповідно, структури **III**, **IV** та **V**. Такі комплекси не мають горизонтальної площини симетрії, але перші два об'єкти мають вертикальну площину симетрії, яка проходить через центр **M** та між двома однаковими екваторіальними замісниками; отже, структури **III** та **IV** – ахіральні. Водночас у структурі **V** усі екваторіальні замісники різні, тому можуть мати два варіанти розташування, що позначені як **V-I** та **V-II**. Ці дві структури є дзеркальним

відображенням одна одної, тобто, енантіомерами. Усі ахіральні ізомери між собою та з кожним із енантіомерів співвідносяться як діастереомери.

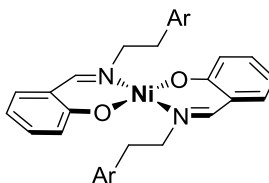
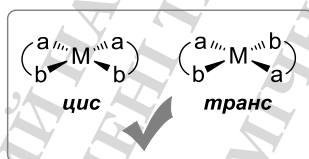
Зауважимо, що називаючи зображені комплекси ахіральними, ми мали на увазі лише геометрію центрального атома та вважали, що власне ліганди додаткових елементів хіральності не мають.

17-2. $M(\widehat{ab})_2$, плоский квадрат.

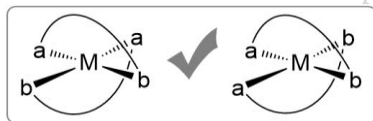


Відповідь

$\widehat{ab}$ – це позначення асиметричного бідентантного ліганду, на зразок аніонів гліцину чи β -аланіну, аніону тіогліколевої кислоти, *орто*-аміно(тіо)фенолу, саліцилового альдегіду тощо. Зазвичай координаційні центри розміщуються в сусідніх положеннях, і в цьому випадку можливі два діастереомери, умовно – *цис* та *транс*, тобто, коли два однакових зв'язуючих атоми розміщуються поряд і, відповідно, навпроти. Також показано приклад нікелевого комплексу з несиметричним бідентантним лігандом, похідною іміну саліцилового альдегіду. Конфігурація комплексу – *транс*, що цілком очікувано, оскільки до одного зі зв'язуючих атомів ліганду приєднано досить великий замісник.



Звісно, коли всі атоми, що формують комплекс, лежать у одній площині, то енантіомерія неможлива. Але для комплексу наведеного складу все ж можливо побудувати хіральну структуру. Якщо лінкер, що з'єднує два зв'язуючих атоми ліганду, досить великий, щоб ці атоми розташувались діагонально, структура виходить із площини та набуває хіральності, отже, матимемо два енантіомерних комплекси.



- 17-3. $\mathbf{M}a_4b$, тригональна біпіраміда.
- 17-4. $\mathbf{M}a_3bc$, тригональна біпіраміда.
- 17-5. $\mathbf{M}a_2bcd$, тригональна біпіраміда.
- 17-6. $\mathbf{M}abcde$, тригональна біпіраміда.
- 17-7. $\mathbf{M}(\widehat{aa})bcd$, тригональна біпіраміда.
- 17-8. $\mathbf{M}(\widehat{aa})b_2c$, тригональна біпіраміда.
- 17-9. $\mathbf{M}(\widehat{aa})_2b$, тригональна біпіраміда.
- 17-10. $\mathbf{M}(\widehat{aa})(\widehat{bb})c$, тригональна біпіраміда.
- 17-11. $\mathbf{M}(\widehat{ab})_2c$, тригональна біпіраміда.
- 17-12. $\mathbf{M}(\widehat{ab})(\widehat{cd})e$, тригональна біпіраміда.
- 17-13. $\mathbf{M}(\widehat{aa})(\widehat{bc})d$, тригональна біпіраміда.
- 17-14. $\mathbf{M}a_4b$, тетрагональна піраміда.
- 17-15. $\mathbf{M}a_3bc$, тетрагональна піраміда.
- 17-16. $\mathbf{M}a_2bcd$, тетрагональна піраміда.
- 17-17. $\mathbf{M}abcde$, тетрагональна піраміда.
- 17-18. $\mathbf{M}(\widehat{aa})bcd$, тетрагональна піраміда.
- 17-19. $\mathbf{M}(\widehat{aa})b_2c$, тетрагональна піраміда.
- 17-20. $\mathbf{M}(\widehat{aa})_2b$, тетрагональна піраміда.

17-21. $M(\widehat{a\bar{a}})(\widehat{b\bar{b}})c$, тетрагональна піраміда.

17-22. $M(\widehat{a\bar{b}})_2c$, тетрагональна піраміда.

17-23. $M(\widehat{a\bar{b}})(\widehat{c\bar{d}})e$, тетрагональна піраміда.

17-24. $M(\widehat{a\bar{a}})(\widehat{b\bar{c}})d$, тетрагональна піраміда.

17-25. $M a_4 b_2$, октаедр.

17-26. $M a_2 b_2 c_2$, октаедр.

17-27. $M a_2 b_2 c d$, октаедр.

17-28. $M a_3 b_2 c$, октаедр.

17-29. $M a_3 b c d$, октаедр.

17-30. $M(\widehat{a\bar{a}})b_3 c$, октаедр.

17-31. $M(\widehat{a\bar{a}})b_2 c_2$, октаедр.

17-32. $M(\widehat{a\bar{a}})b c d e$, октаедр.

17-33. $M(\widehat{a\bar{b}})c_2 d_2$, октаедр.

17-34. $M(\widehat{a\bar{b}})c_3 d$, октаедр.

17-35. $M(\widehat{a\bar{a}})_2 b c$, октаедр.

17-36. $M(\widehat{a\bar{b}})_3$, октаедр.

17-37. $M(\widehat{a\bar{b}})_2 c_2$, октаедр.

17-38. $M(\widehat{a\bar{b}})_2(\widehat{c\bar{c}})$, октаедр.

17-39. $M(\widehat{a\bar{a}})(\widehat{b\bar{b}})c_2$, октаедр.

ЛІТЕРАТУРА

Рекомендована література

Ковтуненко В. О. Загальна стереохімія. Київ : Невтес, 2001. 332 с.
Eliel E. L., Wilen S. H., Doyle M. P. Basic Organic Stereochemistry.
Wiley-Interscience, 2001. 704 p.

Використані джерела

Матеріали для цього видання підготовані з використанням електронних ресурсів відкритого доступу:

<http://www.chemspider.com/>
<https://go.drugbank.com/>
<https://organicchemistrydata.org/>
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
<https://synarchive.com/>
<https://www.sigmaaldrich.com/>

а також першоджерел:

Вісник КНУТШ. Хімія **2020**, 57 (1), 55.
Angew. Chem. Int. Ed. **2021**, 60 (37), 20424.
Chem. Eur. J. **2019**, 25 (28), 6928.
Chem. Eur. J. **2022**, 28 (54), e202202117.
Chem. Eur. J. **2024**, 30 (12), e202303859.
Chem. Eur. J. **2024**, 30 (72), e202403277.
ChemistrySelect **2023**, 8 (25), e202302143.
Eur. J. Org. Chem. **2019**, (33), 5624.
Eur. J. Org. Chem. **2020**, (22), 3261.
Eur. J. Org. Chem. **2020**, (22), 3261.
Eur. J. Org. Chem. **2021**, (35), 4897.
Eur. J. Org. Chem. **2021**, (47), 6570.
Eur. J. Org. Chem. **2024**, 27 (10), e202301309.
Eur. J. Org. Chem. **2024**, 27 (32), e202400493.
Int. J. Mol. Sci **2025**, 26 (7), 3065.

J. Fluorine Chem. **2023**, 272, 110215.
J. Org. Chem. **2019**, 84 (21), 13908.
J. Org. Chem. **2019**, 84 (3), 1363.
J. Org. Chem. **2019**, 84 (3), 1363.
J. Org. Chem. **2020**, 85 (19), 12692.
J. Org. Chem. **2020**, 85 (4), 2321.
J. Org. Chem. **2020**, 85 (8), 5288.
J. Org. Chem. **2020**, 85 (9), 5927.
J. Org. Chem. **2022**, (40), e202200863.
J. Org. Chem. **2023**, 88 (5), 3109.
J. Org. Chem. **2024**, 89 (15), 10440.
J. Org. Chem. **2024**, 89 (24), 18477.
J. Org. Pharm. Chem. **2024**, 22 (3), 3.
JACS Au **2023**, 3 (3), 700.
Macromolecules **2020**, 53 (2), 640.
Molecules **2022**, 27 (1), 206.
Nat. Commun. **2024**, 15, 9239.
Org. Biomol. Chem. **2022**, 20 (15), 3183.
Polymer. Bull. **1993**, 30 (2), 171.
Res. Chem. Intermed. **2016**, 42 (5), 4839.
Synth. Commun. **2011**, 41 (7), 981.
Tetrahedron Asymmetry **2014**, 25 (13–14), 1038.
Tetrahedron Lett. **2020**, 61 (12), 151645.
Ukr. Bioorg. Acta **2021**, 16 (1), 10.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. Молекулярна симетрія	4
2. Ізомерія подвійного зв'язку. <i>Z</i> / <i>E</i> -конфігурація	13
3. Елементи хіральності. Центральна та аксіальна хіральність	22
4. Створення хіральності в молекулах різної геометричної будови	35
5. Зображення конфігурації асиметричних центрів	39
6. Молекули з двома сусідніми хіральними центрами. Проекція "зиг-заг" та проєкція Фішера. <i>Трео</i> - та <i>еритро</i> -конфігурація	46
7. Діастереоселективне приєднання до карбонільної групи	52
8. <i>Мезо</i> -форми та псевдохіральні центри	57
9. Насичені цикли з псевдохіральними центрами	63
10. Особливості стереоізомерії сполук з екзоциклічним подвійним зв'язком	69
11. Зображення просторової будови молекул зі стереоланками різних типів	73
12. Опис просторової будови складних молекул	79
13. Гомо- та гетеротопні атоми	86
14. Прохіральність та енантіоселективні реакції	92
15. Конформації циклогексану	99
16. Тактичні полімери	103
17. Стереоізомерія координаційних центрів з конфігурацією, відмінною від тетраедра	107
ЛІТЕРАТУРА	111

Навчальне видання

ШАБЛИКІНА Ольга Валентинівна
ГРИГОРЕНКО Олександр Олегович

**СТЕРЕОХІМІЯ.
ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ
(З ПРИКЛАДАМИ РОЗВ'ЯЗКУ)**

Навчальний посібник
для студентів хімічного факультету

У авторській редакції