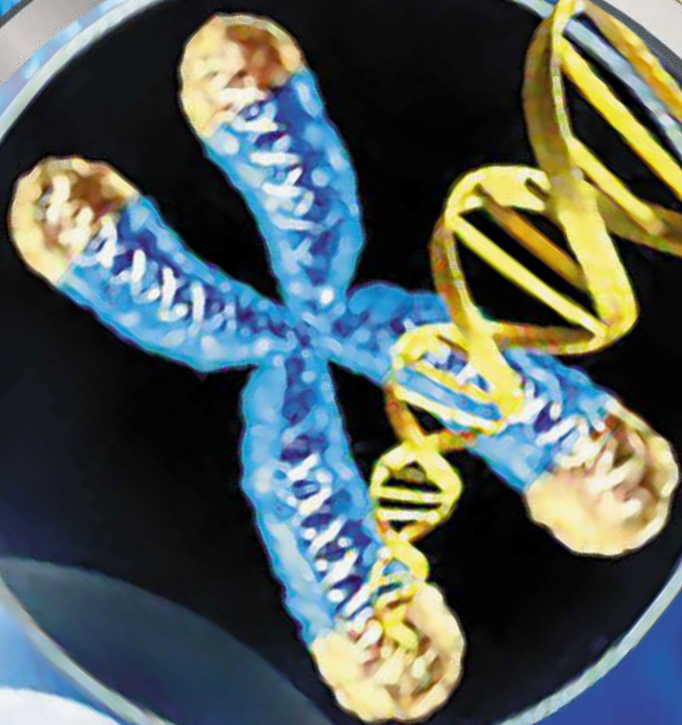


Гене́за

НОВА УКРАЇНЬСЬКА
ШКОЛА

БІОЛОГІЯ



9

Тварини Червоної книги України



бразник
прозерпіна



рись
євразійська



мідянка
звичайна



дельфін
білобочка



лелека
чорний



пелікан
кучерявий



сорокопуд
сірий



саламандра
плямиста



хохуля
звичайна

Рослини Червоної книги України



плодоріжка
салепова



підсніжник
білосніжний



пізньоцвіт
осінній



зозуліні черевички
справжні



тюльпан
двоквітковий



горицвіт
весняний



тис
ягідний



лілія
лісова



сон-
трава



зозульки
травневі



ДЕРЖАВНИЙ ГІМН УКРАЇНИ

*Музика Михайла Вербицького
Слова Павла Чубинського*

Ще не вмерла України і слава, і воля,
Ще нам, браття молодії, усміхнеться доля.
Згинуть наші воріженьки, як роса на сонці.
Запануєм і ми, браття, у своїй сторонці.

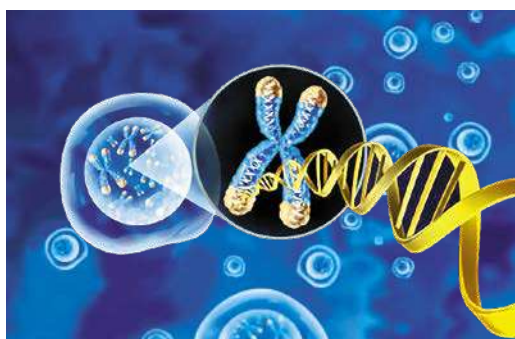
Приспів:

Душу й тіло ми положим за нашу свободу,
І покажем, що ми, браття, козацького роду.

БІОЛОГІЯ

Підручник для 9 класу
закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України



Київ
«Генеза»
2026

УДК 57(075.3)
Б65

Автори:

Павло Балан, Олександр Козленко, Ольга Кулініч,
Людмила Юрченко, Людмила Остапченко

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(наказ Міністерства освіти і науки України від 27.01.2026 № 110)

Видано за рахунок державних коштів.

Продаж заборонено

Відповідає модельній навчальній програмі
«Біологія, 7–9 кл.» для закладів загальної середньої освіти
(автори: П.Г. Балан, О.М. Кулініч, Л.П. Юрченко)

Інтерактивний електронний додаток до підручника

<https://cutt.ly/btS5sBFR>



Інтерактивні методичні матеріали до підручника

<https://faino.school/>



Умовні позначення



Проблемне питання,
завдання, задача



Запитання, завдання



Дослідницька діяльність



Бережи здоров'я

Цікаво знати



Поміркуйте

Біологія : підруч. для 9 кл. закл. заг. серед.
Б65 освіти / Павло Балан [та ін.]. — Київ : Генеза, 2026. —
304 с. : іл.

ISBN 978-617-8468-49-1.

Підручник реалізує концептуальні ідеї модельної навчальної програми (авт. П. Балан, О. Кулініч, Л. Юрченко). Мета підручника – сформувати в учнів цілісне уявлення про живу природу та місце людини в ній; розвивати пізнавальні, дослідницькі, творчі й комунікативні вміння, поєднуючи наукове пізнання з особистим досвідом взаємодії з довкіллям.

УДК 57(075.3)

ISBN 978-617-8468-49-1

© Балан П.Г., Козленко О.Г.,
Кулініч О.М., Юрченко Л.П.,
Остапченко Л.І., 2026

© ТОВ «Генеза», оригінал-макет, 2026

Дорогі дев'ятикласниці та дев'ятикласники!

Протягом попередніх років навчання ви ознайомилися з різноманітним світом організмів: бактерій, рослин, грибів, тварин. Ви також докладно вивчали будову та процеси життєдіяльності людини як біосоціальної істоти.

У 9 класі ви дізнаєтеся більше про досягнення сучасних біологічних наук, які досліджують хімічний склад організмів, будову та функціонування неклітинних форм життя, клітин і тканин, особливості індивідуального розвитку, закономірності спадковості й мінливості, організацію та функціонування надорганізованих біологічних систем – екосистем, а також етапи історичного розвитку життя на Землі.

Ми переконані, що нові знання допоможуть вам краще орієнтуватися в складному, різноманітному й надзвичайно захопливому світі живих істот, зрозуміти їхню взаємодію з довкіллям. Сподіваємося, що ви усвідомите важливість збереження природи, раціонального використання її ресурсів і поліпшення стану навколишнього середовища.

Вам буде цікаво дізнатися про сучасні досягнення біотехнології, генної та клітинної інженерії, адже вони допомагають розв'язувати актуальні проблеми людства: забезпечення продовольством, розроблення нових лікарських препаратів, охорона довкілля, збільшення тривалості та якості життя людини.

Протягом року ви будете вдосконалювати навички дослідницької роботи. Ви активно працюватимете з різними джерелами природничої інформації – відеоматеріалами, віртуальними лабораторіями, мобільними застосунками та програмами для роботи з об'єктами живої природи. У парах чи групах ви проводитимете експерименти, застосовуючи сучасні методи та обладнання, оцінюватимете точність досліджень і достовірність отриманих результатів. На вас чекає моделювання біологічних процесів та об'єктів, розв'язання біологічних задач і виконання цікавих проєктів.

На початку кожної теми підручника подано перелік проєктів: інформаційно-пошукових, практико-орієнтованих, дослідницьких, творчих і навіть ігрових. Вони сприятимуть формуванню ваших умінь працювати як самостійно, так і у складі групи. Разом з учителем або учителькою оберіть і реалізуйте ті з них, що зацікавлять саме вас, а результати представте у вигляді презентації, колажу, лепбука, «Грона» та іншого унаочнення. Наприкінці кожної теми ви знайдете завдання, що допоможуть перевірити рівень засвоєння знань і набутих умінь за такими критеріями: «Проводжу дослідження», «Опрацьовую та використовую інформацію», «Усвідомлюю закономірності природи», а також – цікаві компетентісно орієнтовані завдання. Багато додаткової інформації ви дізнаєтеся за покликаннями у QR-кодах.

Бажаємо вам успіхів у пізнанні складного й захопливого світу живої природи! Нехай набуті знання, практичні навички та компетентності стануть надійною опорою у вашому подальшому житті.

Автори



Розділ 4. Біологія: від молекули до біосфери

Вступ



Які властивості мають організми, функціонування яких пов'язане з різними рівнями організації живого?

Інформаційно-пошуковий проект:

«Порівняльно-описовий метод у біології: від Аристотеля до сьогодення»; «Моніторинг – актуальний метод біологічних досліджень»; «Зв'язки біології з іншими науками».

Практико-орієнтований проект:

виготовлення буклета «Заміна традиційного палива на біопаливо»; виготовлення пам'ятки «Правильність зберігання продуктів у холодильнику».

Ігровий проект:

«Ти агроном (ветеринар, садівник, біотехнолог, біохімік тощо)».

Творчий проект:

створення лепбука «Рівні організації живого у степу, лісі, озері тощо».

§ 1. Біологія як комплексна наука. Місце біології серед інших наук



Яка роль біологічних знань у житті сучасної людини?

Біологія – комплексна наука про живу природу. Як самостійна природнича дисципліна, біологія зародилася ще до нашої ери. Її витоки пов'язані з діяльністю вчених Давньої Греції – зокрема Аристотеля та Теофраста (мал. 1.1, А, Б). Власне термін *біологія* (від грец. *біос* – життя, *логос* – наука) почали вживати наприкінці XVIII – на початку XIX століття. Його згадує, зокрема, у своїх працях видатний французький учений Жан-Батист Ламарк (мал. 1.1, В).

Цікаво знати. Аристотель описав близько 500 видів тварин, запропонував першу класифікацію тварин, яка залишалася актуальною до середини XVIII ст. Його праці мали значний вплив не лише на біологію, а й на медицину. Учня і послідовника Аристотеля – Теофраста вважають «батьком ботаніки». Він досліджував життєдіяльність рослин і розробив їхню класифікацію. Видатний французький біолог, зоолог Жан-Батист Ламарк – автор першої цілісної еволюційної гіпотези, він запропонував виділення окремої групи тварин – безхребетних.

Пройшовши тривалий шлях розвитку від античних часів до сьогодення, біологія сформувалася як **комплексна наука**, що вивчає життя на всіх рівнях його організації: від молекулярного до біосферного.



Мал. 1.1. Учені, які зробили внесок у становлення біології:
 А. Аристотель (384–322 рр. до н. е.). Б. Теофраст (371–287 рр. до н. е.).
 В. Жан-Батист П'єр Антуан де Моне, шевальє де Ламарк (1744–1829)

У попередніх класах ви вже ознайомилися з основами біологічних наук – ботаніки, мікології, зоології, мікробіології, вірусології, анатомії та фізіології людини.

Цього навчального року ви дізнаєтеся про досягнення інших біологічних наук: біохімії, цитології, вірусології, біології індивідуального розвитку, генетики, еволюційного вчення тощо. Знання із цих наук дають змогу вивчати закономірності, притаманні всім біологічним системам різних рівнів організації.

Пригадаймо: система (від грец. *система* – ціле, складене із частин) – це цілісна сукупність взаємопов'язаних елементів. Біологічні системи складаються з компонентів, кожен з яких виконує певну функцію. Наприклад, *простою системою* є вірусна частинка (віріон), яка складається з різних молекул. *Складною системою* є екосистема – як-от озеро, у якому взаємодіють різні групи організмів та елементи неживої природи.



Чим біологічна система відрізняється від інших систем?

Важливою властивістю систем, й зокрема біологічних, є здатність набувати нових властивостей, які не притаманні їхнім окремим компонентам. Це означає, що ціле має характеристики, яких немає у його частин.

Цікаво знати. Цю властивість систем різного типу можна проілюструвати на прикладі автомобіля. Він складається з багатьох деталей, кожна з яких характеризується своїми властивостями та призначенням. Але тільки цілісному автомобілю притаманні такі властивості, як певна швидкість, кількість витраченого палива за одиницю відстані, а головне – він може їхати й довозити людей до місця призначення.



На прикладі екосистеми проаналізуйте, які нові властивості має система порівняно з її окремими складовими.

Яке місце біології в системі наук. Наука – це сфера людської діяльності, спрямована на здобуття і систематизацію об'єктивних знань про світ. Ці знання оформлюються у вигляді гіпотез, теорій, законів, понять тощо.

Біологія – одна з природничих наук. Ці науки, до яких також належать фізика, хімія, географія, геологія, вивчають об'єкти, явища і

процеси живої та неживої природи. У результаті тісної взаємодії біології з іншими *природничими науками* виникли такі дисципліни, як біофізика, біохімія тощо. Біологія також взаємодіє із *соціальними* (соціологія, економіка, право) та *гуманітарними* (філософія, філологія) науками.

Сучасна біологія – це система наук про життя на різних рівнях його організації. Її головне завдання – пізнання сутності життя та дослідження біологічних систем. Як комплексна наука біологія використовує методи дослідження з інших галузей знань. Її результати не лише формують наукову картину світу, а й активно застосовуються в практичній діяльності людини – у медицині, сільському господарстві, охороні природи тощо.

✓ **Дізнайтеся більше** про застосування біологічних знань у розв'язанні основних проблем людства за QR-кодом.



Узагальнення

Біологія – це комплексна наука, що вивчає живу природу на всіх рівнях її організації – від молекулярного до біосферного. Біологічним системам різного рівня організації, що складаються з різних компонентів, притаманні нові властивості, які не характерні для окремих елементів цих систем. На стику біології з іншими науками виникають міждисциплінарні галузі знань, зокрема біофізика, біохімія та інші. Головним завданням сучасної біології є пізнання сутності життя та дослідження функціонування біологічних систем. Біологічні знання широко застосовують у сферах охорони здоров'я, забезпечення людства продуктами харчування, а також збереження й поліпшення стану навколишнього середовища.

Поміркуйте

1. Чи могло б людство існувати без використання лікарських препаратів?
2. Як біологічні знання впливають на продуктивність сільського господарства для забезпечення людства продовольством?
3. Чому збереження біорізноманіття є актуальною проблемою сьогодення?

§ 2. Рівні організації живого

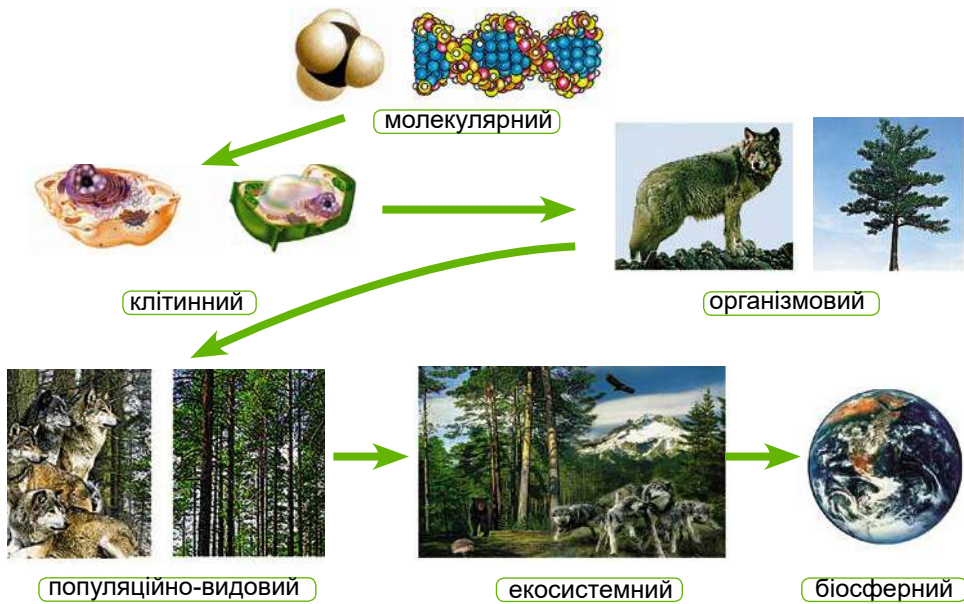


Чи могли всі рівні організації живого виникнути в процесі еволюції одночасно?

Що характерно для різних рівнів організації живої природи. Жива природа організована на різних рівнях: молекулярному, клітинному, організмовому, популяційно-видовому, екосистемному та біосферному (мал. 2.1).

- На **молекулярному рівні** відбуваються різні біохімічні процеси, перетворення енергії, а також кодується, зберігається та реалізується спадкова інформація. На молекулярному рівні також перебувають неклітинні форми життя, як-от віруси.

- Для **клітинного рівня** характерно те, що клітина – це структурна і функціональна одиниця всіх організмів: бактерій, рослин, тварин,



Мал. 2.1. Рівні організації живого

грибів, людини тощо. Клітина здатна до самостійного функціонування та самовідтворення. У ній зберігається й реалізується спадкова інформація, відбувається обмін речовин і перетворення енергії.

Пригадайте, організми поділяють на одноклітинні та багатоклітинні. Одноклітинні (переважна більшість прокаріотів, багато водоростей, деякі гриби) – це окремі клітини, які функціонують як цілісні організми (мал. 2.2). Отже, *клітина є елементарною одиницею будови, функціонування і розвитку живої природи.*



Мал. 2.2. Приклади одноклітинних організмів: 1 – бактерія чумна паличка; 2 – зелена водорість хламідомонада; 3 – інфузорія-туфелька; 4 – цвілевий гриб мукор – багатоядерна розгалужена клітина

- **Організмівий рівень.** У багатоклітинних організмів клітини спеціалізуються за будовою і функціями, часто утворюючи тканини (у вищих рослин і більшості тварин). З тканин формуються органи, а органи об'єднуються в системи органів, що забезпечують життєдіяльність цілісного організму.

- **Популяційно-видовий рівень.** Усі організми належать до певних видів. Особини, що належать до одного виду, мають спільні риси будови

ви і життєдіяльності, а також подібні екологічні вимоги, здатні залишати плодючих нащадків. У природних екосистемах види існують у формі популяцій.

Популяція – це сукупність особин одного виду, які тривалий час живуть більш-менш ізольовано від інших особин свого виду й взаємодіють між собою (розмножуються, ділять ресурси чи спільну територію). Види, що складаються з популяцій, формують популяційно-видовий рівень організації живого. Його особливістю є вільний обмін спадковою інформацією між різними представниками певного виду та передавання її нащадкам.

- **Екосистемний рівень.** Популяції різних видів, які населяють певну територію, взаємодіють між собою та із чинниками неживої природи, утворюючи **екосистеми**. Для цього рівня характерні постійні потоки енергії між популяціями різних видів, а також постійний обмін речовиною між живою та неживою частинами екосистем.

- **Біосферний рівень.** Потоки енергії та колообіг речовин з'єднують різні екосистеми нашої планети в єдину цілісну саморегульовану надвидову біологічну систему вищого рівня складності – **біосферу**.

Різні рівні організації живого виникали не одночасно, а послідовно в процесі еволюції: спочатку з'явилися нижчі рівні, потім – вищі. Процес історичного розвитку живої природи, під час якого біосфера набула сучасного вигляду, має назву **еволюція**. У процесі еволюції рівні організації ускладнювалися і формувалися дедалі складніші біологічні системи.

Цікаво знати. Багато науковців вважають, що життя зародилося на молекулярному рівні. Першими біологічними системами могли бути молекули нуклеїнових кислот, які набули здатності до самовідтворення.

Рівні організації живої природи тісно пов'язані між собою: нижчі рівні є складниками вищих, без яких вони не можуть функціонувати. Молекули утворюють клітини, клітини – тканини, органи та організми, організми – популяції, популяції – види, види є складниками екосистем, а всі екосистеми разом утворюють біосферу.

Узагальнення

Жива природа існує на різних рівнях організації: молекулярному, клітинному, організмовому, популяційно-видовому, екосистемному та біосферному. Кожному з них притаманні специфічні властивості. Між рівнями організації існує закономірний взаємозв'язок: нижчі рівні є складовими частинами вищого. Найвищим є біосферний рівень, що охоплює всі попередні. У процесі еволюції рівні організації поступово ускладнювались.

Поміркуйте

1. Чому існування інфузорії-туфельки пов'язане з клітинним та організмовим рівнями організації живого?
2. Чи є поле та сад біологічними системами, що відповідають екосистемному рівню?
3. Чому всі екосистеми Землі об'єднані в єдину біологічну систему – біосферу?

§ 3. Основні методи біологічних досліджень



Як пов'язані між собою тема дослідження та методи дослідження?

Для дослідження живого застосовують різні методи. Ці методи можна об'єднати у кілька основних груп, головні з яких – порівняльно-описові, експериментальні, моніторинг і моделювання.

- **Порівняльно-описові методи** започаткував видатний давньогрецький учений Аристотель (див. мал. 1.1, А). Їх і досі використовують для опису нових для науки видів організмів, процесів або явищ. Наприклад, щоб довести унікальність нового виду, його порівнюють з уже відомими науці подібними видами. Порівнювати об'єкти потрібно в межах одного рівня організації живого: наприклад, молекулу порівнюють з іншими молекулами, а клітину – з іншими клітинами.

- **Експериментальні методи** полягають у свідомому втручанні дослідника в будову або функціонування об'єктів, процесів чи явищ із метою спостереження наслідків такого втручання. Експерименти бувають польові та лабораторні. **Польові експерименти** проводять у природних умовах: наприклад, вивчають вплив певних речовин на ріст рослин; досліджують міграції тварин за допомогою геолокаційних приладів. **Лабораторні** експерименти здійснюють у спеціально обладнаних приміщеннях – лабораторіях (мал. 3.1).



Мал. 3.1. Сучасна біологічна лабораторія – місце проведення лабораторних експериментів

- **Моніторинг** – це постійне спостереження за перебігом певних процесів в окремих популяціях, екосистемах або в біосфері загалом. Моніторинг дає змогу визначати стан об'єктів, прогнозувати можливі негативні зміни, аналізувати їхні наслідки й розробляти заходи для охорони природи. Наприклад, моніторинг вмісту вуглекислого газу в атмосфері допомагає передбачити зміни клімату.

- **Моделювання** – метод демонстрування та дослідження будови й функцій об'єктів, перебігу процесів і явищ за допомогою спрощених моделей. Моделювання є важливим етапом багатьох наукових досліджень, оскільки дає змогу вивчати об'єкти й процеси, які важко або неможливо спостерігати безпосередньо. Моделі будують на основі наявних фактів і перевіряють, чи відповідають реальні спостереження / дані досліджень передбаченням, отриманим за допомогою моделювання. У такий спосіб відбувається перехід до узагальнень (виявлення закономірностей чи навіть законів).

Існує багато класифікацій моделей. Найпростіше поділити їх на *статичні*, що демонструють певні структурні елементи систем без розвитку в часі, і *динамічні*, тобто такі, в яких можна дослідити як перебіг процесів, так і вплив окремих чинників на них (мал. 3.2).



Пригадайте класифікацію моделей, розглянуту в 7 класі (презентація за покликанням <https://cutt.ly/2ex5i9z0> або за QR-кодом).





Мал. 3.2. Приклад динамічної інтерактивної моделі екосистеми акваріума, яка дає змогу змінювати параметри і досліджувати вплив цих змін на систему в часі

Фахівці створюють моделі біологічних систем різних рівнів організації – від молекулярного до біосферного. Моделі допомагають прогнозувати наслідки різних явищ. Такі моделі потребують складних обчислень, і математичне моделювання розглядають як окрему галузь прикладної математики.

Математичне моделювання – сукупність методів аналізу складних кількісних взаємозв'язків і закономірностей, зокрема в біологічних системах, за допомогою комп'ютерних програм чи навіть штучного інтелекту. Математичні моделі також можуть бути статичними і динамічними.

Цікаво знати. Першу в біології математичну модель створили у 20-х роках XX ст. незалежно один від одного два математики: англієць Альфред Джеймс Лотка (1880–1949) та італієць Віто Вольтерра (1860–1940). Вони описали зміни чисельності популяцій хижаків та їхньої здобичі у вигляді системи двох диференціальних рівнянь, які показують зміну за одиницю часу кількості особин жертви і хижаків залежно від швидкості розмноження чи рівня смертності, ймовірності для жертви загинути під час зустрічі з хижаком.

- **Статистичні методи** дають змогу опрацьовувати великі обсяги даних для виявлення закономірностей та оцінювання достовірності отриманих результатів і сформульованих висновків. Завдяки статистиці біологія стала більш точною наукою.

Узагальнення

Живу природу на різних рівнях організації вивчають за допомогою таких методів: порівняльно-описових, експериментальних, моніторингу, статистичних та моделювання. Велику кількість біологічних даних обробляють із застосуванням статистичних методів.

Поміркуйте

1. До яких методів біологічних досліджень можна віднести спостереження за птахами – бьордвотчінг (*birdwatching*)?
2. Під час використання яких методів біологічних досліджень користуються збільшувальними приладами?
3. Які методи можна застосувати для вивчення видового складу екосистеми мішаного лісу?

Тема 1.

Хімічний склад клітини



Чому до складу органічних сполук різних організмів входять переважно 4 хімічні елементи: С, Н, N, О? Чому до складу більшості білків входить 20 видів амінокислот, а в природі їх існує понад сто?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Макроелементи та їхня роль у клітині»; «Історія відкриття нуклеїнових кислот»; «Вітаміни, їх відкриття та роль в організмі»; «Гормони та нейrogормони, їхня природа та роль в організмі тварин і людини».

Науково-дослідницький проєкт:

«Дослідження впливу фітогормонів і стимуляторів натурального походження (меду, соку кропиви, соку алое тощо) на проростання насіння рослин»; «Дослідження вмісту органічних і неорганічних речовин у молоці (молочних продуктах) різного походження / різних виробників».

Практико-орієнтований проєкт:

розроблення пам'ятки: «Елементози та їхня профілактика»; «Застосування ферментів (ензимів) у побуті, медицині, біотехнологіях тощо».

Творчий проєкт:

написання есе (твору, розповіді) «Білки в моєму організмі»; створення лепбуків, колажів: «Функції ліпідів», «Функції вуглеводів», «Функції ДНК», «Функції РНК».

Ігровий проєкт:

гра «ДНК чи РНК»; «Білок – функція».

§ 4. Хімічний склад біологічних систем



Чому вміст хімічних елементів в організмах і в неживій природі істотно відрізняється?

Хімічний склад біологічних систем, властивості та функції виявлених у них сполук, шляхи їх утворення й перетворення вивчає наука **біохімія**. Значний внесок у її розвиток зробили українські вчені: О. Я. Данилевський, О. В. Палладін, Я. О. Парнас та інші.

Які хімічні елементи входять до складу біологічних систем. У складі організмів виявлено близько 60 хімічних елементів зі 118, відомих сучасній науці. Деякі з них є обов'язковими для всіх організмів, інші – лише для окремих видів.



Жодного хімічного елемента, який входив би до складу організмів, але був відсутній у неживій природі, не виявлено. Поміркуйте, чому це так.

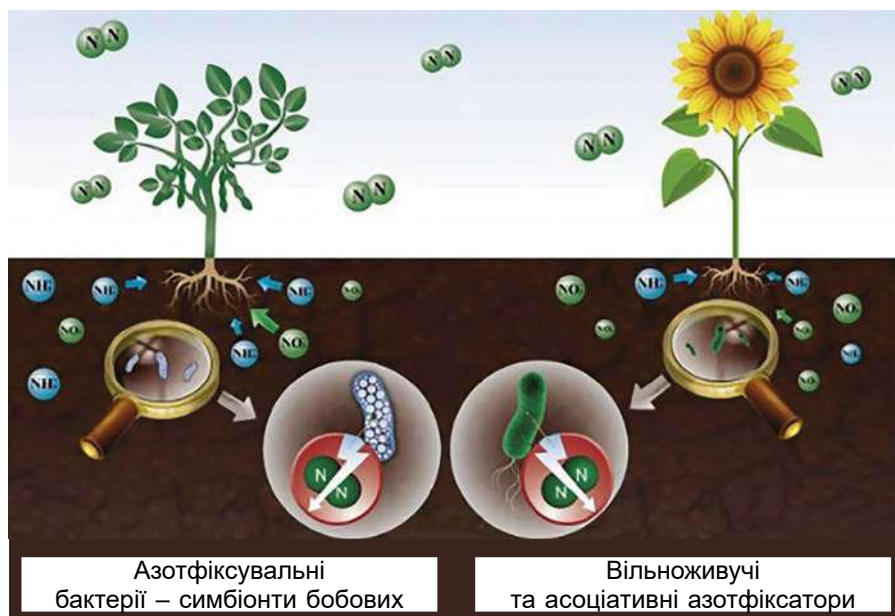
Залежно від кількісного вмісту в біологічних системах, елементи поділяють на **макроелементи** та **мікроелементи**. До **макроелементів** (від грец. *макрос* – великий) зараховують ті, що становлять до 99 % маси організму (табл. 4.1). До складу органічних сполук, крім **Карбону (С)**, можуть входити і деякі інші хімічні елементи, насамперед **Оксиген (О)**, **Гідроген (Н)** та **Нітроген (N)**.

Таблиця 4.1. Уміст макроелементів у тілі людини

Макроелементи	Уміст, %	Макроелементи	Уміст, %
Оксиген (O)	65,0	Кальцій (Ca)	1,3
		Фосфор (P)	0,6
Карбон (C)	18,5	Калій (K)	0,2
		Сульфур (S)	0,3
Гідроген (H)	9,5	Натрій (Na)	0,2
		Хлор (Cl)	0,2
Нітроген (N)	2,6	Магній (Mg)	0,05
		Ферум (Fe)	0,02

Серед макроелементів надзвичайно важливе значення мають чотири: Карбон, Оксиген, Гідроген та Нітроген. Наприклад: з атомів **Гідрогену** й Оксигену складається вода. **Оксиген** у складі кисню (O_2) потрібен більшості організмів для дихання. **Нітроген** є компонентом білків і нуклеїнових кислот. **Карбон** у складі вуглекислого газу (CO_2) бере участь у фотосинтезі. Вуглекислий газ, що утворюється у процесі дихання, виводиться з організмів в атмосферне повітря.

Азот (N_2) переважає серед атмосферних газів (понад 78 %). Хоча для більшості живих істот цей газ інертний (вони його не засвоюють), його можуть поглинати з атмосфери деякі організми (азотфіксувальні бактерії, деякі ціанобактерії) (мал. 4.1). Тим самим вони включають атмосферний азот у колообіг речовин у природі.



Мал. 4.1. Фіксація Нітрогену бактеріями

Не менш важлива роль інших макроелементів. Наприклад, **Кальцій (Ca)** – компонент скелета людини і тварин, мушель, потрібен для зсідання крові, функціонування серця та м'язів. **Калій (K)** і **Натрій (Na)** забезпечують проведення нервових імпульсів, активний транспорт через мембрани. **Ферум (Fe)** входить до складу гемоглобіну (мал. 4.2, А), за його нестачі виникає **анемія**.

Магній (Mg) потрібен для синтезу хлорофілу, який забезпечує фотосинтез у рослин. За нестачі Магнію або Феруму в рослин розвивається **хлороз** – листки жовкнуть, верхівки пагонів усихають (мал. 4.2, Б).



Мал. 4.2. Роль сполук Феруму в житті організмів. А. Атоми Феруму надають червоного забарвлення молекулам гемоглобіну, еритроцитам і крові загалом. Б. Ознаки хлорозу в рослин

Фосфор (P) входить до складу АТФ, нуклеїнових кислот, мембран клітин. У рослин цей елемент стимулює дозрівання плодів, а у тварин і людини – формування кісток.

На відміну від макроелементів, **мікроелементи** містяться в організмах у дуже малій кількості (менше ніж 0,01 %), проте їхня роль – життєво важлива. Великий внесок у вивчення мікроелементів зробив В. І. Вернадський (мал. 4.3).



Мал. 4.3. А. Володимир Іванович Вернадський (1863–1945). Б. Зображення В. І. Вернадського на банкноті 1000 гривень, яку Національний банк України почав випускати з 2019 року

Цікаво знати. Внесок Володимира Івановича Вернадського в розвиток біології та екології важко переоцінити. Він створив учення про біосферу та ноосферу (сучасний стан біосфери, зумовлений насамперед розумовою діяльністю людини), започаткував науку біогеохімію (вивчає роль різних груп організмів у перетворенні оболонок планети), заснував у Києві Національну бібліотеку Української держави (нині – Національна

бібліотека України імені В. І. Вернадського), був одним із засновників Української академії наук, її першим президентом.

Серед мікроелементів, потрібних організмам, – **Йод (I), Кобальт (Co), Купрум (Cu), Цинк (Zn), Бром (Br), Манган (Mn), Селен (Se), Флуор (F)** та інші. **Йод** потрібен для утворення гормонів щитоподібної залози. Його нестача спричиняє **кретинізм, мікседему, ендемічний зоб**. **Кобальт** – складова вітаміну B_{12} , потрібного для кровотворення. **Купрум** важливий для утворення крові. **Цинк** регулює діяльність підшлункової залози. **Бром** бере участь у синтезі гормонів гіпофіза.

✓ **Дізнайтеся більше** про вплив нестачі окремих елементів на рослини за QR-кодом.



Надлишок або нестача мікроелементів можуть спричинити **мікроелементози** – значні порушення обміну речовин. Наприклад, **Флуор** необхідний для формування емалі зубів. Його нестача спричиняє **карієс** (мал. 4.4, А), а надлишок – **флюороз** (мал. 4.4, Б), що у важких випадках уражає кістки.

Нестача **Селену** порушує функцію щитоподібної залози, серцево-судинної системи. Надлишок спричиняє **селеноз** – патологічний стан із ураженням печінки, нирок, нервової системи.



Мал. 4.4. Ураження емалі зубів може бути спричинене як нестачею в організмі Флуору (карієс; А), так і його надлишком (флюороз; Б)

Узагальнення

Біохімія досліджує хімічний склад біологічних систем. До складу організмів входять близько 60 хімічних елементів. З них найбільша кількість (понад 99,9 %) припадає на макроелементи (С, Н, N, O, K, Ca, Na, Mg, P, Cl, S), тоді як уміст окремих мікроелементів (Co, I, F, Se, Mn, Br тощо) коливається в межах від 0,001 до 0,000000000001 %. Макро- та мікроелементи входять до складу біологічних систем як компоненти органічних і неорганічних сполук.

Поміркуйте

1. Як мікро- та макроелементи надходять до організму?
2. Йод належить до мікроелементів. Чи може організм людини обійтись без Йоду?
3. До яких неорганічних та органічних сполук входять такі макроелементи: С, Н, N, O?

§ 5. Вода та інші неорганічні сполуки у складі організмів



Чи відрізняються властивості води, яка утворює середовище існування організмів, від властивостей води, що входить до складу клітин організмів?

Хімічні елементи, що входять до складу біологічних систем, утворюють як органічні, так і неорганічні сполуки або наявні у вигляді йонів. Загальний уміст неорганічних сполук (без урахування води) у клітинах становить від одного до кількох відсотків. Найважливішими неорганічними речовинами є вода, неорганічні кислоти та солі. Вони забезпечують функціонування клітин і цілих організмів.

Солі неорганічних кислот можуть перебувати в організмах у розчиненому вигляді (у формі йонів) або в твердому стані. Наприклад, солі Кальцію та Фосфору входять до складу кісток хребетних тварин, а також зовнішніх скелетів безхребетних (мал. 5.1).

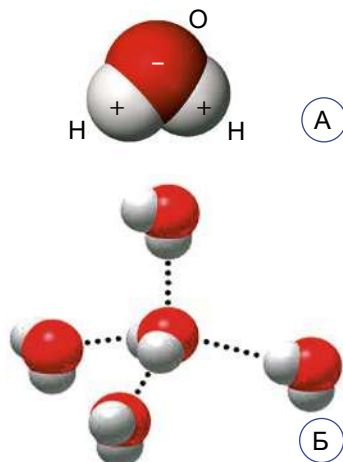


Мал. 5.1. Солі кальцію входять до складу як внутрішнього (А), так і зовнішнього (Б, В) скелета тварин. А. Внутрішній скелет слона. Б. Зовнішній скелет мадрепорового корала – мозковика. В. Мушля двостулкового молюска – тридакни велетенської

Постійний уміст натрій хлориду (NaCl) та інших солей у плазмі крові людини (0,9 %) є обов'язковою умовою підтримання гомеостазу – динамічної сталості складу і властивостей внутрішнього середовища організму. Саме тому в разі невеликих крововтрат або під час ін'єкцій певних ліків використовують розчин такої самої концентрації – *фізіологічний розчин*. Важливу роль відіграють і **неорганічні кислоти**. Наприклад, хлоридна кислота створює кисле середовище в шлунку людини, активуючи ферменти шлункового соку.

Структура, властивості та функції води. Серед усіх неорганічних сполук особливе значення має **вода**. Вона є основою внутрішнього середовища організмів, у якому відбуваються процеси обміну речовин і перетворення енергії. Вода бере участь у розщепленні органічних сполук. Її вміст в організмах становить у середньому 60–70 %, а в деяких – до 98 % (як-от у медуз). У цитоплазмі клітин міститься близько 80 % води.

Молекула води (H_2O) складається з атома Оксигену і двох атомів Гідрогену, з'єднаних міцними **ковалентними полярними зв'язками** (мал. 5.2, А). Саме через різницю в електронегативності атомів Оксигену та Гідрогену молекулі води притаманна полярність – на її «полюсах» формуються позитивний і негативний заряди. Це забезпечує виникнення **водневих зв'язків** – електростатичної взаємодії між



Мал. 5.2. А. Масштабна модель молекули води.
Б. Схема утворення водневих зв'язків (позначені крапками)

атомом Оксигену однієї молекули та атомом Гідрогену іншої (мал. 5.2, Б). Ці зв'язки слабші за ковалентні, але відіграють ключову роль у формуванні властивостей води. У рідкому стані вони постійно утворюються й розриваються.

Частина молекул води формує навколо певних сполук, наприклад білків, водну (гідратаційну) оболонку, що запобігає їхній взаємодії між собою. Таку воду називають **зв'язаною**, або **структурованою** (4–5 % від загального вмісту води в організмах).

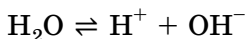
Решта – **вільна вода** (95–96 %), що не пов'язана з іншими сполуками. Основні властивості води такі.

- **Здатність перебувати у трьох агрегатних станах.** Залежно від температури середовища вода може бути рідкою, твердою (лід) або газуваною (пара).

✓ **Дізнайтеся більше** про кристалічну структуру води за QR-кодом.



- **Здатність до йонізації.** Молекули води здатні дисоціювати з утворенням йонів Гідрогену та гідроксид-йону. При цьому між молекулами води та йонами встановлюється динамічна рівновага:



- **Регуляція об'єму.** Вода визначає об'єм клітин. Її майже неможливо стиснути. Завдяки цьому вода може використовуватися також як гідростатичний скелет (пригадайте, у яких тварин). До слова, в автомобілях також використовують цю властивість: у гідравлічних гальмах саме рідина передає тиск від педалі гальмування на гальмові колодки в колесах.

Вода забезпечує підтримання внутрішньоклітинного тиску (тургору), що зумовлює пружність клітин рослин.

- **Універсальний розчинник.** Усі речовини поділяють на добре розчинні у воді (**гідрофільні**) та нерозчинні в ній (**гідрофобні**). До гідрофільних сполук належить багато кристалічних солей, наприклад кухонна сіль (NaCl), а також такі вуглеводи, як глюкоза, фруктоза тощо. Гідрофільні сполуки часто містять полярні (заряджені) групи. Вода розчиняє гідрофільні речовини завдяки взаємодії з їхніми полярними групами. Гідрофобні речовини (ліпіди, деякі білки) мають неполярні групи, тому у воді не розчиняються. Такі сполуки розчиняються переважно в неполярних розчинниках (як-от хлороформ, бензол).

Існують **амфіфільні речовини** – одна частина їхньої молекули виявляє гідрофільні властивості, інша – гідрофобні (наприклад, фосfolіпіди, ліпопротеїди, деякі білки).

- **Транспортна функція.** Вода транспортує речовини у формі розчинів: провідними тканинами й міжклітинниками в рослин, кровоносною та лімфатичною системами, тканинною рідиною у тварин.

- **Участь у біохімічних реакціях.** Наприклад, за участі води розщеплюються органічні сполуки. Такі реакції називають **гідролізом** (від грец. *гідро* – вода й *лізис* – розкладання). Перебіг багатьох біологічних процесів можливий саме завдяки утворенню і руйнуванню водневих зв'язків.



Подумайте, які фізичні властивості визначаються здатністю води утворювати водневі зв'язки.

- **Регулювання температури.** Воді властива висока **теплоємність** (кількість тепла, потрібна для нагрівання одиниці об'єму на 1 °C). Ця властивість дає змогу стабілізувати внутрішню температуру організмів. Випаровування води (транспірація у рослин, потовиділення або випаровування вологості зі слизових оболонок у ссавців) забезпечує тепловіддачу, що захищає організми від перегрівання.

- **Теплопровідність.** Завдяки цій властивості води тепло рівномірно розподіляється в тілі організму через кров, лімфу або розчини у рослин.

Узагальнення

До складу біологічних систем хімічні елементи входять як компоненти органічних та неорганічних сполук. Найважливішими неорганічними сполуками організмів є вода, неорганічні солі та кислоти. Вода створює внутрішнє середовище організму, є універсальним розчинником, регулює об'єм і тиск клітин, транспортує речовини, бере участь у біохімічних реакціях, регуляції температури тіла.



Поміркуйте

1. Де в природі можна бачити три агрегатних стани води водночас?
2. Чому вчені вважають, що життя на нашій планеті зародилося саме у водному середовищі?
3. Завдяки яким властивостям води організми можуть витримувати високу та низьку температуру?

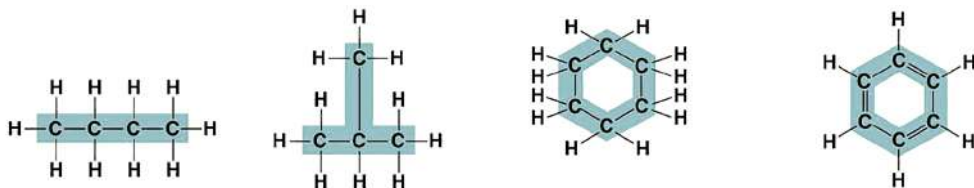
§ 6. Органічні речовини: вуглеводи та ліпіди



За якими особливостями будови ліпіди та вуглеводи відносять до органічних сполук?

Які речовини називають органічними. Органічні речовини – це сполуки Карбону з іншими хімічними елементами. Вони є основою біологічних систем. Ці сполуки зазвичай мають складну будову і виконують різноманітні функції в клітинах та цілих організмах.

У складі органічних сполук переважають органогенні хімічні елементи: Карбон, а також найчастіше Гідроген, Оксиген, Нітроген тощо. Ковалентно зв'язані між собою атоми Карбону утворюють ланцюжки, кільця або ряди кілець – так званий скелет молекули (мал. 6.1).



Мал. 6.1. Приклади скелетів різних органічних сполук. Зверніть увагу: кожен атом Карбону може утворювати чотири ковалентних зв'язки

Цікаво знати. Тривалий час вважали, що органічні сполуки можуть синтезуватись лише в живих організмах. Згодом було доведено, що деякі органічні сполуки можуть виникати внаслідок перетворення неорганічних речовин. Нині розроблено методи штучного синтезу багатьох органічних сполук.

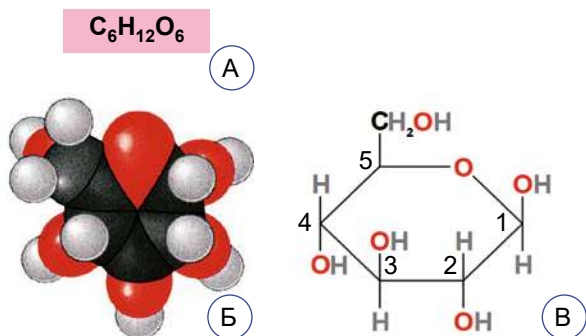
До складу клітин входять різні органічні сполуки: ліпіди, вуглеводи, білки, нуклеїнові кислоти тощо. Їхні молекули можуть мати високу молекулярну масу, складаючись із великої кількості однакових чи різних за хімічною будовою ланок (простих молекул) – мономерів.

Мономери (від грец. *монос* – один і *мерос* – частина) – це низькомолекулярні сполуки, які можуть використовуватись для синтезу високомолекулярних полімерів (їх ще називають макромолекулами). Полімери, які синтезуються в організмах, називають **біополімерами** (від грец. *біос* – життя, *полі* – багато і *мерос*). Наприклад, молекули білків складаються із залишків амінокислот; молекули нуклеїнових кислот – із залишків нуклеотидів, а складних вуглеводів (полісахаридів) – із залишків моносахаридів.

Будова та властивості вуглеводів. Вуглеводи – це сполуки, у яких співвідношення хімічних елементів С, Н, О здебільшого відповідають формулі $(\text{CH}_2\text{O})_n$, де n дорівнює трьом і більше. У клітинах тварин вуглеводи містяться в незначній кількості (близько 1 % сухої маси (маси усіх компонентів, за винятком води), у клітинах печінки та м'язів – до 5 %). У рослинних клітинах їхній уміст значно більший (до 60–90 %).

Залежно від кількості мономерів, що входять до складу молекул, вуглеводи поділяють на моносахариди, олігосахариди та полісахариди.

Моносахариди здебільшого мають загальну формулу $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$. Вони можуть містити від 3 до 10 атомів Карбону. У природі найпоширеніші моносахариди, що містять 5 (як-от рибоза і дезоксирибоза) та 6 (глюкоза, фруктоза та ін.) атомів Карбону (мал. 6.2). Моносахариди мають



Мал. 6.2. Моносахарид глюкоза:

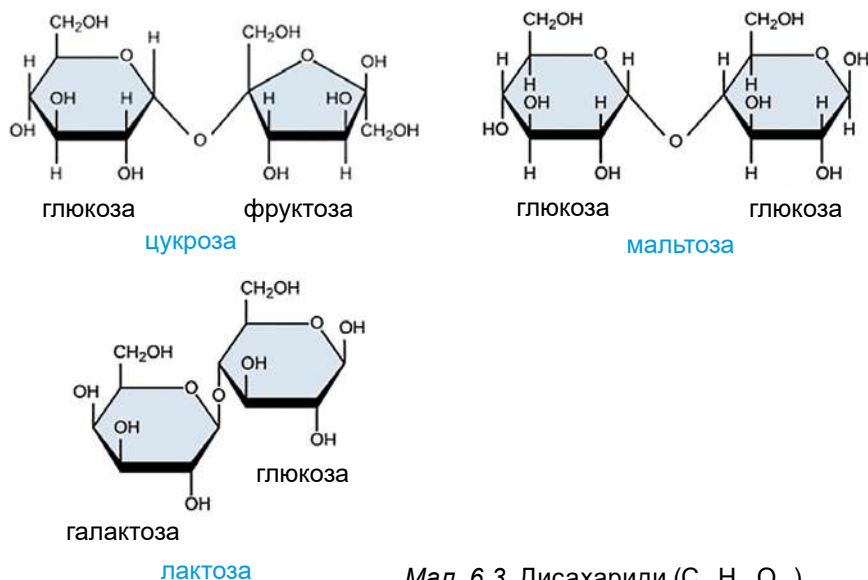
А – молекулярна формула;

Б – просторова модель;

В – структурна формула

солодкий присмак, добре розчиняються у воді. Моносахариди, до складу яких входить п'ять атомів Карбону, називають *пентозами*, шість – *гексозами*.

Олігосахариди – полімерні вуглеводи, у яких моносахаридні ланки (від двох до десяти) з'єднані міцним ковалентним зв'язком. Досить поширені *дисахариди*, утворені сполученням залишків двох молекул моносахаридів. Приклади дисахаридів: мальтоза (солодовий цукор), цукроза (бураковий або тростинний цукор), лактоза (молочний цукор), трегалоза (грибний цукор) (мал. 6.3). Вони мають солодкий присмак і також добре розчиняються у воді.



Мал. 6.3. Дисахариди ($C_{12}H_{22}O_{11}$)

Полісахариди – це біополімери, молекулярна маса деяких із них може сягати кількох мільйонів Да¹. Приклади полісахаридів: крохмаль, целюлоза, глікоген, пектин, хітин та ін. Вони майже не розчиняються у воді й не мають солодкого присмаку.

Вуглеводи можуть вступати у зв'язок з іншими сполуками. Такі вуглеводи називають *складними*. Приклади: глікопротеїни (сполуки вуглеводів з білками), гліколіпіди (сполуки вуглеводів з ліпідами).

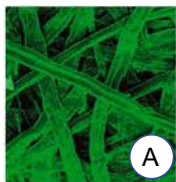
Функції вуглеводів у біологічних системах.

- **Енергетична функція:** під час окиснення 1 г вуглеводів у клітинах вивільняється до 17,6 кДж енергії.

Цікаво знати. Важливою властивістю вуглеводів є їхня здатність розщеплюватися з виділенням енергії без участі кисню. Завдяки цій властивості вуглеводів анаеробні організми забезпечують себе енергією.

- **Резервна функція:** полісахариди можуть відкладатись у клітинах про запас, найчастіше у вигляді зерен. У клітинах рослин відклада-

¹ *Пригадаймо:* молекулярна маса – маса молекули, яка дорівнює масі всіх атомів, що входять до її складу. Атомна одиниця маси (а. о. м.), або Дальтон (Да), дорівнює 1/12 маси ізотопу Карбону ^{12}C .



Мал. 6.4. Будівельна (структурна) функція вуглеводів. А. Целюлоза у складі клітинних оболонок рослин. Б. Зовнішній скелет членистоногих утворений з кутикули, до складу якої входить хітин

ється крохмаль, у клітинах тварин і грибів – глікоген. Ці запасні сполуки є резервом поживних речовин та енергії.

• Будівельна (структурна)

функція: вуглеводи входять до складу певних клітинних структур. Так, нітрогенумісний полісахарид хітин входить до складу зовнішнього скелета членистоногих і клітинної стінки справжніх грибів; до складу клітинної стінки рослин входить целюлоза (мал.

6.4). Клітинні стінки рослин і грибів, які містять полісахариди, захищають уміст клітин і підтримують їхню форму. До складу надмембранних структур клітин тварин (глікокаліксу) входять вуглеводи, пов'язані з білками та ліпідами.

Цікаво знати. Целюлоза є найпоширенішою органічною речовиною на Землі: приблизно половина атомів Карбону, що входять до складу органічних сполук, міститься саме в целюлозі.

• **Захисна функція:** полісахариди пектини (вони містяться в усіх рослинах, насамперед у фруктах) здатні зв'язувати деякі токсини та радіонукліди, запобігаючи потраплянню їх у кров. Полісахаридну природу має гепарин, який синтезують лейкоцити базофіли.



Гепарин запобігає зсіданню крові й розвитку тромбозу вен (утворенню тромбів, здатних ускладнювати кровообіг), підвищує проникність судин, стійкість організму до нестачі кисню, впливу вірусів і токсинів, знижує рівень цукру в крові. Тому його застосовують як лікувальний препарат.

Різноманітність ліпідів. Ліпіди – група гідрофобних або амфіфільних органічних сполук, що розчиняються в неполярних розчинниках, як-от у хлороформі або бензолі. До ліпідів відносять такі органічні сполуки, як воски, жирні кислоти тощо.

Поширеною групою ліпідів є **жири** – речовини, утворені триатомним спиртом гліцеролом і трьома залишками жирних кислот. Вони можуть відкладатися у вигляді жирових включень у рослинних і тваринних клітинах.

Воски виконують здебільшого захисну функцію. У ссавців віск виділяють сальні залози шкіри: він надає шкірі еластичності та зменшує зношення волосяного покриву. У водоплавних птахів віск виділяє куприкова залоза, розташована над основою хвоста. Її секрет надає пір'яному покриву водовідштовхувальних властивостей. Восковий шар вкриває листки наземних рослин (мал. 6.5, А) і поверхню зовнішнього скелета членистоногих – мешканців суходолу, запобігаючи надлишковому випаровуванню води з поверхні тіла. Добре розвинуті восковидільні залози є в черевці медоносних бджіл-робітниць (мал. 6.5, Б).

Складні ліпіди утворюються внаслідок взаємодії молекул простих ліпідів з іншими речовинами. До них належать ліпопротеїни (сполуки ліпідів і білків), гліколіпіди (сполуки ліпідів і вуглеводів), фосфоліпіди (сполуки ліпідів та ортофосфатної кислоти).



Мал. 6.5. Воски вкривають поверхню плодів і входять до складу кутикули листків (А); з восків медоносна бджола будує стільники (Б)

Стероїди – біологічно активні речовини тваринного, рідше – рослинного походження. Стероїдну природу, зокрема, мають статеві гормони людини – естрогени (жіночі) та андрогени (чоловічі), а також гормони надниркових залоз (кортикостероїди). Стероїд *холестерин*, або *холестерол*, в організмі людини міститься в клітинах жирової та нервової тканин, печінки. В організмі людини холестерол є попередником під час синтезу статевих гормонів, вітаміну D.

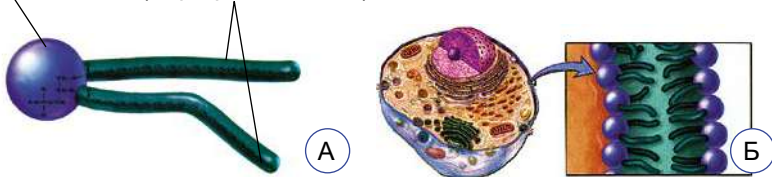


Надлишок холестеролу в організмі може призвести до утворення жовчних каменів, атеросклерозу, підвищення ризиків серцевих нападів, ішемічної хвороби серця, інсультів тощо. Щоб запобігти цьому, потрібно періодично робити аналізи на визначення рівня холестеролу в організмі.

Функції ліпідів. Одна з найважливіших функцій ліпідів – *енергетична*. У разі повного розщеплення 1 г таких сполук ліпідної природи, як жири, виділяється 38,9 кДж.

• Не менш важлива *будівельна*, або *структурна*, функція ліпідів. Так, фосфоліпіди є важливою складовою клітинних мембран (мал. 6.6).

ортофосфатна група (гідрофільна головка) ланцюжки жирних кислот (гідрофобні хвости)



Мал. 6.6. Фосфоліпіди – складник клітинних мембран. А. Будова молекули фосфоліпіду. Б. Розташування фосфоліпідів у складі клітинної мембрани

• **Резервна функція** полягає в тому, що ліпіди містяться в цитоплазмі клітин у вигляді включень (наприклад, клітин жирової тканини, насіння соняшнику тощо).

Запаси жирів організм може використовувати як резервні поживні речовини та як *джерело метаболічної води* (під час окиснення 1 г жирів утворюється майже 1,1 г води).

• Запаси жиру в організмі можуть виконувати й *захисну функцію*. Зокрема, вони захищають внутрішні органи від механічних ушкоджень. Накопичуючись у підшкірній жировій клітковині тварин – мешканців прохолодного клімату (китів, тюленів, пінгвінів та ін.), жири захищають організм від дії низьких температур (*теплоізоляційна функція*). Ця функція жирів зумовлена їхньою низькою теплопровідністю.

Цікаво знати. Хоча верблюда мешкають у спекотних пустелях, де температура вдень може сягати до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище, в їхньому організмі відкладаються значні запаси жиру. Це пов'язано з тим, що під час окиснення жирів утворюється вода (її називають метаболічною), нестача якої може гостро відчуватись у пустелі. Сині кити здебільшого мешкають у прохолодних водах, і значні запаси підшкірного жиру захищають їхнє тіло від переохолодження, а також впливають на плавучість.



Чим можна пояснити різний характер розподілу жирових відкладень у тілі синього кита (у вигляді суцільного шару) та верблюда (окремими ділянками)?

• Важлива й **регуляторна функція** ліпідів. Деякі біологічно активні речовини (стероїдні гормони, вітаміни групи D) мають ліпідну природу. Вони беруть участь у регуляції життєвих функцій організмів: обміну речовин у тварин і людини, процесу линяння у комах тощо.



Узагальнення

Органічні речовини – основа біологічних систем. До їх складу входить Карбон та інші хімічні елементи. Прості органічні молекули – мономери – входять до складу складних молекул – біополімерів. Вуглеводи – сполуки, у складі яких співвідношення Карбону, Гідрогену та Оксигену відповідає формулі $(\text{CH}_2\text{O})_n$, де n дорівнює трьом і більше. Моносахариди (глюкоза, фруктоза) утворюють олігосахариди (цукроза, лактоза) та полісахариди (крохмаль, хітин тощо). Ліпіди – переважно гідрофобні органічні сполуки, не полімерні та не полярні. До ліпідів належать жири, воски та стероїди.



Поміркуйте

1. Чому моносахариди входять до складу різних груп організмів, а полісахариди є специфічними?
2. З якою метою гепарин застосовують у медицині?
3. У чому користь та шкода холестеролу?



Лабораторне дослідження «Вивчення властивостей ліпідів і вуглеводів (на прикладі цукру, крохмалю, олії, вершкового масла)».



§ 7. Білки: рівні структурної організації, основні властивості



Чому будову білків порівнюють з будовою слів, а амінокислоти – з буквами абетки?

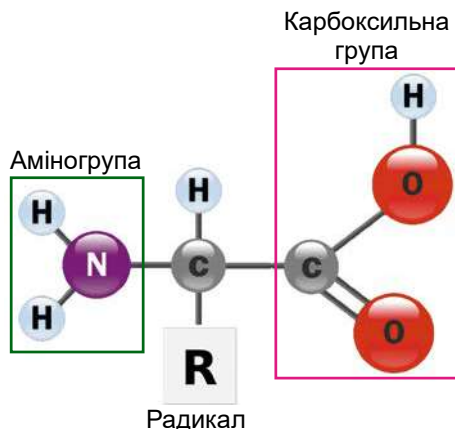
Білки є незамінними компонентами усіх клітин. У клітинах тварин на них припадає до 40–50 % сухої маси, а в рослинних клітинах – до 20–35 %.

Будова білків. Білки – це високомолекулярні біополімери, мономерами яких є залишки амінокислот.

Амінокислоти – органічні сполуки, що містять *аміногрупу* ($-\text{NH}_2$) з лужними властивостями та *карбоксильну групу* ($-\text{COOH}$) з кислотними властивостями. Обидві ці групи, а також атом Гідрогену приєднані

до одного й того самого атома Карбону. Також кожна амінокислота має **радикал** (R-групу), який визначає її хімічну унікальність (мал. 7.1).

Відомо понад 600 амінокислот, проте до складу білків зазвичай входить 20 так званих *стандартних*, або *протеїногенних*, амінокислот (табл. 7.1). Вони кодуються *генетичним кодом* (його вивчатимете пізніше) і трапляються в більшості білків. Крім них, існують нестандартні амінокислоти, які утворюються в результаті хімічних змін стандартних. Завдяки різноманітним комбінаціям стандартних і нестандартних амінокислот утворюються мільйони типів білкових молекул (у людини – понад 5 млн). Кожен білок має унікальний склад і порядок розташування амінокислот, що визначає його специфічні властивості й функції.



Мал. 7.1. Будова амінокислоти

Таблиця 7.1. Назви стандартних амінокислот та їхні скорочені позначення

Повна назва амінокислоти	Скорочене позначення амінокислоти	Повна назва амінокислоти	Скорочене позначення амінокислоти
Аланін	Ала	Гістидин	Гіс
Лейцин	Лей	Тирозин	Тир
Аргінін	Арг	Гліцин	Глі
Лізин	Ліз	Треонін	Тре
Аспарагін	Асн	Глутамін	Глн
Метіонін	Мет	Триптофан	Три
Аспарагінова кислота	Асп	Глутамінова кислота	Глу
Пролін	Про	Фенілаланін	Фен
Валін	Вал	Ізолейцин	Іле
Серин	Сер	Цистеїн	Цис

Цікаво знати. Назви деяких амінокислот походять від джерела, з якого їх уперше було виділено, або від їхніх властивостей. Наприклад, аспарагін уперше виявлено в аспарагусі, а гліцин названо через солодкий смак (від грец. *глікос* – солодкий).

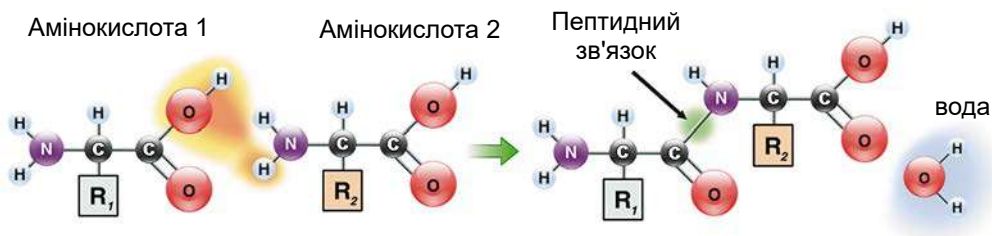
Амінокислоти поділяють на замінні та незамінні. *Замінні амінокислоти* можуть синтезуватися в організмі людини і тварин з продуктів обміну речовин. Натомість *незамінні амінокислоти* в організмі людини і тварин не синтезуються, тому мають надходити з їжею. Їх синтезують інші організми: рослини, гриби, бактерії. Білки, які містять у своєму складі всі незамінні амінокислоти (лізин, лейцин, ізолейцин, треонін, триптофан, фенілаланін, валін, метіонін, а для

дітей – також аргінін і гістидин), називають **повноцінними**. Нестача в їжі хоча б однієї з незамінних амінокислот призводить до активного розщеплення білків, яке переважає над синтезом. Крім того, незамінні амінокислоти є попередниками біологічно активних молекул: тирозин – гормонів тироксину й адреналіну, триптофан – серотоніну, фенілаланін – дофаміну.

Цікаво знати. Основним джерелом білків для людини є м'ясо та інші частини тіла тварин, а також молоко, яйця птахів та ікра риби. Серед продуктів рослинництва велику кількість білка мають зернобобові: соя, квасоля, боби тощо. Вміст білка глютену в зернах злакових культур є основним критерієм визначення якості борошна.

Існує багато прикладів того, як традиційні народні кухні, з огляду на багаторічний досвід, компенсують нестачу певних поживних речовин. Так, в італійській кухні пасту часто поєднують із сиром, щоб урівноважити дефіцит деяких незамінних амінокислот у глютені пшениці. Зокрема, сир містить багато тирозину і триптофану – амінокислот, яких бракує в пшеничному білку. У мексиканській кухні традиційним є поєднання кукурудзи з бобовими, адже білки цих рослин доповнюють один одного за складом незамінних амінокислот. Завдяки такому поєднанню організм отримує повний набір необхідних амінокислот. В українській традиційній кухні є багато виробів з кисломолочного сиру, який містить незамінні амінокислоти, наприклад вареники із сиром.

Залишки амінокислот у складі білків з'єднані між собою **пептидними** (від грец. *пептон* – зварений) **зв'язками** – міцними ковалентними зв'язками між карбоксильною групою однієї амінокислоти та аміногрупою іншої (мал. 7.2). Сполука з двох амінокислот – **дипептид**, з багатьох – **поліпептид**. Структури, які складаються з великої кількості залишків амінокислот (від 6–10 до декількох десятків), належать до **поліпептидів**.

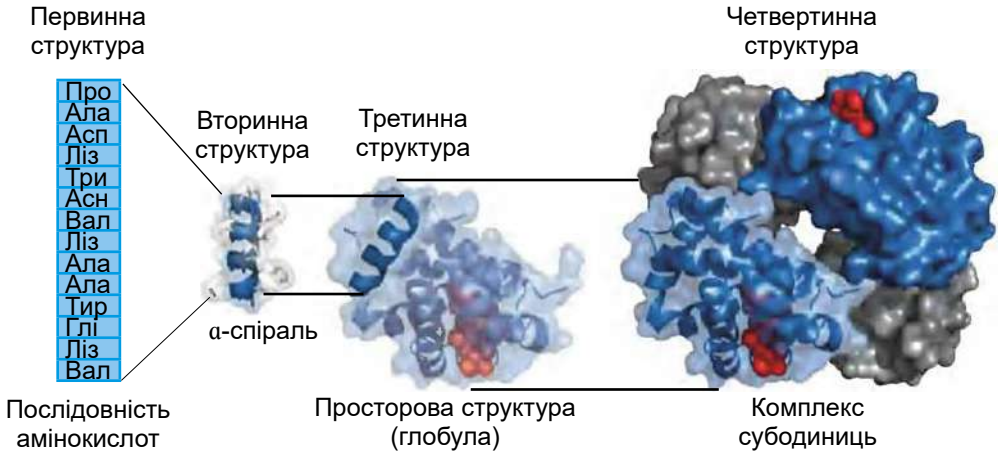


Мал. 7.2. Схема утворення пептидного зв'язку

Поліпептиди з високою молекулярною масою (від 6000 до кількох мільйонів) називають **білками**. Вони складаються з одного або декількох поліпептидних ланцюгів і можуть містити до кількох тисяч амінокислотних залишків.

Рівні просторової структури білків. Певне просторове розташування атомів у складі молекули називають **конформацією** (від лат. *конформаціо* – розташування). Відомо чотири рівні структури білків: первинний, вторинний, третинний і четвертинний (мал. 7.3).

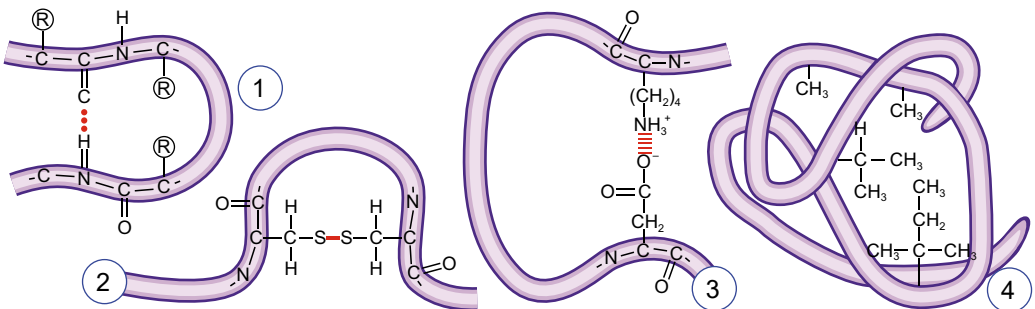
• **Первинну структуру** білків визначає певна послідовність амінокислотних залишків, з'єднаних за допомогою пептидних зв'язків (мал. 7.3). Первинна структура зумовлює властивості та функції білкової молекули.



Мал. 7.3. Рівні просторової організації білкових молекул

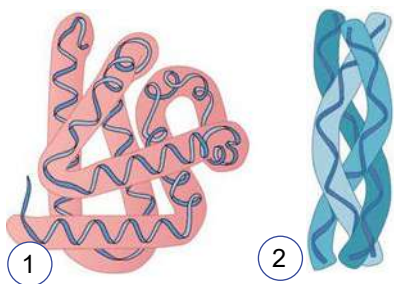
• Для виконання специфічних функцій молекула білка має набутися більш складної структури, зокрема **вторинної**. При цьому молекула частково чи повністю скручується у спіраль завдяки водневим зв'язкам, які виникають між атомами Н і О пептидних груп різних витків (мал. 7.4, 1). Хоча водневі зв'язки значно слабші за пептидні, однак разом вони формують досить міцну структуру. Вторинна структура білкової молекули також може набувати вигляду кількох зближених ділянок у вигляді ланцюгів, сполучених водневими зв'язками.

• **Третинна структура** зумовлена здатністю поліпептидної спіралі певним чином закручуватися, зазвичай у грудку, або глобулу (мал. 7.3). Це відбувається завдяки ковалентним зв'язкам між залишками амінокислоти цистеїну (мал. 7.4, 2) – так званим **дисульфідним зв'язкам**. Підтримання третинної структури також забезпечують гідрофобні, електростатичні та інші взаємодії, а також водневі зв'язки (мал. 7.4, 1, 3, 4) між радикалами амінокислот.



Мал. 7.4. Зв'язки, які підтримують просторові організації білкової молекули: 1 – водневі; 2 – дисульфідні; 3 – йонні взаємодії; 4 – гідрофобні взаємодії

Гідрофобні взаємодії – це сили взаємного тяжіння між неполярними ділянками молекул у водному середовищі. Гідрофобні залишки амінокислот у водному середовищі зближуються, наче «злипаються», та стабілізують структуру білка. При цьому гідрофобні амінокислотні залишки спрямовуються всередину білкової молекули, а гідрофільні – назовні, взаємодіючи з молекулами води. Утворена глобула згодом ущільнюється, що забезпечує виконання білковою молекулою своїх специфічних функцій. Глобулярна структура додатково стабілізується *йонними взаємодіями*, які виникають між позитивно та негативно зарядженими хімічними групами молекули.



Мал. 7.5. Глобулярна (1) та фібрилярна (2) структура білків

Молекули білка, яким притаманна третинна структура, можуть мати не тільки **глобулярну форму**, а й **фібрилярну** (ниткоподібну) (мал. 7.5).

• **Четвертинна структура** білків виникає під час об'єднання кількох глобул. Наприклад, молекула гемоглобіну складається із чотирьох поліпептидних ланцюгів (мал. 7.6). Підтримання четвертинної структури забезпечують гідрофобні, електростатичні та інші взаємодії, а також водневі зв'язки (мал. 7.4).



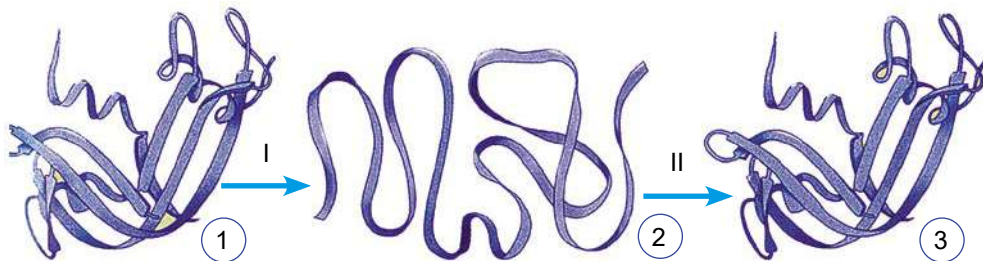
Мал. 7.6. Просторова модель будови молекули гемоглобіну: різні поліпептидні ланцюги забарвлені у різні кольори

Цікаво знати. Хоча науковці доволі давно (понад 50 років тому) навчилися визначати первинну структуру (послідовність амінокислот) білків, передбачення вторинної та третинної структур залишалися проблемними. Завдяки використанню моделі штучного інтелекту AlphaFold2, створеної Google DeepMind для розрахунку структури білків, цю проблему вдалося розв'язати. Створена модель дає змогу передбачити структуру майже всіх 200 мільйонів білків, які дослідники виявили в організмах. За цю роботу Деміс Гассабіс і Джон Джемпер здобули 2024 року Нобелівську премію в галузі хімії.

Одні з білків складаються лише з амінокислотних залишків, тоді як інші містять також небілкові компоненти – залишки ортофосфатної та нуклеїнових кислот, вуглеводів, ліпідів, атоми Феруму, Цинку, Купруму тощо.

Функціональні властивості білків зумовлені їхнім амінокислотним складом і просторовою структурою. Фібрилярні білки зазвичай нерозчинні у воді й виконують структурну (наприклад, кератин у складі волосся) або рухову (скоротливі білки) функції. Натомість глобулярні білки здебільшого водорозчинні та виконують в організмі інші функції: наприклад, гемоглобін (мал. 7.6) забезпечує транспорт газів, пепсин – розщеплення білків їжі, імуноглобуліни (антитіла) – виконують захисну функцію.

Під дією температури, кислот, лугів та інших чинників або речовин білки можуть втрачати свою просторову структуру і властивості. Процес порушення природної структури білків, який супроводжується розгортанням білкової молекули без зміни її первинної структури, називають **денатурацією** (мал. 7.7, I).



Мал. 7.7. Денатурація (I) та ренатурація (II) білкової молекули:
1, 3 – активні молекули білка; 2 – неактивна молекула білка

Здебільшого денатурація необоротна. Але якщо на початкових стадіях денатурації припиняється дія чинників, що призвели до неї, білок може відновити свій початковий стан. Це явище називають **ренатурацією** (мал. 7.7, II). В організмів оборотна денатурація часто пов'язана з виконанням білковими молекулами певних функцій: забезпеченням рухів, передаванням до клітини сигналів із зовнішнього середовища, прискоренням біохімічних реакцій та іншими процесами.

Процес руйнування первинної структури білків необоротний, його називають **деструкцією**.

Узагальнення

Білки – це біополімери, мономерами яких є амінокислоти. До складу білків входять 20 стандартних амінокислот, кожна з яких має унікальний бічний радикал. Амінокислоти з'єднуються між собою пептидними зв'язками, утворюючи поліпептидний ланцюг. Існує чотири рівні структурної організації білкових молекул: первинний, вторинний, третинний і четвертинний. Під дією зовнішніх чинників білки можуть денатурувати – втрачати свою природну структуру, а за сприятливих умов – ренатурувати, тобто відновлювати її. Повне руйнування пептидних зв'язків призводить до деструкції білкової молекули.

Поміркуйте

1. Чому саме первинна структура білка зумовлює властивості та функції білкової молекули?
2. Чому поняття «білки» та «поліпептидні ланцюги» вживають як синоніми?
3. Амінокислоти поділяють на незамінні, які не синтезуються в організмі, та замінні. Де організм бере замінні амінокислоти?

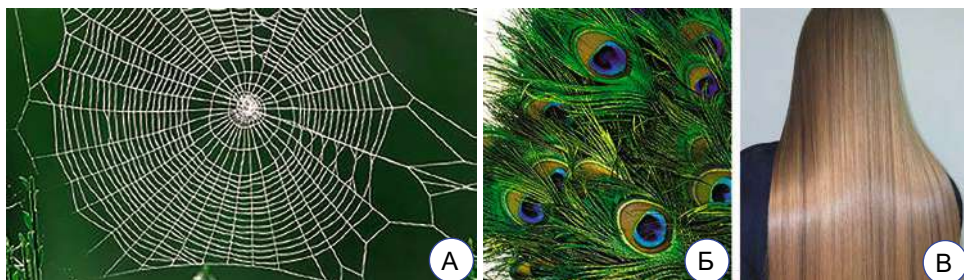
§ 8. Білки: функції в біологічних системах. Ферменти, їхня роль у клітині



Які особливості будови білків забезпечують їм здатність виконувати багато різних функцій – впливати на швидкість багатьох різних хімічних реакцій?

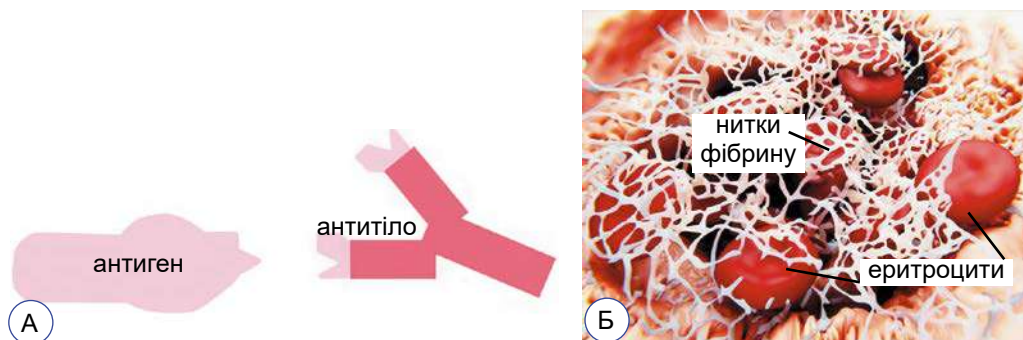
Функції білків у біологічних системах. Різноманітність білкових молекул зумовлює їхню функціональну різноманітність в організмах.

- **Будівельна (структурна) функція.** Білки є важливими компонентами клітинних і позаклітинних структур. Вони входять до складу клітинних мембран і цитоскелета, який фіксує органели або забезпечує їх переміщення. Колаген – пружний і міцний білок – основа хрящів, сухожиль, кісток, а також кігтів, нігтів, рогів, копит, волосся. Еластин, що міститься у зв'язках, має здатність розтягуватись, забезпечуючи їхню гнучкість. Білок фіброїн формує шовкові нитки та павутиння (мал. 8.1).



Мал. 8.1. Структури, до складу яких входять білки: А. Фіброїн входить до складу павутини. Б, В. Кератин будує пір'я та волосся

- **Захисна функція.** Імуноглобуліни (антитіла) – це спеціалізовані глобулярні білки, які розпізнають і знешкоджують чужорідні для організму речовини (антигени). Кожне антитіло здатне зв'язуватись лише з певним антигеном, що забезпечує специфічний гуморальний імунітет (мал. 8.2, А). Інтерферони – білки, які забезпечують неспецифічний гуморальний імунітет, захищаючи організм від збудників різних



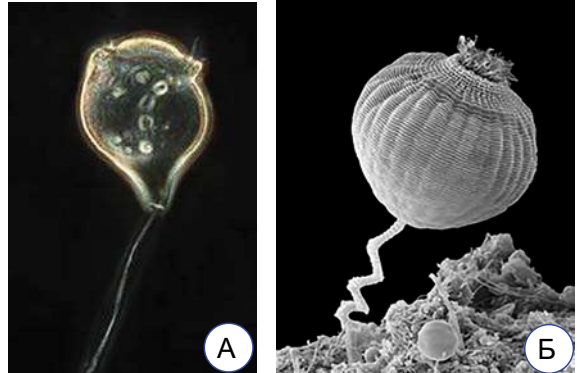
Мал. 8.2. Захисна функція білків. А. Реакція антиген – антитіло.
Б. Фібрин у згустку крові

інфекцій. Деякі білки, наприклад тромбін, тромбопластин і фібриноген, беруть участь у процесах зсідання крові та утворення тромбів, запобігаючи крововтратам (мал. 8.2, Б).

- **Сигнальна функція.** Мембранні складні білки – глікопротеїди розпізнають специфічні речовини та передають сигнали до клітини, забезпечуючи її подразливість – здатність реагувати на зміни навколишнього середовища (мал. 8.3).

Мал. 8.3. Подразливість клітин інфузорії-сувійки.

А. Клітина сувійки у спокійному стані. Б. У разі подразнення клітина сувійки втягує всередину передній полюс з війками, а її стебельце спірально скручується завдяки скоротливим білкам



- **Скорочувальна (рухова) функція.** Білки, такі як актин і міозин, забезпечують скорочення м'язових клітин. Тубулін у складі джгутиків і війок еукаріотів також бере участь у русі їхніх клітин.

- **Резервна функція.** Деякі білки відкладаються про запас і забезпечують живлення зародка (овальбумін в яйцеклітинах тварин, глютен в ендоспермі пшениці, казеїн у молоці).

- **Транспортна функція.** Міоглобін і гемоглобін транспортують кисень і вуглекислий газ. Мембранні білки забезпечують перенесення речовин через клітинну мембрану.

- **Адаптація до температури.** У плазмі крові деяких риб є білки-антифризи, які запобігають її замерзанню за низьких температур.

- **Регуляторна функція.** Білкову природу мають певні гормони та нейрогормони, які регулюють активність обміну речовин, процеси росту і розвитку організмів (до прикладу, соматотропін – гормон росту).

- **Функція прискорення біохімічних реакцій** притаманна особливим білкам – *ферментам*, або *ензимам*. Вони впливають на швидкість перебігу біохімічних реакцій. Одні з ферментів забезпечують розщеплення певних сполук, інші – їхній синтез (мал. 8.4).

Ферменти бувають простими та складними. *Прості ферменти* – це білкові молекули (пепсин, трипсин тощо), які складаються лише з амінокислотних залишків.

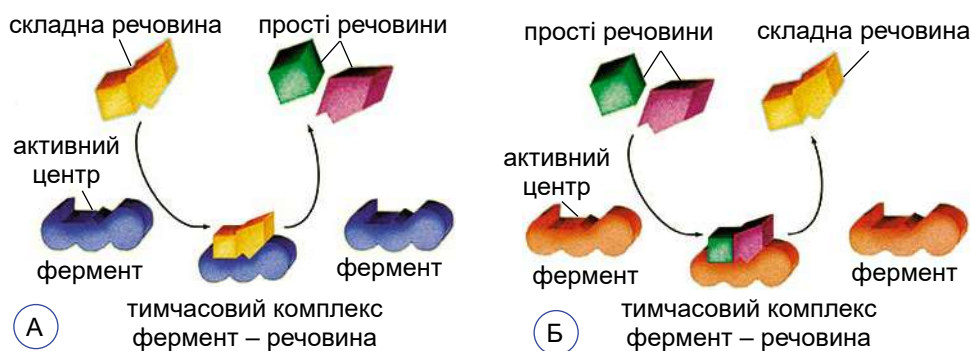
Складні ферменти (наприклад, уреаза, що розщеплює сечовину до амоніаку та вуглекислого газу), крім білкової частини, містять ще й небілкову (до прикладу, в уреазі небілковим компонентом є Нікель). Загальна назва небілкової частини ферментів – *кофактор*. Вона може бути як органічної, так і неорганічної природи. Якщо небілкова частина ферменту має органічну природу (як-от похідні вітамінів), її також називають *коферментом*. За відсутності кофактору складні ферменти не можуть виконувати каталітичні функції.

Цікаво знати. Фермент лізоцим, який міститься в слині, слюзах і слизових оболонках, захищає організм від бактерій.

Кожен фермент має активний центр – ділянку, яка просторово відповідає молекулі речовини (субстрату), з якою він взаємодіє. Завдяки цьому ферменти діють вибірково (ця властивість має назву *специфічність*).

У результаті ферментативних реакцій, на відміну від безферментних, не утворюються побічні продукти, тобто спостерігають майже 100-відсотковий вихід кінцевого продукту. Поміркуйте: яке це має значення для нормального функціонування організму?

Без участі ферментів не може відбуватись жодна біохімічна реакція.



Мал. 8.4. Механізм дії ферментів. А. Розщеплення складної речовини на простіші. Б. Утворення складної речовини з простіших

Узагальнення

У живих системах білки виконують функції: будівельну, захисну, сигнальну, скорочувальну, резервну, транспортну, адаптацій до існування в умовах несприятливих температур, регуляторну, каталітичну. Ферменти (екзими) – специфічні білки, що прискорюють хімічні реакції. Ферменти бувають простими та складними (містять ще й небілкові компоненти). Кожен фермент має активний центр (ділянку, що відповідає молекулі речовини / речовин, з якою / якими взаємодіє). Тому ферменти є специфічними, каталізують зазвичай одну реакцію.

Поміркуйте

1. Чому в клітинах організму людини запасальну (резервну) функцію виконують переважно ліпіди та вуглеводи?
2. Під час зсідання крові фібриноген перетворюється на нерозчинний фібрин. Як це впливає на його функції?
3. Пральні порошки, до складу яких входять ферменти (ензими), рекомендують використовувати за температури 40 °С. Поясніть чому.



Лабораторне дослідження «Вивчення властивостей ферментів».



§ 9. Нуклеїнові кислоти: ДНК

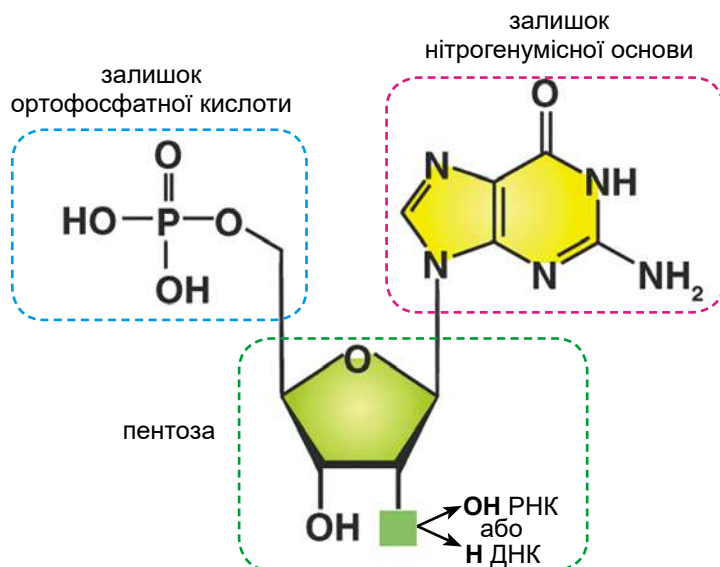


Завдяки чому одна і та ж сама молекула ДНК може мати різну просторову структуру (конформацію)?

Усі живі істоти здатні зберігати спадкову інформацію і передавати її нащадкам. Цю функцію виконують *нуклеїнові кислоти*.

Нуклеїнові кислоти – високомолекулярні біополімери, мономерами яких є *нуклеотиди*. У складі однієї молекули може бути від 200 до 200 млн нуклеотидів. Уперше нуклеїнові кислоти виявили в ядрі клітин, звідки й походить назва цих сполук (від лат. *нуклеус* – ядро). Але згодом їх було знайдено й в інших частинах клітин.

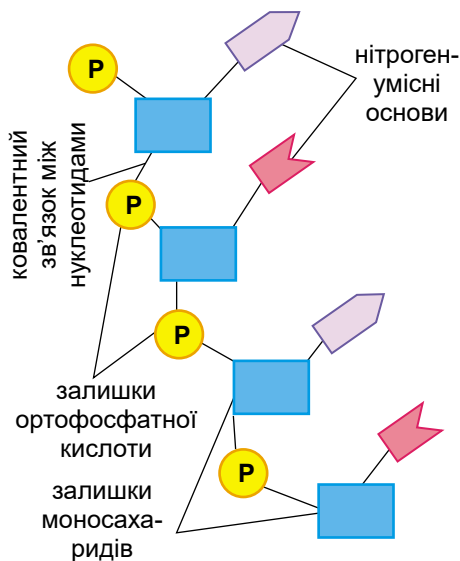
Кожен нуклеотид складається з трьох компонентів: залишків нітрогенумісної основи, моносахариду з п'ятьма атомами Карбону (пентози – рибози або дезоксирибози) та ортофосфатної кислоти (мал. 9.1). Залежно від типу моносахариду (пентози) розрізняють два види нуклеїнових кислот: **дезоксирибонуклеїнову** (скорочено **ДНК**) і **рибонуклеїнові** (**РНК**). До складу ДНК входить залишок дезоксирибози, а РНК – рибози.



Мал. 9.1. Схема будови нуклеотиду; у молекулі дезоксирибози, на відміну від рибози, замість гідроксильної групи (ОН) – атом Гідрогену (Н)

У молекулах ДНК і РНК містяться залишки різних нітрогенумісних основ. У молекулі ДНК – залишки нуклеотидів з **аденіном** (скорочено позначають літерою **А**), **гуаніном** (**Г**), **цитозином** (**Ц**) та **тиміном** (**Т**); у молекулі РНК – з **аденіном** (**А**), **гуаніном** (**Г**), **цитозином** (**Ц**) та **урацилом** (**У**).

У складі нуклеїнових кислот нуклеотиди з'єднані між собою в ланцюг за допомогою ковалентних зв'язків, які виникають між залишком пентози одного нуклеотиду та залишком ортофосфатної кислоти іншого (мал. 9.2). Такі зв'язки називають *фосфодіестерними*.



Мал. 9.2. Схема будови ланцюга нуклеїнової кислоти

молекулі ДНК. Ці закономірності назвали **правилами Чаргаффа**:

- у будь-якій молекулі ДНК кількість нуклеотидів з аденіном дорівнює кількості нуклеотидів з тиміном ($A = T$), а нуклеотидів з гуаніном – кількості нуклеотидів із цитозином ($G = C$);
- сума нуклеотидів з аденіном і гуаніном дорівнює сумі нуклеотидів з тиміном і цитозином ($A + G = T + C$).

1953 року Джеймс Ватсон (1928–2025) і Френсіс Крік (1916–2004), спираючись на дані рентгеноструктурного аналізу Розалінд Франклін (1920–1958) і Моріса Вілкінса (1916–2004), запропонували модель просторової структури ДНК (мал. 9.3).

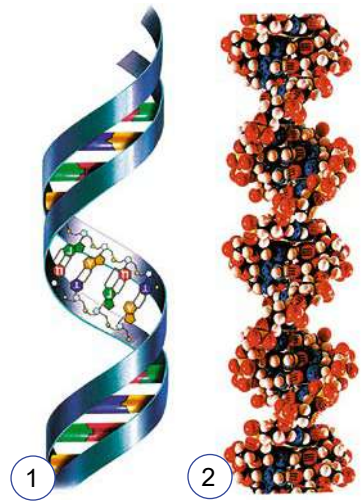
✓ **Дізнайтеся більше** про вчених, які відкрили структуру ДНК, за QR-кодом.



Науковці встановили, що молекула ДНК складається з двох ланцюгів нуклеотидів, з'єднаних між собою водневими зв'язками. Ці зв'язки утворюються між двома нітрогенумісними основами нуклеотидів, які ніби доповнюють один одного за розмірами і зарядженими атомами, що здатні утворювати водневі зв'язки. При цьому розміри нуклеотидів з аденіном (А) і гуаніном (Г) дещо більші, ніж нуклеотидів з тиміном (Т) і цитозином (Ц). Тому залишок аденіну (А) нуклеотиду одного ланцюга молекули ДНК завжди сполучається із залишком тиміну (Т) нуклеотиду іншого ланцюга (між ними виникає два водневих зв'язки), а гуаніну (Г) – із цитозином (Ц) (між ними виникають три водневих зв'язки).

Така чітка відповідність нуклеотидів у складі молекули нуклеїнової кислоти, що супроводжується утворенням водневих зв'язків між нуклеотидами, які взаємно доповнюють одне одного, має назву **комплементарність**.

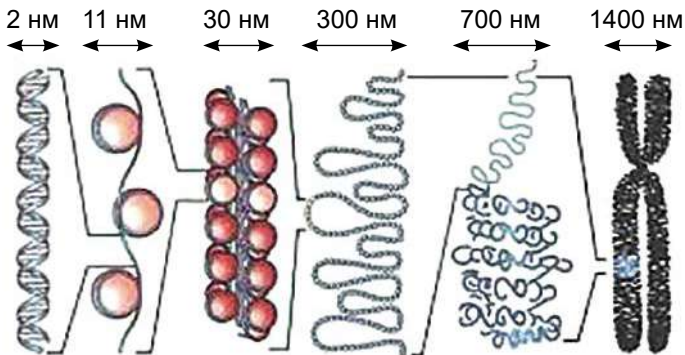
Мал. 9.3. Молекула ДНК: 1 – схема будови; 2 – просторова модель. Зверніть увагу, обидва ланцюги закручені навколо спільної осі, а також один навколо одного



Отже, **комплементарність** (від лат. *комплементум* – доповнення) – це просторова відповідність між молекулами або їхніми частинами, що уможливорює взаємодію між ними та утворення хімічних зв'язків.

Взаємодіючи між собою, обидва ланцюги нуклеотидів молекули ДНК формують її вторинну структуру – закручену праворуч спіраль діаметром приблизно 2 нм¹. Відстань між сусідніми комплементарними парами нітрогенумісних основ становить 0,34 нм, а крок спіралі дорівнює 3,4 нм і містить десять пар основ.

Молекули ДНК у клітині становлять компактні структури. Це досягається формуванням третинної структури. Наприклад, довжина ДНК найбільшої хромосоми людини – близько 10 см, але вона скручена таким чином, що вміщується у хромосомі завдовжки 5 мкм². Це відбувається завдяки тому, що дволанцюгова спіраль ДНК зазнає подальшого просторового ущільнення, формуючи суперспіраль (третинну структуру) (мал. 9.4). Така будова характерна для ДНК хромосом еукаріотів і зумовлена взаємодією між ДНК та ядерними білками, які також входять до складу структур ядра клітини – хроматину й хромосом.



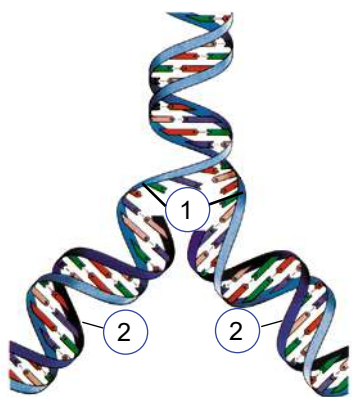
Мал. 9.4. Формування третинної структури ДНК (нм – нанометри)

Властивості ДНК. Як і молекули білків, молекули ДНК здатні до денатурації та ренатурації. За певних умов (дія кислот, лугів, високої температури тощо) водневі зв'язки між комплементарними нітрогенумісними основами різних ланцюгів молекули ДНК розриваються. При цьому молекула ДНК повністю або частково розпадається на окре-

¹ 1 нм (нанометр) дорівнює 1×10^{-6} мм.

² 1 мкм (мікрометр) дорівнює 1×10^{-3} мм.

мі ланцюги й, відповідно, втрачає свою біологічну активність (**процес денатурації**). Після припинення дії негативних чинників структура молекули може відновлюватись завдяки поновленню водневих зв'язків між комплементарними нуклеотидами (**процес ренатурації**). Молекула



Мал. 9.5. Процес реплікації – самоподвоєння молекули ДНК:
1 – материнська молекула ДНК; 2 – дочірні ланцюги ДНК

ДНК повністю або частково розпадається на окремі ланцюги і втрачає свою біологічну активність. Після припинення дії негативних чинників структура молекули може відновлюватись завдяки поновленню водневих зв'язків між комплементарними нуклеотидами.

Важлива властивість молекул ДНК – здатність до самоподвоєння, або **реплікації** (від лат. *реплікаціо* – повторення). Цей процес ґрунтується на принципі комплементарності: послідовність нуклеотидів у новоствореному ланцюзі визначається їхнім розташуванням у ланцюзі материнської молекули ДНК. При цьому ланцюг материнської молекули ДНК слугує матрицею для синтезу іншого ланцюга дочірньої молекули. Таким чином, дві утворені дочірні молекули ДНК містять по одному ланцюгу, успадкованому від материнської молекули,

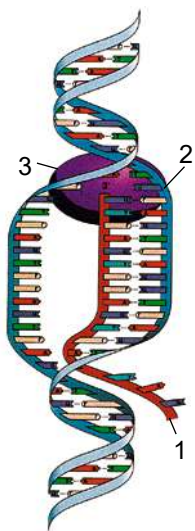
і по одному – синтезованому заново (мал. 9.5). Завдяки цьому кожна з дочірніх молекул ДНК є копією материнської.

Явище реплікації забезпечує точне передавання спадкової інформації від материнської молекули ДНК дочірнім. Завдяки йому можливе стабільне існування різних видів організмів (*поміркуйте чому*).

Функції ДНК. Основні функції ДНК – це кодування, збереження спадкової інформації та її передавання дочірнім клітинам під час розмноження). Молекули ДНК також беруть участь у реалізації спадкової інформації: окремі ланцюги молекули ДНК слугують матрицею для синтезу різних типів молекул РНК (мал. 9.6). Цей процес має назву **транскрипція** (від лат. *транскріптіо* – переписування).

Одиницею спадковості всіх організмів є **ген** – ділянка молекули ДНК (у деяких вірусів – РНК), що містить інформацію про структуру певного білка або РНК. Функціонально ген – цілісна одиниця спадковості, бо будь-які зміни в гені можуть призвести до порушень у передаванні спадкової інформації.

Генетичний код – це система запису спадкової інформації у вигляді послідовності нуклеотидів нуклеїнової кислоти, яка визначає послідовність амінокислот у білках.



Мал. 9.6. Транскрипція – синтез молекули РНК (1) на одному з ланцюгів молекули ДНК (2). Ці процеси забезпечує специфічний фермент (3)

Узагальнення

Нуклеїнові кислоти – це біополімери, мономерами яких є нуклеотиди. Є два види нуклеїнових кислот: дезоксирибонуклеїнова (ДНК) та рибонуклеїнова (РНК). До складу нуклеотиду входять залишки нітрогенумісної основи (Аденіну, Гуаніну, Цитозину, Тиміну чи Урацилу), пентози (рибози або дезоксирибози) та ортофосфатної кислоти. Молекула ДНК складається з двох ланцюгів нуклеотидів, які з'єднані комплементарно й закручені праворуч у подвійну спіраль. Властивостями ДНК є здатність до денатурації, ренатурації та реплікації. Основними функціями ДНК є кодування, збереження спадкової інформації, передавання її дочірнім клітинам під час розмноження материнської.

Поміркуйте

1. Які зв'язки будуть насамперед руйнуватись унаслідок дії на молекулу ДНК різних чинників?
2. Яка роль комплементарності в процесах реплікації молекули ДНК?
3. Чи є нуклеїнові кислоти за хімічною природою кислотами?

§ 10. Нуклеїнові кислоти: РНК. АТФ



Чи властива комплементарність одноланцюговим молекулам РНК?

Молекули РНК клітин прокариотів та еукаріотів, на відміну від дволанцюгових молекул ДНК, складаються з одного ланцюга. До складу РНК входять чотири види нуклеотидів (аденилові, гуанілові, цитидилові, уридилові), які місять відповідно такі нітрогенумісні основи: Аденін (А), Гуанін (Г), Цитозин (Ц) та Урацил (У). Молекули РНК різняться за розмірами та виконуваними функціями. Як і ДНК, молекули РНК, окрім первинної, можуть формувати вторинну і третинну просторові структури. Для стабілізації таких структур потрібні йони металів, наприклад Mg^{2+} .

Типи молекул РНК. Матрична РНК (мРНК) – це копія певної ділянки ДНК, на якій вона синтезована під час транскрипції. Матрична РНК переносить спадкову інформацію про послідовність амінокислот у молекулі білка від ДНК до місця його синтезу – рибосоми. Вона також бере безпосередню участь у збиранні білкової молекули. Довжина мРНК може становити від кількох сотень до кількох тисяч нуклеотидів.

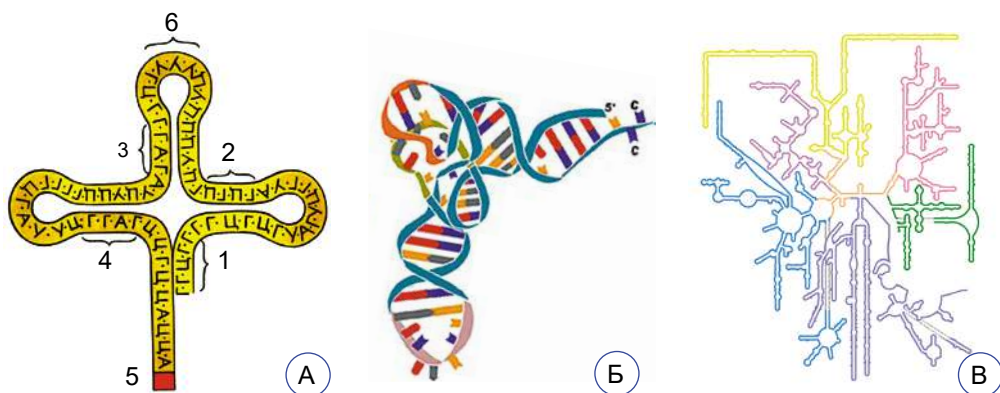
Транспортна РНК (тРНК) – найменша за розміром РНК (73–93 нуклеотиди). Існує багато різних тРНК, кожна приєднує якусь одну амінокислоту і транспортує її до рибосоми, де відбувається синтез білка.

Вторинна структура тРНК за формою нагадує листок конюшини (мал. 10.1). Така структура зумовлена тим, що в певних ділянках молекули тРНК (4–7 послідовних ланок) між комплементарними нуклеотидами виникають водневі зв'язки. Біля верхівки цього «листка конюшини» містяться три нуклеотиди, або триплет, який відповідає певній амінокислоті. Цей триплет має назву **антикодон**.

Біля основи молекули тРНК є ділянка, до якої завдяки ковалентному зв'язку приєднується відповідна амінокислота (мал. 10.1). Під час

синтезу білкової молекули антикодон тРНК має взаємодіяти з комплементарним триплетом мРНК – **кодоном**. Так визначається порядок розташування амінокислотних залишків у молекулі білка, що синтезується.

Третинна структура тРНК схожа на літеру Г (мал. 10.1, Б).



Мал. 10.1. А. Вторинна структура тРНК (двовимірний вигляд): 1–4 – ділянки з'єднання комплементарних нуклеотидів за допомогою водневих зв'язків; 5 – місце приєднання амінокислоти; 6 – антикодон. Б. Об'ємний (тривимірний) вигляд молекули тРНК. В. Вторинна структура рРНК великої субодиниці рибосоми людини (інший масштаб)

Рибосомна РНК (рРНК) входить до складу рибосом – органел, де відбувається синтез білка, і слугує каркасом цієї органели (мал. 10.1, В). Разом з білками, які також входять до складу рибосом, забезпечує просторове розташування молекул мРНК і тРНК під час біосинтезу білків.

На відміну від мРНК, молекули тРНК та рРНК не несуть інформації про структуру білкових молекул, хоча і беруть участь у процесах їхнього синтезу.

✓ **Дізнайтеся більше** про рибозими за QR-кодом.



Регуляція активності генів. Молекули РНК невеликих розмірів – так звані **мікроРНК** (складаються з 21–22 нуклеотидів) – здатні зв'язуватись із комплементарними ділянками мРНК і впливати на активність генів. За це відкриття американські молекулярні генетики – Ендрю Фаєр (народ. 1959 р.) та Крейг Мелло (народ. 1960 р.) – 2006 року здобули Нобелівську премію з фізіології та медицини.

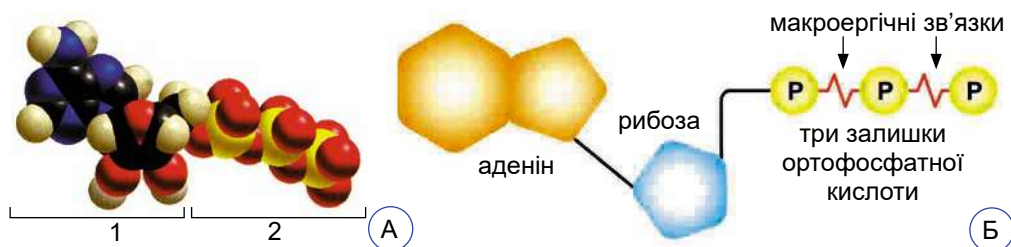
✓ **Дізнайтеся більше** про гіпотезу «світу РНК» за QR-кодом.



На основі РНК створюють вакцини, наприклад проти збудників коронавірусної інфекції (COVID-19). Такі вакцини простіші у виробництві порівняно з традиційними. Вивчаються й інші можливості застосування РНК у медицині.

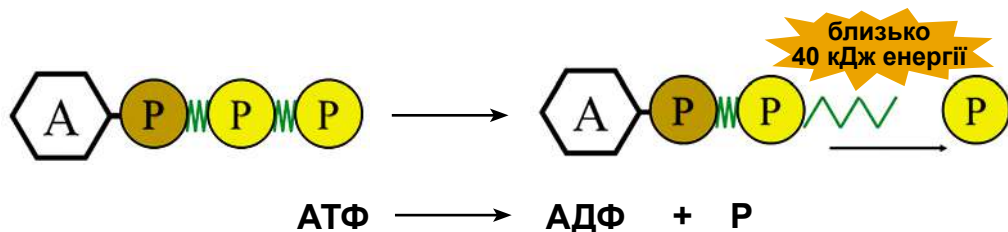
АТФ та її функції. Усі знають, що для роботи смартфона потрібна енергія, джерелом якої є акумулятор. Коли акумулятор розряджається, смартфон підключають до зовнішнього джерела енергії, доки він не зарядиться. У клітині функцію джерела енергії виконує **аденозинтрифосфатна кислота (АТФ)** – нуклеотид, що складається із залишків аденіну, рибози та трьох залишків ортофосфатної кислоти (мал. 10.2).

Зверніть увагу: на відміну від нуклеотидів, які входять до складу нуклеїнових кислот, молекула АТФ містить не один залишок ортофосфатної кислоти, а три (звідки й походить назва цієї сполуки).



Мал. 10.2. А. Просторова модель будови молекули АТФ: 1 – аденозин (аденін + рибоза); 2 – три залишки ортофосфатної кислоти.
Б. Структурна формула АТФ

АТФ має незвичні для інших органічних сполук хімічні властивості. Між залишками ортофосфатної кислоти утворюються два **макроергічних** (від грец. *макрос* – великий та *ергос* – праця) **зв'язки** – високоенергетичні хімічні зв'язки, в яких запасується значна кількість енергії. Під час відщеплення одного залишку ортофосфатної кислоти (за участі відповідного ферменту) АТФ перетворюється на **аденозиндифосфатну кислоту (АДФ)** з вивільненням енергії близько 40 кДж/моль¹ (мал. 10.3). Якщо ж відщеплюються два залишки молекул ортофосфатної кислоти, АТФ перетворюється на **аденозинмонофосфатну кислоту (АМФ)** і вивільняється вже 80 кДж/моль.



Мал. 10.3. Перетворення молекул АТФ під час енергетичного обміну
(А – аденозин, Р – залишки ортофосфатної кислоти)

¹ За даними різних досліджень, під час відщеплення одного залишку ортофосфатної кислоти виділяється від 30 до 60 кДж/моль (Джоуль на моль – похідна одиниця вимірювання молярної енергії в Міжнародній системі одиниць (SI), де енергію вимірюють у джоулях, а кількість речовини – у молях).

Зворотні реакції – приєднання ортофосфатних груп – дають змогу накопичувати енергію. Так, у разі приєднання до АМФ залишку ортофосфатної кислоти відповідно запасається близько 40 кДж енергії. При цьому утворюється молекула АДФ. Ще близько 40 кДж енергії запасається за умови приєднання ще одного залишку ортофосфатної кислоти до молекули АДФ. Молекула АДФ перетворюється на молекулу АТФ.

Енергію, вивільнену під час розщеплення молекул АТФ, організми використовують для синтезу білків, жирів, вуглеводів та інших сполук, підтримання температури тіла, забезпечення м'язового скорочення, активного транспорту речовин та інших життєвих процесів.

Цікаво знати. У клітині є й інші трифосфати: ГТФ (гуанозинтрифосфат), ТТФ (тимідинтрифосфат), ЦТФ (цитидинтрифосфат), УТФ (уридинтрифосфат). З них нарощуються ланцюги ДНК і РНК під час реплікації й транскрипції. Деякі із цих трифосфатів беруть участь в енергетичному обміні. Але універсальним порційним джерелом енергії є саме АТФ.

Крім енергетичної функції, молекули АТФ беруть участь у синтезі нуклеїнових кислот, здатні регулювати активність ферментів, можуть виконувати роль нейромедіаторів.



Молекули АТФ входять до складу лікарських препаратів, які застосовують для лікування серцево-судинних захворювань (як-от ішемічної хвороби серця, порушень серцевого ритму).

Узагальнення

До складу рибонуклеїнової кислоти, або РНК, входять чотири нуклеотиди – Аденін (А), Урацил (У), Гуанін (Г), Цитозин (Ц). Матрична РНК (мРНК) бере участь у реалізації спадкової інформації, що кодується ДНК. Транспортна РНК (тРНК) транспортує амінокислоти до місця синтезу білкової молекули. Рибосомна РНК (рРНК) входить до складу рибосоми та бере участь у процесі синтезу білкової молекули. Як енергетичні сполуки клітина використовує молекули АТФ. Під час розривання макроергічного зв'язку, що виникає між залишками ортофосфатної кислоти, вивільняється орієнтовно 40 кДж енергії. Так процеси, що відбуваються у клітині, забезпечуються енергією.



Поміркуйте

1. Наскільки реалістичною є гіпотеза «світу РНК»?
2. Як будова тРНК забезпечує можливість транспортувати амінокислоти?
3. У яких органелах клітини синтезується АТФ?



Практична робота «Розв'язання елементарних вправ зі структури нуклеїнових кислот».



§ 11. Біологічно активні речовини: вітаміни, гормони, нейрогормони, фітогормони та антибіотики



Чим відрізняється вплив на організм біологічно активних речовин, які він синтезує сам, від впливу тих, які надходять ззовні?

Які речовини належать до біологічно активних. Біологічно активні речовини – це сполуки різної хімічної природи, які в малих концентраціях здатні істотно впливати на функціонування організмів, зокрема на процеси метаболізму. Деякі з них синтезуються самим організмом (наприклад, ферменти, гормони, нейрогормони), інші надходять ззовні (наприклад, багато вітамінів). Основними шляхами надходження біологічно активних речовин в організм людини і тварин є їжа, а також лікарські препарати.

Вітаміни – низькомолекулярні органічні речовини різної хімічної природи, потрібні для нормального функціонування організму. Вони беруть участь в обміні речовин та енергетичних процесах, переважно як небілкові компоненти ферментів – *коферменти* (наприклад B_1 , B_2 , B_6 , B_{12} , С, А). Добова потреба людини у вітамінах становить міліграми або мікрограми.

Деякі вітаміни (наприклад, вітаміни А, Е) є **антиоксидантами** – сполуками, що сповільнюють або припиняють небажані процеси окиснення в організмі. У харчовій промисловості їх використовують для запобігання псуванню продуктів.

Нестача (гіповітаміноз) або відсутність (авітаміноз) певних вітамінів може призвести до порушень обміну речовин, оскільки небілкова частина складних ферментів – вітаміни – потрібна для їхньої активності.

Основним джерелом вітамінів для людини і тварин є продукти харчування переважно рослинного походження. Однак деякі вітаміни (наприклад, А і D) містяться лише у тваринних продуктах. Деякі вітаміни можуть синтезуватися в організмі людини і тварин із попередників (*провітамінів*). Наприклад, вітамін D синтезується у шкірі під впливом ультрафіолетового опромінення. Вітамін А утворюється зі сполук-попередників – каротиноїдів, що надходять з їжею. Вітаміни К, B_6 , B_{12} та деякі інші – синтезують мікроорганізми, що мешкають у кишці. Загалом для людини життєво необхідними вважають 13 вітамінів.

Історично, коли ще не були відомі структура і механізм дії вітамінів, їх позначали літерами латинського алфавіту – А, В, С, D тощо. Тепер використовують переважно хімічні назви (наприклад, вітамін С – аскорбінова кислота). Вітаміни поділяють на дві групи залежно від розчинності: *водорозчинні* (вітаміни групи В (B_1 , B_2 , B_3 , B_5 , B_6 , B_9 , B_{12}) та вітамін С) і *жиророзчинні* (вітаміни груп А, D, К та вітамін Е).

Цікаво знати. Важливий внесок у дослідження вітамінів зробили українські вчені. Зокрема, академік О. В. Палладін (мал. 11.1) був одним із перших в Україні, хто розпочав вивчення цих біологічно активних сполук.

Мал. 11.1. Академік Академії наук України Палладін Олександр Володимирович (1885–1972): видатний український біохімік, засновник української біохімічної школи



✓ **Дізнайтеся більше** про вітаміни за QR-кодом.



Гормони (від грец. *gormao* – рухаю, спонукаю) – органічні сполуки, що регулюють процеси обміну речовин, енергетичні перетворення, ріст, розвиток, репродуктивну функцію та інші фізіологічні процеси. Вони виробляються залозами внутрішньої та змішаної секреції (*ендокринними залозами*) людини і тварин, а також окремими клітинами.

У спеціалізованих нервових клітинах – *нейросекреторних* – синтезуються гормоноподібні речовини – **нейрогормони** (наприклад, вазопресин, окситоцин). Гормони та нейрогормони надходять у кров або інші рідини тіла (наприклад, лімфу або порожнинну рідину безхребетних тварин), що транспортують їх до різних тканин і органів. Ці речовини беруть участь у регуляції обміну речовин, діяльності ендокринних залоз, тонуусу непосмугованої мускулатури, активності ферментів, індивідуальному розвитку та підтриманні гомеостазу.

За хімічною природою гормони та нейрогормони поділяють на три основні групи:

- пептидної природи (гормон росту (соматотропін), антидіуретичний гормон (вазопресин), інсулін, глюкагон);
- похідні амінокислот (адреналін, норадреналін, тироксин);
- гормони ліпідної природи (статеві гормони, кортикостероїди (глюкокортикоїди та мінералокортикоїди) – гормони кори надниркових залоз).

✓ **Дізнайтеся більше** про взаємодію гормонів та нейрогормонів з клітинами-мішенями за QR-кодом.



Лікарські препарати на основі гормонів і нейрогормонів широко застосовують у медичній практиці для лікування або профілактики низки захворювань. Наприклад, щоб уникнути карликовості, дитині, в якій виробляється недостатньо гормону росту (соматотропіну), дають відповідні препарати із цим гормоном; хворим на діабет I типу – вводять гормон інсулін, який знижує рівень цукру в крові тощо.



Пригадайте, до яких порушень в організмі людини призводять збої у функціонуванні гіпофіза, щитоподібної, підшлункової, надниркових і статевих залоз.

Нейромедіатори – біологічно активні речовини (ацетилхолін, норадреналін, адреналін, серотонін тощо), які беруть участь у передачі нервового імпульсу між двома нейронами, між нейронами та м'язовими клітинами тощо.

Фітогормони. У рослин і грибів функції регуляції, подібні до функцій гормонів і нейрогормонів у тварин, виконують **фітогормони** – біологічно активні речовини з різною хімічною будовою. Вони діють у дуже малих кількостях, регулюючи майже всі процеси життєдіяльності рослин: поділ і ріст клітин, диференціювання тканин, формування органів, розвиток бруньок, проростання насіння тощо. За їхньою допомогою здійснюється взаємодія між клітинами, тканинами та органами.

На відміну від тварин, у рослин немає спеціалізованих залоз для утворення фітогормонів – їх синтезують окремі спеціалізовані клітини.

Фітогормонам властива **дистанційна дія** – вони можуть впливати на процеси, що відбуваються на значній відстані від місця їхнього утворення. Проте, на відміну від тваринних гормонів, спектр їхньої дії ширший: один фітогормон може регулювати кілька процесів, а на один процес можуть одночасно впливати кілька фітогормонів.

Виділяють п'ять основних груп фітогормонів – ауксини, гібереліни, цитокініни, абсцизини, етилен.

Ауксини синтезуються у верхівках пагонів і стимулюють ріст рослин шляхом розтягування клітин. Вони також сприяють надходженню поживних речовин до зон активного росту. У рослинництві ауксини використовують для стимуляції формування кореневої системи, а у високих концентраціях – для боротьби з бур'янами як *гербіциди*.

Гібереліни впливають на ріст і розвиток рослин, стимулюють цвітіння, проростання насіння, формування бульб і цибулин.

Цитокініни прискорюють поділ клітин, розвиток бічних бруньок, формування коренів і пагонів, стимулюють проростання насіння, обмін речовин, а також затримують процеси старіння.

Абсцизини (зокрема абсцизова кислота) спричиняють перехід рослин у стан спокою, збільшують тривалість цього періоду, стимулюють опадання листя, гальмують проростання насіння.

Етилен гальмує ріст, сприяє опаданню листя, дозріванню плодів, старінню клітин.

✓ **Дізнайтеся більше** про фітонциди та алкалоїди за QR-кодом.



Антибіотики – біологічно активні речовини, що їх синтезують мікроорганізми (бактерії, мікроскопічні гриби). У малих кількостях вони пригнічують або знищують інші мікроорганізми.

Нині відомо понад 4000 антибіотиків, одні з них убивають мікроорганізми, інші – лише пригнічують їхній ріст. За механізмом дії розрізняють антибіотики, які порушують формування клітинної стінки бактерій (пеніциліни), такі, що руйнують їхню плазматичну мембрану або пригнічують синтез білків (тетрацикліни) чи нуклеїнових кислот. Їхня дія спрямована на такі біохімічні процеси, які є важливими для бактерій, але не відбуваються в організмі людини.



Антибіотики широко застосовують у медицині та ветеринарії як препарати для лікування захворювань, спричинених хвороботворними бактеріями (пеніцилін, цефалоспорин тощо) або грибами (як-от ністатин). Але приймати антибіотики можна лише за призначенням лікаря. Безконтрольне вживання шкодить не лише хвороботворним, а й корисним мікроорганізмам, зокрема мікрофлорі кишки. Існують хибні уявлення, що антибіотики можна застосовувати за вірусних інфекцій. Але це не так: на віруси антибіотики не діють (*поміркуйте чому*).

У харчовій промисловості антибіотики використовують для продовження терміну зберігання продуктів, тваринництві – для стимулювання росту молодих тварин.

Цікаво знати. Важливий внесок у вивчення антибіотиків українських науковців. Наприклад, під керівництвом членів-кореспондентів Академії наук України В. Й. Білай та М. М. Підоплічка створено антибіотик мікроцид. Він виявився ефективним препаратом для лікування інфікованих ран і гнійних процесів. А під керівництвом академіка Академії наук України В. Г. Дроботька – препарат іманін (для лікування важких опіків).

Узагальнення

Біологічно активні речовини (БАР) – це сполуки різної хімічної природи, які в малих кількостях впливають всі процеси життєдіяльності організмів. Вітаміни – це БАР, що надходять до організму з їжею або синтезуються в ньому. Гормони – органічні речовини, які регулюють процеси обміну речовин, активуючи клітинні процеси, або генну активність. Фітогормони синтезуються в організмі рослин і поділяються на дві групи: одні прискорюють, інші уповільнюють процеси росту та розвитку. Антибіотики – біологічно активні сполуки, якими гриби та мікроорганізми захищаються від бактерій. Антибіотики – біологічно активні сполуки, які синтезують бактерії та мікроскопічні гриби. Їх широко використовують у медичній практиці.

Поміркуйте

1. Які правила збереження вітамінів у їжі мають стати корисною звичкою людини?
2. Чи по-різному впливають на клітини гормони, які мають різну хімічну природу?
3. Чому антибіотики пригнічують життєдіяльність або розмноження бактерій і не впливають на віруси?
4. У чому подібність і відмінність дії в організмах гормонів та фітогормонів?

§ 12. Біологічні системи, що перебувають на молекулярному рівні організації живого: віруси



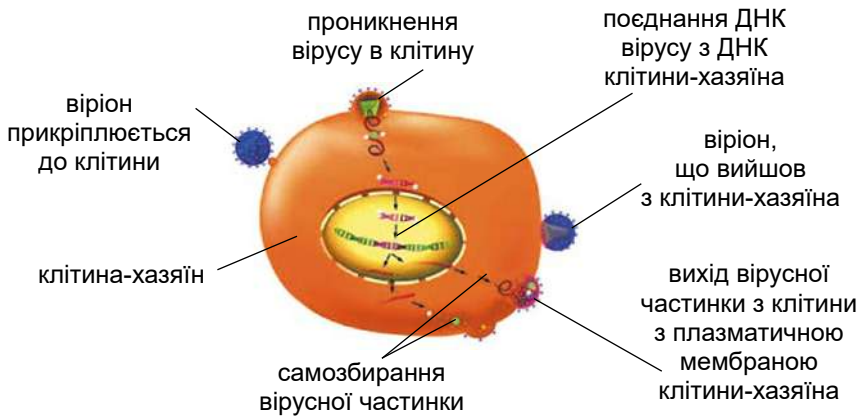
Чи можна вважати віруси, віроїди і пріони біологічними об'єктами на межі живого й неживого?

Біологічні системи на молекулярному рівні організації – це найпростіші форми життя – **віруси** і **віроїди**. Вони не проявляють усіх ознак живого. Зокрема, не здатні до самостійного обміну речовин і забезпечення себе енергією, не мають клітинної будови, органел. Водночас вони розмножуються, проявляють мінливість, можуть адаптуватися до умов середовища. Для розмноження віруси потребують живих клітин, у яких синтезуються вірусні молекули й відбувається самозбирання нових вірусних частинок – **віріонів**. Усе це дає змогу вважати їх **неклітинними формами життя**.

Віруси. Першими серед неклітинних форм життя були відкриті **віруси**, з якими ви познайомилися минулого навчального року. Науку, що вивчає віруси, називають **вірусологією**. Її заснування пов'язують з відкриттям 1892 року інфекційного агента, дрібнішого за бактерії, – вірусу тютюнової мозаїки, збудника мозаїчної хвороби тютюну.

Життєвий цикл вірусів складається з двох фаз:

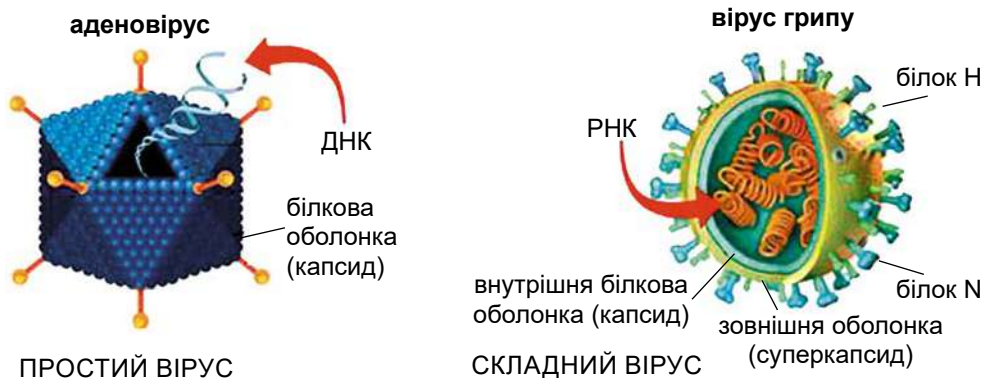
- **позаклітинної**, коли вірусна частинка (*віріон*) не проявляє жодних ознак живого;
- **внутрішньоклітинної**, коли вірус розмножується в клітині-хазяїні (мал. 12.1).



Мал. 12.1. Життєвий цикл вірусу імунодефіциту людини (ВІЛ)

Усі віруси – внутрішньоклітинні паразити, здатні паразитувати у будь-яких організмів: бактерій, архей, одноклітинних еукаріотів, грибів, рослин, тварин і людини. Вони надзвичайно поширені у природі. Станом на сьогодні описано понад 16 000 видів, але їх може бути до 1 млн. Через малі розміри (десятки–сотні нанометрів) віруси здебільшого вивчають за допомогою електронних мікроскопів.

Віріони складаються з оболонки, що оточує спадковий матеріал – ДНК або РНК (мал. 12.2). У **простих вірусів** оболонка складається лише з молекул білків (наприклад, у вірусу поліомієліту або бактеріофага). У **складних вірусів** до оболонки входять також молекули ліпідів, вуглеводів та специфічних білків. Такі віруси (наприклад, ВІЛ, вірус грипу, коронавіруси), виходячи з клітини, можуть обгортатися її плазматичною мембраною, що функціонує як зовнішній шар оболонки вірусної частинки.

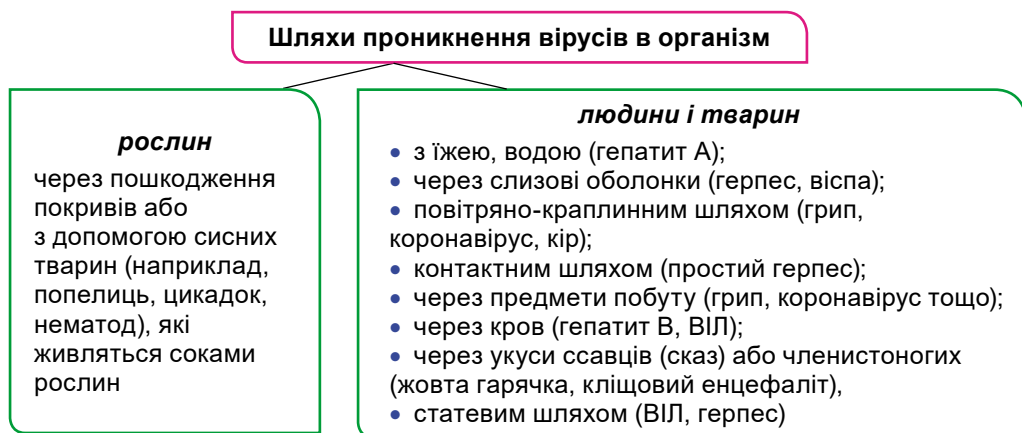


Мал. 12.2. Будова вірусної частинки

Важлива особливість вірусів – наявність лише одного типу нуклеїнової кислоти: або ДНК (ДНК-умісні віруси: герпесу, бактеріофаги), або РНК (РНК-вмісні віруси: грипу, кору, коронавіруси, ВІЛ). На відміну від клітин, у вірусів молекули нуклеїнових кислот можуть бути як одно-, так і дволанцюговими.

Унікальним є й спосіб розмноження вірусів. Вони не діляться, не брунькуються і не фрагментуються. Вони **самозбираються** (мал. 12.1). У клітині-хазяїні з вірусної нуклеїнової кислоти зчитується інформація для синтезу: ферментів, що відтворюють вірусну РНК або ДНК, та білків, з яких утворюються нові оболонки віріону. Ці молекули синтезуються з будівельних матеріалів клітини (амінокислот, нуклеотидів) та з використанням її енергії. Тому хімічний склад вірусів майже тотожний хімічному складові клітин, у яких вони паразитують. Після завершення процесу самозбирання нові віріони виходять з клітини.

Віруси можуть потрапляти в організм хазяїна різними шляхами (мал. 12.3).

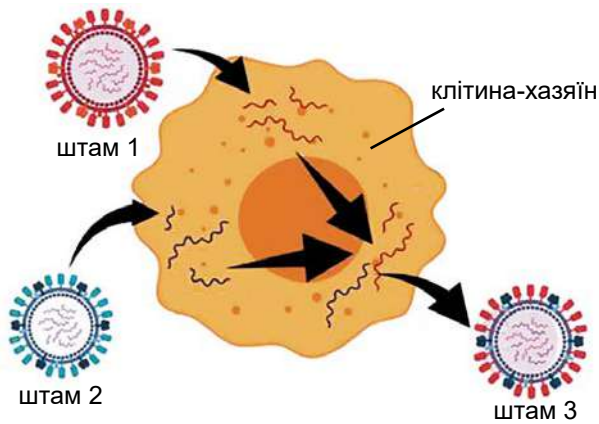


Мал. 12.3. Шляхи проникнення вірусів в організми

Віруси, що належать до одного виду, можуть відрізнятися за набором спадкової інформації й, відповідно, за своїми властивостями. Такі варіанти вірусів одного виду називають **штамами**. Різні штами певного виду вірусів можуть спричиняти в людини і тварин захворювання різної тяжкості. Відомі різні штами коронавірусу (COVID-19) (наприклад, дуже небезпечний штам «Дельта»), вірусу грипу.

Цікаво знати. Одним з найнебезпечніших є вірус грипу А, штами якого називають за типами білків капсиду Н і N (мал. 12.2): H1N1 – спричиняв пандемії 1918 і 2009 років, H3N2 – штам, який домінує останніми роками.

Нові штами певного виду вірусів виникають або внаслідок змін спадкового матеріалу (мутацій), або завдяки здатності обмінюватись спадковою інформацією (якщо кілька різних штамів вірусу заражають одну клітину). Процеси обміну спадковою інформацією між близькими штамами відомі, наприклад, для вірусу грипу (мал. 12.4). Подібні зміни можуть знижувати ефективність попередніх щеплень, оскільки вірус набуває здатності уникати імунного захисту організму.

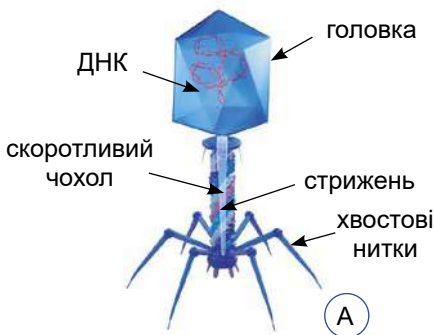


Мал. 12.4. Обмін фрагментами молекул РНК у вірусу грипу (реасортація)

Потрапивши в організм, вірус має дістатись тих клітин, у яких він здатен паразитувати: у рослин – провідними тканинами з розчинами різних сполук, у людини і тварин – з кров'ю, лімфою тощо.

Віруси мають високу **специфічність**. Вони вражають лише певні типи клітин. Це зумовлено взаємодією вірусної частинки з рецепторними молекулами оболонки клітини. Якщо вірус не розпізнає рецептор – проникнення неможливе. На малюнку 12.5, Б показано процес проникнення бактеріофага Т4 в клітину бактерії.

Віруси людини і тварин перед проникненням у клітину також взаємодіють з рецепторними молекулами на поверхні її оболонки (мал. 12.1). У результаті такої складної взаємодії певні віруси (наприклад, ВІЛ) адсорбуються на зовнішній стороні плазматичної мембрани. Далі поверхневий шар оболонки вірусу (*пригадаймо*: це плазматична мембрана клітини, якою вірус оточується під час виходу з клітини) зливається з плазматичною мембраною клітини, і РНК вірусу, оточена білками, опиняється в цитоплазмі клітини (мал. 12.1).



Мал. 12.5. Бактеріофаг Т4. А. Будова. Б. Бактеріофаг на клітині бактерії

Віруси здатні руйнувати структури клітини-хазяїна (оболонку, ядро тощо). Інфікована вірусом клітина може гинути й під час виходу з неї вірусних частинок. Прості віруси виходять із клітини-хазяїна, зазвичай руйнуючи клітинну оболонку вірусними ферментами. Складні віруси (як-от ВІЛ) виходять із клітини-хазяїна в інший спосіб: від-

бруньковуючись від плазматичної мембрани клітини-хазяїна (це можуть бути Т-лімфоцити) і спричиняючи її загибель. Білки вірусів можуть пригнічувати процеси життєдіяльності клітини.

Вірусні захворювання небезпечні також і через інтоксикацію організму отруйними речовинами, що утворюються внаслідок розмноження вірусу. Наприклад, під час захворювання на кір спостерігають гарячку, запалення дихальних шляхів, появу своєрідних плям на слизовій оболонці ротової порожнини, висипання на шкірі.

Віруси здатні пригнічувати імунну систему людини (ВІЛ, збудник кору). Унаслідок цього в інфікованих людей можуть спостерігати захворювання, які у здорових людей трапляються зрідка. До того ж інфікована ВІЛ людина може загинути від хвороби, не смертельної для здорової людини. Саме тому хворі на СНІД потребують належної медичної підтримки.

Цікаво знати. За відкриття вірусу імунodefіциту людини (ВІЛ) 1983 р. Франсуаза Барре-Сінуссі (народ. 1947) разом з іншим французьким вірусологом Люком Антуаном Монтаньє (1947–2022) були удостоєні Нобелівської премії з фізіології або медицини (2008).

Потрапляння вірусу до організму не завжди призводить до розвитку інфекційного захворювання. Це залежить від чутливості організму, стану його імунної системи, концентрації та патогенності вірусу (здатності спричиняти захворювання). Якщо вірус перебуває у клітині в неактивному стані, то клітини здатні нормально функціонувати й ознаки захворювання можуть бути не виражені. Проте за певних умов віруси можуть активізуватись й ознаки захворювання починають проявлятися.



Період захворювання, коли його ознаки непомітні, називають *прихованим*, або *латентним* (від лат. *латентіс* – прихований, непомітний).

Узагальнення

Віруси – неклітинні форми життя, які є внутрішньоклітинними паразитами прокаріотичних та еукаріотичних клітин. У життєвому циклі вірусів є дві фази: внутрішньоклітинна, коли вірус перебуває в клітині хазяїна, та позаклітинна, коли вірус існує у вигляді вірусної частинки – віріону. Віруси одного виду можуть бути представлені різними штамми, які відрізняються за набором спадкового матеріалу й, відповідно, за своїми властивостями. Бувають прості віруси, оболонка яких складається лише з білкових молекул (наприклад, бактеріофаги), та складні, до складу оболонок яких, крім білків, входять молекули ліпідів і вуглеводів (наприклад, вірус грипу). Оболонка складних вірусів формується за рахунок плазматичної мембрани клітини-хазяїна, що оточує вірусну частинку під час виходу з клітини. Вірусам притаманна специфічність: вони можуть паразитувати лише в клітинах певного типу, з рецепторними молекулами оболонки яких вони взаємодіють.

Поміркуйте

1. Чи здатні віруси тварин паразитувати в клітинах рослин?

2. У яких випадках віруси здатні руйнувати клітину-хазяїна?
3. Чи залежить чергування фаз життєвого циклу вірусів (позаклітинна та внутрішньоклітинна) від особливостей їхньої будови (віруси прості й складні)?

§ 13. Роль вірусів у природі та житті людини. Біологічні системи, які перебувають на молекулярному рівні організації живого: віроїди, пріони



Яка роль вірусів у еволюції органічного світу?

Роль вірусів у природі та еволюції органічного світу. Віруси як внутрішньоклітинні паразити здатні спричиняти важкі, часто смертельно небезпечні, захворювання культурних рослин, свійських тварин і людини. Тим самим вони завдають відчутних збитків економіці країн. Ураження сільськогосподарських культур вірусами може спричинити голод на значних територіях.

У природних екосистемах віруси слугують регуляторами чисельності різних видів організмів, запобігаючи їй неконтрольованому збільшенню. Віруси застосовують для боротьби зі шкідливими для господарства людини видами. Разом з тим людина має бути певною, що такі віруси не зашкодять її здоров'ю або свійським тваринам.

Цікаво знати. Потрапивши на територію Австралії, дикі кролі розмножились у такій кількості, що стали загрозою для сільськогосподарських рослин. І лише після застосування вірусу – збудника міксоматозу кролів – чисельність популяції цих тварин вдалося значно скоротити. На початку 50-х років XX ст. цей досвід спробували використати у Франції. Але процес вийшов з-під контролю людини: вірус спричинив масову загибель свійських кролів.

У генетичній інженерії (наука, яка вивчає можливості виділення, зміни та перенесення генів в інші організми для отримання бажаних для дослідників змін і застосовує ці методи на практиці) віруси використовують для введення певних генів у клітину. Завдяки цьому такі клітини можуть набути здатності синтезувати потрібні людині речовини (як-от гормони, вітаміни). Віруси використовують і для розроблення вакцин.

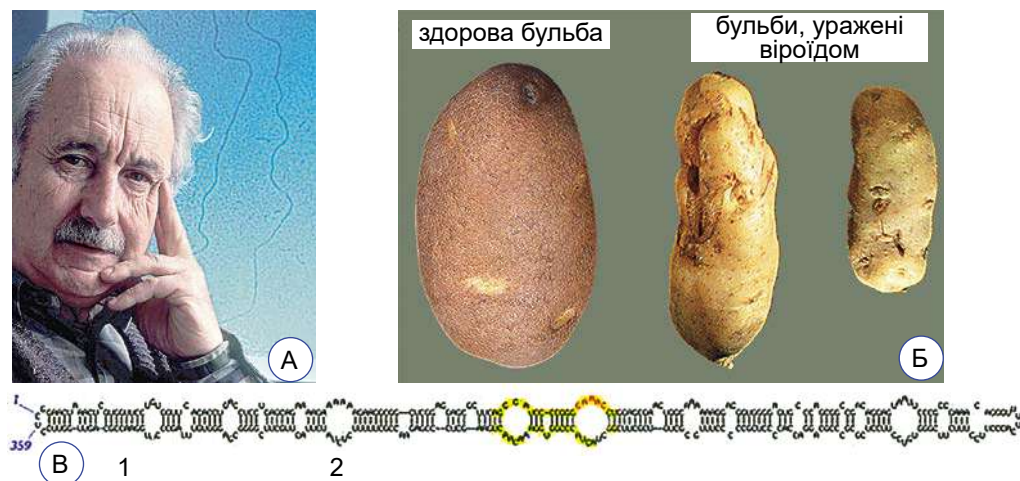
Важко переоцінити роль вірусів в еволюції живого на нашій планеті. Віруси здатні переносити гени між різними видами організмів. Цей процес називають **горизонтальним перенесенням генів**. Він збільшує генетичне різноманіття нашої планети, а що воно більше, то ефективніший процес еволюції. Завдяки цьому виникають нові види та інші систематичні категорії організмів.

✓ **Дізнайтеся більше**, як віруси беруть участь в утворенні нових видів, за QR-кодом.



Віроїди. На відміну від вірусів, до складу яких входять молекули різних типів сполук (насамперед білків і нуклеїнових кислот), **віроїди** – це лише низькомолекулярні одноланцюгові кільцеві молекули РНК (мал. 13.1, В).

Відкрив віроїди 1971 року американський учений Т. Дінер (мал. 13.1, А), коли вивчав інфекційне захворювання картоплі, знане як «веретеноподібність бульб» (мал. 13.1, Б). На превеликий подив дослідника, під час біохімічного аналізу очищеного збудника у препараті не виявили жодних білків. Захворювання картоплі спричиняла невеличка молекула РНК у формі замкненого ланцюга (мал. 13.1, В). Спадковий матеріал віроїду не кодує жодного білка, його головне завдання – забезпечити самовідтворення молекул РНК у клітині-хазяїні.



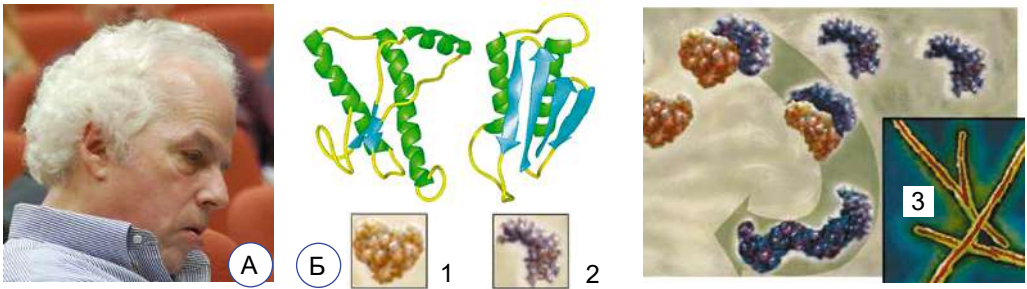
Мал. 13.1. А. Теодор Отто Дінер (1921–2023). Б. Бульби картоплі, уражені віроїдами, набувають веретеноподібної форми. В. Схема будови одноланцюгової кільцевої РНК віроїду: 1 – комплементарна ділянка (між комплементарними зближеними нуклеотидами виникають водневі зв'язки); 2 – некомплементарна ділянка («шпилька»)

Віроїди паразитують винятково у рослин. Тепер відомо багато різних захворювань рослин (цитрусових, кокосових пальм, авокадо, хризантем тощо), спричинених віроїдами. У людини, тварин і бактерій подібних збудників не виявлено.

Віроїди, як і деякі віруси рослин, передаються від рослини до рослини під час механічного ушкодження покривів. В інфікованій клітині віроїд прямує до ядра або до хлоропласта, де використовує клітинний фермент для відтворення власних молекул РНК. Симптоми захворювання виникають саме внаслідок активного відтворення молекул РНК віроїду, що спричиняє патологічний процес в інфікованій клітині. Бражаючи сільськогосподарські й декоративні рослини, віроїди завдають збитків господарствам.

Пріони (від англ. *proteinaceous infectious particles* – інфекційні білкові частинки) – особлива група неклітинних форм життя, що спричиняють важкі захворювання людини й тварин. На відміну від вірусів або віроїдів, пріони не мають власного спадкового матеріалу: до їхнього складу не входять молекули ані ДНК, ані РНК. Вони представлені лише білковими молекулами із незвичними біологічними властивостями. Відкрив пріони американський учений Стенлі Прюзінер

(мал. 13.2, А). За це відкриття він здобув 1997 року Нобелівську премію з фізіології або медицини.



Мал. 13.2. Пріони. А. Стенлі Прюзінер (народ. 1942 р.) – професор університету Каліфорнії (США). Б. Перетворення нормального клітинного білка (1) на пріонний (2) з утворенням амілоїдних фібрил (3)

Пріони дуже стійкі до дії різноманітних чинників: нагрівання, іонізуючого та ультрафіолетового опромінення, дії ферментів, які розщеплюють білки тощо. Тому звичайні методи дезінфекції, наприклад медичних інструментів, на пріонні білки ефективно не діють. Їх здатні руйнувати тільки сильні окисники.

Вважають, що пріони виникають унаслідок змін у структурі звичних для організму білків (мал. 13.2, Б). Проникаючи до інших клітин (нервової системи, лімфоїдної тканини тощо), пріонний білок приєднується до нормального білка клітини, каталізуючи його перетворення на пріонний (мал. 13.2, Б). Отже, у звичайного білка та пріонного, який виник внаслідок змін у просторовій структурі першого, подібний амінокислотний склад. Відмінність між ними полягає у третинній структурі. Ознакою ураженої пріонами клітини є те, що в ній через певний час формуються дуже дрібні стрижнеподібні структури – *амілоїдні фібрили* (їхній діаметр усього 10–20 нм, а довжина – 100–200 нм) (мал. 13.2, Б, 3). Кожна така структура містить близько тисячі молекул пріону.

У людини відомо чотири хвороби, спричинені пріонами: куру, хвороба Кройцфельда – Якоба, синдром Герстмана – Штрауслера – Шейнкера та смертельне родинне безсоння. У разі захворювань, спричинених пріонами, найвищу концентрацію цих молекул спостерігають у нервовій тканині (можлива значна їхня концентрація й у лімфатичній тканині). Загалом випадки пріонних захворювань людини трапляються не часто.

Пріонні хвороби можуть бути спадковими (наприклад, у разі спадкової форми хвороби Кройцфельда – Якоба), передаватися від хворої тварини до здорової людини або тварини або виникати спонтанно (як-от спорадична форма хвороби Кройцфельда – Якоба). Людина здебільшого може заразитися пріонами, що містяться в їжі, оскільки вони не руйнуються ферментами травної системи. Є випадки зараження пріонами під час введення гормональних препаратів, отриманих від інфікованих особин, через хірургічний інструмент (зокрема стоматологічний).

Цікаво знати. У клітині невелику кількість пріонних білків ефективно знищує комплекс Гольджі. Якщо ж функції цієї органели порушуються, концентрація пріонних білків у клітині зростає, і це може спричинити захворювання (наприклад, спорадичну форму хвороби Кройцфельда – Якоба).

Концентруючись у нервових клітинах головного мозку, пріони спричиняють губкоподібну енцефалопатію (від грец. *енкефалон* – головний мозок та *патос* – хвороба, страждання). При цьому уражена ділянка головного мозку набуває характерного губчастого вигляду внаслідок великої кількості пошкоджених нервових клітин. Пріонні захворювання спричиняють безсоння, втрату пам'яті, деменцію (стійке порушення когнітивних функцій). Їм притаманний тривалий прихований (латентний) період, коли ознаки хвороби не проявляються. Він може тривати від 5–8 місяців до 10–15 років.

Цікаво знати. 1957 року американський учений Деніел Карлтон Гайдусек (1923–2008) описав нове захворювання – куру – етнічної групи папуасів-канібалів Нової Гвінеї. Хвороба виникала в результаті вживання в їжу мозку загиблих одноплемінників під час ритуального канібалізму¹. Симптоми хвороби були такі: порушення ходи, згодом – порушення координації руху, втрата здатності ходити самостійно. Через 2–3 місяці від початку захворювання порушується мова, яка згодом стає нерозбірливою. Хворі не можуть самостійно їсти і зазвичай гинуть від виснаження. Характерною особливістю хвороби є підвищена збудженість, безпричинний сміх, тривала посмішка. Саме тому цю хворобу місцеві мешканці й назвали куру: у перекладі «смерть, що сміється». Після припинення канібалізму серед аборигенів випадки захворювання зникли.

Небезпечними пріонними захворюваннями тварин є скрепі овець, коров'ячий сказ тощо. Скрепі овець, що призводить до загибелі тварин, було відоме в Англії ще з 1732 року, але його причини ще довго залишалися нез'ясованими. У 1992–1993 і 2001 роках у Великій Британії спостерігали масове захворювання великої рогатої худоби на «коров'ячий сказ» (це захворювання ще називають губчастоподібною енцефалопатією великої рогатої худоби). Білки, подібні до пріонних, виявлені у дріжджів і деяких інших грибів.

Узагальнення

Віруси, що паразитують в організмах сільськогосподарських рослин і тварин, завдають збитків рослинництву й тваринництву. Віруси, що паразитують у людини, спричиняють важкі інфекційні захворювання, які можуть набувати характеру епідемій. Неклітинними формами життя є віроїди та пріони. Віроїди – низькомолекулярні одноланцюгові кільцеві молекули РНК, які паразитують у рослинних клітинах (картоплі, цитрусових, кокосових пальм, авокадо, хризантем). Пріони – це патогенні білки, які накопичуються у клітинах нервової системи тварин і людини, спричиняючи смертельно небезпечні хвороби (як-от, куру, хвороба Кройцфельда – Якоба тощо).

¹ Канібалізм – явище поїдання представників свого виду.

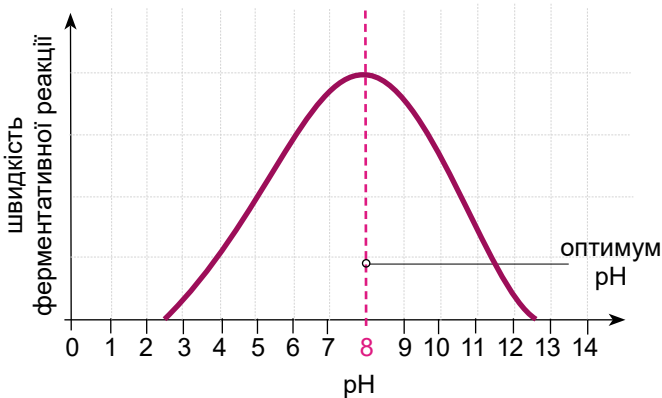
Поміркуйте

1. Чому віроїди та пріони разом з вірусами зараховують до неклітинних форм життя?
2. Чи небезпечно вживати бульби картоплі, уражені віроїдами?
3. Чому небезпечно вживати м'ясо тварин, уражених пріонами, навіть після тривалої термічної обробки?

Підб'ємо підсумки з теми

I. Досліджую природу

1. Учні та учениці досліджували активність ферментів. Опрацювавши отриману інформацію, вони побудували графік. Проаналізуйте твердження.



- I. Учні та учениці встановили залежність активності ферментів від pH середовища.
 - II. Активність ферментів у дослідженні визначили як незалежну змінну.
- A** правильне I твердження
Б правильне II твердження
В правильні обидва твердження
Г неправильні обидва твердження
2. Вивчаючи нуклеїнові кислоти, учні й учениці виділяли ДНК з клітин бананів. Який метод дослідження вони застосовували?
- A** моделювання
Б експериментальний
В моніторинг
Г описово-порівняльний

II. Опрацьовую та використовую інформацію

1. Проаналізуйте таблицю вмісту органічних і неорганічних речовин у бобових культурах (у відсотках). Виберіть твердження «Так» чи «Ні».

Культури	Вода	Білок	Крохмаль	Жир	Сира клітковина
Горох	10–15	16–35	20–46	1,3–1,5	3,0–6,0
Сочевиця	12–14	25–34	47–60	1,3–1,4	3,5–4,0
Квасоля	12–15	22–30	50–56	2,0–2,3	5,0–5,5

Культури	Вода	Білок	Крохмаль	Жир	Сира клітковина
Чина	12–14	25–34	24–25	1,0–1,2	4,0–5,4
Нут	12–14	25–34	47–60	4,0–7,2	4,0–5,4
Кормові боби	12–14	25–35	50–55	1,0–1,3	3,4–6,0
Соя	14–16	30–60	22–34	13–26	2,9–1,1
Люпин кормовий	14–19	30–48	18–39	3,6–14	11–18

У середньому вміст води у насінні бобових – 20 %	Так	Ні
60 % крохмалю в насінні сочевиці та нуту	Так	Ні
Найнижчий вміст білків – у насінні люпину та гороху	Так	Ні
Найвищий вміст жирів у насінні сої	Так	Ні
У квасолі найвищий вміст сирової клітковини та крохмалю	Так	Ні

2. Фермер вирощував цукрові буряки двома способами: при міжрядді 45 см і за схемою трикутника, де відстань – 30 см. Проаналізуйте твердження щодо урожайності та цукристості буряків за вирощування двома способами.

2.1. Виберіть групу органічних сполук, до якої належить цукор.

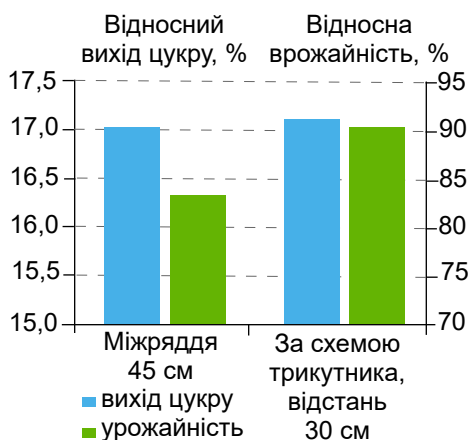
- А** ліпіди **В** олігосахариди
Б моносахариди **Г** білки

2.2. Учні аналізували діаграми. Учень сказав, що вихід цукру мало відрізняється в разі двох способів вирощування. Учениця сказала, що найбільшою є врожайність буряку за міжряддя 45 см.

- А** учень має рацію **В** обидва мають рацію
Б учениця має рацію **Г** обидва помиляються

2.3. За врожайності 90 % (за схемою трикутника – 30 см) вміст цукру становить

- А** 16 % **Б** 16,5 % **В** 17,1 % **Г** 17,5 %



III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Установіть відповідність між речовиною (1–4) та функцією, яку вона виконує в організмі (А–Д).

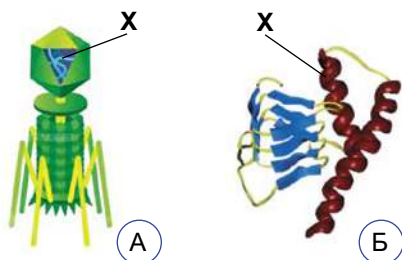
- | | |
|--|--|
| 1 гемоглобін | А структурна |
| 2 стероїд | Б транспортна |
| 3 целюлоза | В збереження спадкової інформації |
| 4 дезоксирибонуклеїнова кислота | Г запасальна |
| | Д регуляторна |

2. Установіть відповідність між структурою організму (1–5) та білком, який до неї входить (А–Е).



А фіброїн Б гемоглобін В кератин Г овальбумін Д пепсин Е актин

3. Розгляньте малюнок, на якому зображено неклітинні форми життя. Проаналізуйте твердження, виберіть правильні.



I. На малюнку А зображено вірус, на малюнку Б – пріон.

II. Літерою X на обох малюнках позначено ДНК.

А правильне I твердження

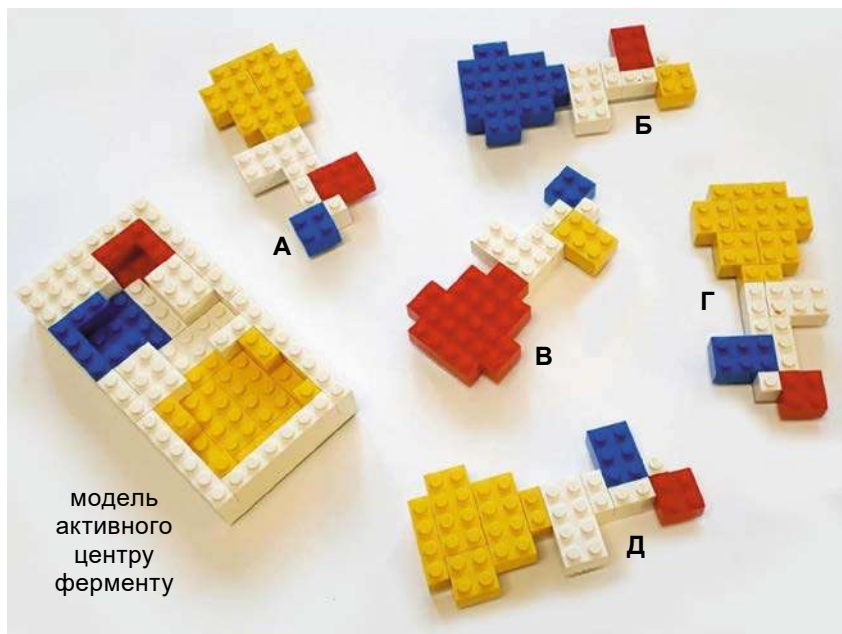
Б правильне II твердження

В правильні обидва твердження

Г неправильні обидва твердження

Компетентнісно орієнтоване завдання

Фермент і його активний центр. Софія й Олексій зробили для біохімічного гуртка модель активного центру ферменту. Легенда до цієї моделі така: *червоні* кубики – негативно заряджені групи атомів у молекулі, *сині* кубики – позитивно заряджені групи атомів, *жовті* кубики – гідрофобні ділянки молекули. На світлині наведено також п'ять можливих молекул-субстратів цього ферменту, позначених літерами.



Розділ 4

1. Який із субстратів підходить до цього ферменту?

☐ А ☐ Б ☐ В ☐ Г ☐ Д

2. Щодо взаємодії ферменту із субстратом Софія та Олексій висловили такі твердження:

I. Софія вважає, що для приєднання до активного центру ферменту молекула субстрату має відповідати цій ділянці за формою та розмірами.

II. Олексій стверджує, що має значення наявність у молекули субстрату заряджених груп, які взаємодіють із зарядженими групами активного центру.

Для взаємодії субстрату з ферментом за принципом «ключа й замка»

А необхідна і достатня лише умова I

Б необхідна і достатня лише умова II

В необхідно і достатньо поєднання умов I і II

Г необхідно, але недостатньо поєднання умов I і II

Поясніть свій вибір.

3. Дідусь Софії, який до пенсії працював хіміком-органіком, з власного конструктора молекул зробив свої моделі «субстратів» (чорні кульки – атоми Карбону, білі – Гідрогену, сині – Нітрогену, червоні – Оксигену.)

Яка із цих моделей молекул найбільш схожа на змодельовану учнем та ученицею модель одного з можливих субстратів, позначену на попередній світлинці літерою Г?



4. Наведіть ще два приклади взаємодії молекул за таким принципом.

Тема 2.

Клітина – структурно-функціональна одиниця організмів



Клітини еукаріотів мають різноманітні форми та розміри. Чим це зумовлено?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Історія створення клітинної теорії»; «Особливості процесів СЗ- та С4-фотосинтезу»; «Особливості будови і функцій над- та підмембранних комплексів клітин організмів різних груп»; «Каріотип організму»; «Чому в життєвому циклі диплоїдних організмів формуються гаплоїдні клітини?»; «Клітинний цикл: його порушення та їхні наслідки».

Науково-дослідницький проєкт:

«Дослідження впливу різного освітлення на утворення вуглеводів у різних кімнатних рослин».

Практико-орієнтований проєкт:

виготовлення буклета «Процеси бродіння та їх використання у промисловості та побуті».

Творчий проєкт:

написання есе (твору, розповіді) «Наскільки важливим для розвитку біології стало відкриття клітини?»; створення лепбука «Органели клітини», «Мітоз», «Мейоз».

Ігровий (рольовий) проєкт:

ділова гра «Клітина-місто».

§ 14. Методи дослідження клітин. Типи мікроскопії

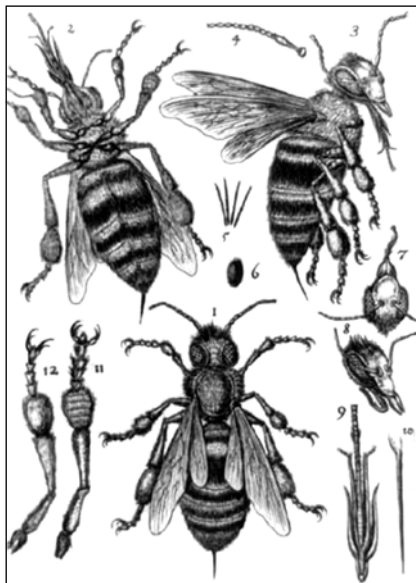


Чи завжди для дослідження клітини потрібен мікроскоп?

Цитологія – наука, яка досліджує клітини, їхню будову та процеси життєдіяльності. Цитологія бере початок з відкриття, яке 1665 р. здійснив англійський дослідник Роберт Гук (1635–1703). За допомогою сконструйованого власноруч мікроскопа він розглянув оболонки клітин корка (різновид покривної тканини рослин, що складається з мертвих клітин) і запропонував сам термін «клітина». Згодом, 1702 р., голландський дослідник А. ван Левенгук (мал. 14.1) також за допомогою мікроскопів власної конструкції відкрив клітини бактерій, деякі одноклітинні еукаріотичні організми (інфузорії та ін.), описав деякі клітини багатоклітинних тварин (еритроцити та сперматозоїди).

Мал. 14.1. Антоні ван Левенгук (1632–1723) (1): його вважають засновником наукової світлової мікроскопії; один із сконструйованих ним мікроскопів (2): упродовж свого життя він власноруч виготовив понад 500 ліній та 25 мікроскопів





Мал. 14.2. Фрагмент сторінки з праці італійського вченого Франческо Стелутті (1577–1652), видрукуваної 1630 р.: для вивчення медоносної бджоли він використовував оптичний мікроскоп ще до досліджень Р. Гука

Цікаво знати. Перші подібні оптичні прилади, що мали лише одну лінзу, відомі ще з XIII ст. Появу складніших мікроскопів датують кінцем XVI – початком XVII ст. (мал. 14.2).

Сучасні дослідження в галузі цитології спрямовані насамперед на вивчення різноманітних органел і структур клітини, їхніх функцій. Удосконалені сучасні збільшувальні прилади й новітні технології відкривають нові перспективи перед дослідниками. Вони надають можливість вивчати навіть

найдрібніші клітинні структури. Нині щодалі більше розвиваються дослідження і в галузі клітинної інженерії.

✓ **Дізнайтеся більше** про кишенькові мікроскопи за QR-кодом.



Клітинна інженерія – галузь, яка займається модифікацією клітин з метою отримання клітин і тканин з новими властивостями.

Типи мікроскопії. Метод світлової (оптичної) мікроскопії. Першим приладом, який дав змогу вивчати клітини, був **світловий (оптичний) мікроскоп** (мал. 14.3).

Методи досліджень, які здійснюють за допомогою цього приладу, називають **світловою (оптичною) мікроскопією**. Вони ґрунтуються на тому, що через прозорий чи напівпрозорий об'єкт дослідження проходять промені світла, які згодом потрапляють до системи лінз



Мал. 14.3. Світлова (оптична) мікроскопія.
А. Будова і принцип роботи світлового мікроскопа
Б. Такий вигляд мають клітини рослини в полі зору світлового мікроскопа

А

Б

об'єктива та окуляра. Ці лінзи збільшують об'єкт дослідження, при цьому кратність збільшення можна визначити як добуток збільшень, які забезпечують об'єктив та окуляр. Наприклад, якщо лінзи окуляра забезпечують збільшення в 10 разів, а об'єктива – в 40, то загальне збільшення об'єкта досліджень становитиме 400 разів.

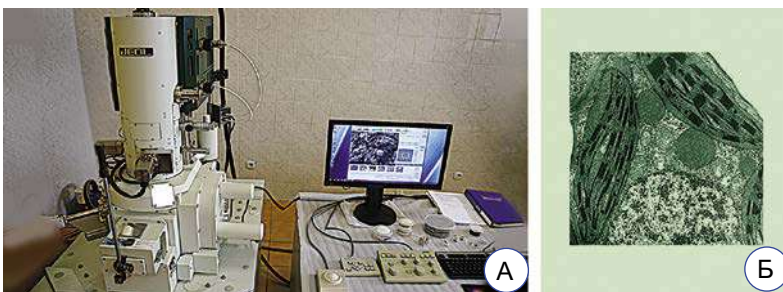


Зверніть увагу на хід променів світла від його джерела до системи лінз об'єктива та окуляра.

Сучасні світлові мікроскопи можуть забезпечувати збільшення до 2–2,5 тис. разів. Це дає можливість вивчати об'єкти дослідження розміром близько 200 нм і навіть дрібніші. Досліджуючи живі клітини за допомогою світлового (оптичного) мікроскопа, можна вивчати процеси їхньої життєдіяльності: рух цитоплазми, поділ клітини тощо.

Метод електронної мікроскопії. Клітинні структури найдрібніших розмірів (мембрани, рибосоми тощо) були вивчені лише за допомогою *електронного мікроскопа* (мал. 14.4). Перший його зразок сконструювали 1931 р. німецькі інженери Макс Кнол (1897–1969) та Ернст Руска (1906–1988) (останній за свій винахід 1986 р. здобув Нобелівську премію з фізики). На відміну від оптичного, електронний мікроскоп здатен збільшувати зображення об'єктів дослідження до 10 млн разів. Це дає змогу вивчати об'єкти, розміри яких становлять лише 0,1 нм.

Конструкція електронного мікроскопа дещо нагадує конструкцію світлового (оптичного), але замість променів світла в ньому застосовують потік електронів, які рухаються в магнітному полі. Роль лінз при цьому виконують електромагніти, здатні змінювати напрямок руху електронів, збирати їх у пучок (фокусувати) й спрямовувати його на об'єкт дослідження (мал. 14.4, Б). Пройшовши через досліджуваний об'єкт, електрони потрапляють на люмінесцентний екран, спричиняючи його нерівномірне свічення, або на особливий фотоматеріал, за допомогою якого зображення можна фотографувати.



Мал. 14.4. Метод електронної мікроскопії. А. Сучасний електронний мікроскоп. Б. Фото хлоропластів у клітині, зроблене за допомогою електронного мікроскопа

За допомогою методу *сканувальної електронної мікроскопії* досліджують поверхні клітин, окремих органел, цілісних організмів тощо. При цьому потік електронів не проходить крізь об'єкт дослідження, а відбивається від його поверхні. Щоби за допомогою сканувального електронного мікроскопа сфотографувати поверхні об'єктів досліджен-



Мал. 14.5. Голова дрозофіли (плодової мухи), зображення отримано за допомогою сканувального електронного мікроскопа (кольори умовні)

ня (цілісних організмів, клітин, окремих органел тощо), їх покривають металічним пилом, наприклад золотим. Сканувальний електронний мікроскоп може збільшувати об'єкти дослідження від 3–10 до 1 млн разів, що дає змогу вивчати об'єкти розміром до 0,4 нм. За допомогою сканувальних електронних мікроскопів отримують тривимірні зображення об'єктів дослідження. А використовуючи спеціальні комп'ютерні програми, отримане зображення об'єктів досліджень можна робити кольоровим (мал. 14.5).



Поміркуйте, що спільного та відмінного у методах світлової (оптичної) та електронної мікроскопії.

✓ **Дізнайтеся більше** про роботу сканувального мікроскопа за QR-кодом.



Інші методи дослідження клітин. Для того щоб постійно мати у своєму розпорядженні клітини для досліджень, учені застосовують **метод культури клітин**. Для цього живі клітини певних типів утримують і розмножують на штучних поживних середовищах (наприклад, виготовлених з агару – речовини, яку добувають із червоних водоростей). Змінюючи компоненти поживного середовища, можна спостерігати, як різні сполуки впливатимуть на ріст і розмноження клітин, інші їхні властивості. Кulture клітин використовують, наприклад, у медицині та фармакології (наука, яка досліджує ліки та їхній вплив на організм) для дослідження впливу різних лікарських сполук, вірусів, отримання біологічно активних речовин (лікарських препаратів, вітамінів тощо).

Цікаво знати. Цитологічні методи широко застосовують для діагностики різноманітних захворювань людини і свійських тварин, визначення фізіологічного стану організмів. Так, в онкології (наука, яка вивчає причини виникнення ракових захворювань, розробляє засоби їхньої діагностики та лікування) ці методи використовують для виявлення злоякісних і доброякісних пухлин, діагностики передонкологічних станів і первісних стадій цих захворювань. Адже що раніше діагностована така хвороба, то більше шансів на одужання. Для цього виявляють аномальні клітини та вивчають їхню здатність до швидкого розмноження. Розроблено цитологічні методики розпізнавання захворювань крові, травної системи, нирок, легень, шкіри тощо. Уперше припущення про те, що хвороби людини пов'язані з патологічними змінами в будові та функціонуванні клітин, ще в XIX ст. зробив німецький науковець Рудольф Вірхов.

Для того щоб розділити клітинні структури за щільністю, використовують центрифуги, в яких подрібнені клітини зазнають дії відцентрової сили, в десятки й сотні тисяч разів більшої за силу тяжіння. Цей метод має назву **диференційне центрифугування**. Так можна отримати матеріал для подальших досліджень біохімічними методами.

Узагальнення

Цитологія – наука, що вивчає клітину, її будову та процеси життєдіяльності. Основним методом цитологічних досліджень є мікроскопія, яку поділяють на світлову (оптичну) та електронну. У світловому мікроскопі зображення формується завдяки проходженню через тонкий прозорий об'єкт пучка світлових променів, які фокусуються збиральними лінзами об'єктива та окуляра. В електронному мікроскопі замість світла використовують потік електронів, а роль лінз виконують електромагніти. Це дає змогу отримувати зображення з набагато вищою роздільною здатністю. До цитологічних методів також належать метод культури клітин та інші спеціалізовані підходи.

Поміркуйте

1. Коли під час досліджень варто застосовувати оптичний мікроскоп, а коли – електронний?
2. Чи можливо вивчати біологічні процеси в клітинах за допомогою методів мікроскопії?
3. Яке значення має метод мікроскопії для розвитку клітинної інженерії?

§ 15. Структура еукаріотичної клітини: клітинна мембрана. Надмембранні комплекси клітини



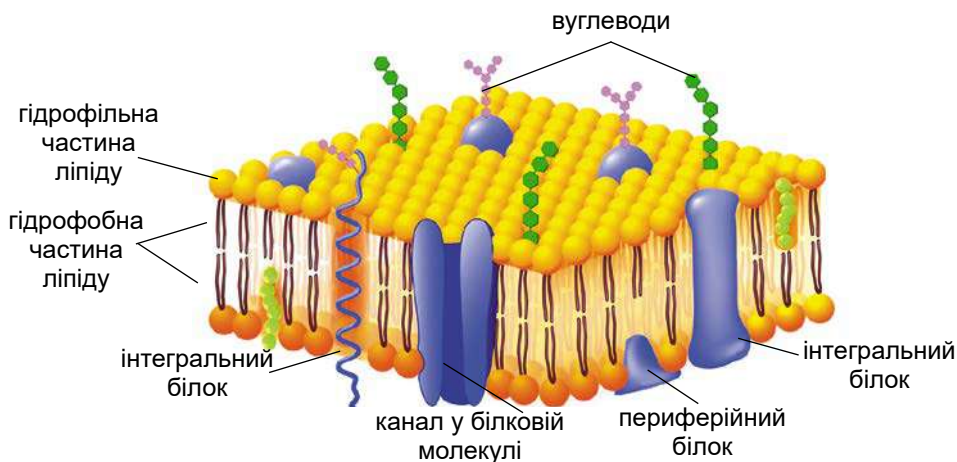
Які функції плазматичної мембрани зумовлені білками, а які – ліпідами?

Клітина – структурно-функціональна одиниця живих істот. На клітинному рівні організації проявляються всі основні властивості живого: обмін речовин і перетворення енергії, здатність до росту, розмноження, руху, подразливості, збереження і передавання спадкової інформації нащадкам. Внутрішній уміст кожної клітини оточує поверхневий апарат, а внутрішнє середовище клітини між клітинною мембраною та ядром – це цитоплазма. У ній розміщені постійні клітинні структури – органели та непостійні – включення.

Поверхневий апарат клітини включає плазматичну мембрану, надмембранні та підмембранні структури. До складу **плазматичної мембрани** (її ще називають **плазмалемою**) входять насамперед молекули ліпідів і білків, а також вуглеводів (мал. 15.1). Молекули ліпідів розташовані у два шари: їхні гідрофільні частини обернені до зовнішнього та внутрішнього боку мембрани, а гідрофобні – обернені всередину цього подвійного шару. Це визначає важливу властивість плазматичної мембрани – **напівпроникність**: вона вибірково пропускає певні сполуки як усередину клітини, так і з клітини назовні.

Основним функціональним компонентом клітинних мембран є білкові молекули. Частина з них розташована лише на зовнішній або внутрішній поверхні мембрани – такі білки називають **периферійними**. Інші ж занурені в подвійний шар ліпідів або навіть повністю його перетинають. Їх називають **інтегральними** білками. Вуглеводи входять до складу мембран у вигляді складних сполук з білками або ліпідами.

Така модель будови мембран дістала назву **рідинно-мозаїчної** (мал. 15.1). Назва пояснюється тим, що близько 30 % молекул ліпідів міцно зв'язані з білками, утворюючи стабільні комплекси, а решта – перебуває в рідкому стані. Через це білково-ліпідні комплекси виглядають ніби «вкрапленими» в рідку ліпідну масу – як мозаїка.



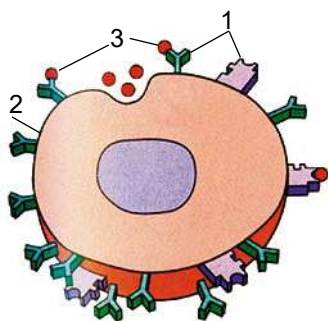
Мал. 15.1. Будова плазматичної мембрани

Молекули, що входять до складу мембран, здатні пересуватися. Завдяки цій властивості мембрани можуть швидко поновлюватися після незначних ушкоджень.

Плазматичні мембрани можуть розтягуватися та стискатися, що дає змогу клітинам певних типів змінювати свою форму (*пригадаймо*, як змінюється форма клітин амеб під час руху та поглинання їжі – фагоцитозу).



Які класи органічних сполук входять до складу мембрани?



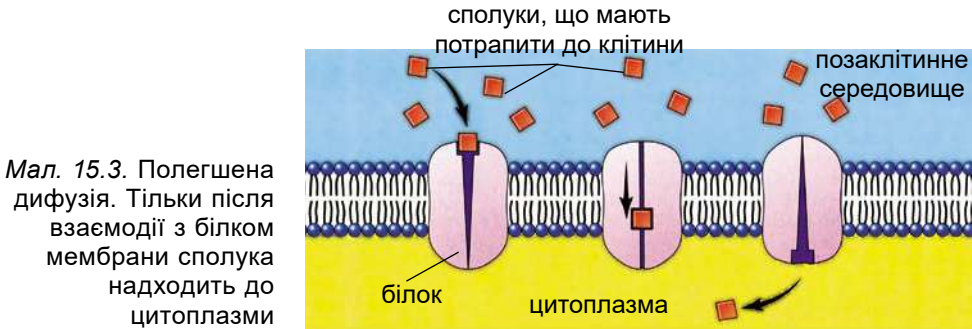
Мал. 15.2. Захисна функція клітинної мембрани: антитіла (1) у складі мембрани (2) зв'язують антигени (3) і запобігають їхньому проникненню в клітину

Функції клітинної мембрани. Клітинна мембрана виконує насамперед **захисну функцію**: оберігає внутрішнє середовище клітини від несприятливих зовнішніх впливів. Зокрема, серед мембранних білків є такі, що здатні зв'язувати антигени (*пригадаймо*: це речовини, які клітина сприймає як чужорідні) й тим самим запобігати їхньому проникненню в клітину (мал. 15.2). Тому плазматична мембрана є однією з ланок імунітету.

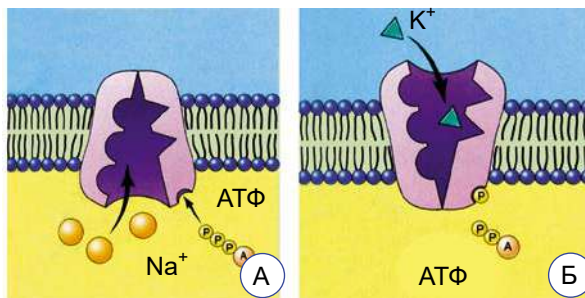
Транспортна функція. Сполуки, які потрібні для забезпечення життєдіяльності клітин, та продукти обміну речовин, утворені в клітині, перетинають плазматичну мембрану за допомогою пасивного або активного транспорту. **Пасивний транспорт** забезпечує невибіркове (вода, гази) чи вибіркове проникнення речовин через мембрани без витрат

енергії. При цьому молекули переміщуються завдяки різниці концентрації речовин по обидва боки мембрани: з ділянки, де їхня концентрація висока, у ділянку, де їхня концентрація нижча.

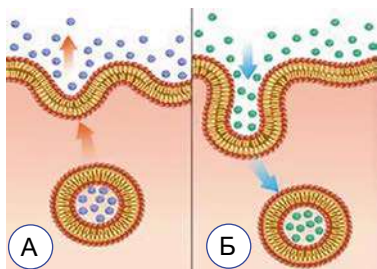
Пасивний транспорт забезпечують різні механізми. Шляхом *дифузії* у клітину надходять вода та розчинені в ній речовини. *Полегшена дифузія* – перетинання мембрани певними молекулами за допомогою мембранних каналів, або білків-переносників, які пронизують мембрану (мал. 15.3). Ці білки взаємодіють з певними молекулами на одній з поверхонь мембрани і внаслідок зміни своєї просторової структури транспортують їх на інший бік. Наприклад, шляхом полегшеної дифузії в більшість клітин людського тіла потрапляє глюкоза.



Активний транспорт речовин через клітинні мембрани, на відміну від пасивного, пов'язаний з витратами енергії, накопиченої в макроергічних зв'язках молекул АТФ (див. мал. 10.3). Один з механізмів активного транспорту речовин через мембрани – так званий *натрій-калієвий насос* (мал. 15.4). Він пов'язаний з тим, що концентрація йонів Калію (K^+) всередині клітини вища, ніж ззовні, а йонів Натрію (Na^+) – навпаки. Завдяки такій різниці концентрацій унаслідок дифузії йони Натрію надходять у клітину, а Калію – виводяться з неї. Але концентрація цих йонів у живій клітині й поза нею ніколи не вирівнюється, оскільки існує особливий механізм, завдяки якому йони Натрію виводяться («відкачуються») з клітини, а Калію – надходять («закачуються») до неї.



Мал. 15.4. Натрій-калієвий насос. А. Йони Na^+ виводяться з клітини, де їхня концентрація нижча, ніж у зовнішньому середовищі. Б. Йони K^+ «закачуються» в клітину, де їхня концентрація вища, ніж у позаклітинному середовищі

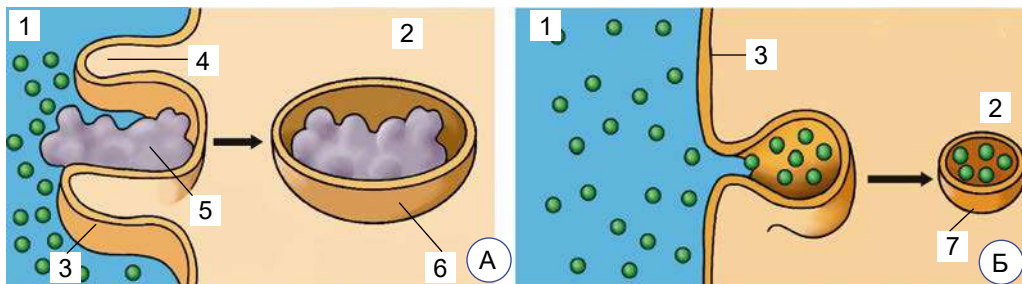


Мал. 15.5. Процеси екзо- (А) та ендоцитозу (Б). *Завдання:* знайдіть риси подібності та відмінності цих процесів

До механізмів транспорту речовин через мембрани належить також екзо- та ендоцитоз (мал. 15.5). Під час **екзоцитозу** (від грец. *екзо* – зовні та *цитос* – клітина) макромолекули у складі пухирців, оточених мембраною, виводяться з клітини назовні. При цьому мембрана такого пухирця зливається з плазматичною мембраною, а його вміст опиняється поза клітиною (мал. 15.5, А). У разі **ендоцитозу** (від грец. *ендон* – всередині та *цитос*) тверді та рідкі сполуки, оточені мембраною, надходять усередину клітини (мал. 15.5, Б).

Розрізняють два основних види ендоцитозу: фаго- і піноцитоз (мал. 15.6). **Фагоцитоз** (від грец. *фагос* – пожити та *цитос*) – активне захоплення клітиною твердих мікроскопічних об'єктів (частинки органічних сполук, дрібні клітини та ін.) (мал. 15.6, А). *Пригадаймо:* за допомогою фагоцитозу захоплюють їжу деякі одноклітинні організми (як-от амеби) та клітини тварин (наприклад, травні клітини гідри). Спеціалізовані клітини тварин і людини за допомогою фагоцитозу виконують захисну функцію (наприклад, така група лейкоцитів, як макрофаги), захоплюючи і перетравлюючи хвороботворні мікроорганізми, фрагменти власних загиблих клітин тощо.

Піноцитоз (від грец. *піно* – п'ю та *цитос*) – процес поглинання клітиною рідини разом з розчиненими або завислими в ній сполуками (мал. 15.6, Б). Як і за фагоцитозу, захоплені об'єкти огортаються мембраною. Так виникають *піноцитозні пухирці*.



Мал. 15.6. Процеси фагоцитозу (А) та піноцитозу (Б): 1 – позаклітинне середовище; 2 – цитоплазма; 3 – плазматична мембрана; 4 – псевдоподія; 5 – тверді часточки; 6 – травна вакуоля; 7 – піноцитозний пухирець з рідиною, у якій є завислі дрібні часточки

Сигнальна функція. У складі плазматичної мембрани є складні білки, здатні у відповідь на дію різних факторів реагувати на них, передаючи сигнали на інші ділянки мембрани або всередину клітини.

Цікаво знати. Ми вже згадували, що з особливими молекулами, які входять до складу плазматичної мембрани, можуть взаємодіяти віруси (див. мал. 12.1). Якщо така взаємодія відбулася – вірус проникає до клітини, якщо не відбулася – ні. Саме на цьому базується створення лікарських препаратів проти вірусних інфекцій: вони спрямовані на те, щоб унеможливити взаємодію вірусних частинок з відповідними молекулами у складі плазматичної мембрани і, відповідно, проникнення у клітину.

✓ **Дізнайтеся більше** про функцію забезпечення міжклітинних контактів у багатоклітинних організмах за QR-кодом.

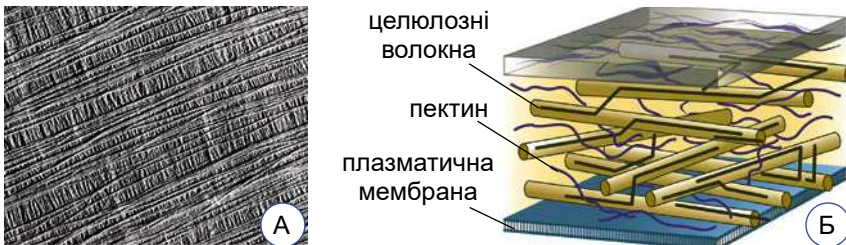


Плазматичні мембрани також беруть участь у процесах росту та поділу клітин.

Надмембранні комплекси клітин складаються зі структур, розташованих над плазматичною мембраною. У клітин рослин і грибів – це клітинна стінка, у клітин тварин – глікокалікс.

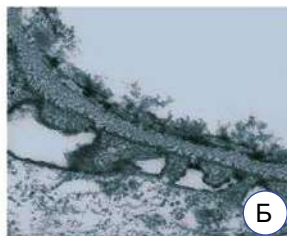
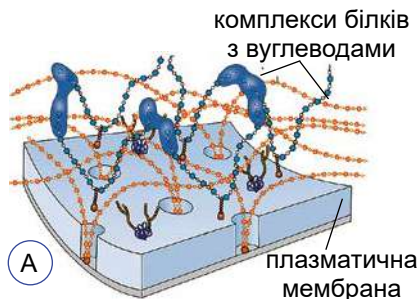
Клітинна стінка клітин рослин включає зібрані в пучечки нерозчинні у воді волоконця полісахариду целюлози (мал. 15.7), занурені у своєрідний каркас (матрикс). Залежно від типу тканин і виконуваних ними функцій, до складу клітинної стінки рослин можуть входити й інші вуглеводи, а також ліпіди, білки, неорганічні сполуки (SiO_2 , карбонати та ортофосфати кальцію тощо). У різних груп справжніх грибів до складу клітинної стінки, крім целюлози, входить нітрогенумісний полісахарид хітин, який підвищує її міцність, можуть входити темні пігменти (меланіни) та інші сполуки.

Цікаво знати. Оболонки клітин корка або судин у рослин з віком просочуються жироподібною речовиною. Унаслідок цього вміст клітин відмирає, що сприяє виконанню ними опорної або провідної функції. Клітинні стінки здатні дерев'яніти, коли проміжки між волокнами целюлози заповнює складна полімерна сполука лігнін, яка надає оболонкам додаткової міцності.



Мал. 15.7. Клітинна стінка рослинної клітини: А – фото, зроблене за допомогою сканувального електронного мікроскопа; Б – схема будови

Опорна функція клітинної стінки полягає в підтриманні форми клітини. Клітинна стінка також забезпечує міжклітинні контакти між сусідніми клітинами. Так, матриксом клітинних стінок може здійснюватися транспорт розчинених речовин.



Мал. 15.8.
Глікокалікс. А. Схема будови глікокаліксу, розташованого над плазматичною мембраною. Б. Електронно-мікроскопічне фото глікокаліксу

Глікокалікс – це дуже тоненький поверхневий шар клітин тварин, що складається зі сполук білків і ліпідів з вуглеводами (мал. 15.8). Він нездатний підтримувати форму клітини, але забезпечує безпосередній зв'язок клітин з навколишнім середовищем. До складу глікокаліксу входять рецепторні молекули, здатні сприймати подразники довкілля. Він бере участь у вибірковогому транспорті речовин усередину клітини та назовні. Крім того, глікокалікс бере участь у формуванні зв'язків між клітинами в багатоклітинних тварин.

Узагальнення

Кожна клітина оточена плазматичною мембраною, з якою пов'язані надмембранні та підмембранні структури. Основу мембрани становить подвійний шар молекул ліпідів, серед яких переважають фосфоліпіди. Така будова забезпечує напівпроникність мембрани. До складу мембрани також входять мембранні білки, вуглеводи та інші компоненти. Мембрана виконує низку важливих функцій: транспорт речовин, сигнальну (сприйняття подразнень), забезпечення контактів між клітинами тощо. Транспорт речовин поділяють на: пасивний, який відбувається без витрат енергії (наприклад, дифузія), та активний, що потребує витрат енергії (наприклад, натрій-калієвий насос, різні види цитозу – транспорту речовин у мембранній упаковці).

Поміркуйте

1. Чому мембрана має бути напівпроникною?
2. Чому надмембранний комплекс тваринної клітини не має клітинної стінки?
3. Які клітини людського організму здатні до фагоцитозу?

§ 16. Будова еукаріотичної клітини: цитоплазма, рибосоми, органели руху, клітинний центр



Чому і як активність клітини залежить від стану її цитоплазми?

Цитоплазма (від грец. *китос* – клітина та *плазма* – виліплене, сформоване) – це внутрішній уміст клітини, за винятком ядра / ядер. Основу цитоплазми становить неоднорідний колоїдний розчин органічних і неорганічних речовин у воді – **цитозоль** (від грец. *китос* та лат. *солуціо* – розчин). Уміст води у ньому може коливатись у значних

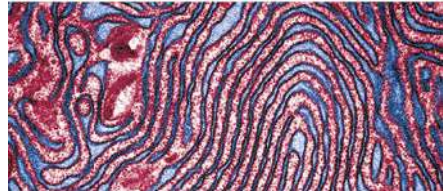
межах, сягаючи в молодих клітинах до 90 %. З органічних сполук у цитоплазмі присутні різноманітні білки, амінокислоти, моно-, оліго- та полісахариди, ліпіди, різні типи РНК тощо. З неорганічних – йони металів (зокрема, Ca^{2+} , K^{+}), карбонатної, хлоридної та ортофосфатної кислот та ін.

✓ **Дізнайтеся більше** про цитозоль за QR-кодом.



Цитозоль об'єднує в єдину функціональну біологічну систему всі клітинні структури і забезпечує їхню взаємодію. У цитозолі відбуваються транспорт різних сполук, процеси обміну речовин. Цитозоль перебуває в постійному русі. Переконатись у цьому можна самостійно, спостерігаючи за живими клітинами водної рослини елодеї або увівши до живої клітини забарвлені сполуки.

Внутрішньоклітинні мембрани. Внутрішній простір еукаріотичної клітини чітко впорядкований. У цитоплазмі клітини міститься система біологічних мембран, що відіграють важливу роль у забезпеченні її нормального функціонування. Ці мембрани поділяють внутрішнє середовище клітини на окремі функціональні ділянки – **компарменти** (від англ. *compartment* – комірка, обмежений простір), кожен з яких виконує певну функцію (мал. 16.1). Вони просторово розділяють несумісні процеси обміну речовин і перетворення енергії, а також захищають окремі ділянки клітини від дії ферментів.



Мал. 16.1. Система внутрішньоклітинних мембран еукаріотичної клітини, фото зроблено за допомогою електронного мікроскопа

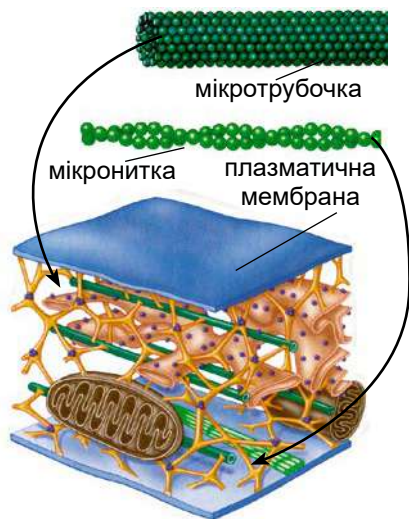
Внутрішньоклітинні мембрани (одна, дві чи, зрідка, більша їхня кількість) оточують різноманітні мембранні **органели** (від грец. *органон* – орган, інструмент) – постійні структури клітини. Кожна з органел забезпечує відповідні процеси життєдіяльності клітини. Непостійні структури клітини – **клітинні включення**, на відміну від органел, можуть зникати і знову з'являтися у процесі життєдіяльності клітини. Включеннями можуть бути запасні сполуки чи кінцеві продукти обміну речовин.

Немембранні структури клітини. Крім мембранних органел (які ми розглянемо в наступному параграфі), у цитоплазмі заанурені й **немембранні органели**.

Цитоскелет, або внутрішньоклітинний скелет, – це система білкових утворів – мікротрубочок і мікрониток (мікрофіламентів) (мал. 16.2). Він виконує опорну функцію, а також сполучає в єдину систему всі компоненти клітини: її поверхневий апарат, структури цитоплазми, ядро.

Елементи цитоскелета сприяють закріпленню органел у певному положенні та їхньому переміщенню в клітині.

Мікронитки (мікрофіламенти) – тонкі ниткоподібні структури, які складаються зі скоротливих білків, переважно актину (*пригадай-*



Мал. 16.2. Схема будови цитоскелета

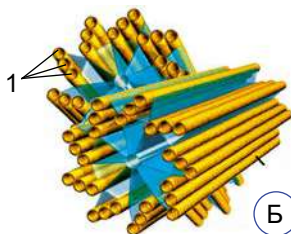
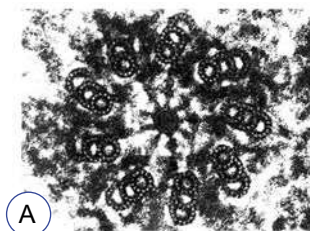
мо: актин – одна зі складових міофібрил м'язових клітин) (мал. 16.2). Вони пронизують цитоплазму й можуть утворювати плетиво під плазматичною мембраною. Пучки мікрониток прикріплені одним кінцем до певної структури (наприклад, плазматичної мембрани), а іншим – до певної органели тощо.

Мікротрубочки – порожнисті циліндричні білкові структури (мал. 16.2). Вони беруть участь у формуванні веретена поділу еукаріотичних клітин, входять до складу війок, джгутиків тощо. Мікротрубочки забезпечують переміщення органел і макромолекул клітиною.

✓ **Дізнайтеся більше** про органели руху за QR-кодом.



Клітинний центр (центросома) – органела, що складається з двох центріолей, розташованих в ущільненій ділянці цитоплазми під прямим кутом одна по відношенню до іншої (мал. 16.3). Центріолі мають вигляд циліндра, який складається з дев'яти комплексів мікротрубочок, по три в кожному.



Мал. 16.3. Будова клітинного центру: А. Фото, зроблене за допомогою електронного мікроскопа. Б. Схема будови центріолей: 1 – групи мікротрубочок по три у кожній

Центріолі здатні до поділу. Після поділу материнської клітини кожна з дочірніх успадковує від неї по одній центріолі, друга виникає в період між двома поділами.

Центріолі містяться в клітинах багатьох багатоклітинних тварин. Їхня функція – участь у формуванні веретена поділу клітини (детальніше про нього ви дізнаєтеся згодом).

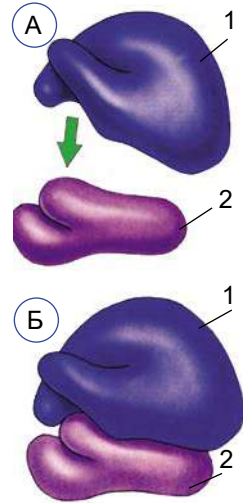
Клітинний центр є головним центром організації мікротрубочок у клітині еукаріотів: він бере участь у формуванні мікротрубочок цитоплазми, джгутиків і війок.

Цікаво знати. В організмів, у клітинах яких відсутні центріолі, джгутики не формуються (покритонасінні рослини, представники справжніх грибів).

Будова та функції рибосом. Обов'язковими органелами будь-яких клітин є **рибосоми** (від *рибонуклеїнова кислота* та грец. *сома* – тільце). Це немембранні органели (не вкриті зовні клітинними мембранами), які беруть участь у біосинтезі білків у клітині. За їхньої участі амінокислоти під час синтезу білкової молекули сполучаються в тому порядку, який визначає послідовність нуклеотидів молекули мРНК.

Рибосоми мають вигляд сферичних тілець, що складаються з двох частин різного розміру – *великої* та *малої субодиноць* (мал. 16.4). Кожна з них містить молекули рРНК і білків, які взаємодіють між собою. Під час синтезу молекули білка ці субодиноці з'єднуються, а після завершення процесу – роз'єднуються. Вони формуються в ядрі клітини, звідки потім потрапляють до цитоплазми. Крім цитоплазми, рибосоми наявні й у складі деяких органел – зокрема мітохондрій і пластид.

Мал. 16.4. Будова рибосоми. А. Роз'єдані велика (1) та мала (2) субодиноці. Б. Велика (1) та мала (2) субодиноці, сполучені у складі рибосоми



Хоча план будови всіх рибосом подібний, їхні розміри можуть бути різними. Так, розміри рибосом прокаріотів, мітохондрій і пластид дрібніші, ніж тих, які містяться у цитоплазмі або пов'язані з мембранами еукаріотичної клітини.

Цікаво знати. На різниці розмірів і складу рибосом бактеріальної та еукаріотичної клітин ґрунтується дія деяких антибіотиків. Такі антибіотики пригнічують дрібніші рибосоми бактерій і не зачіпають більші за розмірами рибосоми клітин людини.

Узагальнення

Внутрішній вміст клітини, за винятком ядра, називають цитоплазмою. До її складу входять цитозоль, органели та включення. Цитозоль – це неоднорідний колоїдний розчин органічних і неорганічних речовин у воді. Цитоплазма створює внутрішнє середовище клітини; об'єднує всі складові клітини в єдину систему; бере участь в обміні речовин. Серед органел є такі, що не оточені мембранами (як-от рибосоми, клітинний центр), двома (мітохондрії, пластиди рослин, зелених водоростей тощо), трьома (наприклад, евглена зелена) або чотирма (як-от пластиди бурих і діатомових водоростей) мембранами.

Поміркуйте

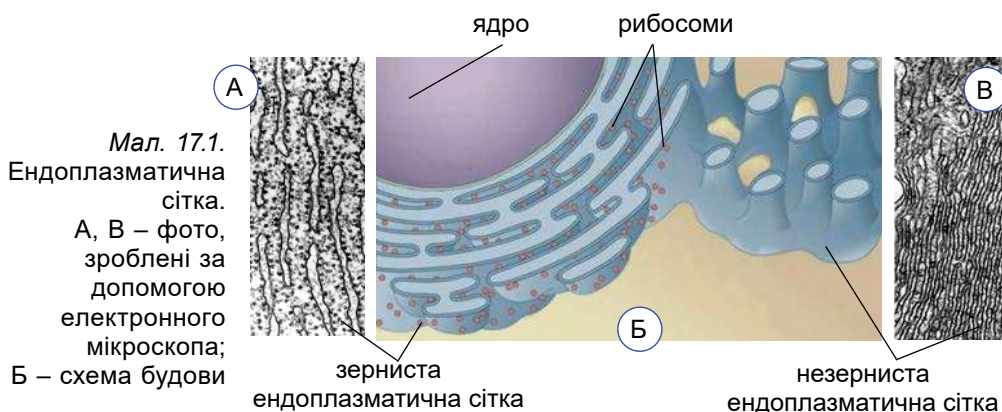
1. Які клітини організму людини мають органели руху та які їхні функції?
2. До складу рибосом входять лише білки та РНК. Як це пов'язано з їхньою функцією?
3. Чи всі клітини живих організмів мають клітинний центр?

§ 17. Будова еукаріотичної клітини: ендоплазматична сітка, комплекс Гольджі, лізосоми, вакуолі



Що спільного між ендоплазматичною сіткою, комплексом Гольджі, вакуолями та лізосомами?

Ендоплазматична сітка, або ендоплазматичний ретикулум, становить собою систему порожнин у вигляді мікроскопічних каналців та їхніх потовщень (так званих цистерн) (мал. 17.1). Вони обмежені клітинною мембраною та сполучаються між собою. Розрізняють два різновиди ендоплазматичної сітки: зернисту та незернисту. **Зерниста, або гранулярна, ендоплазматична сітка** названа так тому, що на її мембранах розташовані рибосоми (див. мал. 16.4). Мембрани зернистої ендоплазматичної сітки можуть сполучатися з плазматичною мембраною. На мембранах **незернистої, або агранулярної, ендоплазматичної сітки** рибосом немає. Зерниста та незерниста ендоплазматична сітка мають просторові та функціональні зв'язки: їхні мембрани безпосередньо переходять одна в одну.



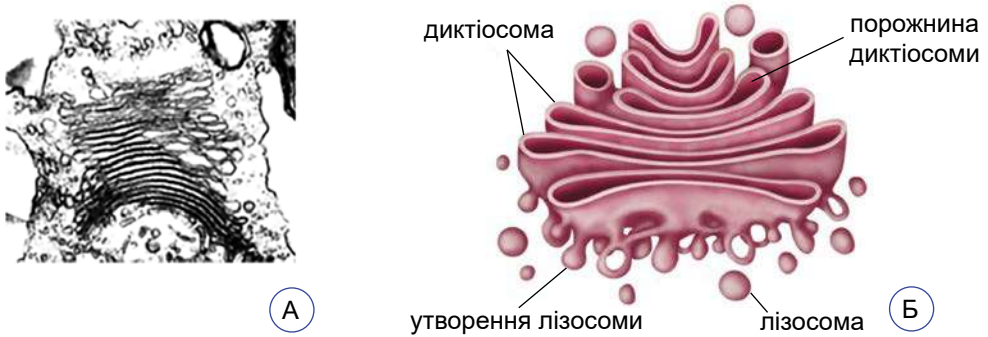
Одна з основних функцій зернистої ендоплазматичної сітки – **забезпечення біосинтезу білків**. Ці процеси відбуваються на її мембранах за участі рибосом. Синтезовані білки можуть накопичуватись у порожнинах зернистої ендоплазматичної сітки, розподілятися між різними ділянками клітини або виводитися з неї назовні.

Крім того, зерниста ендоплазматична сітка бере участь у синтезі компонентів клітинних мембран, зокрема зовнішньої мембрани оболонки ядра в період між двома поділами клітини. На мембранах незернистої ендоплазматичної сітки синтезуються вуглеводи, ліпіди, зокрема деякі гормони. Ці сполуки також можуть накопичуватись в її порожнинах. У порожнинах незернистої ендоплазматичної сітки (наприклад, у клітинах печінки) накопичуються і знешкоджуються отруйні для організму сполуки, які згодом виводяться з клітини й організму.

Ендоплазматична сітка просторово і функціонально пов'язана з комплексом Гольджі.

Комплекс Гольджі (апарат Гольджі) – одна з обов'язкових органел еукаріотичних клітин. Її основною структурною одиницею є купка

пласких мішечків, оточених мембранами, – **диктіосома**. Поруч розташовані пухирці та каналці (мал. 17.2). До одного з полюсів мішечків комплексу Гольджі постійно підходять пухирці, які відокремлюються від ендоплазматичної сітки і містять речовини, що там утворилися. Зливаючись з мішечками комплексу Гольджі, ці пухирці віддають їм свій уміст. З іншого полюса мішечків відокремлюються пухирці, наповнені різними речовинами (мал. 17.2).



Мал. 17.2. Комплекс Гольджі. А. Фото, зроблене за допомогою електронного мікроскопа. Б. Схема будови

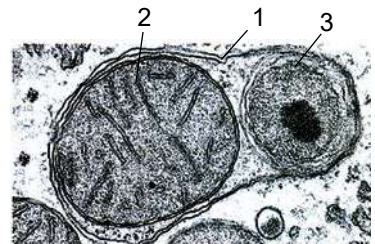
Функції комплексу Гольджі різноманітні. Насамперед у цій органелі накопичуються і певним чином змінюються деякі сполуки (наприклад, білки, які можуть сполучатися з вуглеводами або ліпідами). Речовини, які надійшли до мішечків комплексу Гольджі, сортуються за хімічним складом і призначенням. Відсортовані молекули переходять з одних мішечків до інших і згодом у вигляді пухирців, оточених мембраною, відокремлюються від цієї органели. Відокремлені пухирці транспортуються за допомогою мікротрубочок і можуть віддавати свій уміст іншим органелам. Або ж вони зливаються з плазматичною мембраною, видаляючи свій вміст з клітини.

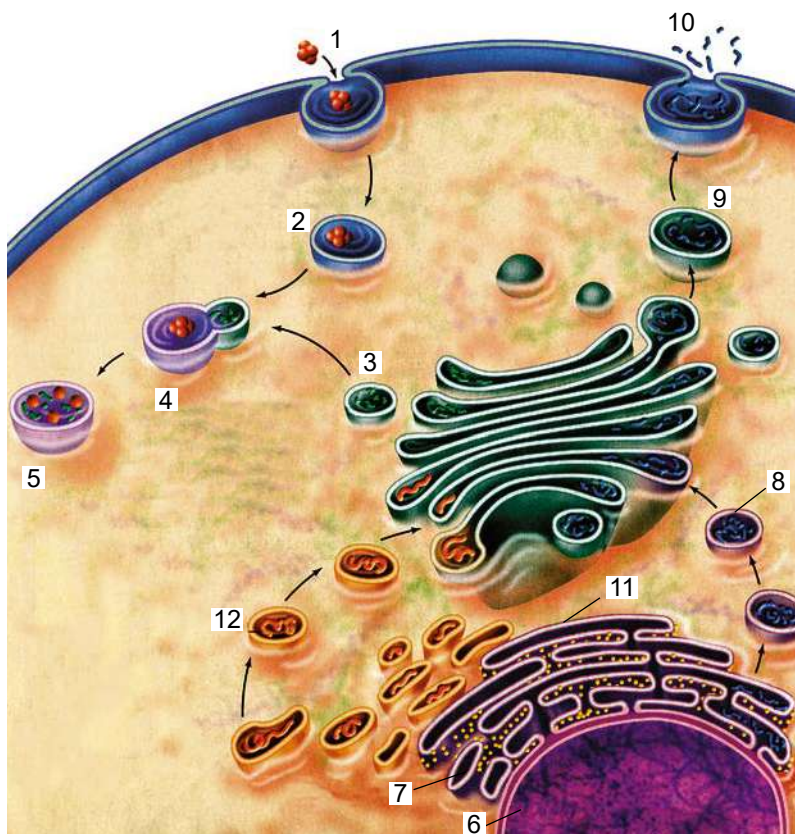
Комплекс Гольджі бере участь у формуванні деяких органел клітин еукаріотів, зокрема лізосом (мал. 17.3) і скоротливих вакуоль. У вигляді пухирців, оточених мембраною, лізосоми відокремлюються від цієї органели (мал. 17.4, 3). А ферменти, які входять до складу лізосом, синтезуються на мембранах зернистої ендоплазматичної сітки.

Одна з основних функцій комплексу Гольджі – накопичення і зміна речовин, їхнє пакування в мембранні пухирці.

Лізосоми (від грец. *лізис* – розчинення і *сома* – тіло) – це органели у вигляді мікроскопічних пухирців, оточених мембраною. Вони містять ферменти, здатні розщеплювати різні речовини – білки, вуглеводи, жири тощо. У клітині існують різні типи лізосом, які відрізняються будовою та функціями. Одні

Мал. 17.3. Лізосома (1), у якій перетравлюються мітохондрія (2) та пероксисома (3), термін життя яких вичерпано (фото зроблене за допомогою електронного мікроскопа)





Мал. 17.4. Просторові зв'язки між ендоплазматичною сіткою, комплексом Гольджі та плазматичною мембраною: 1 – процес фагоцитозу (частинки їжі оточуються плазматичною мембраною); 2 – частинки їжі, оточені мембраною, надходять у цитоплазму; 3 – від комплексу Гольджі відокремлюється лізосома; 4 – лізосома зливається з пухирцем, що містить частинки їжі; 5 – утворюється травна вакуоля; 6 – ядро клітини; 7 – зерниста ендоплазматична сітка; 8 – транспортний пухирець, що містить білки; 9 – екскреторний пухирець підходить до мембрани; 10 – вміст екскреторного пухирця виводиться з клітини; 11 – незерниста ендоплазматична сітка; 12 – пухирець з ліпідами прямує до комплексу Гольджі

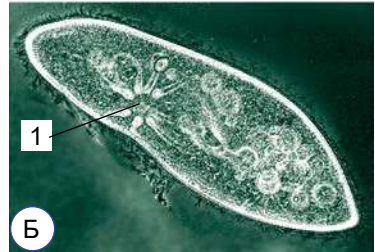
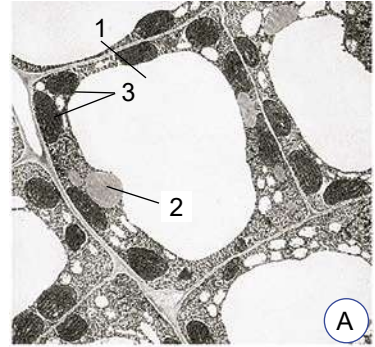
з них зливаються з пухирцями, що утворилися внаслідок піноцитозу або фагоцитозу, і беруть участь у формуванні *травних вакуоль* (мал. 17.4, 4, 5). У таких вакуолях активуються ферменти, і їхній вміст перетравлюється. Таким чином лізосоми забезпечують внутрішньоклітинне травлення. Інші лізосоми розщеплюють окремі компоненти самої клітини (мал. 17.3), іноді – цілі клітини або їхні групи. Крім того, лізосоми виконують захисну функцію – вони здатні перетравлювати хвороботворні мікроорганізми.

Вакуолі (від лат. *вакуус* – порожній) – органели клітини, які мають вигляд порожнин, оточених мембраною і заповнених рідиною. Бувають різні види вакуоль. Про утворення *травних вакуоль*, у яких перетравлюються поживні речовини та мікроорганізми, що надходять у клітину, ми вже згадували.

Вакуолі рослинних клітин утворюються з пухирців, які відокремлюються від ендоплазматичної сітки. Згодом дрібні вакуолі зливаються в більші, які можуть охоплювати майже весь об'єм цитоплазми (мал. 17.5, А). Такі вакуолі заповнені клітинним соком – водним розчином органічних і неорганічних сполук.

Функції вакуоль клітин рослин різноманітні: вони підтримують внутрішньоклітинний тиск, забезпечуючи збереження форми клітин, у них містяться запасні поживні речовини, кінцеві продукти обміну або пігменти. Червоні, сині, жовті тощо пігменти, які розчиняються у клітинному соку, зумовлюють забарвлення певних типів рослинних клітин (наприклад, червоний колір плодів вишні, коренеплодів редису, пелюсток тощо). Завдяки напівпроникності через мембрани вакуоль відбувається транспорт речовин із цитозолю і навпаки.

У клітинах прісноводних одноклітинних еукаріотів є **скоротливі вакуолі** – вкриті мембраною пухирці, здатні змінювати свій об'єм (мал. 17.5, Б). Це пов'язано з тим, що в прісній воді концентрація солей значно нижча, ніж у цитоплазмі. Тому, згідно з фізичними законами, вода з навколишнього середовища надходить до клітини, підвищуючи тиск усередині неї. Стінки таких вакуоль скорочуються завдяки скоротливим білкам, які входять до їх складу. Таким чином, скоротливі вакуолі виводячи надлишок води з клітини регулюють внутрішньоклітинний тиск і запобігають її руйнуванню.



Мал. 17.5. Різні типи вакуоль. А. Вакуоля в рослинній клітині:

- 1 – вакуоля з клітинним соком; 2 – ядро;
- 3 – хлоропласти (фото зроблене за допомогою електронного мікроскопа).

Б. Будова скоротливої вакуолі інфузорії-туфельки (1) (фото зроблене за допомогою світлового мікроскопа)

✓ **Дізнайтеся більше** про пероксисоми за QR-кодом.



Узагальнення

До органел, оточених однією мембраною, належать: ендоплазматична сітка, комплекс Гольджі, вакуолі, лізосоми та ін. Вони беруть участь у формуванні єдиної мембранної системи клітини, якою транспортуються різні речовини. Ендоплазматична сітка буває зернистою та незернистою. У комплексі Гольджі накопичуються речовини, що надходять до нього; вони сортуються, оточуються мембранами. Лізосоми забезпечують процеси внутрішньоклітинного травлення та перетравлення структур клітин або ціліс-

них клітин, чий термін існування завершений. У вакуолях рослин накопичуються речовини, вони підтримують тургор клітини. Скоротливі вакуолі в одноклітинних евкаріотів, переважно мешканців прісних водойм, регулюють тиск усередині клітини.

Поміркуйте

1. У чому полягає просторовий і функціональний зв'язок між окремими одномембранними органелами клітин?
2. Яка роль лізосом під час перетворення пугловка, що має довгий хвіст, на дорослу жабу, позбавлену хвоста?
3. Як за допомогою розміру вакуоль рослинних клітин визначити – клітина молода чи стара?

§ 18. Будова евкаріотичної клітини: мітохондрії і пластиди

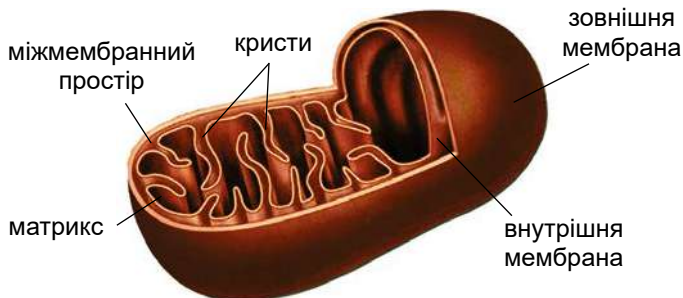


До складу оболонки клітини входить одна плазматична мембрана. Як у клітині могли з'явитися двомембранні органели?

Мітохондрії і пластиди – органели клітин евкаріотів, поверхневий апарат яких зазвичай складається з двох мембран, розділених міжмембранним простором. З іншими органелами клітини мітохондрії та пластиди просторово не пов'язані. Їхніми спільними функціями є участь в енергетичному обміні клітини.

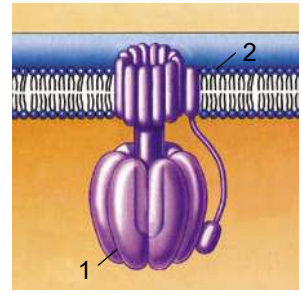
Мітохондрії (від грец. *мітос* – нитка і *хондріон* – зерно) є своєрідними генераторами енергії в клітині (мал. 18.1). Вони можуть мати різний вигляд: кулястих тілець, паличок, ниток. Число цих органел у клітинах різних типів може коливатись від 1 до 100 000 і більше й часто залежить від того, наскільки активно в клітині відбуваються процеси обміну речовин і перетворення енергії. Основна функція мітохондрій – **синтез молекул АТФ** (див. мал. 10.3). Цей процес забезпечує енергія, що вивільняється під час окиснення органічних сполук.

Цікаво знати. Клітини велетенських амеб з роду Хаос можуть мати до 300–500 тис. мітохондрій. А ось у паразитів кишки людини – гіардій (лямблій) мітохондрії взагалі відсутні, оскільки вони мешкають у середовищі з гострим дефіцитом кисню. Це пояснюється тим, що для синтезу молекул АТФ в мітохондріях потрібний кисень. Не мають мітохондрій й еритроцити людини. Вони їх втрачають разом з ядром у процесі дозрівання клітини.



Мал. 18.1.
Будова мітохондрії

Зовнішня мембрана мітохондрій гладенька і відокремлює органелу від цитозолу. Внутрішня мембрана утворює численні вгини всередину, які називають **кристами** (мал. 18.1). Вони можуть мати дископодібну, трубчасту або пластинчасту форму й часто розгалужуються. На внутрішній мембрані, з боку матриксу, розміщені особливі грибоподібні білкові структури – **АТФ-соми** (мал. 18.2). Вони містять комплекс ферментів, необхідних для синтезу АТФ. Внутрішній простір мітохондрій заповнений напіврідким середовищем – **матриksom**, у якому містяться власні рибосомы, ДНК, мРНК, тРНК та інші молекули. У матриксі також відбувається синтез білків, що входять до складу внутрішньої мембрани мітохондрій.



Мал. 18.2. Схема будови АТФ-соми:
1 – АТФ-сома;
2 – внутрішня мембрана мітохондрії

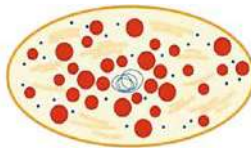


Зміни у спадковому матеріалі мітохондрій (мутації) можуть спричинити певні захворювання людини, оскільки мітохондрії відіграють важливу роль у метаболізмі клітини. Ці захворювання можуть бути пов'язані з розладами діяльності нервової системи, ураженням м'язів, розвитком діабету тощо.

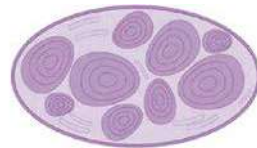
Пластиди (від грец. *пластидес* – виліплений, сформований) – органели клітин вищих рослин, різних груп водоростей та деяких одноклітинних еукаріотів. Відомо три типи пластид – хлоропласти, хромопласти, лейкопласти, які різняться за забарвленням, особливостями будови та функціями (мал. 18.3).



Хлоропласт



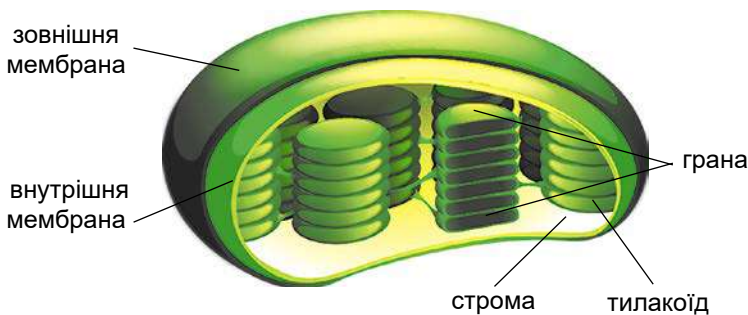
Хромопласт



Лейкопласт

Мал. 18.3. Особливості будови різних типів пластид

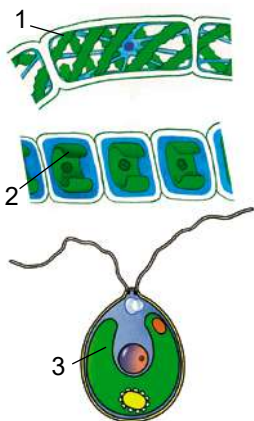
Хлоропласти (від грец. *хлорос* – зелений) – пластиди, зазвичай забарвлені в зелений колір завдяки наявності пігменту хлорофілу (мал. 18.4). У цих органелах відбуваються процеси фотосинтезу.



Мал. 18.4. Внутрішня будова хлоропласта

Як і в мітохондріях, зовнішня мембрана хлоропластів гладенька, а внутрішня утворює вирости, спрямовані всередину органели. Внутрішній простір хлоропласта називають **стромою** (мал. 18.4). З внутрішньою мембраною пов'язані структури, що мають назву **тилакоїди**. Це плоскі мембранні цистерни, зібрані в **грані**, які нагадують стоси монет. У тилакоїдах містяться основні пігменти (хлорофіли) та допоміжні (каротиноїди), а також усі ферменти, необхідні для фотосинтезу.

У стромі хлоропластів є ДНК, різні типи РНК, рибосоми й зерна запасного полісахариду – переважно крохмалю. На мембранах тилакоїдів також розміщені АТФ-соми, завдяки яким у хлоропластах, так само як і в мітохондріях, синтезуються молекули АТФ.



Мал. 18.5. Форма хлоропластів:

- 1 – стрічкоподібні в клітинах спірогіри;
- 2 – у вигляді незамкненого кільця в клітинах улотрикса;
- 3 – чашоподібна у клітині хламідомонади

Цікаво знати. Будова й забарвлення хлоропластів у різних груп водоростей і деяких одноклітинних еукаріотів можуть відрізнятися від таких у вищих рослин. Наприклад, у еуглени зеленої хлоропласти оточені трьома мембранами, а в діатомових і бурих водоростей – чотирма. Якщо в хлоропластах певних водоростей переважають інші пігменти, а не хлорофіл, вони можуть набувати відповідного кольору: бурожовтого – у бурих водоростей, червоного, помаранчево-жовтого чи синьо-зеленого – у червоних. Форма хлоропластів у водоростей теж буває різною: вони можуть нагадувати чашу, незамкнене кільце або спіральну стрічку (мал. 18.5).

Лейкопласти (від грец. *лейкос* – безколірний) – безбарвні пластиди різноманітної форми, у яких запасуються деякі сполуки (крохмаль, білки тощо) (мал. 18.3). У стромі лейкопластів містяться ферменти, які забезпечують синтез і розщеплення запасних речовин.

Хромопласти (від грец. *хроматос* – колір, фарба) – це пластиди, забарвлені в різні кольори: жовтий, червоний, фіолетовий (мал. 18.3). Таке забарвлення зумовлене накопиченням пігментів, переважно каротиноїдів. Хромопласти забарвлюють пелюстки квітів, плоди, листки та інші частини рослин. На відміну від хлоропластів, внутрішня мембранна система в хромопластах або повністю відсутня, або представлена лише окремими тилакоїдами.

Пластиди одного типу здатні перетворюватись на пластиди іншого. Так, лейкопласти можуть перетворюватись на хлоропласти або хромопласти. Під час старіння листків, стебел, дозрівання плодів у хлоропластах руйнується хлорофіл, спрощується будова внутрішньої мембранної системи, і вони перетворюються на хромопласти. Хромопласти на пластиди інших типів не перетворюються.

Автономія мітохондрій і хлоропластів у клітині. Для хлоропластів і мітохондрій, на відміну від інших органел, характерне функціонування, певною мірою незалежне від інших структур клітини. Ці органели містять власну спадкову інформацію – кільцеві молекули ДНК, а також здатні синтезувати власні білки. Вони не виникають з інших мембранних структур клітини, а розмножуються поділом.



Існує ендосимбіотична теорія, яка стверджує, що мітохондрії та хлоропласти могли виникнути в процесі еволюції еукаріотичної клітини внаслідок того, що з нею вступали у співіснування (симбіоз) клітини певних бактерій. Певні представники аеробних гетеротрофних бактерій стали «предками» мітохондрій, а ціанобактерії, здатні до фотосинтезу, – хлоропластів. Які особливості будови та функціонування мітохондрій і хлоропластів дозволяють робити такі припущення?

Узагальнення

Клітини еукаріотів зазвичай містять двомембранні органели: мітохондрії та пластиди. Мітохондрії – це переважно видовжені або округлі тільця, оточені двома мембранами: зовнішньою гладкою та внутрішньою, яка утворює численні складки – кристи. Внутрішній простір заповнений матриксом. На кристах розташовані АТФ-соми – структури, в яких синтезується аденозинтрифосфатна кислота (АТФ) – головне джерело енергії для клітини. Пластиди бувають трьох типів: лейкопласти – безбарвні, у них запасуються поживні речовини; хромопласти – містять червоні, жовті, помаранчеві та інші пігменти. Хлоропласти мають внутрішню мембранну систему, утворену тилакоїдами, з мембранами яких пов'язаний хлорофіл – пігмент, необхідний для здійснення фотосинтезу. Мітохондрії та пластиди мають власні молекули ДНК.



Поміркуйте

1. Мітохондрії є у клітинах більшості еукаріотів. Де їх більше – у рослинних, грибових чи тваринних клітинах? Чому?
2. Якій клітині людського організму потрібно мати більше мітохондрій: клітині мозку, шкіри чи кістки?
3. Як перетворюються пластиди у листках дерева під час осіннього листопаду?

§ 19. Будова еукаріотичної клітини: ядро



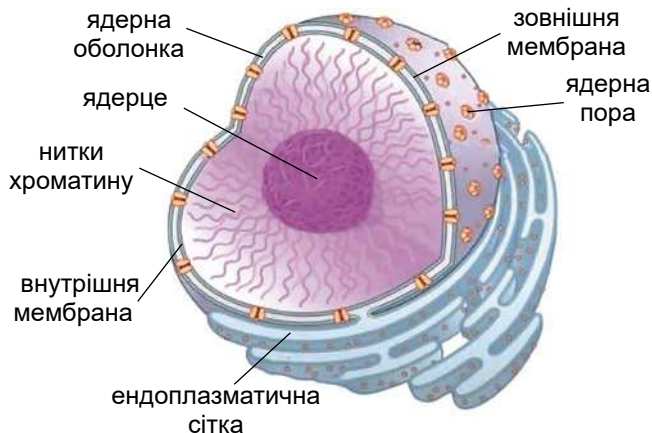
Які клітини мають більше одного ядра, а які – жодного?

Ядро – обов'язковий компонент будь-якої еукаріотичної клітини. У ньому зберігається спадкова інформація. Лише деякі типи клітин у зрілому стані не мають ядра – наприклад, еритроцити більшості ссавців і ситоподібні трубки вищих рослин. У таких клітинах ядро формується на ранніх етапах розвитку, але згодом руйнується. Після цього клітина втрачає здатність до розмноження.

У більшості клітин наявне одне ядро, проте трапляються багато-ядерні клітини – наприклад, у інфузорій, форамініфер, деяких водоростей, грибів і посмугованих м'язових волокон.

Ядро складається з поверхневого апарату та внутрішнього середовища (матриксу) (мал. 19.1).

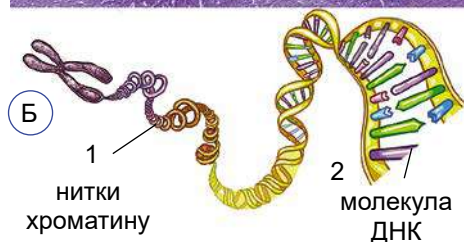
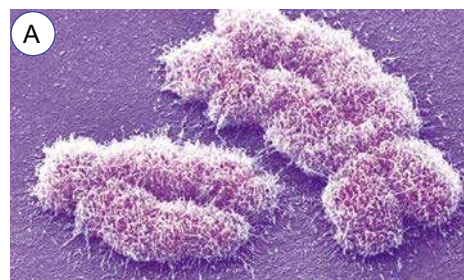
Поверхневий апарат ядра складається з двох мембран – зовнішньої та внутрішньої, між якими є заповнений рідиною щілиноподібний простір. У деяких ділянках ці мембрани з'єднуються навколо мікроскопічних отворів – *ядерних пор* (мал. 19.1).



Мал. 19.1. Будова ядра

Поверхневий апарат ядра регулює транспорт речовин між ядром і цитоплазмою. Із цитоплазми до ядра надходять синтезовані в ній білки, а з ядра виводяться різні типи молекул РНК. Білки ядерних пор відповідають за розпізнавання, сортування та транспортування цих сполук. Мембрани ядра функціонально пов'язані з мембранною системою ендоплазматичної сітки. На зовнішній мембрані ядра часто розташовані численні рибосоми.

Внутрішнє середовище ядра – **ядерний матрикс** – складається з ядерного соку, ядерець і ниток хроматину (мал. 19.1). **Хроматин** (від грец. *хроматос* – фарба) – ниткоподібні структури ядра, утворені з білків та нуклеїнових кислот. Під час поділу клітини нитки хроматину ущільнюються і з них формуються компактні тільця – **хромосоми** (мал. 19.2).



Мал. 19.2. А. Хромосоми людини (фото, зроблене за допомогою сканувального електронного мікроскопа). Б. Різні стани хроматину: 1 – ущільнений; 2 – неущільнений

Ядерний сік (**каріоплазма**, або **нуклеоплазма**) за будовою та властивостями нагадує цитоплазму. У ньому є білкові нитки (фібрили), які утворюють особливий внутрішньоядерний скелет. Він сполучає різні структури: ядерець, нитки хроматину, ядерні пори тощо.

Ядерець – щільні структури, що складаються з комплексів РНК з білками, хроматину і гранул, які слугують попередниками складових рибосом (див. мал. 16.4). У ядрі може бути від одного до багатьох ядерець (наприклад, у яйцеклітинах риб), які формуються на особливих ділянках хромосом. Функції ядерець полягають в утворенні рРНК та інших склад-

ників рибосом, які згодом виходять у цитоплазму, а також – синтезі ядерних білків.

Будова хромосом. Основу хромосом становить дволанцюгова молекула ДНК, зв'язана з ядерними білками (мал. 19.3).

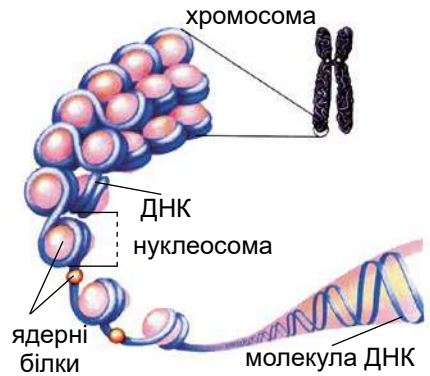
Молекули ДНК та білків у хромосомах розташовані певним чином. Ядерні білки утворюють особливі структури – **нуклеосоми** (від лат. *нуклеус* – ядро та грец. *сома* – тіло), навколо яких наче накручені нитки ДНК. Кожна нуклеосома складається з восьми білкових глобул. Така організація забезпечує компактну структуру молекул ДНК під час поділу клітин, довжина яких у розгорнутому стані значно перевищує довжину самих хромосом. Наприклад, довжина хромосом під час поділу клітини в середньому становить 0,5–1 мкм, а розгорнутих молекул ДНК – декілька сантиметрів і більше.

Щільне пакування молекули ДНК захищає їх від пошкоджень під час поділу клітини.

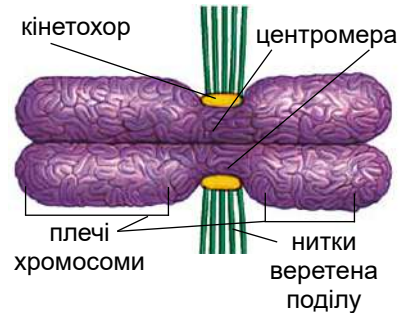
Кожна хромосома складається з двох поздовжніх структурних елементів – **хроматид**, з'єднаних у ділянці, яку називають *зоною первинної перетяжки*, або *центромерою* (мал. 19.4). Вона поділяє хромосоми на ділянки – *плечі*. На центромері формується білкова структура – **кінетохор** (грец. *кінео* – рухаюсь та *хорео* – іду вперед). Під час поділу клітини до кінетохора прикріплюються нитки веретена поділу, що забезпечує точний розподіл хроматид або хромосом між дочірніми клітинами. Кожна хроматида містить молекулу ДНК з подібним набором спадкової інформації.

Після розходження хроматид їх називають дочірніми хромосомами. У період між поділами кількість хроматид знову подвоюється завдяки здатності ДНК до реплікації (самоподвоєння) (див. мал. 9.4).

Хромосоми містять гени – ділянки молекули ДНК із закодованою інформацією про будову молекул білка або РНК. Підрахувати кількість хромосом і розглянути особливості їхньої будови за допомогою мікроскопа можливо лише під час поділу клітини. У період між послідовними поділами хромосоми розкручуються і мають вигляд ниток хроматину.



Мал. 19.3. Взаємодія ядерних білків і молекул ДНК у складі нитки хроматину

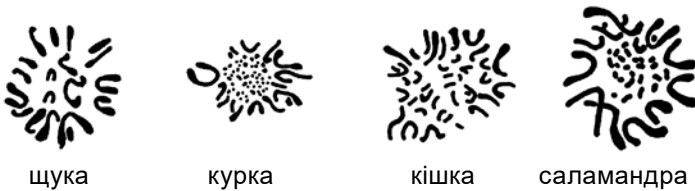


Мал. 19.4. Схема будови хромосоми

✓ **Дізнайтеся більше** про теломери за QR-кодом.



Каріотип. Клітини кожного виду тварин, рослин, грибів мають певний набір хромосом. Сукупність ознак повного хромосомного набору (кількість хромосом, їхня форма і розміри) називають **каріотипом** (від грец. *каріон* – ядро і *типос* – форма) (мал. 19.5). *Пригадаймо:* статеві клітини (гамети) мають лише половинний набір хромосом порівняно з нестатевими (соматичними). Кожному виду притаманний свій каріотип. Наприклад, у нестатевих клітинах мухи-дрозофіли всього 8 хромосом (4 пари), людини – 46 (23 пари). Постійність каріотипу забезпечує існування видів. Особливий каріотип особин одного виду дає їм змогу паруватися між собою, залишати життєздатних нащадків, і зазвичай унеможливорює їхнє парування з особинами інших видів. Якщо ж таке парування і відбувається, то нащадки або взагалі не утворюються, або ж вони нежиттєздатні чи нездатні до розмноження.

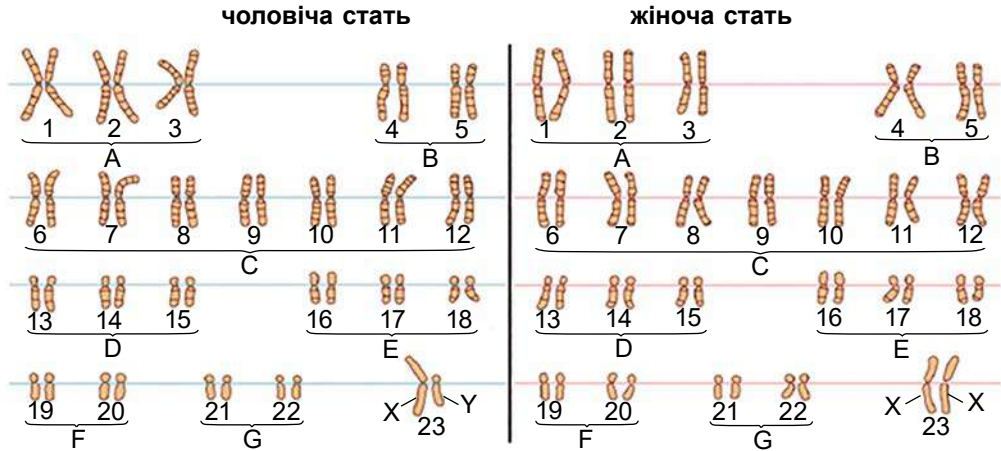


Мал. 19.5.
Каріотипи різних тварин

Хромосомний набір ядра може бути гаплоїдним, диплоїдним або поліплоїдним. У **гаплоїдному** (від грец. *гаплоос* – поодинокий) наборі (його умовно позначають $1n$) усі хромосоми відрізняються одна від одної за розмірами та будовою. У **диплоїдному** (від грец. *диплоос* – подвійний) наборі ($2n$) кожна хромосома має пару, подібну за розмірами та особливостями будови; їх називають **гомологічними**. Відповідно хромосоми, які відрізняються за особливостями будови та розмірами, називають **негомологічними**. Якщо кількість гомологічних хромосом перевищує дві, то такі хромосомні набори належать до **поліплоїдних** (від грец. *поліс* – численний): триплоїдних ($3n$), тетраплоїдних ($4n$) тощо.

У роздільностатевих тварин і дводомних рослин в особин певної статі хромосоми однієї з пар різняться між собою, тоді як в особин іншої – вони подібні. Це **статеві хромосоми**, які ще називають **гетерохромосомами** (від грец. *гетерос* – інший). Хромосоми інших пар, які подібні у всіх особин, незалежно від статі, називають **нестатевими**, або **аутосомами** (від грец. *аутос* – сам). Так, у хромосомному наборі людини є 44 аутосоми та дві гетерохромосоми (їх умовно позначають як X- та Y-хромосоми). У жінки є дві X-хромосоми, тоді як у чоловіка є лише одна X-хромосома та одна Y-хромосома (мал. 19.6). Зрозуміло, якщо аутосоми мають подібний набір генів, то в X- та Y-хромосом він різний.

Цікаво знати. Будову каріотипу застосовують у систематиці організмів для розпізнавання близьких за будовою видів, яких важко розпізнати за особливостями зовнішньої будови. Такі види називають **видами-двійниками** (мал. 19.7). Наприклад, вид полівка звичайна відрізняється від близького виду, полівки лучної, каріотипом (у полівки звичайної $2n = 46$, а у полівки лучної, $2n = 54$). Крім того, вивчення каріотипу дає змогу встановлювати ступінь історичної спорідненості між організмами (*поміркуйте* як).



Мал. 19.6. Кариотип людини (цифрами позначено пари гомологічних хромосом, латинськими літерами А–Г позначені 7 груп хромосом людини, які відрізняються розмірами та розташуванням центромери)



Мал. 19.7. Приклад видів-двійників: полівка європейська (А) та полівка лучна (Б); обидва види трапляються на території України

Функції ядра. Ядро зберігає спадкову інформацію і забезпечує її передачу від материнської клітини дочірнім. Крім того, воно є своєрідним центром керування процесами біосинтезу білків. Саме в ядрі з молекул ДНК на молекули мРНК переписується інформація про структуру білків. Згодом ця інформація передається до місця їхнього синтезу. В ядрі за участю ядерця утворюються складові рибосом. Завдяки реалізації спадкової інформації, закодованої в молекулах ДНК, ядро регулює біохімічні, фізіологічні й морфологічні процеси, які відбуваються в клітині.

Цікаво знати. У деяких одноклітинних тварин, як-от інфузорії, є ядра двох типів: генеративні та вегетативні. Ядра першого типу забезпечують зберігання та передавання спадкової інформації дочірнім клітинам. Основні функції другого – участь у реалізації спадкової інформації.

Узагальнення

Ядро – обов'язковий компонент еукаріотичної. Воно оточене подвійною мембраною. Обмін речовин між ядром і цитоплазмою забезпечують ядерні пори в оболонці ядра. Внутрішній уміст – ядерний матрикс. У його складі: ядерний сік, ядерця, нитки хроматину. Набір хромосом, характерний для певного виду, назива-

ють каріотипом. Хромосоми бувають нестатеві (аутосоми) та статеві (гетерохромосоми), що визначають певну стать організму. Гомологічні хромосоми – це пари хромосом, які містять подібний набір генів. У негомологічних хромосом він різний. Функції ядра: збереження спадкової інформації та участь в її передачі дочірнім клітинам; регуляція процесів, що відбуваються у клітині, зокрема контроль за біосинтезом білків та інші.

Поміркуйте

1. Чому існування видів залежить від стабільності їхніх каріотипів?
2. Які органічні сполуки входять до складу хромосом?
3. Які клітини людського організму є без'ядерними? Чому?



Лабораторне дослідження «Вивчення структурно-функціональної різноманітності клітин еукаріотів».

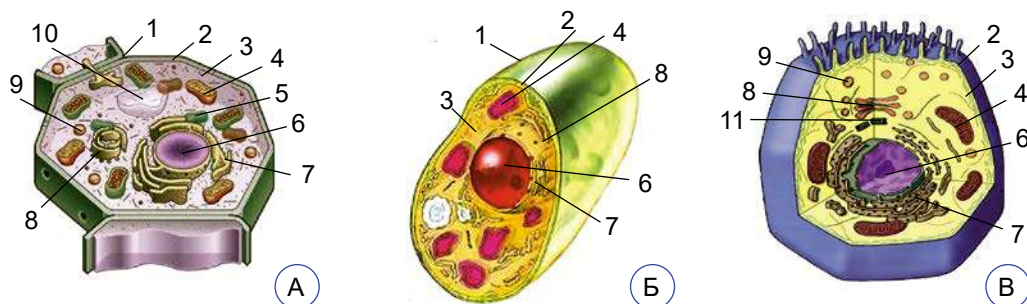


§ 20. Будова прокаріотичної клітини



Клітини яких організмів (прокаріотичних чи еукаріотичних) більш пристосовані до умов середовища існування?

Порівняльна характеристика еукаріотів і прокаріотів. Пригадаймо: залежно від рівня організації клітини всі організми поділяють на дві групи – прокаріоти та еукаріоти. Клітини еукаріотів (тварин, рослин і грибів) мають ядро. Їхня цитоплазма поділена клітинними мембранами на окремі функціональні ділянки, містить різноманітні органили. Проте в будові клітин різних представників еукаріотів є й певні відмінності. Пригадайте їх, уважно розглянувши малюнок 20.1.

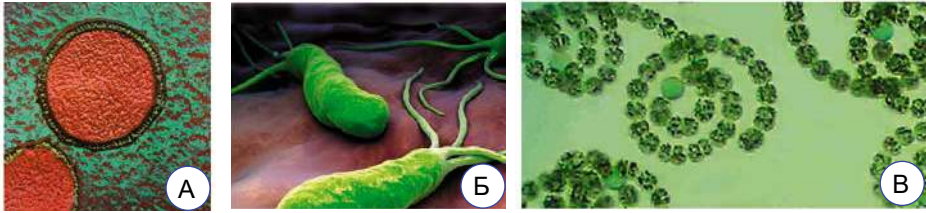


Мал. 20.1. Будова клітин різних представників еукаріотів: А. Рослин, Б. Грибів, В. Тварин: 1 – клітинна стінка; 2 – плазматична мембрана; 3 – цитоплазма; 4 – мітохондрія; 5 – хлоропласт; 6 – ядро; 7 – ендоплазматична сітка; 8 – комплекс Гольджі; 9 – лізосома; 10 – вакуоля; 11 – клітинний центр. **Завдання:** знайдіть органили спільні та відмінні для клітин цих груп організмів

Клітини прокаріотів мають простішу порівняно з еукаріотами будову. Ознайомимосся з особливостями організації їхніх клітин детальніше.

Будова клітин прокаріотів. **Прокаріоти** (від лат. *про* – перед, замість та грец. *каріон* – ядро) існують на нашій планеті понад 2,5 млрд років.

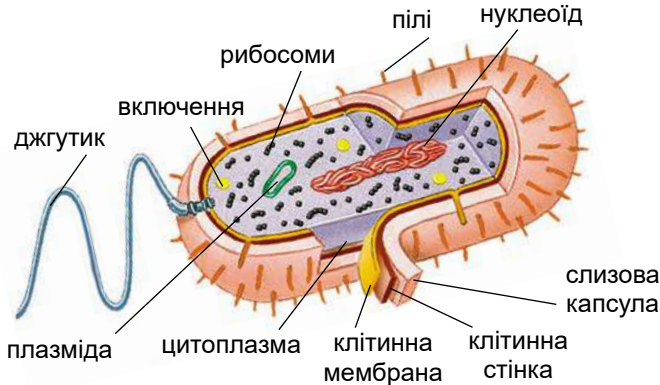
До них належать археї (одноклітинні прокаріоти з унікальними біохімічними й екологічними властивостями) та різні групи бактерій (серед яких і ціанобактерії) (мал. 20.2).



Мал. 20.2. Представники прокаріотів. А. Археї. Б. Бактерії роду Гелікобактер. В. Ціанобактерії

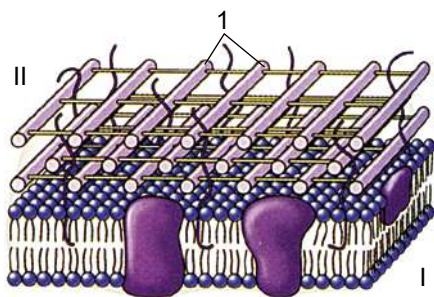
Цікаво знати. Бактерії роду Гелікобактер (мал. 20.2, Б) мешкають у шлунку та дванадцятипалій кишці. Певні штами цього виду бактерій здатні спричиняти в людей, насамперед з послабленим імунітетом, запалення слизової оболонки шлунка (гастрити), дванадцятипалої кишки (дуоденіти), утворення виразок.

Як і клітини еукаріотів, клітини прокаріотів мають поверхневий апарат і цитоплазму, в якій розташовані нечисленні органели та різноманітні вклучення (мал. 20.3). У клітинах прокаріотів немає ядра й таких органел, як мітохондрії, пластиди, ендоплазматична сітка, комплекс Гольджі, лізосоми, клітинний центр тощо. Така простіша будова прокаріотів свідчить про давність їхнього походження.



Мал. 20.3. Схема будови клітини прокаріотів

Цитоплазма клітин прокаріотів оточена оболонкою, до складу якої обов'язково входять плазматична мембрана та клітинна стінка. Зовні від клітинної стінки можуть бути розташовані слизова капсула, пілі та джгутики (мал. 20.4). Будова клітинної стінки прокаріотів є досить складною. У бактерій вона містить полімерну сполуку муреїн (мал. 20.4, II, 1). Муреїн (його ще називають пептидоглікан) складається з полісахаридних волокон, з'єднаних пептидними перемичками, і утворює сітчасту структуру, що надає клітинній стінці жорсткості. У клітинній стінці архей муреїн відсутній.



Мал. 20.4. Схема будови клітинної стінки прокаріотів: I – плазматична мембрана; II – клітинна стінка; 1 – муреїн

стінкою. Вона забезпечує кращий захист вмісту клітини. Такі бактерії стійкі до дії деяких антибіотиків, наприклад пеніциліну або актиноміцину.

Над клітинною стінкою у багатьох бактерій може розташовуватися захисна слизова капсула, утворена з полісахаридів (мал. 20.3). Вона нещільно зв'язана з поверхнею клітини й легко руйнується під дією певних речовин.

Поверхню клітин багатьох прокаріотів вкривають *пілі* (ворсинки) (мал. 20.3). Ці мікроскопічні ниткоподібні білкові структури (завдовжки до 20 мкм) беруть участь у прикріпленні до різних субстратів. Особлива група пілей (їх називають статевими) також забезпечує обмін спадковим матеріалом між двома клітинами бактерій.

У цитоплазмі клітин прокаріотів містяться рибосоми та різноманітні включення (мал. 20.3). Рибосоми прокаріотів дрібніші, ніж у клітинах еукаріотів, за розмірами вони подібні до рибосом мітохондрій і пластид.

Плазматична мембрана клітин прокаріотів може утворювати гладенькі або складчасті вгини в цитоплазмі. На відміну від клітин еукаріотів, ці вгини не поділяють цитоплазми на окремі функціональні ділянки (компартменти). На складчастих ділянках мембрани можуть міститися дихальні ферменти або рибосоми, а на гладеньких – фотосинтетичні пігменти.

У цитоплазмі ціанобактерій міститься система мембран – *тилакоїдів* (мал. 20.5). Ці мембранні структури забезпечують здійснення фотосинтезу та дихання. У деяких прісноводних бактерій і архей у цитоплазмі є газові пухирці, оточені мембраною. На відміну від вакуоль клітин рослин, які заповнені клітинним соком, ці пухирці заповнені газом. Вони зменшують питому масу клітини, що полегшує її перебування у товщі води.

Замість ядра в клітинах прокаріотів є *ядерна зона* (нуклеоїд) (мал. 20.3; 20.5). Там розташований спадковий матеріал – кільцева молекула ДНК, яка в певному місці прикріплена до плазматичної мембрани. У прокаріотів молекули ДНК не пов'язані з ядерними білками. Отже, типові хромосоми, які в клітинах еукаріотів розташовані в ядрі, у прокаріотів відсутні.



Мал. 20.5. А. Будова клітини ціанобактерії. Б Ціанобактерії під мікроскопом

Крім молекули ДНК, розташованої в ядерній зоні, у цитоплазмі клітин прокаріотів присутні невеликі, зазвичай кільцеві молекули ДНК – **плазмід**и. Як і молекула ДНК, розташована у ядерній зоні, вони здатні до самоподвоєння. Часто плазмід містять гени, які забезпечують пристосування до умов середовища існування, зокрема стійкість до певних антибіотиків. Клітини прокаріотів можуть обмінюватись плазмідом. Це може відбуватись як за безпосереднього контакту між двома клітинами, так і шляхом захоплення плазмід із зовнішнього середовища.

✓ **Дізнайтеся більше** про спадковий матеріал клітин прокаріотів за QR-кодом.



Клітини деяких бактерій мають органели руху – один, декілька або багато джгутиків (мал. 20.3). Джгутики можуть бути набагато довшими за саму клітину, проте їхній діаметр незначний. Тому у світловий мікроскоп вони не помітні. Джгутики прокаріотів лише зовні нагадують джгутики клітин еукаріотів. Їхня будова простіша: вони складаються з однієї трубчастої молекули особливого білка.

Цікаво знати. Джгутики бактерій здатні обертатися (це один з небагатьох прикладів використання в природі принципу колеса) і, як пропелер гвинтомоторного літака, тягнути бактеріальну клітину за собою.

Узагальнення

Клітини еукаріотів мають оформлене ядро, оточене ядерною оболонкою. У прокаріотів ядро відсутнє, а спадковий матеріал зосереджений у ядерній зоні (нуклеоїді) – ділянці цитоплазми, де міститься кільцева молекула ДНК. Крім того, у цитоплазмі можуть бути дрібні додаткові молекули ДНК – плазмід. До прокаріотів належать археї та бактерії. Клітини бактерій мають плазматичну мембрану, цитоплазму з немембранними структурами, а також надмембранні утвори – клітинну стінку та слизову капсулу.

Поміркуйте

1. Чим можна пояснити простішу будову клітин прокаріотів порівняно з клітинами еукаріотів? Відповідь обґрунтуйте.

2. Як відбувається передача спадкового матеріалу між бактеріальними клітинами?
3. Для чого бактеріальні клітини запасують поживні речовини і які?



Практична робота «Порівняльна характеристика прота еукаріотичної клітин».



§ 21. Обмін речовин та енергії в клітині



Навіщо організмам обмін речовин та енергії?

Загальна характеристика процесів метаболізму. Процеси метаболізму – це складний ланцюг перетворень різноманітних сполук, починаючи від моменту надходження їх в організм або окрему клітину й закінчуючи видаленням кінцевих продуктів обміну речовин у зовнішнє середовище. Кінцевими продуктами окиснення вуглеводів, жирних кислот та амінокислот зазвичай є вуглекислий газ і вода, які виводяться з організму. Для амінокислот додатковим продуктом розщеплення є сполуки, що містять Нітроген: сечовина, сечова кислота, амоніак.

Процеси видалення з організму кінцевих продуктів обміну речовин має назву **екскреція** (від лат. *екскреціо* – виділення).

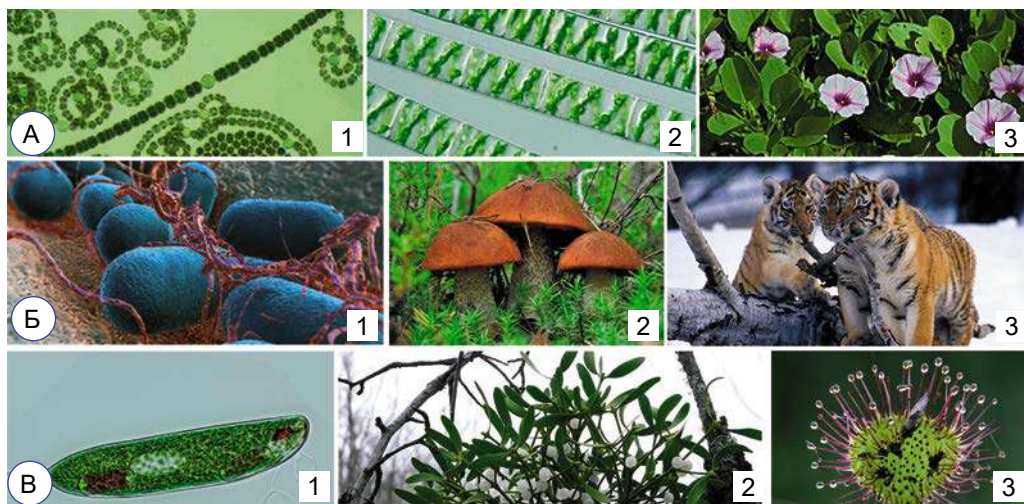
Сукупність реакцій синтезу, які забезпечують ріст і розвиток як окремих клітин, так і цілісних організмів, поновлення їхнього хімічного складу, має назву **пластичний обмін** (від грец. *пластос* – створений). Ці процеси ще називають **анаболізмом** (від грец. *анаболе* – підйом), або **процесами асиміляції** (від *асиміляціо* – уподібнення). На їхнє здійснення витрачається певна кількість енергії. Прикладами процесів асиміляції є синтез амінокислот, моносахаридів, жирних кислот, нуклеотидів, полісахаридів, білків, нуклеїнових кислот, АТФ тощо.

Пригадаймо: одні організми здатні синтезувати органічні сполуки з неорганічних, інші – ні. Ті організми, які здатні синтезувати органічні речовини з неорганічних, називають **автотрофами** (від грец. *аутос* – сам і *трофе* – споживати) (мал. 21.1, А). При цьому одні з них здатні до фотосинтезу, їх називають **фототрофними** (від грец. *фотос* – світло і *трофе*). До них належать вищі рослини, водорості, деякі бактерії (наприклад, ціанобактерії). Енергію світла, яку вони отримують з довкілля, ці організми використовують для забезпечення власних процесів життєдіяльності або ж накопичують її у вигляді енергії хімічних зв'язків синтезованих ними сполук. Інші автотрофні організми для синтезу органічних сполук з неорганічних використовують енергію, що вивільняється під час здійснення хімічних реакцій (деякі бактерії: нітрифікувальні, залізо- та сіркобактерії). Їх називають **хемотрофними** (від грец. *хемо* – хімічний і *трофе*).

Усі гриби, багатоклітинні тварини, більшість протозоїв і бактерій належать до **гетеротрофів** (від грец. *гетерос* – різний і *трофе*) (мал. 21.1, Б). Для них джерелом енергії є органічні сполуки, утворені іншими організмами. Ці органічні сполуки вони отримують з їжею (інші організми, їхні рештки або продукти життєдіяльності).

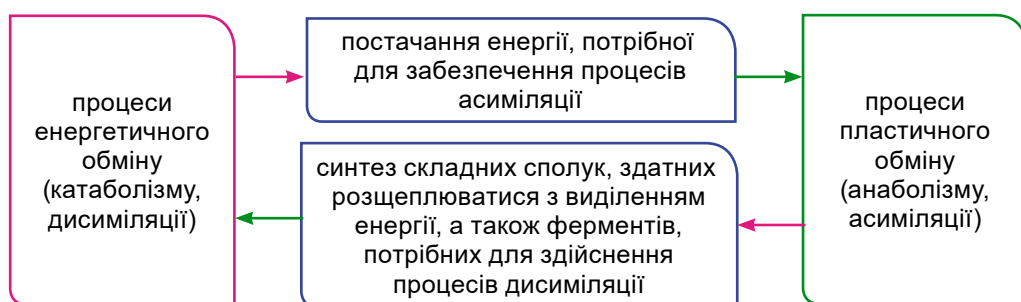
Існують і **міксотрофи** (від грец. *міксис* – змішування і *трофе*) – організми зі змішаним типом живлення (хламідомонада, еуглена зеле-

на; мал. 21.1, В). Такі організми здатні не лише синтезувати органічні сполуки з неорганічних, а й поглинати готові органічні речовини.



Мал. 21.1. А. Автотрофні організми: 1 – ціанобактерії; 2 – зелені водорості; 3 – квіткові рослини. Б. Гетеротрофні організми: 1 – гетеротрофні бактерії; 2 – гриби; 3 – тварини. В. Міксотрофні організми: 1 – евглена зелена; 2 – омела; 3 – росичка

Сукупність реакцій розщеплення складних сполук у клітині або цілісному організмі до простіших, що супроводжуються виділенням енергії, називають **енергетичним обміном, катаболізмом** (від грец. *катаболе* – руйнування), або процесами **дисиміляції** (від лат. *дисиміляціо* – розподібнення). Вони ґрунтуються на реакції безкисневого розщеплення складних сполук до простіших або на реакції їхнього окиснення. Процеси пластичного та енергетичного обмінів тісно взаємопов'язані (мал. 21.2).



Мал. 21.2. Схема, що ілюструє зв'язок між процесами асиміляції та дисиміляції

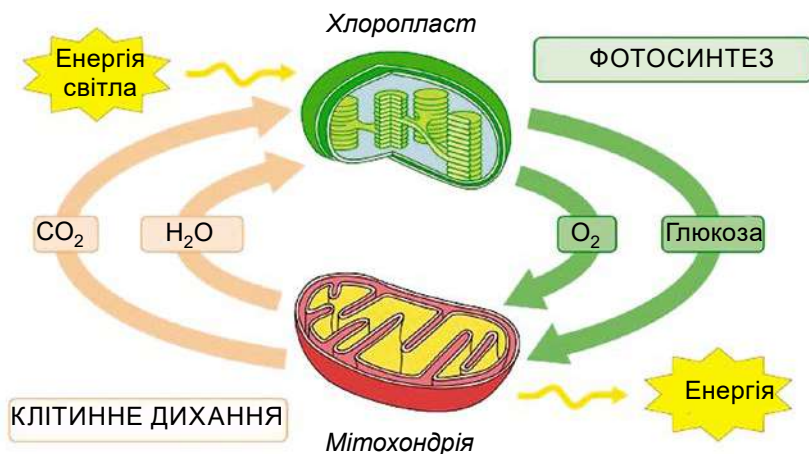
Єдність та узгодженість процесів пластичного та енергетичного обмінів забезпечує функціонування організмів як цілісних біологічних систем, здатних до саморегуляції та самовідтворення.

Дихання. Одним з прикладів процесів енергетичного обміну (дисиміляції) є процеси дихання організмів. *Пригадаймо:* у людини, тварин,

рослин **дихання** – це сукупність процесів, які забезпечують надходження в організм кисню, використання його для окиснення органічних речовин у клітинах (білків, жирів, вуглеводів) задля отримання енергії – **клітинне дихання**, а також видалення з організму вуглекислого газу, що утворився під час реакцій окиснення. У деяких прокаріотів та одноклітинних еукаріотів (як-от у паразитів кишки людини – гіардії (лямблії), дизентерійної амеби) кисень не бере участі у процесах дихання, тому його називають **анаеробним**.

Фізіологічне значення клітинного дихання полягає у тому, що багати на хімічну енергію сполуки за участю кисню окиснюються до простих, бідних на енергію (CO_2 , H_2O). У результаті цього вивільняється енергія, потрібна для забезпечення різноманітних процесів життєдіяльності.

У процесі фотосинтезу рослини поглинають і використовують вуглекислий газ, а виділяють у довкілля кисень. Але одночасно з фотосинтезом вони й дихають, поглинаючи кисень й виділяючи вуглекислий газ (мал. 21.3). Молекулярні механізми клітинного дихання в рослин і тварин загалом подібні.



Мал. 21.3. Схема, що ілюструє зв'язок між процесами фотосинтезу та клітинним диханням у фототрофних організмів

Узагальнення

Метаболізм – це сукупність усіх перетворень речовин, що відбуваються в клітині від моменту їх надходження до виведення кінцевих продуктів обміну (процесів екскреції). Залежно від типу живлення організми поділяють на автотрофів, гетеротрофів і міксотрофів. Метаболізм охоплює два протилежні за напрямом процеси: асиміляцію (пластичний обмін, або анаболізм), під час якої утворюються складні органічні сполуки, і дисиміляцію (енергетичний обмін, або катаболізм), що супроводжується їх розщепленням і вивільненням енергії. Прикладом енергетичного обміну є дихання – процес окиснення органічних речовин із виділенням енергії.

Поміркуйте

1. Що спільного й відмінного між фототрофними та хемотрофними організмами?
2. Як організми, що живуть за відсутності кисню, забезпечують свої потреби в енергії?
3. Проаналізуйте корені слів, які входять до синонімічних назв процесів метаболізму. Згадайте спільнокореневі слова, що допоможуть запам'ятати ці терміни.

§ 22. Етапи енергетичного обміну



За рахунок чого молекули АТФ можуть вивільняти і накопичувати енергію?

Етапи енергетичного обміну. У біологічних системах енергія існує в різних формах, здатних перетворюватись одна на іншу. Це забезпечує нормальний перебіг різноманітних процесів життєдіяльності (рух, проведення нервових імпульсів, скорочення м'язів тощо). Частина енергії, яка виділяється під час розщеплення органічних речовин, розсіюється у вигляді тепла, підтримуючи певну температуру клітини або цілісного організму. Інша частина – запасається у вигляді високоенергетичних хімічних зв'язків певних сполук, які синтезуються у клітинах. *Пригадаймо:* універсальною сполукою, що бере участь у процесах перетворення енергії в клітинах, є аденозинтрифосфатна кислота (АТФ) (див. мал. 10.3).

Енергетичний обмін відбувається в три послідовних етапи: підготовчий, безкисневий і кисневий. Початковий етап енергетичного обміну – **підготовчий** – перебігає в цитоплазмі клітин усіх організмів, а в більшості багатоклітинних тварин і людини – також і в порожнині органів травної системи. На підготовчому етапі складні органічні сполуки (біополімери) під дією ферментів розщеплюються на простіші – мономери (*пригадаймо*, на які сполуки розщеплюються білки, жири, полісахариди, нуклеїнові кислоти). Ці процеси супроводжуються вивільненням енергії, але її кількість незначна, і вона розсіюється у вигляді тепла. Це тепло організми можуть використовувати для підтримання температури власного тіла. На підготовчому етапі енергетичного обміну молекули АТФ не синтезуються.

За підготовчим етапом настає **безкисневий**, який відбувається в клітинах. Його ще називають **анаеробним** (від грец. *ан* – частинка, що означає заперечення, та *аер* – повітря), оскільки сполуки, які утворилися на попередньому етапі, зазнають подальшого багатоступеневого розщеплення, але без участі кисню. Цей етап енергетичного обміну обов'язковий для всіх організмів – як анаеробів, так і аеробів. Деякі мікроорганізми й безхребетні тварини (здебільшого паразити) не можуть використовувати кисень у процесах енергетичного обміну. Необхідну енергію вони отримують тільки завдяки анаеробному розщепленню органічних сполук (тобто **анаеробному диханню**).

✓ **Дізнайтеся більше** про організми, які мешкають у безкисневому середовищі, за QR-кодом.



Гліколіз. Процеси безкисневого розщеплення вуглеводів, або анаеробне дихання, узагальнено називають **гліколізом** (від грец. *глікис* –

солодкий і *лізис* – розщеплення). Гліколіз є енергетично малоефективним процесом: лише близько 35–40 % вивільненої енергії запасається у вигляді макроергічних зв'язків молекул АТФ. У результаті утворюються лише дві молекули АТФ (у перерахунку на одну молекулу глюкози), а решта енергії розсіюється у вигляді тепла. Продуктом такого розщеплення є дві молекули *піровиноградної кислоти (пірувату)*, що складаються з трьох атомів Карбону.

Попри невисоку енергетичну ефективність, гліколіз має велике фізіологічне значення. Завдяки йому організми можуть отримувати енергію за відсутності або нестачі кисню, а проміжні продукти цього процесу використовуються для синтезу різних біологічно важливих сполук. Крім того, кінцеві продукти гліколізу можуть зазнавати подальших ферментативних перетворень – за наявності кисню (а за відсутності – відновлюватися до *молочної кислоти (лактату)* і виводитися з клітини).

Цікаво знати. Подібними до гліколізу є процеси бродіння – молочнокислого (яке здійснюють молочнокислі бактерії), спиртового (яке забезпечують дріжджі та деякі бактерії) тощо. У разі молочнокислого бродіння кінцевим продуктом є молочна кислота, а за спиртового – етиловий спирт. Ці процеси широко використовують у господарстві. Молочнокисле бродіння застосовують для консервування деяких продуктів харчування (наприклад, квашення овочів, виготовлення сиру), що забезпечує їхнє тривале зберігання, адже молочна кислота пригнічує ріст і розмноження шкідливих мікроорганізмів. Також на процесі молочнокислого бродіння ґрунтується виробництво кисломолочних продуктів (ряжанки, сметани), силосування кормів для тварин (консервації зеленої рослинної маси) і промислове одержання молочної кислоти, на процесах спиртового бродіння – спиртів.

Більшість організмів у процесах енергетичного обміну здатні використовувати кисень. Але в таких організмів кисневому етапу енергетичного обміну завжди передують безкисневий.

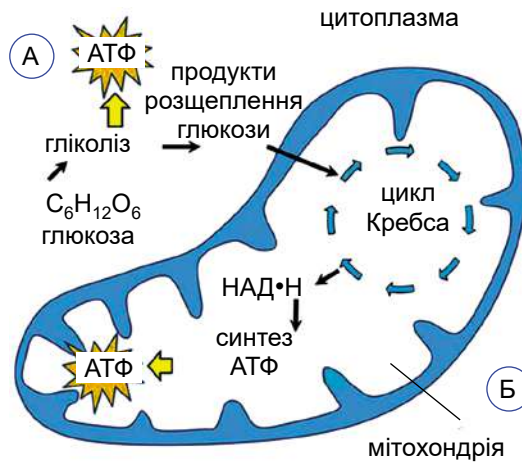
Кисневий етап. Завершальним етапом енергетичного обміну є *кисневий (аеробне дихання)*. Він може відбуватись лише за наявності кисню (в аеробних умовах). На цьому етапі органічні сполуки, що утворилися на попередньому – безкисневому, окиснюються в клітинах до кінцевих продуктів – вуглекислого газу (CO_2) та води (H_2O).

Процеси біологічного окиснення органічних сполук, пов'язані з відщепленням від них атомів Гідрогену, відбуваються в мітохондріях за участю відповідних ферментів. Завдяки цим процесам організм накопичує значну кількість енергії у вигляді макроергічних зв'язків молекул АТФ. Оскільки кисневий етап енергетичного обміну можливий лише за умов наявності кисню, його недостатнє надходження в клітини аеробних організмів здатне порушити процеси метаболізму та спричинити смерть.

Важливе місце серед біохімічних перетворень, які відбуваються під час аеробного етапу енергетичного обміну, належить циклу біохімічних реакцій, так званому **циклу Кребса**. Його ще називають **циклом трикарбонових кислот**, оскільки у цих реакціях беруть участь сполуки, що містять два або три атоми Карбону (вони утворюються як проміжні продукти розщеплення молекул вуглеводів, жирів та білків). Цей цикл біохімічних реакцій 1937 р. відкрив англійський біохімік

Ганс Адольф Кребс (1900–1981), за що у 1953 р. він здобув Нобелівську премію з фізіології або медицини разом з американським біохіміком німецького походження Фріцом Альбертом Ліпманом (1899–1986).

Реакції циклу Кребса відбуваються в матриксі мітохондрій (див. мал. 18.1). Вони становлять послідовні перетворення органічних кислот (насамперед лимонної), в результаті яких атоми Карбону доокиснюються до молекул CO_2 . Вуглекислий газ залишає мітохондрії й зрештою виводиться з клітини. У результаті біохімічних реакцій циклу Кребса звільняється Гідроген. Атоми Гідрогену передаються спеціальним сполукам – переносникам Гідрогену, найважливішим з яких є НАД. Приєднання атомів Гідрогену перетворює цю сполуку на відновлену форму – НАД · Н (знайдіть цей процес на малюнку 22.1).



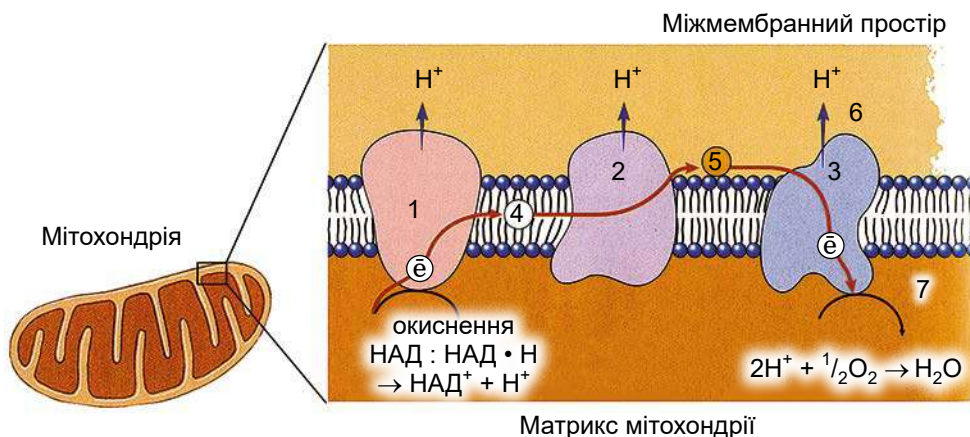
Мал. 22.1. Зв'язок між безкисневим (А) та кисневим (Б) етапами енергетичного обміну

Цікаво знати. Повна назва НАД – *нікотинамідаденіндинуклеотид* (не для запам'ятовування, але спробуйте її проаналізувати). Ця сполука – компонент ферментів, присутніх в усіх живих клітинах, що забезпечують важливі окисно-відновні реакції енергетичного та пластичного обміну.

Під час окисно-відновних реакцій циклу Кребса електрони переносяться від відновника (сполуки, яка їх постачає, у цьому разі – органічних кислот) до окисника (сполуки, яка їх сприймає, наприклад, НАД). За участю специфічних ферментів атоми Гідрогену окиснюються, тобто втрачають електрони (e^-). При цьому електрони, які вивільнилися, за допомогою послідовного ряду сполук-переносників, розташованих у внутрішній мембрані мітохондрії, транспортуються до її внутрішньої поверхні, тоді як йони Гідрогену (H^+) накопичуються на її зовнішній поверхні (мал. 22.2). Цей механізм дістав назву **ланцюг перенесення електронів**, або **дихальний ланцюг**.

Отже, функціонування дихального ланцюга супроводжується утворенням різниці концентрації йонів Гідрогену (H^+) з різних боків внутрішньої мембрани мітохондрій (мал. 22.2). Така різниця концентрацій йонів Гідрогену має потенціальну енергію, здатну виконувати

корисну роботу: переміщення цих йонів з ділянки з високою концентрацією в ділянку з низькою концентрацією супроводжується вивільненням енергії, частина якої слугує для синтезу молекул АТФ. Внутрішня мітохондріальна мембрана непроникна для йонів Гідрогену (H^+). Їх переміщення можливе тільки через спеціальний канал, який є структурним елементом особливого ферментного комплексу – АТФ-соми (див. мал. 18.2). *Пригадаймо*: у складі АТФ-соми є особливі ферменти, за участі яких і синтезуються молекули АТФ.



Мал. 22.2. Ланцюг перенесення електронів у внутрішній мембрані мітохондрії. Електрони (e^-), яким надана енергія, транспортуються молекулами – мобільними переносниками (4) на зовнішню поверхню внутрішньої мембрани мітохондрії (5 – білкова сполука, що забезпечує подальший транспорт електронів). Три білкові молекули (1–3) використовують частину звільненої енергії електронів для перекачування йонів Гідрогену (H^+) у простір між двома мембранами мітохондрії (6). Зрештою електрони взаємодіють з протонами та киснем, утворюючи воду (7)

Отже, аеробний (кисневий) етап енергетичного обміну відіграє основну роль у забезпеченні клітини енергією. На цьому етапі вивільняється велика кількість енергії, достатня для синтезу 36 молекул АТФ. Ефективність заощадження енергії на аеробному (кисневому) етапі енергетичного обміну становить близько 70 %, що значно більше, ніж на безкисневому (анаеробному) етапі.

Якщо врахувати, що на безкисневому (анаеробному) етапі утворюються 2 молекули АТФ, то загалом повне розщеплення однієї молекули глюкози забезпечує утворення 38 молекул АТФ. Завершується енергетичний обмін виведенням кінцевих продуктів (молекул H_2O та CO_2) з організму.

Узагальнення

Енергетичний обмін відбувається в три послідовних етапи: підготовчий, безкисневий (анаеробний) та кисневий (аеробний). Підготовчий етап перебігає в травному каналі людини і тварин та цитоплазмі клітин. Під час нього складні органічні речовини

(полімери) розщеплюються до простіших – мономерів. Безкисневий етап відбувається в цитоплазмі клітин і забезпечує часткове розщеплення органічних сполук без участі кисню. Кисневий етап відбувається в мітохондріях і включає цикл Кребса, перебіг якого відбувається в матриксі мітохондрій. З внутрішньою мембраною мітохондрій пов'язаний дихальний ланцюг (його ще називають електронно-транспортним ланцюгом), який включає систему сполук – переносників електронів. Дихальний ланцюг пов'язаний з процесами синтезу молекул АТФ. Утворення молекул АТФ пов'язане зі спеціалізованими структурами – АТФ-сомами, розташованими на внутрішній мембрані мітохондрій. Кінцевими продуктами енергетичного обміну є молекули АТФ, CO_2 і H_2O .

Поміркуйте

1. Чому розщеплення органічних сполук за присутності кисню виявляється енергетично ефективнішим, ніж за його відсутності?
2. Які особливості будови мітохондрій сприяють ефективному перебігу кисневого етапу енергетичного обміну?
3. Як нестача кисню впливає на функціонування організму людини?

§ 23. Особливості процесів пластичного обміну. **Фотосинтез**



Яким би було існування живих істот на Землі без процесу фотосинтезу?

Біохімічні особливості процесів пластичного обміну. Основні процеси пластичного обміну – це біосинтез білків, вуглеводів, ліпідів, нуклеїнових кислот. Унаслідок процесів пластичного обміну (анаболізму, або реакцій асиміляції) зі сполук, які надходять у клітину, утворюються потрібні для неї органічні речовини.

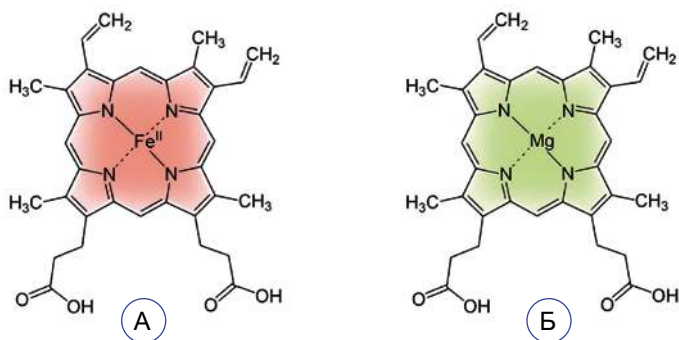
Процеси асиміляції відбуваються й під час фотосинтезу та хемосинтезу. Проте слід пам'ятати, що під час фотосинтезу та хемосинтезу відбуваються також процеси, характерні для енергетичного обміну, – синтез молекул АТФ, які є акумуляторами енергії в клітині.

На синтез складних сполук з простіших витрачається певна кількість енергії, накопиченої в ході реакцій енергетичного обміну. Зі свого боку, продукти пластичного обміну застосовуються для оновлення хімічного складу клітин, забезпечення їхнього росту, формування тканин та органів тощо. Створені під час процесів асиміляції органічні сполуки слугують тим резервом, який може бути задіяний під час реакцій енергетичного обміну: їх розщеплення супроводжується виділенням енергії (див. мал. 21.2).

Процес фотосинтезу. Серед багатьох біохімічних процесів, які відбуваються за участю живих істот, є один, без якого життя на нашій планеті існувати не може. Цей унікальний процес – **фотосинтез** (від грец. *фото* – світло та *синтезис* – синтез): утворення органічних сполук з неорганічних завдяки перетворенню світлової енергії на енергію хімічних зв'язків синтезованих вуглеводів.

Унікальність процесу фотосинтезу, який відбувається в клітинах ціанобактерій, водоростей і рослин, полягає в тому, що реакції світлової фази є процесами енергетичного обміну, а реакції темної – пластичного.

У клітинах рослин і водоростей фотосинтез відбувається в хлоропластах. У них містяться фотосинтезувальні пігменти, найважливішими з яких є **хлорофіли** (від *хлорос* – зелений та *філлон* – листок). Молекула хлорофілу за своєю структурою нагадує молекулу, що входить до складу гемоглобіну, але в ній замість Феруму присутній Магній (мал. 23.1). Хлорофіл, а також допоміжні пігменти (каротиноїди, забарвлені у червоний або жовтий колір), задіяні у фотосинтезі, входять до складу білків, розташованих у мембранах структур хлоропластів – тилакоїдів (див. мал. 18.4).



Мал. 23.1. Структурні формули гемоглобіну (А) і хлорофілу (Б)

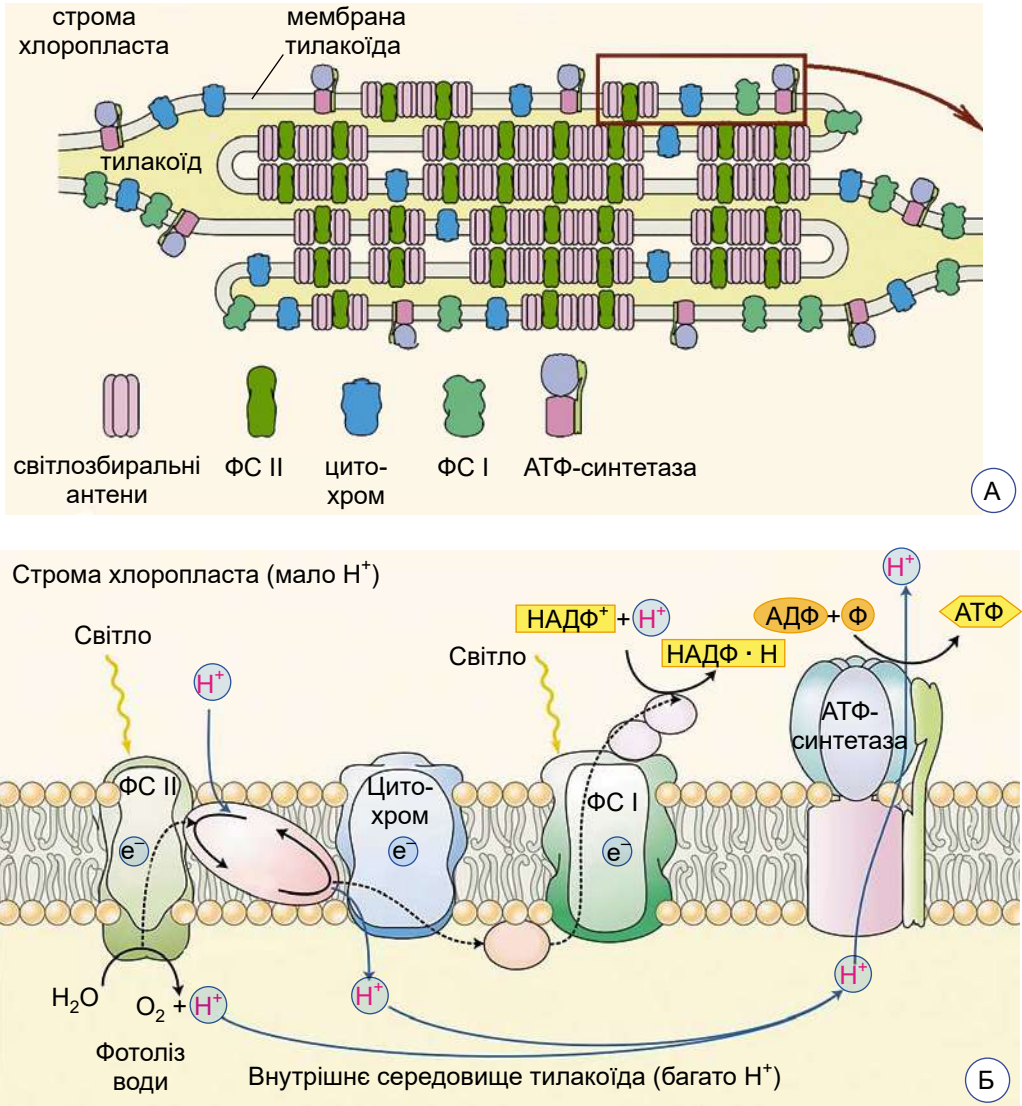
✓ **Дізнайтеся більше** про можливе застосування хлорофілу у фармакології за QR-кодом.



Фази фотосинтезу. У процесі фотосинтезу розрізняють дві послідовні фази: світлову та темнову. **Світлова фаза** дістала таку назву тому, що її реакції відбуваються лише за наявності світла. Ці процеси пов'язані з білками, зануреними в мембрани тилакоїдів (мал. 23.2) і зв'язаними з пігментами – хлорофілами та допоміжними (каротиноїдами). Каротиноїди розширюють спектр поглинання світлових хвиль (вони вловлюють світлові хвилі, недоступні для хлорофілу) і передають отриману енергію молекулам хлорофілу.

Реакції світлової фази розпочинаються з поглинання кванта світла (фотона) молекулою хлорофілу. Унаслідок цього один з її електронів переходить у збуджений стан.

Білки, у склад яких входять пігменти, об'єднані у функціональні комплекси, які називають **фотосистемами**. У фотосинтезі рослин і ціанобактерій беруть участь дві фотосистеми – перша (I) і друга (II) (мал. 23.2, А). Кожна фотосистема має дві частини: реакційний центр, який слугує своєрідним пусковим механізмом реакцій світлової фази, та антенний комплекс, який оточує реакційний центр. Антенний комплекс – комплекс пігментних молекул, що виконують роль світлозбиральних антен (звідки й походить його назва). Антенний комплекс містить сотні молекул хлорофілу, які спрямовують енергію світла до реакційного центру.



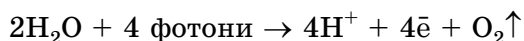
Мал. 23.2. А. Організація білків у мембранах хлоропластів. Б. Ланцюг перенесення електронів під час світлової фази фотосинтезу. Завдяки фотолізу води вивільняються електрони, які відновлюють фотосистему II (ФС II). З реакційного центру фотосистеми II через ланцюг перенесення електрони потрапляють до реакційного центру фотосистеми I (ФС I), і відновлюється НАДФ. Енергія, що вивільнилася, частково використовується на синтез молекул АТФ за допомогою АТФ-синтетази

Усі молекули хлорофілів здатні поглинати світло, однак лише дві з них безпосередньо беруть участь у перетворенні світлової енергії на хімічну – у вигляді макроергічних зв'язків у молекулах АТФ. Ці спеціалізовані молекули хлорофілу, пов'язані з певними білками, утворюють **реакційний центр** фотосистеми. Саме тут накопичена світлова енергія спрямовується до структур хлоропласта, де перетворюється на хімічну енергію синтезованих сполук.

Усі інші пігментні молекули, що входять до складу антенного комплексу фотосистеми, виконують роль світлозбиральних антен. Поглинаючи кванти світла (фотони), вони передають отриману енергію сусіднім молекулам. Так енергія збудження швидко мігрує комплексом пігментів і зрештою досягає реакційного центру фотосистеми.

Електрон молекули хлорофілу, що входить до складу реакційного центру, після отримання енергії збудження може відірватися від неї та перейти на перший переносник у ланцюзі перенесення електронів. Цей ланцюг, розташований у мембрані тилакоїда, функціонально подібний до ланцюга перенесення електронів у внутрішній мембрані мітохондрій. Він складається з ферментних комплексів, вбудованих у мембрану, які послідовно передають електрон від однієї молекули до іншої (мал. 23.2, Б).

Обидві фотосистеми – фотосистеми I та II – пов’язані між собою через ланцюг перенесення електронів. У процесі фотосинтезу вони включаються послідовно – спочатку фотосистема II, а згодом – фотосистема I. Після втрати електрона реакційним центром фотосистеми I в її молекулі хлорофілу залишається так звана дірка. Вона заповнюється електроном, що переноситься від збудженого реакційного центру фотосистеми II (мал. 23.2). Зі свого боку, «дірка», яка при цьому утворилася в реакційному центрі фотосистеми II, заповнюється електроном, джерелом якого є молекула води. Компонентом фотосистеми II є фоточутливий фермент, який під дією світла здійснює процес фотолізу води:



Фотоліз води – розщеплення молекул води на світлі за участю особливих ферментів з утворенням протонів (H^+), електронів (e^-) та молекулярного кисню (O_2). Електрони використовуються на відновлення реакційного центру фотосистеми II, а молекулярний кисень виділяється в атмосферу.

У фотосистемі I «збуджені» електрони можуть передаватись особливий сполучі – НАДФ (нікотинамідаденіндинуклеотидфосфат). Взаємодіючи з протонами Гідрогену (H^+), що утворилися у процесі фотолізу води, ці електрони відновлюють її. Згодом ця відновлена сполука постачає Гідроген, який потрібен для синтезу глюкози під час темнотної фази фотосинтезу (про неї йтиметься в наступному параграфі).

Під час світлової фази фотосинтезу синтезуються молекули АТФ. Ферменти АТФ-синтетази входять до складу особливих комплексів, розташованих у мембрані тилакоїдів. Процеси світлової фази фотосинтезу, подібно до реакцій кисневого (аеробного) етапу енергетичного обміну, ґрунтуються на окисно-відновних реакціях, пов’язаних з перенесенням електронів від сполук, які їх постачають (сполук-донорів), до сполук, які їх сприймають (сполук-акцепторів).

Під час світлової фази фотосинтезу переважають процеси, характерні для енергетичного обміну: заощадження енергії сонячного світла у вигляді макроергічних зв’язків синтезованих молекул АТФ.

Отже, основними подіями світлової фази фотосинтезу є синтез молекул АТФ та фотоліз води, внаслідок якого в атмосферу виділяється молекулярний кисень.

Узагальнення

Фотосинтез – це утворення органічних сполук (вуглеводів) з неорганічних (води й вуглекислого газу) з використанням світлової енергії. Він можливий завдяки наявності хлорофілу – пігменту, який у водоростей і рослин разом з іншими пігментами – каротиноїдами, входить до складу фотосистем I та II, пов'язаних з мембранами тилакоїдів хлоропластів. Фотосинтез відбувається у дві фази: світлову й темнову. У світловій фазі під дією світлових хвиль збуджуються електрони, що входять до складу молекул хлорофілу відповідних фотосистем, відбувається фотоліз води (під час якого вивільняється молекулярний кисень), відновлюється НАДФ (ця відновлена сполука постачає Гідроген, потрібний для синтезу глюкози під час темної фази) і синтезуються молекули АТФ.

Поміркуйте

1. Чи можливий фотосинтез за штучного освітлення?
2. Під час якого етапу світлової фази утворюється кисень та із чого він утворюється?
3. Що спільного у перебігу процесів світлової фази фотосинтезу та кисневого (аеробного) етапу енергетичного обміну?

§ 24. Фотосинтез: темнова фаза. Хемосинтез



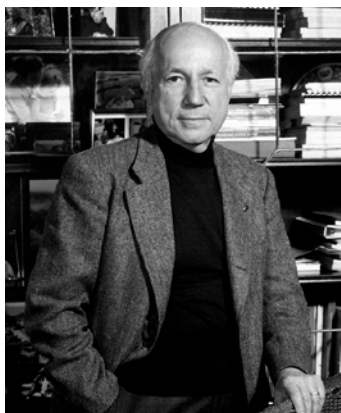
Чи можлива темнова фаза фотосинтезу без світлової?

Темнова фаза фотосинтезу. Саме під час **темної фази** з неорганічних сполук синтезуються вуглеводи. Реакції темної фази фотосинтезу відбуваються у стромі хлоропластів цілодобово, оскільки не потребують участі світла (звідки й походить її назва). Темнова фаза починається з того, що особлива сполука фіксує молекулу CO_2 , що надходить у хлоропласти з атмосферного повітря. До молекули CO_2 за допомогою певних ферментів приєднується Гідроген (який постачає відновлений протягом світлової фази НАДФ).

Процес надходження до клітин рослин CO_2 називають **повітряним живленням**.

На здійснення реакцій темної фази витрачається енергія, яка була акумульована в макроергічних зв'язках молекул АТФ, синтезованих під час світлової фази. Через низку послідовних реакцій утворюються глюкоза та інші моносахариди. Згодом з них синтезуються полісахариди (крохмаль у вищих рослин та зелених водоростей, багрянковий крохмаль – у червоних водоростей, ламінарин у бурих водоростей та ін.).

Послідовність реакцій темної фази (світлонебезалежних процесів) з'ясував американський науковець М. Кальвін (мал. 24.1) зі своїми співробітниками. На його честь комплекс цих біохімічних реакцій назвали **циклом Кальвіна**. За це відкриття М. Кальвін 1961 року став лауреатом Нобелівської премії з хімії.

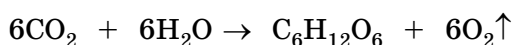


Мал. 24.1. Мелвін Елліс Кальвін (1911–1997) – видатний американський біохімік

інженерії. Модифікація генів, які його кодують, дає змогу підвищити ефективність фотосинтезу, що може сприяти збільшенню врожайності рослин. Один з напрямів – введення в клітини рослин генів мікроорганізмів і водоростей (наприклад, червоної водорості галдерії), які кодують високоактивні варіанти RuBisCo.

Унаслідок подальших реакцій циклу Кальвіна, які також відбуваються за участі ферментів (кожну з них каталізує свій специфічний фермент), АТФ і НАДФ · Н (відновленої форми), утворюється глюкоза – кінцевий продукт фотосинтезу. Також відновлюється рибулозо-бісфосфат, що знову вступає в цикл. Для включення однієї молекули CO_2 у склад глюкози цикл споживає 2 молекули НАДФ · Н і 3 молекули АТФ – стільки ж, скільки утворюється у світловій фазі на кожну молекулу кисню.

Підсумкове рівняння обох фаз фотосинтезу має такий вигляд:



Вуглеводи, синтезовані під час реакцій темної фази, відіграють важливу роль у процесах енергетичного обміну, адже вони можуть не тільки окиснюватись, а й розщеплюватись без участі кисню. Отже, глюкоза, яка належить до моносахаридів, є формою акумуляції хімічної енергії. Під час її розщеплення та остаточного окиснення в мітохондріях вивільняється енергія, що витрачається на потреби організму. Крім того, з глюкози в клітинах рослин можуть синтезуватися полісахариди (наприклад, крохмаль), які можуть відкладатися в клітині про запас.

Процеси темної фази є прикладом реакцій пластичного обміну (або асиміляції).

Процеси фотосинтезу в різних груп прокаріотів можуть відбуватися по-різному. У ціанобактерій фотосинтез відбувається так само, як і в зелених рослин чи водоростей, – за участі двох фотосистем – I та II. Під час світлової фази у них відбувається фотоліз води та виділення молекулярного кисню. На відміну від ціанобактерій, у пурпурових

бактерій, зелених сірчаних бактерій, деяких архей є лише одна фотосистема. Тому під час фотосинтезу в них кисень не виділяється.

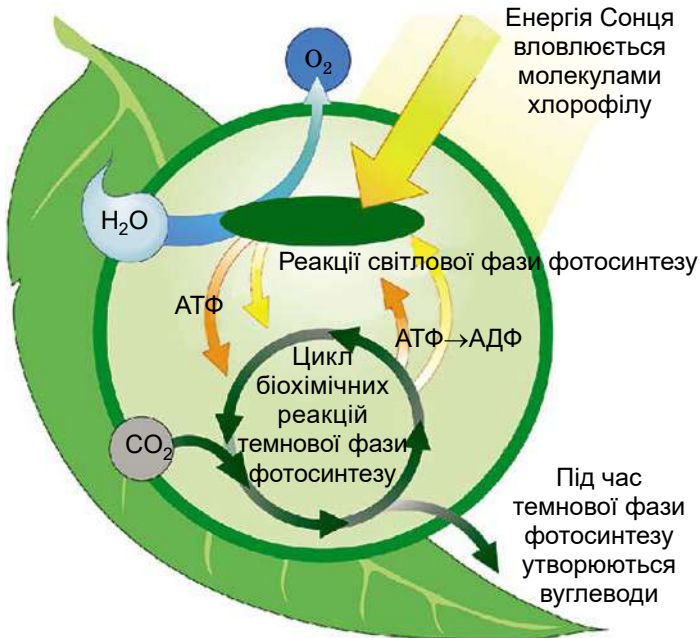


Поміркуйте, з якою саме фотосистемою водоростей і рослин – I чи II – можна порівняти фотосистему в цих прокариотів.

Значення фотосинтезу для існування біосфери. Завдяки фотосинтезу фотосинтезувальні організми вловлюють світлову енергію Сонця і перетворюють її на енергію хімічних зв'язків синтезованих ними вуглеводів. Коли організми-гетеротрофи (тварини, гриби тощо) споживають живих автотрофів або їхні рештки, то разом з їжею отримують і запасену в ній енергію. Тож існування біосфери можливе саме завдяки фотосинтезу. Отже, рослини є своєрідними посередниками в надходженні енергії сонячного світла до інших мешканців нашої планети, які не можуть її використовувати безпосередньо для забезпечення процесів пластичного обміну.

Зелені рослини, водорості та ціанобактерії, здійснюючи фотосинтез, поглинають вуглекислий газ і виділяють кисень, тим самим вони підтримують сталий газовий склад атмосфери. Кисень необхідний для дихання більшості організмів. Тому без перебільшення можна сказати: життя на нашій планеті без організмів, які здійснюють фотосинтез з виділенням кисню, було б неможливим.

Рослини є своєрідною біохімічною лабораторією, здатною створювати органічні речовини з неорганічних (мал. 24.2). Крім того, під впливом космічного випромінювання частина кисню перетворюється на озон (O_3), який утворює озоновий шар (екран) атмосфери. Цей шар виконує захисну функцію, поглинаючи короткохвильове ультрафіолетове випромінювання, що згубно впливає на організми (зокрема, здатне спричиняти пошкодження в молекулах ДНК). До формування озоно-



Мал. 24.2. Зелений листок – універсальна біохімічна лабораторія

вого екрана життя могло існувати лише у водному середовищі, оскільки вода ефективно поглинає таке ультрафіолетове випромінювання.



Установіть зв'язки між світловою та темною фазами фотосинтезу.

Щорічно завдяки фотосинтезу на Землі утворюється понад 200 млрд тонн газуватого кисню. За рік рослинний світ Землі продукує близько 10^{17} кДж енергії, що значно перевищує кількість енергії корисних копалин, яке споживає за рік людство. При цьому самі ці корисні копалини (нафта, газ і вугілля) – не що інше, як продукт фотосинтезу давніх рослин. Науковці підраховали, що річна продуктивність фотосинтезу містить енергії майже у 10 разів більше, ніж потрібно для забезпечення потреб сучасного населення нашої планети.

Цікаво знати. Існує показник ефективності фотосинтезу. Він показує, яку частку світлової енергії фотосинтезувальні організми здатні перетворювати на хімічну енергію синтезованих органічних сполук. Однією з найефективніших у цьому плані культурних рослин є цукрова тростина: вона засвоює близько 7–8 % світлової енергії. Для порівняння, у більшості культурних рослин цей показник становить лише 1–2 %.

На процес фотосинтезу можуть впливати різні зовнішні чинники. Продуктивність фотосинтезу зростає за умов кращого водопостачання рослин, їхнього оптимального освітлення, забезпечення вуглекислим газом, завдяки селекції сортів, спрямованій на підвищення ефективності фотосинтезу тощо. Нестача вологи гальмує процес фотосинтезу, навіть за оптимальної інтенсивності освітлення й концентрації CO_2 в атмосфері.

Цікаво знати. Важливою особливістю фотосинтезу є те, що він може здійснюватися не лише за сонячного освітлення, а й за штучного. Це дає змогу в умовах теплиць регулювати тривалість та інтенсивність освітлення, а відповідно – й продуктивність рослин. Але слід пам'ятати, що підвищення інтенсивності освітлення забезпечує підвищення продуктивності рослин лише до певної межі, після якої цей показник не зростає.

Крім фотосинтезувальних організмів, органічні сполуки з неорганічних можуть створювати й певні групи бактерій. Ці процеси вони здійснюють шляхом хемосинтезу.

Хемосинтез. Хемосинтезувальні організми, або хемотрофи (від грец. *хемейя* – хімія та *трофе* – живлення), на відміну від фотосинтезувальних, для синтезу органічних сполук використовують енергію, яка звільняється під час окиснення неорганічних речовин. До хемотрофних організмів належать певні групи бактерій: нітрифікувальні, метаноутворювальні, залізобактерії, безбарвні аеробні хемотрофні бактерії тощо. Процес хемосинтезу відкрив 1887 року наш співвітчизник – видатний мікробіолог С. М. Виноградський (мал. 24.3).



Мал. 24.3. Сергій Миколайович Виноградський (1856–1953). Народився у м. Києві, де в університеті Святого Володимира (нині – Київський національний університет імені Тараса Шевченка) розпочав свою біологічну освіту. Відкрив процес хемосинтезу, досліджував процеси колообігу Нітрогену в природі

Нітрифікувальні бактерії послідовно окиснюють амоніак спочатку до нітритів (солей нітритної кислоти), а потім – до нітратів (солей нітратної кислоти). Ці процеси мають велике значення, адже нітрати є важливим джерелом Нітрогену для живлення рослин.

Залізобактерії отримують енергію під час окиснення сполук двовалентного Феруму (Fe^{2+}) до тривалентного (Fe^{3+}). *Безбарвні аеробні хемотрофні бактерії* окиснюють сірководень та інші сполуки Сульфору до сульфатної кислоти, також отримуючи при цьому енергію.

Хемотрофні організми відіграють важливу роль у процесах колообігу певних хімічних елементів у природі. Вони здатні синтезувати органічні сполуки з неорганічних у тих частинах біосфери, куди не досягає сонячне світло. Залізобактерії беруть участь у створенні покладів залізних руд, які використовує людина.



Поміркуйте, що спільного й відмінного між процесами хемосинтезу і фотосинтезу.



Узагальнення

Темнова фаза фотосинтезу відбувається у стромі хлоропластів клітин евкаріотів. У ній використовується енергія молекул АТФ, утворених під час світлової фази. Сукупність біохімічних реакцій, які відбуваються під час темної фази, називають циклом Кальвіна. Значення фотосинтезу для біосфери полягає в засвоєнні сонячної енергії та її перетворенні на хімічну енергію синтезованих фототрофними організмами органічних сполук, у регуляції газового складу атмосфери. Хемосинтез – це процеси синтезу органічних речовин за рахунок енергії, що вивільняється під час окиснення неорганічних сполук. Основні групи хемосинтезувальних бактерій – залізобактерії, безбарвні аеробні хемотрофні бактерії, нітрифікувальні тощо. Хемосинтез відіграє важливу роль у колообігу хімічних елементів у природі й забезпечує синтез органічних сполук з неорганічних у тих частинах біосфери, куди не сягає сонячне світло.



Поміркуйте

1. Яке значення має світло для перебігу темної фази фотосинтезу?
2. Яке біологічне значення хемосинтезу в природі?
3. Чи обов'язкова наявність світла для здійснення хемосинтезу?

§ 25. Клітинний цикл. Мітоз



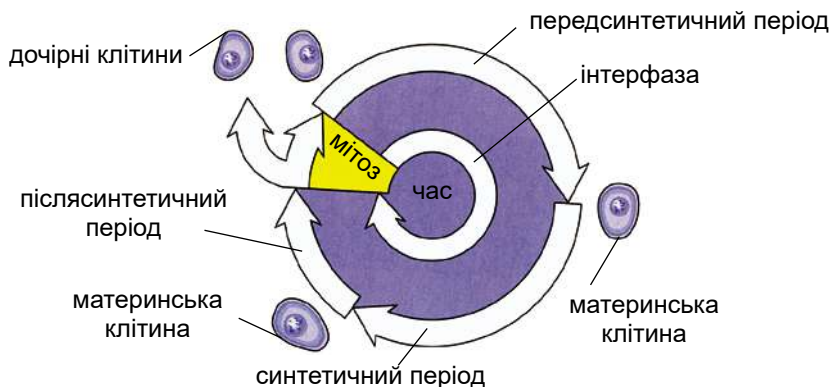
Що забезпечує точну передачу спадкової інформації від материнської клітини дочірнім?

Клітинний цикл – це період існування клітини від початку одного поділу до настання наступного або ж від початку останнього поділу клітини до її загибелі (мал. 25.1). Його тривалість у різних організмів не однакова: у бактерій за оптимальних умов вона становить усього 20–30 хв, у клітин евкаріотів – 10–80 год і більше (наприклад, інфузорія-туфелька може за оптимальних умов ділитися кожні 10–20 год).

Між двома послідовними поділами клітини є період, який називають **інтерфазою** (від лат. *інтер* – між і грец. *фазис* – поява). Вона може тривати від завершення одного поділу до початку наступного або до загибелі клітини. Таке явище характерне для клітин багатоклітинних організмів, які втрачають здатність до поділу, наприклад нейронів, еритроцитів людини і ссавців, ситоподібних трубок рослин тощо.

Упродовж інтерфази клітина росте. У ній активно синтезуються білки та інші органічні сполуки, накопичується енергія, потрібна для майбутнього поділу. Найінтенсивніше синтез відбувається в **синтетичний період** інтерфази (мал. 25.1). У цей час подвоюються хроматиди (внаслідок реплікації ДНК), центріолі, діляться мітохондрії та пластиди.

Період між завершенням попереднього поділу та початком синтетичного етапу називають **передсинтетичним**, а проміжок між завершенням синтетичного періоду й початком наступного поділу – **післясинтетичним** (мал. 25.1). Загалом інтерфаза триває до 90 % усього клітинного циклу. Стимулом до поділу клітини зазвичай є досягнення нею певного розміру в період інтерфази.



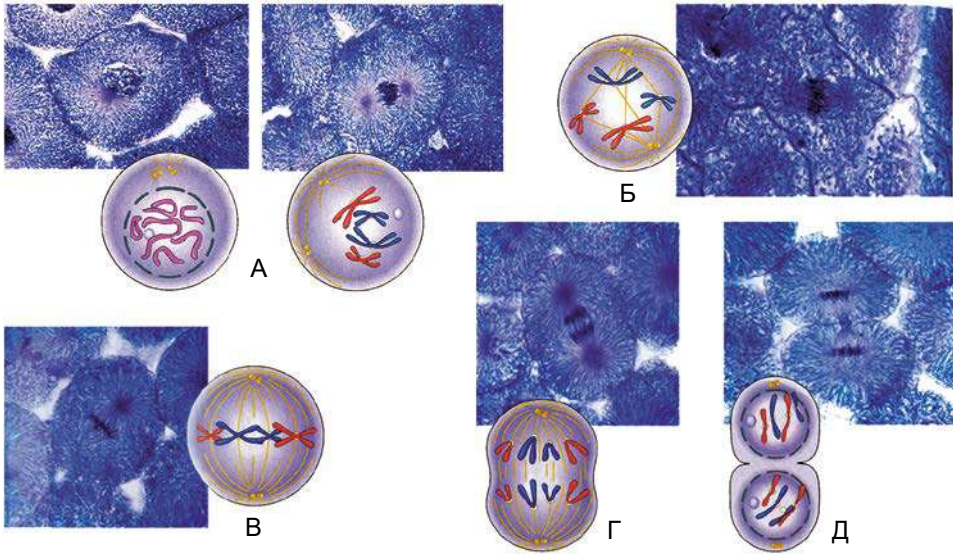
Мал. 25.1. Узагальнена схема клітинного циклу

Основним способом поділу еукаріотичних клітин є **мітоз** (від грец. *мітос* – нитка) (мал. 25.2). Під час мітозу формується спеціальний апарат – **веретено поділу**, яке забезпечує рівномірний розподіл спадкової інформації між двома дочірніми клітинами. У процесі утворення веретена поділу часто беруть участь центріолі (зокрема в клітинах тварин). Проте в клітинах організмів, які не мають клітинного центру (згадайте, в яких), веретено формується без участі центріолей.

Фази мітотичного поділу. Мітоз складається із чотирьох послідовних фаз: профазі, метафазі, анафазі і телофазі (мал. 25.2). Його тривалість – від кількох хвилин до 2–3 год.

Профаза (від грец. *про* – перед і *фазис*) починається з ущільнення (спіралізації) ниток хроматину, при цьому вони вкорочуються (мал. 25.2, А). Хромосоми набувають вигляду щільних тілець. У них стає помітною первинна перетяжка (центромера), де розташований **кінетохор** (від грец. *кінето* – рух і *хорос* – місце) (див. мал. 19.4) – білкова структура, до якої кріпитимуться волокна веретена поділу. У цей час під світловим мікроскопом можна розглянути будову хромо-

сом і підрахувати їхню кількість. Поступово зменшуються в розмірах і зникають ядерця.



Мал. 25.2. Мітоз. А. Профаза. Б–В. Метафаза. Г. Анафаза. Д. Телофаза

У більшості клітин під час поділу ядерна оболонка розпадається на фрагменти та зникає, і хромосоми опиняються в цитоплазмі. У цей час починає формуватися веретено поділу. Його нитки прикріплюються до кінетохорів, і хромосоми починають рухатись до центральної частини клітини (мал. 25.2, Б).

Під час **метафази** (від грец. *мета* – після та *фазис*) завершується ущільнення хромосом і формування веретена поділу. Саме в цей час деталі будови хромосом стають помітними найчіткіше. Хромосоми наче «вишиковуються» в одній площині в центральній частині клітини, а їхні центромери розташовані на однакових відстанях від кожного з полюсів клітини (мал. 25.2, В). Наприкінці метафази дві структурні одиниці хромосом – хроматиди – відокремлюються одна від одної (їх ще називають сестринськими хромосомами).

Цікаво знати. Якщо обробити клітини, що діляться, алкалоїдом колхіцином, поділ зупиняється на стадії метафази. У цей час хромосоми найзручніше досліджувати та описувати. За допомогою методів диференційного забарвлення можна також вивчати будову окремих хромосом (мал. 25.3).

Анафаза (від грец. *ана* – знову, поза та *фазис*) – найкоротша фаза мітозу (мал. 25.2, Г). У цей час окремі хроматиди кожної хромосоми (сестринські хромосоми) починають



Мал. 25.3. Мікрофотографія метафазної пластинки

рухатися до різних полюсів клітини. Кожна з хроматид при цьому містить ідентичний спадковий матеріал.

Телофаза (від грец. *телос* – кінець та *фазис*) триває від моменту припинення руху хроматид (сестринських хромосом) до утворення двох дочірніх клітин (мал. 25.2, Д). На початку телофази хромосоми деспіралізуються. Навколо кожного з двох скупчень хромосом формується ядерна оболонка, з'являються ядерця. Ядра дочірніх клітин набувають такого вигляду, який вони мали в інтерфазі. Протягом телофази поступово зникає веретено поділу, ділиться цитоплазма материнської клітини й утворюються дві дочірні.

Цікаво знати. У деяких випадках процес мітозу не завершується поділом цитоплазми й утворені ядра залишаються в одній клітині. Унаслідок цього кількість ядер у клітині збільшується (наприклад, клітини печінки (гепатоцити), клітини серцевого м'яза (кардіоміоцити)).

✓ **Дізнайтеся більше** про цитокінез за QR-кодом.



Біологічне значення мітозу. Мітотичний поділ забезпечує точне передавання спадкової інформації від материнської клітини дочірнім протягом низки послідовних клітинних циклів. Кожна з дочірніх клітин отримує по одній хроматиді від кожної хромосоми. Завдяки цьому зберігається постійне число хромосом в усіх дочірніх клітинах і сталий набір спадкової інформації.

Оскільки процес мітозу забезпечує сталість каріотипу організмів певного виду, то тим самим він забезпечує існування біологічних видів протягом тривалих історичних проміжків часу.

✓ **Дізнайтеся більше** про регуляцію клітинного циклу за QR-кодом.



Узагальнення

Клітинним циклом називають період існування клітини від початку одного поділу до настання наступного або ж від початку останнього поділу клітини до її загибелі. У клітинному циклі виділяють інтерфазу та період поділу (мітоз). Під час інтерфази (яка може становити до 90 % часу життя клітини) клітина росте, подвоюються хромосоми й органели клітини, відбувається синтез білків та накопичення енергії. Мітоз включає чотири фази: профазу, метафазу, анафазу й телофазу. Мітоз забезпечує збереження та точну передачу спадкової інформації в ряді поколінь клітин.

Поміркуйте

1. Чому мітотичний поділ неможливий без подвоєння хромосом?
2. Під час якої з фаз мітотичного поділу найдоцільніше вивчати особливості будови хромосом?
3. Чому інтерфаза у життєвому циклі клітини триваліша за сам поділ?



Лабораторне дослідження «Вивчення фаз мітозу (на прикладі клітин кореня цибулі)».



§ 26. Мейоз. Клітинна теорія



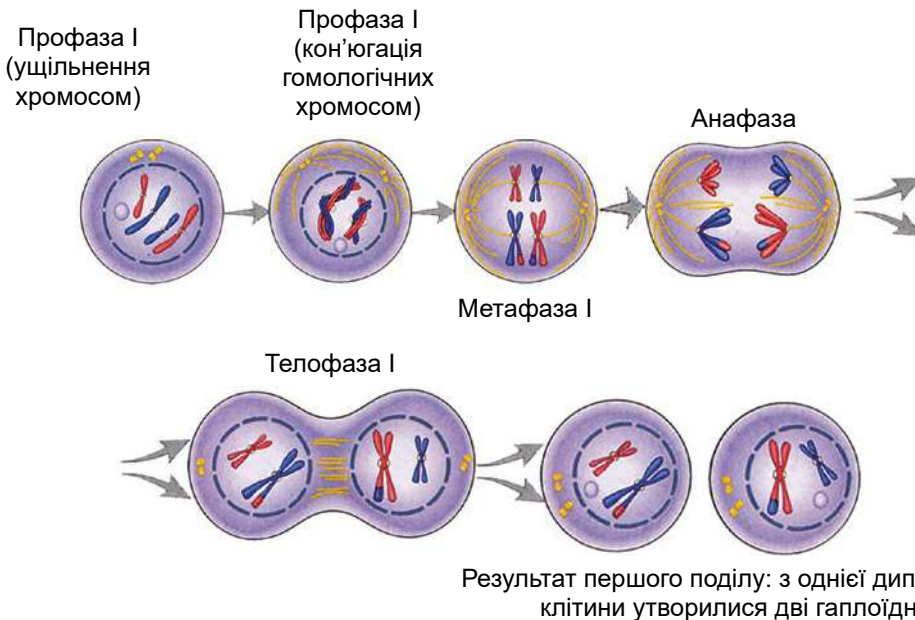
Яким клітинам організму людини властиві гаплоїдний та диплоїдний набори хромосом?

Для чого потрібен мейотичний поділ. Запліднення супроводжується злиттям ядер чоловічої та жіночої статевих клітин, які зазвичай мають гаплоїдний набір хромосом ($1n$). У результаті цього хромосомний набір зиготи – заплідненої яйцеклітини – подвоюється і стає диплоїдним ($2n$). Тобто кожна хромосома має собі пару (гомологічну).

Якби під час статевого розмноження кількість хромосом подвоювалася з кожним поколінням, це могло б призводити до утворення нових біологічних видів у кожному поколінні. Однак у природі цього не відбувається: *хромосомний набір у представників кожного виду залишається сталим*. Це свідчить про існування в життєвому циклі організмів спеціального механізму, який забезпечує зменшення кількості хромосом у статевих клітинах удвічі порівняно з нестатевими. Під час цього процесу з кожної пари хромосом до статевої клітини потрапляє лише одна. Такий механізм поділу називають **мейозом**.

Мейоз (від грец. *мейозис* – зменшення) – спосіб поділу еукаріотичних клітин, унаслідок якого їхній хромосомний набір зменшується вдвічі.

Під час мейозу, на відміну від мітозу, відбуваються два послідовних поділи, інтерфаза між якими вкорочена. Кожен із цих поділів, як і мітоз, складається із чотирьох послідовних фаз: профазі, метафазі, анафазі і телофазі (мал. 26.1, 26.3).

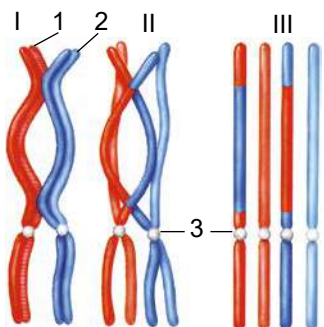


Мал. 26.1. Перший мейотичний поділ

Цікаво знати. Мейоз відбувається лише в тих організмів, у життєвому циклі яких наявний статевий процес. У евкаріотів, які не розмножуються статевим шляхом (наприклад, хлорела, амеба протей, евглена зелена), мейотичний поділ не спостерігають.

Профаза першого мейотичного поділу (профаза I) є найтривалішою фазою мейозу. У цей час хромосоми починають ущільнюватися і набувають вигляду паличкоподібних структур (мал. 26.1). Потім гомологічні хромосоми зближуються і кон'югують між собою попарно. У цей час здається, що в ядрі не диплоїдний, а гаплоїдний набір хромосом. Насправді кожна його складова частина – це пара сполучених між собою гомологічних хромосом.

Під час кон'югації може відбуватись **кросинговер** (від англ. *кросинг овер* – перехрест) – процес, під час якого гомологічні хромосоми здатні обмінюватися своїми певними ділянками (мал. 26.2). У результаті утворюються нові комбінації спадкового матеріалу: за набором алельних генів гомологічні хромосоми можуть відрізнитися.



Мал. 26.2. Схема, що ілюструє процес кросинговеру: I – гомологічні хромосоми (1 та 2) зближуються, II – після кон'югації гомологічні хромосоми починають розходитися (3 – центромери), але залишаються сполученими у певних ділянках, III – хроматиди гомологічних хромосом, що після кросинговеру обмінялися своїми ділянками (знайдіть ці ділянки на малюнку). Так унаслідок процесу кросинговеру утворилися дві гомологічні хромосоми з різним набором алельних генів

Кросинговер є одним з джерел спадкової мінливості організмів – виникнення нових комбінацій алельних генів у нащадків.



Поміркуйте, якими можуть бути інші джерела такої мінливості.

Цікаво знати. Кон'югація хромосом і кросинговер є одним з механізмів, що запобігають утворенню плодючих нащадків у разі міжвидового схрещування. Каріотип таких гібридів містить хромосоми обох батьків, які належать до різних видів, і тому хромосоми можуть значно відрізнитися за розмірами та будовою. Це ускладнює або навіть унеможлиблює їхню кон'югацію під час профазі першого мейотичного поділу. У результаті порушується формування статевих клітин, що й пояснює часту стерильність міжвидових гібридів.

Через певний час гомологічні хромосоми починають відходити одна від одної. Стає помітним, що кожна з них складається з двох хроматид, сполучених між собою в певних точках. Наприкінці профазі I гомологічні хромосоми розходяться, зникають ядерця, руйнується ядерна оболонка і починає формуватися веретено поділу.

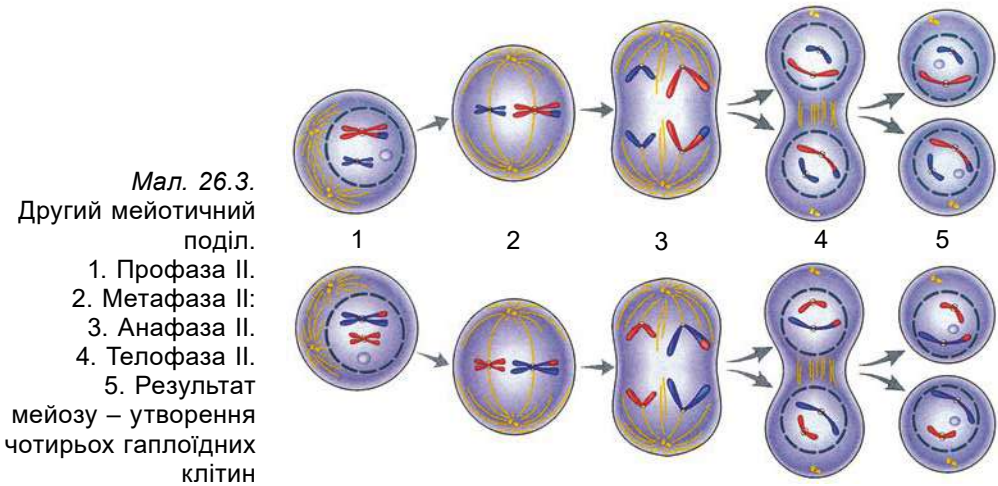
У **метафазі першого поділу мейозу (метафазі I)** нитки веретена поділу приєднуються до кінетохорів гомологічних хромосом. При цьому центромери гомологічних хромосом розташовані одна навпроти одної.

Під час **анафазі першого мейотичного поділу (анафазі I)** гомологічні хромосоми пересуваються до протилежних полюсів клітини. Кожна з них складається з двох хроматид. Отже, наприкінці анафазі I

біля кожного з полюсів клітини опиняється половинний набір хромосом. Якщо клітина до початку мейозу була диплоїдною ($2n$), то після завершення першого мейотичного поділу вона стає гаплоїдною ($1n$).

У **телофазі першого поділу мейозу (телофазі I)** формується ядерна оболонка. У клітинах тварин і деяких видів рослин хромосоми деспіралізуються й діляться цитоплазма материнської клітини. Але в клітинах багатьох видів рослин цитоплазма в цей час може й не ділитися.

Інтерфаза між першим і другим мейотичними поділами вкорочена: молекули ДНК у цей період не подвоюються. У клітинах багатьох рослин інтерфаза майже відсутня, тому вони одразу переходять до другого мейотичного поділу (мал. 26.3).



Під час **профази другого мейотичного поділу (профази II)** хромосоми, кожна з яких складається з двох хроматид, ущільнюються, зникають ядерця, руйнується ядерна оболонка, хромосоми починають пересуватись до центральної частини клітини, знову починає формуватись веретено поділу (мал. 26.3, 1).

У **метафазі другого мейотичного поділу (метафазі II)** завершується ущільнення хромосом і формування веретена поділу. Як і під час мітотичного поділу, центромери хромосом розташовані в одній площині в центральній частині клітини, і до кінетохорів прикріплюються нитки веретена поділу (мал. 26.3, 2).

В **анафазі другого мейотичного поділу (анафазі II)** діляться центромери, і хроматиди кожної з хромосом (дочірні хромосоми) розходяться до різних полюсів клітини (мал. 26.3, 3).

Під час **телофази другого мейотичного поділу (телофази II)** хромосоми знову деспіралізуються, зникає веретено поділу, формуються ядерця та ядерна оболонка. Завершується телофаза II поділом цитоплазми (мал. 26.3, 5).

У результаті другого мейотичного поділу кількість хромосом у клітинах залишається такою самою, як і після першого поділу, проте число хроматид у кожній хромосомі зменшується вдвічі. Відповідно, вміст ДНК у кожній дочірній клітині також зменшується вдвічі порівняно з материнською клітиною.

Отже, внаслідок двох послідовних мейотичних поділів з однієї диплоїдної клітини утворюються чотири гаплоїдні дочірні клітини (мал. 26.3, 5).

Біологічне значення мейозу. Мейоз – досконалий механізм, який забезпечує сталість каріотипу видів, які розмножуються статевим способом. Мейоз також забезпечує і спадкову мінливість організмів. По-перше, в профазі I гомологічні хромосоми можуть обмінятися ділянками. По-друге, в анафазі I гомологічні хромосоми, які можуть містити різний набір алельних генів, опиняються в різних дочірніх клітинах (мал. 26.3).

✓ **Дізнайтеся більше** про мейоз у життєвому циклі організмів за QR-кодом.



Клітинна теорія. Важливим етапом розвитку не тільки цитології, а біології загалом було створення **клітинної теорії**. Її перші положення впродовж 1838–1839 років сформулювали два німецьких науковці, М. Я. Шлейден і Т. Шванн (мал. 26.4). Згодом її доповнив німецький лікар і науковець – Р. Вірхов. Він встановив, що нові клітини виникають не з міжклітинної речовини, як вважали раніше, а винятково внаслідок поділу материнської клітини.



Мал. 26.4. Науковці, автори клітинної теорії. А. Маттіас Якоб Шлейден (1804–1881). Б. Теодор Шванн (1810–1882). В. Рудольф Вірхов (1821–1902)

Клітинна теорія – одне з фундаментальних узагальнень у біології, яке визначає клітину як структурно-функціональну одиницю всіх організмів. Клітину розглядають як самостійний організм у випадку прокаріотів та одноклітинних еукаріотів або як складову частину багатоклітинних організмів.

Основні положення клітинної теорії такі:

- усі організми складаються з клітин, клітина є їхньою структурно-функціональною одиницею;
- клітини різних організмів подібні за планом будови, хімічним складом і основними проявами процесів життєдіяльності;
- нові клітини виникають унаслідок поділу материнської клітини;
- у багатоклітинних організмів, які розвиваються з однієї клітини, різні типи клітин утворюються шляхом спеціалізації впродовж індивідуального розвитку організму;

• клітини певного типу можуть формувати тканини, а з тканин можуть формуватися органи.

Ці положення згодом були доповнені новими відкриттями в біології:

• за рівнем організації клітини поділяють на прокаріотичні та еукаріотичні;

• поділу клітин передуює копіювання спадкової інформації шляхом подвоєння молекул ДНК, що забезпечує генетичну безперервність життя;

• у еукаріотів генетична безперервність підтримується також здатністю до розмноження таких органел, як мітохондрії та пластиди;

• діяльність окремих клітин і цілісного багатоклітинного організму регулюється як через вплив біологічно активних речовин (гуморальна регуляція), так і завдяки нервовій системі;

• усі клітини, що походять від однієї клітини (наприклад заплідненої або незаплідненої яйцеклітини), мають однаковий набір спадкової інформації; клітини різних типів утворюються внаслідок вибіркової активації різних груп генів.

Узагальнення

Мейоз – це особливий тип поділу еукаріотичних клітин, унаслідок якого хромосомний набір зменшується вдвічі. Він складається з двох послідовних поділів – першого та другого. Під час першого поділу з однієї диплоїдної клітини утворюються дві гаплоїдні, хромосоми яких складаються з двох хроматид. У профазі I відбуваються кон'югація та кросинговер між гомологічними хромосомами, що забезпечує перекомбінування спадкового матеріалу. Другий поділ забезпечує утворення чотирьох гаплоїдних клітин. Мейоз передуює утворенню гамет у багатоклітинних тварин і спор у вищих спорових рослин. Узагальнення знань про будову та функціонування клітин стало підґрунтям для формулювання клітинної теорії.

Поміркуйте

1. Якими були б наслідки, якби гамети були диплоїдні, як і соматичні клітини?
2. Чому важливо, щоб кон'югували між собою лише гомологічні хромосоми, а не хромосоми різних пар?
3. Чому клітина є структурно-функціональною одиницею організмів? Які є винятки із цього правила?



Практична робота «Порівняльна характеристика процесів мітозу та мейозу».



Підб'ємо підсумки з теми

І. Досліджую природу

1. Виконуючи науково-дослідницький проєкт: «Дослідження впливу різного освітлення на утворення вуглеводів у різних кімнатних рослин», учні та учениці визначали

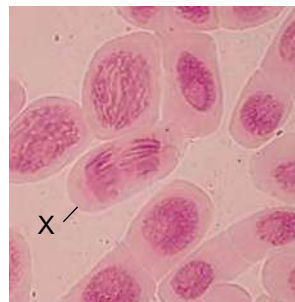
Розділ 4

змінні. Учень сказав, що кількість вуглеводів – це залежна змінна, учениця додала – ступінь освітлення є контрольованою змінною. Хто з учнів має рацію?

- А учениця
- Б учень
- В обидва мають рацію
- Г обидва помиляються

2. Під час уроку учень та учениця виконували лабораторне дослідження «Вивчення фаз мітозу (на прикладі клітин кореня цибулі)». Учениця сказала, що клітина, позначена X, перебуває в анафазі. Учень додав, що в інших клітинах відбуваються різні фази мітозу. Хто з учнів має рацію?

- А учениця
- Б учень
- В обидва мають рацію
- Г обидва помиляються



II. Опрацювую та використовую інформацію

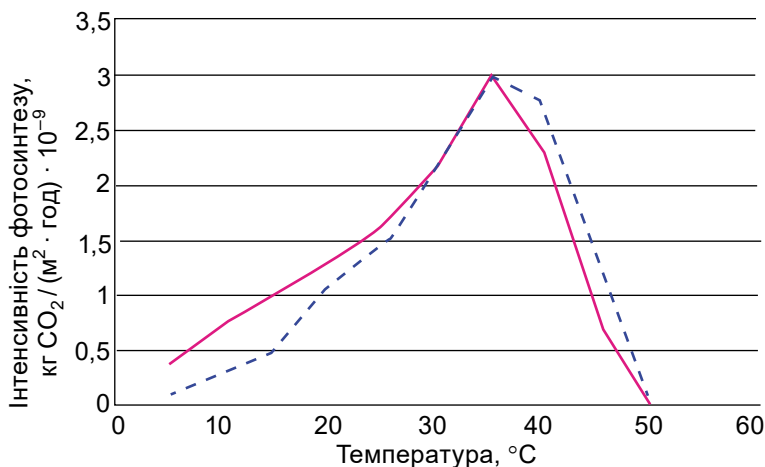
1. Прочитайте опис особливостей функціонування мітохондрій у клітинах. Розгляньте малюнок. Виберіть твердження, які відповідають опрацьованій інформації.

Мітохондрії – двомембранні органели клітини, внутрішня мембрана яких утворює впинання – кристи. Вони можуть мати більше та менше крист (1.1; 2.1). Низька густина мітохондріальних крист (1.1) свідчить про низьке енергопостачання клітини, тоді як висока густина вказує на адаптацію клітини до енергетичних потреб (2.1). Мітохондрії можуть контактувати з різними органелами клітини. Зменшення контактів з органелами вказує на неефективний метаболічний шлях (1.2). Мітохондрії можуть зливатися між собою, утворюючи мітохондріальні мережі, які забезпечують адаптацію до енергетичних витрат (2.3). Уміст мітохондрій у клітині відображає інтенсивність клітинного метаболізму (1.4; 2.4). Так, у клітинах печінки, м'язової та нервової тканини їхня кількість більша (2.4). Під час активної витрати енергії мітохондрії можуть переміщуватись з клітини в клітину (2.5). А реакцію на низьку клітинну адаптацію до стресових умов характеризує низька частота мітохондріальних комунікацій та переміщення між клітинами (1.5).

Густина крист	Густина крист	Густина крист	Уміст мітохондрій у клітині	Густина крист
1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5

Мітохондрії під цифрою 1.1 мають більше крист і більше синтезують АТФ, ніж мітохондрії на малюнку 2.1	Так	Ні
У клітині 2.4 більше мітохондрій, ніж у клітині 1.4	Так	Ні
Мітохондрії, які контактують з різними органелами клітини та мають ефективний метаболічний шлях, зображені на малюнку 1.2	Так	Ні
Під номером 2.4 схематично зображено клітини печінки, мозку та серцевого м'яза	Так	Ні
Мітохондрії, які витрачають більше енергії та добре адаптують клітини до умов існування, зображено під номерами 2.1–2.3	Так	Ні
Дві клітини, які обмінюються мітохондріями для оптимізації енергетичних витрат, зображено під номером 1.5	Так	Ні
Інтенсивний клітинний метаболізм з високим умістом мітохондрій та великим умістом крист зображено під номерами 1.1–1.5	Так	Ні

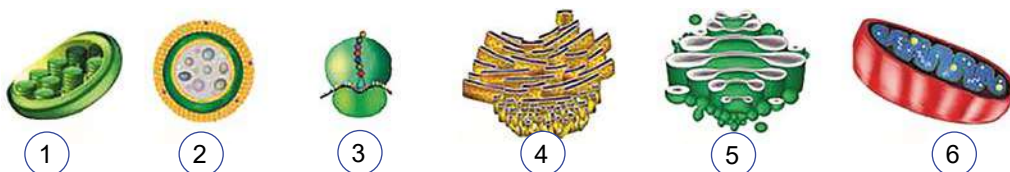
2. Розгляньте графіки залежності інтенсивності фотосинтезу від температури. Пунктиром позначено динаміку росту помідорів, суцільною лінією – огірків. Виберіть твердження, яке відповідає інформації, наведений на графіках.



- А** найвища інтенсивність фотосинтезу для огірка за температури 20 °C
Б для огірків і помідорів найвища інтенсивність фотосинтезу – за температури 33–35 °C
В для помідорів посилення фотосинтезу можна спостерігати за температури 40 °C
Г для огірків і помідорів мінімальним показником, за якого відбувається фотосинтез, є 2 °C

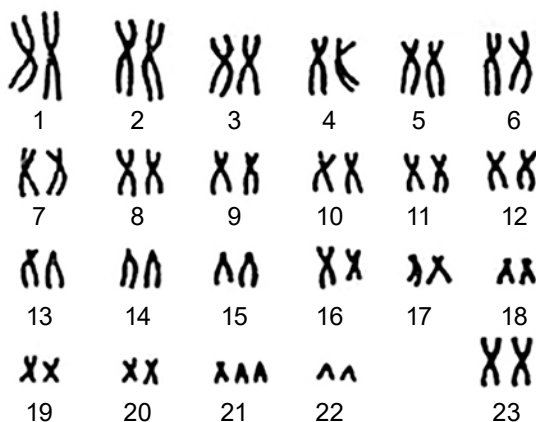
II. Усвідомлюю закономірності природи

1. Розгляньте органели, зображені на малюнку. Дайте відповіді на запитання, зазначивши номери відповідних органел.



Розділ 4

1. Які органели є немембранними?
 2. Які органели вкриті однією мембраною?
 3. Які органели мають зовнішню гладку мембрану та внутрішню зі складками та вгинами?
 4. Яка органела містить гідролітичні ферменти та здійснює внутрішньоклітинне травлення?
 5. Які органели беруть участь у процесах синтезу та перетворення білків?
 6. Яка органела містить тилакоїди та строму, здійснює фотосинтез?
 7. Які органели формують єдину транспортну систему в клітині?
 8. Яка органела утворює іншу органелу, позначену цифрою 2?
 9. Яку органелу може містити на своїй мембрані органела, позначена цифрою 4?
 10. Яка органела містить на кристах АТФ-соми?
2. Розгляньте каріотип. Виберіть твердження, яке йому відповідає.
А каріотип належить здоровій жінці
Б у каріотипі 47 хромосом
В каріотип належить чоловіку з хворобою
Г у каріотипі є зайва статеві хромосома



Компетентнісно орієнтоване завдання

Тренування й АТФ

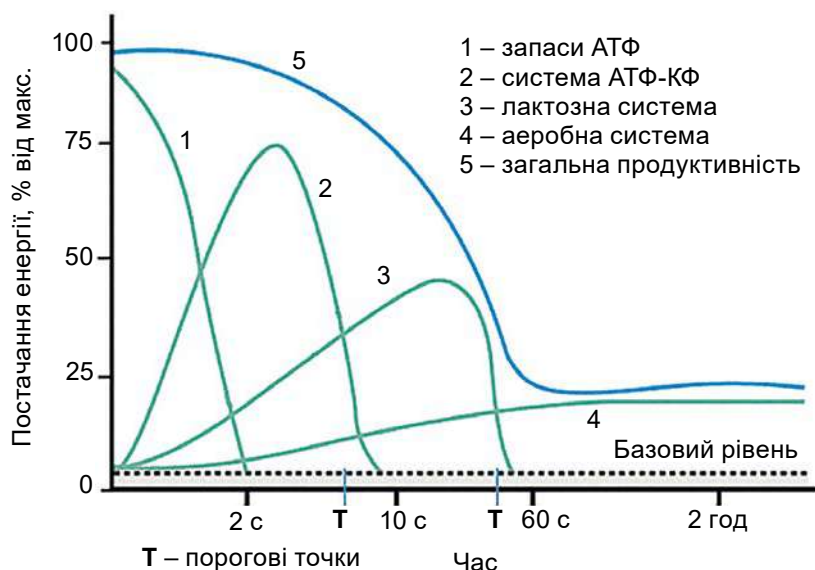
Учень 9 класу Сергій – кандидат у майстри спорту серед юніорів з легкої атлетики. Якось його вчителька вчоргове нагадала Сергієві про ненадолужені навчальні втрати, і той відповів:

– Тетяно Іванівно, я й так знаю, що АТФ є джерелом енергії для роботи м'язів, нащо мені знати ще щось?

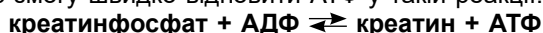
– А чи знаєш ти, – запитала вчителька, – на який час роботи м'язів вистачить внутрішніх запасів АТФ у клітинах?

– Ну-у-у... хвилин на 10, мабуть?

– На дві секунди. Ще раз: НА ДВІ СЕКУНДИ. Запас АТФ у клітині обмежений, тож щоб і надалі мати цю універсальну молекулу як джерело енергії для м'язової роботи, її треба синтезувати наново з АДФ та молекул ортофосфатної кислоти. Тисячі раз на добу. Ось дивись, – і вона показала роздрукований графік.



– Дві секунди – це дуже мало, – вела далі Тетяна Іванівна, – відскочити від лапи хижака можна, але добігти до найближчого дерева і залізти на гілку – може не вистачити. Тому, щоб мати АТФ секунд на 8–10, у клітинах м'язів є креатинфосфат, який дає змогу швидко відновити АТФ у такій реакції:



Запасів креатинфосфату в м'язовій тканині разів у 5–8 більше, ніж АТФ, що й дає можливість швидко відновлювати постачання енергії (на графіку це «система АТФ-КФ»). Принаймні деякий час. Потім м'язам знадобиться десь 3 хв відпочинку, щоб відновити резерви АТФ та креатинфосфату.

– Але якщо треба бігти не 10 с, а більше? – запитав Сергій. – А, здається, знаю: утворюється молочна кислота. Її накопичення викликає «печіння» в м'язах.

– Так, тому система й називається *лактозною*, – підтвердила вчителька. – Якщо кисню клітинам не вистачає, доводиться використовувати неефективне, але швидке безкисневе окиснення глюкози. М'язи запасують полісахариди, які можуть швидко розщеплюватись до глюкози, а та – до молочної кислоти. Саме накопичення лактату й є обмежувальним фактором, що викликає втому під час бігу на дистанції від 400 до 800 метрів.

– А як щодо бігу на довгу дистанцію? Глікогену теж може не вистачити...

– Тоді, хоч-не-хоч, клітинам доводиться бути ощадливими, – відповіла Тетяна Іванівна. – Молочну кислоту можна доокислити до CO_2 і H_2O , отримавши більше енергії, але на це знадобляться час і кисень. До слова, аеробна система може використовувати не тільки вуглеводи, але й жирні кислоти, амінокислоти. У співвідношенні 50–60 % на вуглеводи, 25–30 % на жири і 10–15% – на амінокислоти.

– Тобто щоб схуднути, треба навантажувати аеробну систему? – запитала Тамара, яка вже деякий час дослухалася до обговорення.

– Зачекай, – перебив її Сергій. – Але якщо все так, як на графіку, то...

– Хороша новина в тім, що всі три системи можна тренувати, і їхні резерви можуть суттєво збільшуватися, – підсумувала вчителька.

1. Напишіть назви клітинних процесів систем енергозабезпечення:

Лактозна система –

Аеробна система –

2. Професійні пірнальники за перлами можуть затримувати дихання під водою на 4 хв. Яку з систем вони тренують?

А АТФ-КФ **Б** лактозну (безкисневу) **В** аеробну (кисневу)

3. Оцініть правильність тверджень (оберіть «Так» або «Ні»).

Система генерації енергії АТФ-КФ є анаеробною	Так	Ні
Щоб схуднути, треба навантажувати аеробну систему	Так	Ні
На дистанції 60 м можна добігти до фінішу без витрат глюкози	Так	Ні
Спурт перед фінішем на середній дистанції (прискорення за кілька метрів до фінішу) забезпечує система АТФ-КФ	Так	Ні
Аеробна система слугує для відновлення інших енергетичних систем у періоди відпочинку	Так	Ні

4. Сергій розповів про розмову з учителькою тренерів. Той не тільки не здивувався, а й показав плани тренувань, які пропонував Сергієві. «Тепер, – сказав тренер, – познач, яку із систем ти тренуєш за кожним з наведених планів». (Упишіть номер плану тренувань у комірки з назвами систем.)

I	Біг: 10 повторень по 300 м з 1 хв відновлення; Біг: 8 повторень по 400 м з 2 хв відновлення; або 6 повторень по 600 м з 3 хв відновлення
II	40 хвилин пробіжки або 20 хвилин на гребному тренажері; Біг: 5 повторень по 1000 м з 5-хвилинним відпочинком; або 2 повторення по 2400 м з 8-хвилинним відпочинком
III	Біг: 10 повторень по 30 м з 3 хв відновлення; Біг: 6 повторень по 60 м з 6 хв відновлення; або піднімання максимально можливої ваги, 1 або 2 повторення

А АТФ-КФ **Б** лактозну (безкисневу) **В** аеробну (кисневу)

Тема 3.

Закономірності спадковості та мінливості організмів



Чи існують механізми захисту організму від мутацій?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Програма “Геном Людини” – етапи, результати»; «Визначення статі у різних тварин»; «Властивості модифікаційної мінливості у тварин і рослин»; «Мутагени навколо нас»; «Захворювання зі спадковою схильністю – причини прояву, профілактика».

Творчий проєкт:

«Визначення можливих проявів варіантів станів ознак у майбутньої дитини обраної подружньої пари; складання родоводу видатних людей / літературних персонажів (за вибором вчителя / вчительки)»; «Дослідження властивостей модифікаційної мінливості на прикладі деяких ознак відомих людей»; створення лепбука: «Класифікація мутацій», «Мутагени»; створення колажу: «Закони Менделя та їх застосування», «Властивості генетичного коду».

Практико-орієнтований проєкт:

складання власного родоводу та демонстрація успадкування певних ознак (за вибором учня / учениці або вчителя / вчительки).

Науково-дослідницький проєкт:

«Вивчення частоти прояву мутацій очей та крил у плодової мушки дрозофіли, вирощеної власноруч»; «Дослідження залежності антропометричних характеристик (окружності голови, довжини та форми стопи, довжини носа тощо) у школярів / школярок зіставно до зросто-масового індексу».

Ігровий проєкт:

«Ти на прийомі у фахівця / фахівчині медико-генетичної консультації».

§ 27. Особливості організації генів. Поняття про алейні гени



Чи тотожні поняття «спадковість» і «ген»?

Гени та особливості їхньої будови. Усім організмам притаманна універсальна властивість – **спадковість**, тобто здатність передавати свої ознаки й особливості індивідуального розвитку нащадкам. Основною одиницею спадковості є **ген** – ділянка молекули ДНК, яка містить інформацію про будову певного білка, нуклеїнової кислоти або виконує регуляторні функції. Кожен ген становить специфічну послідовність нуклеотидів у молекулі ДНК (у РНК-умісних вірусів – у молекулі РНК).

Цікаво знати. Термін «ген» запропонував 1909 року датський учений Вільгельм Людвіг Йогансен (1857–1927). Він також запропонував терміни: «генотип», «фенотип», «популяція».

Розміри окремих генів можуть значно варіювати – від кількох десятків до десятків тисяч пар нуклеотидів. Гени прокаріотів та еукаріотів кодують структуру білкових молекул (а також молекул різних типів РНК). Є гени, які відповідають за синтез білків-регуляторів, що впливають на активність біохімічних процесів у клітині: вони можуть як стимулювати, так і пригнічувати їх. Така регуляція є надзвичайно важливою для нормального функціонування організму, оскільки дає змогу адаптуватися до змін у навколишньому середовищі.

Гени еукаріотів та архей мають **мозаїчну будову**: є ділянки генів, які кодують спадкову інформацію, і ділянки, які її не кодують (мал. 27.1). Ділянки гена, які кодують амінокислотну послідовність, називають **ексонами** (від англ. *EX*pressed *regi*ON – виражена ділянка), а ті, що не кодують, – **інтронами** (від англ. *INTR*agenic *regi*ON – ділянка



Мал. 27.1. Екзонно-інтронна модель будови гена: ■ – інтрони;
■ – екзони

всередині гена). Кількість інтронів усередині тих чи інших генів різна: наприклад, у гені гемоглобіну їх – 2, яєчного білка овальбуміна – 7, білка-колагену курки – 51.

Поняття про алельні гени. Пригадаймо: в еукаріотів молекули ДНК, з'єднані з білками ядра, входять до складу хромосом (див. мал. 19.3). Винятком є молекули ДНК мітохондрій і хлоропластів. Гени розташовані у хромосомі уздовж молекули ДНК в лінійному порядку: один за одним. Кожен ген розташований у хромосомі в певному положенні – **локусі**.

✓ **Дізнайтеся більше** про «стрибаючі гени» за QR-кодом.



Сукупність молекул ДНК, притаманних гаплоїдному набору хромосом певного організму або виду, називають **геномом**. Гени визначають спадкові ознаки, наприклад форму плодів помідорів. Плоди помідорів можуть бути кулястими, плоскими, сливкоподібними, грушоподібними або овальними (мал. 27.2, А). Це зумовлено тим, що один і той самий ген може існувати в різних варіантах. Такі варіанти одного гена називають **алелями** (або **алельними генами**).



Мал. 27.2. Варіанти ознак, які кодують алельні гени: А – форма плодів помідорів; Б – забарвлення шерсті кролів

Алельні гени розташовані в однаковому локусі гомологічних хромосом, тобто займають у них ідентичне положення. Кожен ген визначає певну спадкову ознаку, наприклад, колір очей у людини. А різні алелі цього гена зумовлюють різні варіанти ознаки: очі можуть бути

блакитними, карими, зеленими, сірими тощо. У диплоїдного організму (каріотип якого умовно позначають **2n**) є по два алелі кожного гена – вони можуть бути або однаковими, або різними.

Цікаво знати. Алелів певного гена може бути не два, як зазвичай вважають, а багато – до кількох десятків. Наприклад, у конюшини є ген, який визначає нездатність до самозапилення, алелів якого налічують близько 200.

Біологічна доцільність того, що один ген може бути представлений багатьма алелями, полягає в розмаїтті варіантів ознак, які кодує певний ген. Що більше існує алелів певного гена, то ширшим є спектр можливих варіантів відповідної ознаки серед особин. Наприклад, у кролів відомо кілька алелів гена, що визначає забарвлення шерсті: дике, шиншилове, гімалайське тощо (мал. 27.2, Б). Іноді трапляються й кролі-альбіноси, у яких повністю відсутній пігмент.

Кожній негомологічній хромосомі (тобто хромосомам з різних пар) притаманний свій унікальний набір генів. Натомість у гомологічних хромосом набір генів подібний.

Сукупність алелів усіх або лише певних генів окремої клітини або цілісного організму називають **генотипом**.

Узагальнення

Спадковість – це властивість організмів зберігати та передавати свої ознаки та особливості індивідуального розвитку нащадкам. Ген – одиниця спадковості, це ділянка молекули ДНК, що містить інформацію про будову білка, нуклеїнової кислоти або виконує регуляторну функцію. Гени еукаріотів і архей мають мозаїчну будову: вони складаються з ділянок, що кодують інформацію (екзонів), і некодувальних ділянок (інтронів). Гени розташовані у певних ділянках хромосом, які називають локусами. Геном – це сукупність молекул ДНК, притаманних гаплоїдному набору хромосом певного організму або виду. Алельними називають гени, що розміщені в однакових локусах гомологічних хромосом.

Поміркуйте

1. Що спільного та відмінного в поняттях «геном» і «генотип»?
2. Навіщо у складі генів еукаріотів є неінформативні ділянки – інтрони?
3. Як різноманітність варіантів певної ознаки залежить від того, якою кількістю алелів представлений певний ген?

§ 28. Особливості організації геномів прокаріотичних та еукаріотичних організмів



Як сучасна систематика використовує інформацію щодо генів про- та еукаріотів?

Особливості організації геномів прокаріотичних організмів. Дослідження різних представників прокаріотів та еукаріотів показали, що кількість генів в їхньому геномі значно варіює. *Пригадаймо:* клітини прокаріотів – архей і бактерій – не мають сформованого ядра. Їхній

спадковий матеріал – кільцеподібна молекула ДНК, яка не відокремлена від цитоплазми мембранною оболонкою. Вона розташована в ядерній зоні цитоплазми – нуклеоїді (див. мал. 20.3). У цитоплазмі клітин прокаріотів одночасно з кільцевою молекулою ДНК, розташованою в ядерній зоні, містяться також невеличкі кільцеві молекули ДНК. Це плазмідні – позахромосомні фактори спадковості. Плазмідні можуть передаватись від однієї клітини до іншої.

Довжина кільцевої молекули ДНК кишкової палички становить близько 1,6 мм. Вона складається з 4,6 млн пар нуклеотидів. Кількість генів, які кодують білки, становить приблизно 4100. У генах бактерій відсутні неінформативні ділянки – інтрони. Ще близько 120 генів кодують різні молекули РНК. Середній розмір гена бактерій – близько 950 пар нуклеотидів.



Який набір спадкової інформації в кишкової палички – гаплоїдний чи диплоїдний?

Особливості організації геномів еукаріотичних організмів. Значно складніше організований геном еукаріотів. Наприклад, у геномі птахів відомо близько 30 000 генів, які кодують молекули білків. Ще певна кількість генів кодує молекули РНК.

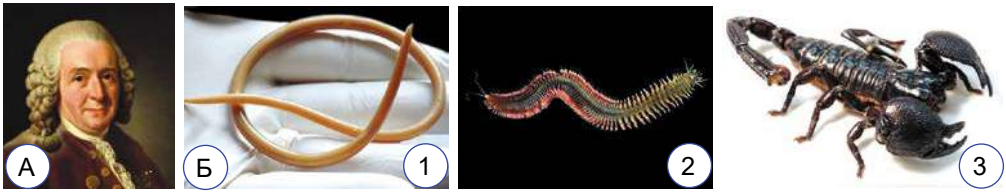
Кількість ДНК у ядрі клітин еукаріотів перевищує потрібну для кодування всіх молекул білків та РНК у 8–10 разів. Причини цього явища різні. По-перше, ДНК, розташована в ядрі еукаріотів, містить багато послідовностей, кожна з яких повторюється до сотень тисяч разів. По-друге, значна частина ДНК взагалі не містить генетичної інформації (некодувальні ділянки). Це послідовності нуклеотидів, які розділяють сусідні гени, а також інтрони.

З підвищенням рівня еволюційного розвитку розмір геному еукаріотів зростає переважно за рахунок саме некодуючих послідовностей. Так, гаплоїдний хромосомний набір нематод (круглих червів) містить близько 100 млн пар нуклеотидів, дрізофіли – 130 млн, курки – близько 1 млрд, ссавців – приблизно 3 млрд пар нуклеотидів.

Між видами, що належать до близьких систематичних груп, спостерігають високий ступінь подібності геномних нуклеотидних послідовностей. Так, геноми людини та миші подібні майже 87 %, людини і свині – майже на 98 %, людини та шимпанзе – майже на 98,9 %.

Порівняльний аналіз геномів різних організмів є важливим методом сучасної систематики. Він дає змогу встановлювати ступінь їхньої спорідненості.

Цікаво знати. За часів Карла Ліннея (мал. 28.1, А) і пізніше спорідненість різних груп організмів визначали за ступенем подібності їхньої будови. Тепер цю наукову проблему розв'язують, насамперед аналізуючи їхній спадковий матеріал. Наприклад, кільчасті черви та членистоногі мають багато спільних рис будови. Проте, досліджуючи спадковий матеріал цих організмів, встановлено, що членистоногі споріднені з нематодами (мал. 28.1, Б). Їх об'єднують у групу Линяючі, адже ріст цих організмів супроводжується періодичним линнянням (натомість кільчасті черви не линяють). *Пригадаймо*, Карл Лінней – засновник науки систематики. Він створив оригінальні класифікації тварин і рослин, послідовно ввів у застосування принцип подвійних назв видів (бінарну номенклатуру) та основні систематичні категорії (вид, рід, порядок, клас).



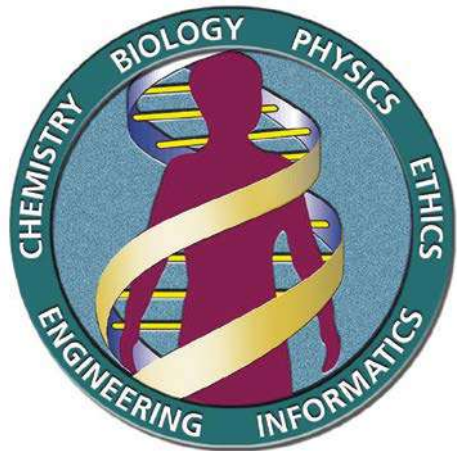
Мал. 28.1. А. Карл Лінней (1707–1778). Б. Представники трьох типів тварин: 1 – Нематоди (аскарида людська); 2 – Кільчасті черви (багатощетинковий черв нереїс); 3 – Членистоногі (скорпіон-імператор)

Проект «Геном людини» (англ. *The Human Genome Project*, HGP) – наймасштабніший міжнародний науковий проект у галузі біології, реалізований впродовж 1990–2003 рр. (мал. 28.2). Вартість цього проекту склала близько 2,7 млрд доларів США, а основні дослідження провели науковці й науковиці США, Великої Британії, Франції, Німеччини, Японії та Китаю.

На початку проект «Геном людини» очолив видатний американський науковець Джеймс Уотсон (*пригадаймо*: це один з учених, які з'ясували просторову структуру молекули ДНК). Згодом, 1993 року його замінив інший американський науковець Френсіс Коллінз (народ. 1950 р.).

Проект «Геном людини» розв'язував такі завдання:

- визначення послідовностей нуклеотидів молекул ДНК геному людини;
- визначення локалізації генів у хромосомах та з'ясування їхніх функцій; створення генетичних карт хромосом людини;
- дослідження етичних, правових та соціальних наслідків розшифрування геному людини.



Мал. 28.2. Емблема проекту «Геном людини»



Поміркуйте, чому на цій емблемі наведено назви таких наук, як біологія, фізика, етика, інформатика, інженерія та хімія.

Генетичні карти – це графічне лінійне зображення хромосом із зазначеним порядком розташування генів і відстанями між ними (мал. 28.3).

Цікаво знати. Паралельно з міжнародним науковим проектом «Геном людини» фахівці приватної компанії «Корпорація Селера (Celera Corporation)» реалізували й аналогічний приватний проект, який було завершено раніше, ніж міжнародний.

У межах проекту «Геном людини» для досліджень використовували зразки крові (від жінок) та крові й сперми (від чоловіків). Якщо до початку проекту кількість генів у геномі людини оцінювали в

м'язова дистрофія Беккера		сидеробласна анемія,
м'язова дистрофія Дюшена		синдром Аарскога–Скотта,
хронічне гранулематозне		гемопітична анемія
захворювання		нестійка пігментація, синдром Віскотта–
хвороба Норрі		Олдрича, синдром Менкеса
сидеробласна анемія, синдром		нечутливість андрогену
Аарскога–Скотта, гемопітична		невропатія Шарко–Марі–Туса, розчеплен-
анемія		ня піднебіння, судомна параплегія
агаммаглобулінемія, синдром		PRPS подагра
Кеннеді		синдром Лоу
хвороба Пеліцеуса–Мерцбахера,		синдром Леша–Найхана, HPRI подагра
синдром Альпорта, хвороба		синдром Ханта, гемофілія В
Фабрі		гемофілія А, хронічна гемоїтична анемія,
імунна недостатність		маніакально-депресивне захворювання,
лімфопроліферативний		засліплення яскравими кольорами,
синдром, глухота, альбінізм		аденолейкодистрофія, мускульна
		дистрофія, нецукровий діабет

Мал. 28.3. Генетична карта 23-ї хромосоми людини (наведено приклади важких спадкових захворювань, які можуть зумовлювати гени, локалізовані в цій хромосомі)

80–140 тис., то в результаті його реалізації було встановлено, що ця кількість значно менша: близько 22 300 генів, які кодують білки. Таку розбіжність пояснюють великою кількістю повторюваних ділянок у геномі. Крім того, встановлено, що геном окремої людини налічує близько 3,1 млрд пар нуклеотидів.

У межах проекту також досліджували геноми модельних організмів: бактерії кишкової палички, плодової мушки дрозофіли та хатньої миші. Це допомогло краще зрозуміти функції окремих генів людини.

Хоча проєкт «Геном людини» був офіційно завершений 2003 року, дослідження у цій галузі тривали. Лише 2023 року було завершено встановлення нуклеотидних послідовностей (секвенування) всіх 24 хромосом людини – 22 аутосом і двох статевих хромосом (X та Y).

✓ **Дізнайтеся більше** про Ігнобелівську лекцію щодо проєкту «Геном людини» за QR-кодом.



Цікаво знати. Встановлено, що кільцева молекула ДНК мітохондрій людини утворена 16 568 парами нуклеотидів і містить лише 37 генів, 13 з яких кодують білки мітохондрій, 2 – рРНК та 22 – тРНК. В окремих мітохондріях людини міститься від 5 до 10 ідентичних копій молекул ДНК.

Результати проєкту мають не лише наукове, а й практичне значення, зокрема для медицини. Зібрані дані використовують для створення нових лікарських препаратів і розроблення генетичних тестів, які дають змогу виявити схильність до небезпечних захворювань – наприклад, раку молочної залози, цукрового діабету I типу, хвороб печінки тощо. Очікується, що подальше дослідження геному людини допомо-

же з'ясувати причини багатьох хвороб, таких як онкологічні захворювання чи хвороба Альцгеймера, й розробити ефективні методи їхнього лікування. Зокрема, відкриваються перспективи виявлення мутацій, які можуть спричиняти рак.

Порівняння геному людини з геномами інших організмів дає змогу глибше зрозуміти процеси еволюції та визначити ступінь спорідненості людини з іншими видами. Інформацію про послідовність нуклеотидів у ДНК геному людини зберігають у спеціальних базах даних, доступних дослідникам через мережу «Інтернет». Для аналізу цих даних створено спеціальні комп'ютерні програми – без них сучасне генетичне дослідження стало б неможливим.

Узагальнення

Основний спадковий матеріал прокаріотичних організмів представлений молекулою ДНК, яка розташована в ядерній зоні (нуклеоїді). Крім того, у цитоплазмі клітин прокаріотів за межами ядерної зони (нуклеоїда) можуть бути наявні кільцеві молекули ДНК, що містять певний набір спадкової інформації (їх називають плазмідами). У генах бактерій відсутні інтрони (неінформативні ділянки ДНК), їхні гени складаються лише з кодувальних послідовностей нуклеотидів. У еукаріотів ДНК міститься в ядрі у складі хромосом, молекули ДНК також трапляються у мітохондріях і пластидах. Молекула ДНК у складі хромосом має багато повторюваних послідовностей, а також некодувальні ділянки, розташовані між генами. Послідовне секвенування (встановлення послідовностей нуклеотидів) усього геному людини було здійснено в межах міжнародного проекту «Геном людини».

Поміркуйте

1. Чим відрізняється організація геному кишкової палички від організації геному людини?
2. Яке значення матимуть результати, отримані внаслідок реалізації проекту «Геном людини», в майбутньому?
3. Чому в різних еукаріотичних організмів кількість генів відрізняється?

§ 29. Генетичний код та його властивості

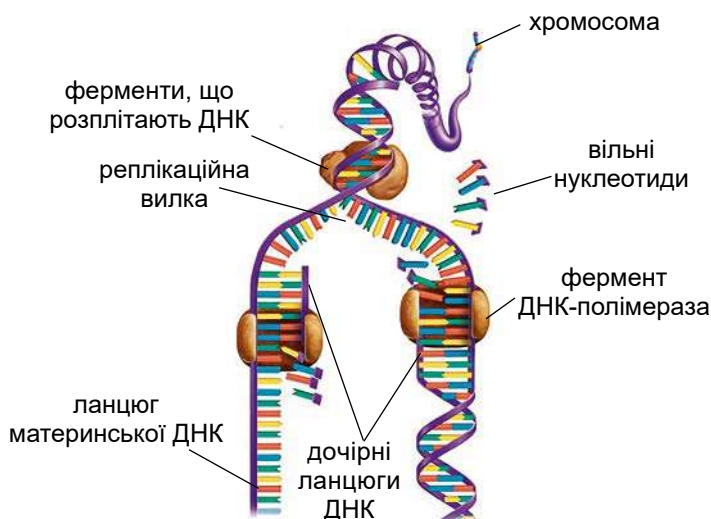


Як чотирма типами нуклеотидів ДНК можна закодувати 20 стандартних амінокислот у молекулах білків?

Роль різних типів молекул нуклеїнових кислот у кодуванні та реалізації спадкової інформації. Ви вже знаєте, що різні типи молекул нуклеїнових кислот відіграють певну роль у процесах кодування, зберігання й реалізації спадкового матеріалу. Провідна роль у цих процесах належить молекулам ДНК, які здатні до самоподвоєння. Цей процес забезпечує точну передачу спадкової інформації від материнської клітини дочірнім.

Процес самоподвоєння молекул ДНК, або **реплікація** (від лат. *реплікаціо* – відтворення), відбувається за принципом комплементарності.

Тобто послідовність нуклеотидів у новому ланцюзі визначається порядком розташування комплементарних нуклеотидів у відповідному ланцюзі материнської молекули. Під час реплікації обидва ланцюги материнської ДНК за участю спеціальних ферментів розходяться, і кожен із них слугує матрицею для синтезу нового ланцюга за принципом комплементарності. Фермент ДНК-полімераза (мал. 29.1) забезпечує приєднання нуклеотидів у правильній послідовності та каталізує утворення ковалентних зв'язків між сусідніми нуклеотидами.



Мал. 29.1. Процес реплікації молекули ДНК

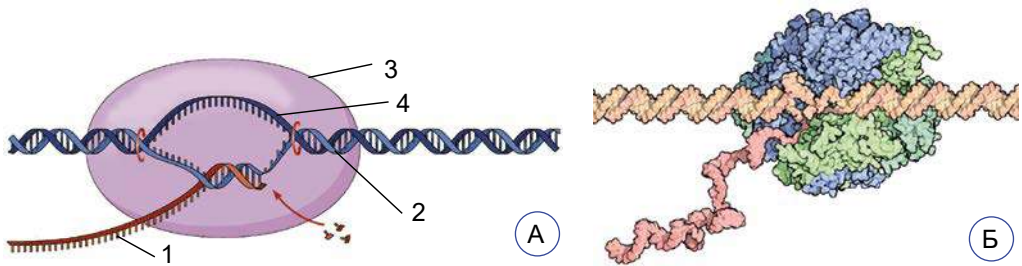
Тип нуклеотиду, що приєднується під час реплікації (А, Т, Г або Ц) до ланцюга, що синтезується, визначається послідовністю нуклеотидів того ланцюга молекули ДНК, який слугує матрицею. Приєднаний нуклеотид має бути комплементарним нуклеотиду, розташованому у відповідній точці матричного ланцюга. У результаті утворюються дві ідентичні дочірні молекули ДНК, кожна з яких є точною копією материнської (мал. 29.1), причому в кожній одна з ниток – материнська, а друга – новосинтезована.

Різні типи молекул РНК (як-от мРНК, тРНК, рРНК) синтезуються також за принципом комплементарності на молекулах ДНК (мал. 29.2). Утім, матрицею слугує лише один з ланцюгів ДНК. Цей процес має назву **транскрипція**.



Дізнайтеся, що таке слово «транскрипція» у словниках іноземної мови. Чому таку назву дали згаданому процесу?

У біологічних системах деякі біохімічні реакції мають особливу властивість: одна молекула слугує основою – матрицею – для синтезу іншої. Наприклад, молекула ДНК слугує матрицею для синтезу різних типів РНК. Такі процеси називають **реакціями матричного синтезу**. Їх можна порівняти з промисловими технологіями, коли з однієї форми-матриці виготовляють багато однакових виробів – як-от друк банк-



Мал. 29.2. А. Синтез молекули мРНК (1) на одному з ланцюгів молекули ДНК (2). Ці процеси забезпечує специфічний фермент РНК-полімераза (3). Другий ланцюг ДНК (4) у цей час залишається неактивним. Б. Візуалізація молекул, що беруть участь у транскрипції: блідо-рожевий – ДНК; рожевий – РНК; зелений, блакитний, синій – РНК-полімераза

нот. Аналогічно в клітині деякі нові молекули формуються відповідно до матриці: мономери цих молекул розміщуються у суворій відповідності до розташування мономерів у молекулі-матриці.

Реакції матричного синтезу є основою однієї з головних властивостей біологічних систем – здатності до самовідтворення.

Важливою властивістю молекул ДНК є їхня здатність до відновлення – **репарації** (від лат. *репараціо* – відновлення).

✓ **Дізнайтеся більше** про процес репарації ДНК за QR-кодом.



Генетичний код та його властивості. В організмах синтезується велика кількість різноманітних білкових молекул. Інформація про будову кожного білка зберігається в спадковому матеріалі клітини. Усі організми використовують єдину систему кодування спадкової інформації – **генетичний код**. Спадкова інформація закодована у вигляді певної послідовності нуклеотидів у молекулах нуклеїнових кислот (*пригадаймо*: у клітинах прокаріотів і еукаріотів – це ДНК, у деяких вірусів – РНК). Саме ця послідовність нуклеотидів визначає порядок розміщення амінокислот у поліпептидному ланцюзі під час синтезу білка. Науковці виявили, що кожна амінокислота в поліпептидному ланцюзі кодується певною послідовністю з трьох нуклеотидів – так званим **триплетом**. Отже, **генетичний код триплетний**.

Цікаво знати. У генетичному коді використано чотири нуклеотиди – А, Т (або У в РНК), Г і Ц. Однак потрібно закодувати 20 амінокислот – мономерів білків. Очевидно, що одного нуклеотиду недостатньо для кодування однієї амінокислоти (маємо лише 4 варіанти), а навіть поєднання двох нуклеотидів дає лише 16 комбінацій – теж замало. Щоб отримати достатню кількість варіантів, кожен амінокислоту кодує поєднання трьох нуклеотидів, тобто триплет, або кодон. Комбінуючи три нуклеотиди, отримуємо $4^3 = 64$ варіанти кодонів – цього достатньо для кодування всіх стандартних амінокислот і навіть кількох стоп-сигналів.

Отже, більшість стандартних амінокислот (18 з 20) кодується кількома триплетами (від двох до шести), і лише дві з них – одним (табл. 29.1).

Таблиця 29.1. Генетичний код (мРНК)

Перша основа	Друга основа				Третя основа
	У	Ц	А	Г	
У	ФЕН	СЕР	ТИР	ЦИС	У
	ФЕН	СЕР	ТИР	ЦИС	Ц
	ЛЕЙ	СЕР	Стоп-кодон	Стоп-кодон	А
	ЛЕЙ	СЕР	Стоп-кодон	ТРИ	Г
Ц	ЛЕЙ	ПРО	ГІС	АРГ	У
	ЛЕЙ	ПРО	ГІС	АРГ	Ц
	ЛЕЙ	ПРО	ГЛН	АРГ	А
	ЛЕЙ	ПРО	ГЛН	АРГ	Г
А	ІЛЕ	ТРЕ	АСН	СЕР	У
	ІЛЕ	ТРЕ	АСН	СЕР	Ц
	ІЛЕ	ТРЕ	ЛІЗ	АРГ	А
	МЕТ	ТРЕ	ЛІЗ	АРГ	Г
Г	ВАЛ	АЛА	АСП	ГЛІ	У
	ВАЛ	АЛА	АСП	ГЛІ	Ц
	ВАЛ	АЛА	ГЛУ	ГЛІ	А
	ВАЛ	АЛА	ГЛУ	ГЛІ	Г

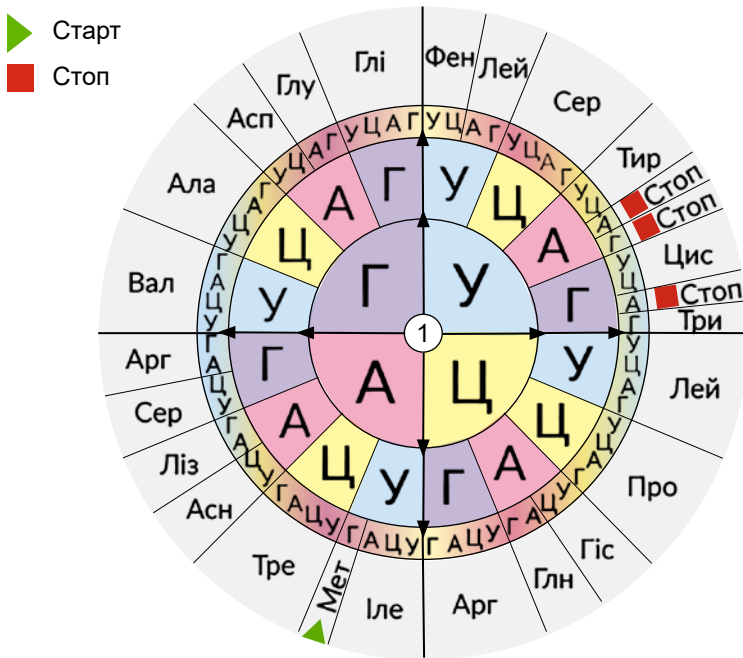
Примітка. У таблиці наведено (не для запам'ятовування) назви амінокислот, закодовані триплетами мРНК: аланіну (АЛА), аргініну (АРГ), аспарагіну (АСН), аспарагінової кислоти (АСП), валіну (ВАЛ), гістидину (ГІС), гліцину (ГЛІ), глютаміну (ГЛН), глутамінової кислоти (ГЛУ), ізолейцину (ІЛЕ), лейцину (ЛЕЙ), лізину (ЛІЗ), метіоніну (МЕТ), проліну (ПРО), серину (СЕР), тирозину (ТИР), треоніну (ТРЕ), триптофану (ТРИ), фенілаланіну (ФЕН) та цистеїну (ЦИС), АУГ (кодує МЕТ) – стартовий триплет.

За допомогою таблиці 29.1 можна визначити, яку саме амінокислоту кодує той або інший триплет. Перший нуклеотид у триплеті беруть з лівого вертикального стовпчика, другий – з горизонтального і третій – з правого вертикального. У місці уявного перетину ліній міститься скорочений запис амінокислоти, що кодується відповідним триплетом. Нагадуємо, що в таблиці 29.1 наведено триплети мРНК, а не ДНК (*поміркуйте чому*).

Існують й інші способи представлення генетичного коду, наприклад, у вигляді концентричних кіл (мал. 29.3).

Те, що одна амінокислота може кодуватись кількома триплетами (про цю властивість кажуть, що генетичний код є *виродженим*), має важливе біологічне значення, оскільки підвищує надійність генетичного коду. Отже, випадкова заміна одного нуклеотиду в певному триплеті на інший не завжди супроводжуватиметься змінами в первинній структурі білка.

У таблиці 29.1 знайдемо триплети, які кодують амінокислоту лейцин (ЛЕЙ). Припустімо, що в певній молекулі цю амінокислоту кодує



Мал. 29.3. Генетичний код як «циферблат». Внутрішнє коло відповідає першому нуклеотиду триплету, наступні – другому й третьому, в зовнішньому колі розміщено скорочені назви амінокислот. Щоб ним скористатися, достатньо уявити стрілочку, схожу на годинникову, що йде від центру через перший, другий і третій нуклеотиди триплету та вказує на амінокислоту, яку кодує цей триплет

триплет ЦУУ. Унаслідок змін у цьому триплеті останній нуклеотид (У) може замінюватися на інший, наприклад на А. Але триплет, що утворився – ЦУА, все одно кодуватиме амінокислоту лейцин.

Ще одна властивість генетичного коду полягає в тому, що кожен триплет кодує лише одну певну амінокислоту. Тобто *генетичний код однозначний*. Крім того, *генетичний код універсальний* – єдиний для всіх організмів: від бактерій до людини. В окремих генетичних системах (геноми мітохондрій чи хлоропластів, наприклад), можуть бути відмінності в кодуванні окремих амінокислот, але принцип кодування залишається універсальним.

Генетичний код не перекривається: генетична інформація у прокаріотів та еукаріотів з певної послідовності нуклеотидів може зчитуватися лише в один спосіб (у геномі вірусів трапляється перекривання генів. Подумайте, яке це може мати значення).

Послідовність нуклеотидів починає зчитуватися з певної точки в одному напрямку, що визначає порядок зчитування триплетів усього ланцюга нуклеотидів. Ця властивість забезпечує точне відтворення білкових молекул в особин різних поколінь. Початок процесу синтезу білкової молекули визначає триплет АУГ, тому його називають *стартовим*.

Генетична інформація зчитується послідовно – крок за кроком: кожен крок відповідає одному триплету (мал. 29.4), і між триплетами

немає «розділових знаків», наприклад, нуклеотидів, які виконували б функцію «розділових знаків». Але в генетичному коді є три триплеті (УАА, УАГ, УГА), кожен з яких сигналізує про припинення синтезу поліпептидного ланцюга. Їх називають **стоп-кодонами**.

<u>АУГ</u>	<u>ЦЦА</u>	<u>ГАУ</u>	<u>ЦЦЦ</u>	<u>ГАА</u>	...	<u>УГА</u>
мет	про	асп	про	глу		стоп-кодон

Мал. 29.4. Зчитування генетичної інформації

Аналізуючи таблицю 29.1, ви звернули увагу на те, що триплеті **УАА, УАГ, УГА** не кодують жодної амінокислоти, на відміну від триплета **АУГ** (або інших).

Узагальнення

До реакцій матричного синтезу належать процеси реплікації ДНК і транскрипції. Під час транскрипції матрицею слугує ділянка одного з ланцюгів ДНК (кодуючий ланцюг), на якій синтезується молекула мРНК. Спадкова інформація записана у вигляді певної послідовності нуклеотидів молекул ДНК (у деяких вірусів – РНК). Кожну амінокислоту кодує послідовність з трьох нуклеотидів (триплет або кодон). Існує 64 триплеті, з яких 61 кодує 20 стандартних амінокислот. Триплет АУГ (старт-кодон) сигналізує про початок синтезу білкової молекули, а три триплеті (УАА, УАГ, УГА) виконують функцію стоп-кодонів, тобто сигналів для припинення її синтезу.

Поміркуйте

1. Яке значення для існування організмів має здатність ДНК до репарації?
2. Чому ферменти, які забезпечують реплікацію, не можуть забезпечувати транскрипцію?
3. У чому полягають особливості реакцій матричного синтезу?

§ 30. Реалізація спадкової інформації в клітині: біосинтез білкових молекул



Як з віком у людини змінюється інтенсивність синтезу білка?

Біосинтез білкових молекул. Генетичний код у клітині реалізується шляхом біосинтезу білків. У цьому процесі важливу роль відіграють різні типи РНК: матрична (мРНК), рибосомна (рРНК) і транспортна (тРНК).

Білки, що надходять із їжею, розщеплюються в органах травної системи людини і тварин до амінокислот. У клітинах з них (а також із новосинтезованих у реакціях обміну речовин) синтезуються власні білки організму. Механізм біосинтезу білків з'ясовано в 50-их роках ХХ ст. Як і біосинтез нуклеїнових кислот, він відбувається за принципом реакцій матричного синтезу.

Процеси біосинтезу білків відбуваються там, де є рибосоми: у цитозолі, на мембранах зернистої ендоплазматичної сітки, у мітохондріях

і пластидах. У цитозолі синтезуються білки, потрібні для внутрішніх потреб клітини – так звані білки хатнього господарства. Натомість білкові молекули, що утворюються на мембранах зернистої ендоплазматичної сітки, переважно виводяться з клітини або входять до складу плазматичної мембрани чи зовнішньої мембрани ядерної оболонки. Білки, синтезовані в мітохондріях і пластидах, входять до складу внутрішніх мембран цих органел.

Етапи біосинтезу білкових молекул. Початковий етап біосинтезу білкової молекули пов'язаний із синтезом молекули мРНК на одному з ланцюгів молекули ДНК (див. мал. 29.2). Процеси переписування спадкової інформації з молекули ДНК на молекулу мРНК називають **транскрипцією** (від лат. *транскриптіо* – переписування). Особливий фермент роз'єднує подвійну спіраль ДНК, і на одному з її ланцюгів за принципом комплементарності синтезується молекула мРНК. Приєднання нових нуклеотидів до ланцюга РНК, що синтезується, забезпечує інший фермент. При цьому напроти нуклеотидів з аденіном у складі матричного ланцюга ДНК у молекулі РНК включаються нуклеотиди з урацилом.

Під час транскрипції на основі певної послідовності нуклеотидів одного з ланцюгів молекули ДНК (гена) синтезується попередник мРНК – **про-мРНК**. Ця молекула містить ділянки, що відповідають як ексонам, так й інтронам.

Далі, за участю спеціальних ферментів, інтрони вирізаються, а сусідні екзони зшиваються. Цей процес дозрівання мРНК називають **сплайсингом** (від англ. *сплайс splice* – з'єднувати, зшивати встик). У результаті формується зріла молекула мРНК, яка вже не містить інтронів і виходить з ядра до цитоплазми (мал. 30.1). Там вона переносить спадкову інформацію від ДНК до рибосоми – місця синтезу білків.

У рибосомі мРНК виконує роль матриці, тобто «зразка» для побудови білкової молекули.

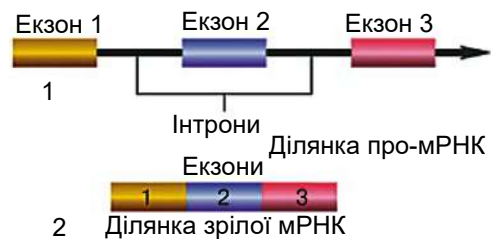
Наступні етапи біосинтезу білків мають назву **трансляція** (від лат. *трансляціо* – передача). Послідовність нуклеотидів у молекулі мРНК переводиться в послідовність амінокислотних залишків молекули білка, що синтезується. У такий спосіб розшифровується інформація, записана у вигляді послідовності нуклеотидів мРНК.

Молекула мРНК синтезується лише на одному з ланцюгів молекули ДНК. При цьому послідовність нуклеотидів молекули мРНК комплементарна послідовності нуклеотидів ланцюга ДНК, на якому вона синтезована, і збігається з послідовністю нуклеотидів іншого її ланцюга, який називають **кодувальним**, або **змістовним**:

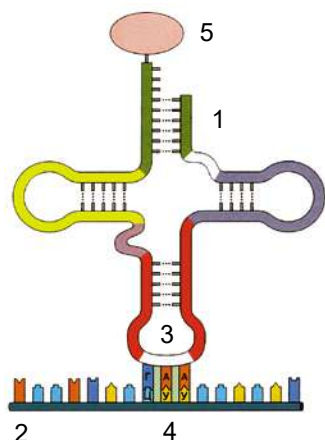
АУГ ГЦГАУЦЦГГ – ділянка мРНК

ТАЦЦГЦТАГ ГЦЦ – ланцюг ДНК, за яким відбувається транскрипція

АТТ ГЦГАТЦЦГГ – другий ланцюг ДНК – кодувальний, або змістовний



Мал. 30.1. Структура мРНК до (1) та після (2) процесу сплайсингу



Мал. 30.2. Взаємодія молекули тРНК (1) з молекулою мРНК (2). Антикодон (3) молекули тРНК взаємодіє з кодоном (4) молекули мРНК, 5 – амінокислота, яку транспортує молекула тРНК

Спочатку в цитоплазмі кожна амінокислота, яка має увійти до складу білкової молекули, за участі специфічного ферменту ковалентним зв'язком приєднується до певної молекули тРНК (мал. 30.2). Кожна молекула тРНК розпізнає відповідну амінокислоту завдяки своєму антикодону й транспортує її до місця синтезу білка.

У переміщенні комплексу «тРНК – амінокислота» до рибосом беруть участь мікротрубочки та мікронитки цитоскелета.

Трансляція розпочинається з *ініціації*: мРНК зв'язується з рибосомою, а згодом – і з амінокислотним залишком, приєднаним до певної молекули тРНК. У результаті молекула мРНК опиняється між двома субодинами рибосоми. Структура молекули рРНК разом із білками забезпечує правильне просторове розташування мРНК і тРНК під час біосинтезу білка.

Спочатку рибосома розпізнає стартовий кодон АУГ у складі мРНК. Такий комплекс готовий до початку синтезу білкової молекули. Стартовий кодон зчитується завдяки взаємодії з антикодоном – комплементарним триплетом, що входить до складу тРНК (мал. 30.2).

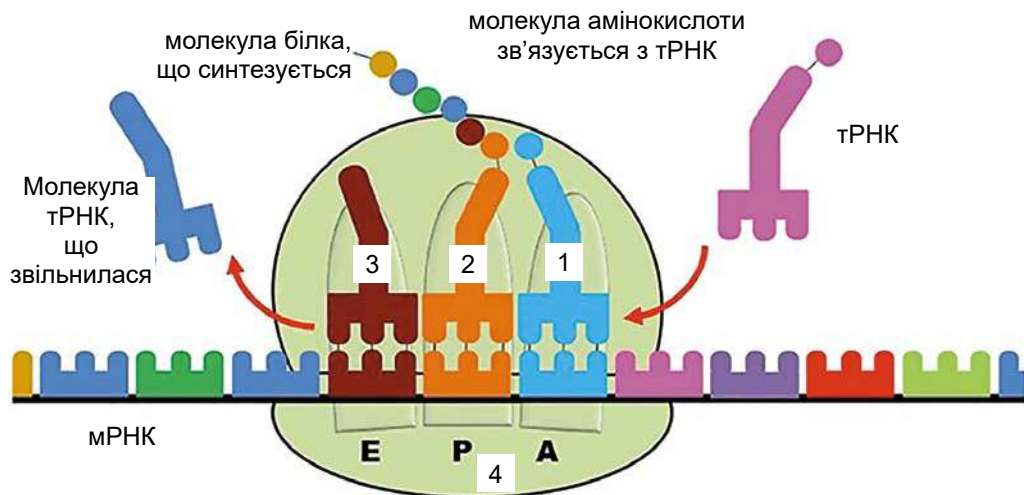
На наступних етапах біосинтезу білка поліпептидний ланцюг продовжується завдяки послідовному з'єднанню амінокислотних залишків міцними ковалентними пептидними зв'язками. Кожен наступний кодон мРНК упізнається відповідним антикодоном тРНК, а рибосома каталізує приєднання амінокислоти до поліпептиду. Після цього рибосома зміщується вздовж мРНК на одну позицію (триплет), щоб взаємодіяти з наступною тРНК.

Основні етапи трансляції забезпечує *функціональний центр рибосоми*. У ньому одночасно можуть перебувати три молекули тРНК, які зв'язуються з відповідними ділянками – *сайтами* (на малюнку 30.3 їх позначено англійськими літерами літерами Е, Р, А).

До сайту А надходить тРНК з амінокислотним залишком. У сайті Р утворюється пептидний зв'язок між цією амінокислотою та поліпептидним ланцюгом, що синтезується. У сайті Е розташовується тРНК, яка вже передала транспортовану нею амінокислоту та згодом залишає рибосому.

Отже, процес нагадує роботу конвеєра: одна молекула тРНК виходить з рибосоми, інша пересувається до сайту Е, її місце в сайті Р займає наступна тРНК, а до сайту А приєднується нова тРНК з амінокислотою.

Кількість рибосом, які одночасно можуть бути розташовані на молекулі мРНК, визначається її довжиною, однак не перевищує 20. Комплекс рибосом, об'єднаних молекулою мРНК, називають *полірибосомою* (скорочено – *полісомою*). На одній полісомі водночас синтезу-



Мал. 30.3. Участь рибосоми в біосинтезі білкової молекули: 1 – до сайту А підходить молекула тРНК з амінокислотним залишком; 2 – у сайті Р амінокислотний залишок включається до складу білкової молекули, що синтезується; 3 – молекула тРНК уже без амінокислотного залишку; 4 – Е, Р, А – сайти зв'язування молекул тРНК

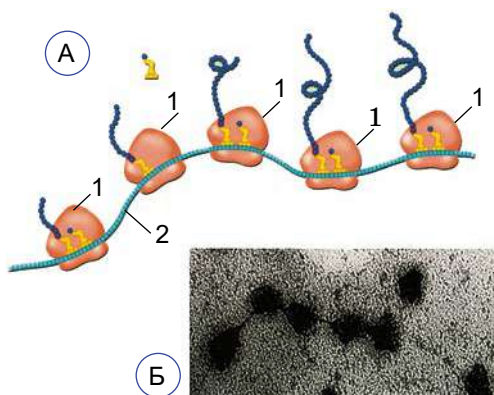
ється багато молекул певного білка (мал. 30.4). Завдяки об'єднанню окремих рибосом у полісоми за один і той самий проміжок часу синтезується більше молекул білків.

Процес синтезу білкової молекули триває доти, доки рибосома не сягне стоп-кодону (*пригадаймо*: таких стоп-кодонів три – **УАА**, **УАГ**, **УГА**). Тоді трансляція припиняється: вільна рибосома розпадається на субодиниці, які згодом об'єднуються навколо іншої молекули мРНК.

Синтезована молекула білка може надходити в цитоплазму або в порожнину ендоплазматичної сітки, якою транспортується в певну ділянку клітини або виводиться за її межі.

Цікаво знати. Для підвищення надійності процесу завершення синтезу білкової молекули (термінації) стоп-кодони дублюються. Першим при цьому зазвичай є кодон **УАА** (основний стоп-кодон), а за ним на дуже близькій відстані розташований один із запасних стоп-кодонів – **УАГ** або **УГА**.

На заключному етапі біосинтезу синтезований білок набуває своєї природної просторової структури. За участі відповідних ферментів відщеплюються зайві амінокислотні залишки. До складу молекули можуть вводитись небілкові складові (ортофосфатні, карбоксильні та



Мал. 30.4. Структура та функції полірибосоми. А. Декілька рибосом (1), об'єднані молекулою мРНК (2), утворюють полірибосому (полісому). Б. Електронна мікрофотографія полірибосоми

інші групи, вуглеводи, ліпіди тощо). Цей процес називають *посттрансляційною модифікацією білкової молекули*. Він відбувається переважно в комплексі Гольджі. Лише набувши певної просторової структури, молекула білка стає функціонально активною.

Процеси синтезу білкових молекул потребують витрат енергії, яка вивільняється під час розщеплення молекул АТФ. Найбільша кількість енергії витрачається на процеси трансляції.

Узагальнення

Біосинтез білка – це процес утворення білкових молекул на матриці – молекулі мРНК. У ньому беруть участь молекули ДНК, мРНК, рРНК, тРНК, рибосоми та ферменти. Основні етапи біосинтезу білка: транскрипція, трансляція (реалізація спадкової інформації шляхом синтезу білкової молекули за участі рибосом), термінація (завершення процесу синтезу) та посттрансляційна модифікація (набуття білком певної просторової структури, у складних білків – введення до складу молекули небілкових частин). На одній молекулі мРНК може одночасно перебувати кілька рибосом, утворюючи полірибосому (полісому) – комплекс, що забезпечує одночасний синтез кількох копій білка. Усі етапи біосинтезу білкових молекул потребують витрат енергії АТФ.

Поміркуйте

1. Гени кодують структуру білкових молекул або молекул РНК. Як вони впливають на перебіг синтезу інших молекул: вуглеводів, ліпідів тощо?
2. Чому різні етапи синтезу білка відбуваються в різних частинах клітини?
3. Яка роль старт-кодону АУГ та стоп-кодонів УАА, УАГ, УГА?



Практична робота «Розв’язування елементарних вправ з реплікації, транскрипції та трансляції».



§ 31. Генетика – наука про закономірності спадковості й мінливості організмів



Чому об’єктами вивчення генетики є протилежні властивості живого – спадковість і мінливість?

Генетика – наука про закономірності спадковості та мінливості.

Чому діти схожі на своїх батьків? Чому особини одного виду більшою чи меншою мірою подібні між собою, тоді як представники різних видів – переважно ні? Це пояснюється тим, що всім організмам властива універсальна біологічна властивість – *спадковість*, яка забезпечує генетичний зв’язок між поколіннями.

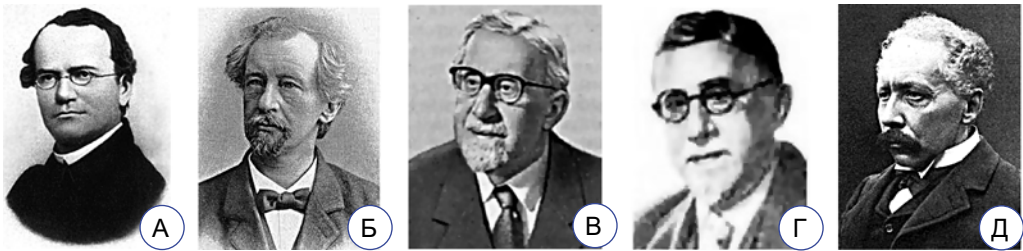
Ви, мабуть, помічали, що протягом життя ваш організм, як і організми інших людей, зазнає змін. Те саме відбувається і з представниками інших видів. До того ж майже неможливо знайти дві абсолютно ідентичні особини одного виду. Це явище пов’язане з іншою універсальною властивістю живого – *мінливістю*.

- **Спадковість** – це здатність організмів передавати свої ознаки та особливості індивідуального розвитку нащадкам.

- **Мінливість** – здатність організмів набувати нових ознак у процесі індивідуального розвитку, а також в історичному розвитку виду.

Спадковість і мінливість – взаємопов’язані, але водночас протилежні властивості. Завдяки спадковості зберігається стабільність біологічних видів, а завдяки мінливості виникають нові ознаки та їхні варіанти, що створює умови для формування нових видів і забезпечує історичний розвиток біосфери.

Два загальнобіологічних явища – спадковість і мінливість – є предметом досліджень науки **генетики** (від грец. *генезис* – походження). Датою її народження вважають 1900 р., коли трое науковців – нідерландський Г. де Фріз, німецький К. Корренс та австрійський Е. Чермак – під час досліджень з гібридизації рослин незалежно один від одного перевірнули закони спадковості, які ще 1865 року встановив чеський дослідник Г. Мендель. Назву «генетика» новій науці запропонував 1906 р. англійський науковець В. Бетсон (мал. 31.1).



Мал. 31.1. Науковці, які були біля витоків генетики. А. Грегор Йоганн Мендель (1822–1884) – чеський священник та дослідник, установив основні закони спадковості. Б. Гуго де Фріз (1848–1935) – нідерландський ботанік і генетик; ввів термін «мутація». В. Карл Корренс (1864–1933) – німецький біолог, відомий фахівець у галузі ботаніки та мікології. Г. Еріх Чермак (1871–1962) – австрійський учений-генетик, працював у галузі схрещування культурних рослин. Д. Вільям Бетсон (1861–1926) – англійський учений, який запропонував назву «генетика»

Поняття про фенотип. Людський організм складається з мільярдів нестатевих клітин (їх ще називають *соматичними*), кожна з яких має ідентичний набір генів. Кожна нестатова клітина (крім деяких, *пригадайте* яких) містить ядро з ідентичним набором хромосом – каріотипом. У складі кожної пари гомологічних хромосом одна успадкована від матері, друга – від батька. У складі хромосоми кожна хроматида (сестринська хромосома) містить молекулу ДНК, у якій закодована інформація про будову білків і молекул РНК.

Різні алелі певного гена визначають різні варіанти певних ознак – **фенів** (від грец. *фаіно* – являю, виявляю). Приклади окремих фенів: жовте чи зелене забарвлення насіння гороху посівного, блакитний чи карий колір очей людини, забарвлення черепашок (мал. 31.2) тощо.

Унаслідок взаємодії генотипу з факторами навколишнього середовища формується певний **фенотип** (від грец. *фаіно* і *типос* – зразок), тобто сукупність усіх ознак і властивостей організму. На малюнку 32.3 зображено два варіанти фенотипу денного метелика – сонцевичка змін-



Мал. 31.2. Приклади різних фенів: різні варіанти забарвлення черепашки одного з видів наземного черевоногого молюска роду Анікса



Мал. 31.3. Весняна (1) та літня (2) форми метелика сонцевичка змінного

ного. Якщо дорослий метелик виходить з лялечки, яка розвивалася за низьких температур (весняна форма), основне тло його крил має цегляне забарвлення (1). Якщо ж лялечка розвивалася за підвищеної температури (літня форма), тло крил метелика темне (2).

Упродовж життя генотип особини залишається незмінним. А ось фенотип протягом індивідуального розвитку зазвичай змінюється.

Типи взаємодій алельних генів між собою. Пригадаймо: у деяких генів може існувати багато алелів – десятки, а іноді навіть сотні. Однак у диплоїдного організму (в якого кожна хромосома має парну – гомологічну) одночасно можуть бути лише два алелі одного гена: або однакові, або різні.



Мал. 31.4. Домінантні та рецесивні варіанти ознак організмів. Алель, який визначає червоне забарвлення плодів помідорів (А), домінує над алелем, що визначає жовте (Б)

За наявності двох різних алелів один з них може пригнічувати прояв іншого. У такому разі проявляється лише один варіант ознаки, тоді як інший не спостерігається. Наприклад, у помідорів алель, що визначає червоне забарвлення плодів, домінує над алелем жовтого кольору (мал. 31.4). У людини алель, що зумовлює карий колір очей, є домінантним щодо алеля блакитного кольору.

Явище пригнічення прояву одного алеля іншим називають **домінуванням**. Алель, що завжди проявляється в присутності іншого та визначає певний варіант ознаки, називають **домінантним** (від лат. *домінантіс* – панівний), а той, що не проявляється в присутності домінантного, – **рецесивним** (від лат. *рецесус* – відступ, видалення).

Домінантні алелі позначають великими літерами латинського алфавіту (А, В, С, D тощо), а відповідні їм рецесивні – малими (а, b, c, d тощо).

Можливі різні варіанти поєднання алельних генів у генотипі організмів. Припустимо, що в організмів певного виду певний ген представлений лише двома алелями: домінантним (А) та рецесивним (а). У нестатевих (соматичних) клітинах диплоїдного організму одночасно можуть бути лише два алелі одного гена. Тому

варіантів поєднання цих алелів (генотипів) може бути три: **АА**, **Аа** та **аа**. Як ви помітили, у першому та третьому варіантах у генотипі особин є два однакових алелі – це генотипи **АА** та **аа**. Таких особин називають **гомозиготними** (або **гомозиготами**). Особин, у генотипі яких представлені два різних алелі – один домінантний (**А**), другий – рецесивний (**а**), – називають **гетерозиготними** (або **гетерозиготами**).

- **Гомозигота** (від грец. *гомос* – однаковий та *зиготос* – сполучений разом) – це клітина чи особина з диплоїдним або поліплоїдним набором хромосом, гомологічні хромосоми якої містять ідентичні алелі певного гена.

- **Гетерозигота** (від грец. *гетерос* – інший) – це клітина або особина з диплоїдним або поліплоїдним набором хромосом, гомологічні хромосоми якої містять різні алелі певного гена.

Узагальнення

Предметом вивчення генетики є спадковість і мінливість організмів. Як наука генетика сформувалася 1900 року, коли Г. де Фріз, К. Корренс та Е. Чермак незалежно один від одного перевідкрили закономірності спадковості, встановлені Г. Менделем 1865 року. Фенотип – це сукупність ознак і властивостей організму, що формуються внаслідок взаємодії генотипу з умовами середовища. Гомозигота – клітина або особина з диплоїдним (або поліплоїдним) набором хромосом, гомологічні хромосоми якої містять однакові алелі певного гена. Гетерозигота – клітина або особина з диплоїдним (або поліплоїдним) набором хромосом, гомологічні хромосоми якої містять різні алелі певного гена.

Поміркуйте

1. Відома загальнобіологічна закономірність, згідно з якою гетерозиготи більш життєздатні порівняно з гомозиготами. Поміркуйте чому.
2. Як пов'язані між собою генотип і фенотип організму?
3. Чому генетика як наука виникла значно пізніше багатьох інших біологічних дисциплін?

§ 32. Методи генетичних досліджень



Який / які з методів генетики не застосовують для дослідження спадковості людини? Чому?

Класичні методи генетичних досліджень. Одним з перших у генетичних дослідженнях почали застосовувати **гібридологічний метод**. Він полягає у схрещуванні (гібридизації) організмів, які різняться певними варіантами однієї чи кількох спадкових ознак. Отриманих у результаті цього нащадків називають **гібридами** (від лат. *гібрида* – суміш). На гібридизації базується **гібридологічний аналіз** – дослідження характеру успадкування різних варіантів ознак за допомогою системи схрещувань. Для цього підраховують кількість особин з певним фенотипом серед нащадків, отриманих унаслідок гібридизації.

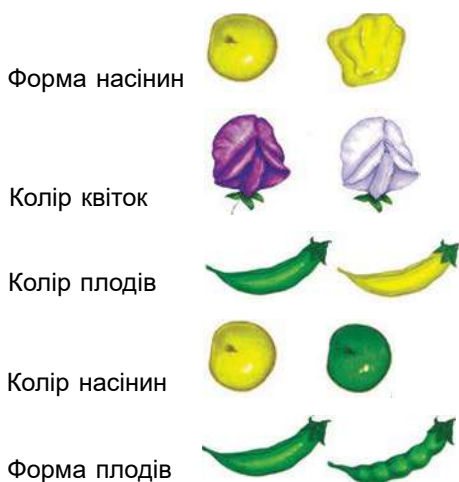
Науковцем, який використав гібридологічний метод для відкриття закономірностей спадковості, був католицький священник з Августин-

ського монастиря у м. Брно (Чехія) Грегор Мендель (див. мал. 31.1, А). Об'єктом своїх досліджень він обрав горох посівний. Горох посівний виявився надзвичайно вдалим об'єктом для генетичних досліджень, оскільки: має чітко виражені й різноманітні ознаки, зручні для спостереження (мал. 32.1); розмножується статевим, що дає змогу проводити контрольовані схрещування; здатний як до перехресного запилення, так і до самозапилення; має короткий період вегетації; є зручним у вирощуванні.

Схрещування може бути моногібридним, дигібридним і полігібридним. *Моногібридне* (від грец. *монос* – один та лат. *гібрида*) *схрещування* – це гібридизація батьківських форм, які відрізняються різними варіантами лише однієї досліджуваної спадкової ознаки (наприклад,

забарвленням насіння); *дигібридне* (від лат. *ди* – два та *гібрида*) – двох ознак (наприклад, забарвленням насіння та структурою його поверхні); *полігібридне* (від грец. *поліс* – багато та *гібрида*) – трьох (наприклад, забарвленням насіння, структурою його поверхні та забарвленням віночка квітки) і більше ознак.

Схрещуючи між собою рослини гороху із чітко вираженими варіантами однієї або декількох ознак, Г. Мендель отримав кілька чистих ліній для кожної з них: за кольором квіток (пурпурові або білі), кольором насіння (жовте або зелене), поверхнею насінин (гладенька або зморшкувата), висотою стебла (високе або низьке) тощо.



Мал. 32.1. Парні варіанти ознаки у гороху посівного

Чисті лінії – це генотипово однорідні нащадки однієї особини, отримані внаслідок самозапилення рослин, гомозиготні за досліджуваними генами. У тварин чисті лінії отримують шляхом близькосторідненого схрещування упродовж кількох поколінь до того етапу, коли пересвідчуються в їхній генетичній одноманітності (у фенотипі нащадків не проявляються інші варіанти ознаки).

Подальше схрещування рослин чистих ліній між собою та отриманих гібридів дало змогу Г. Менделю сформулювати універсальні закономірності спадковості, відомі як закони Менделя (про них ви дізнаєтеся з наступних параграфів).

✓ **Дізнайтеся більше** про дослід Г. Менделя, розглянувши гербарний зразок, що ілюструє успадкування ознак у гороху, за QR-кодом.



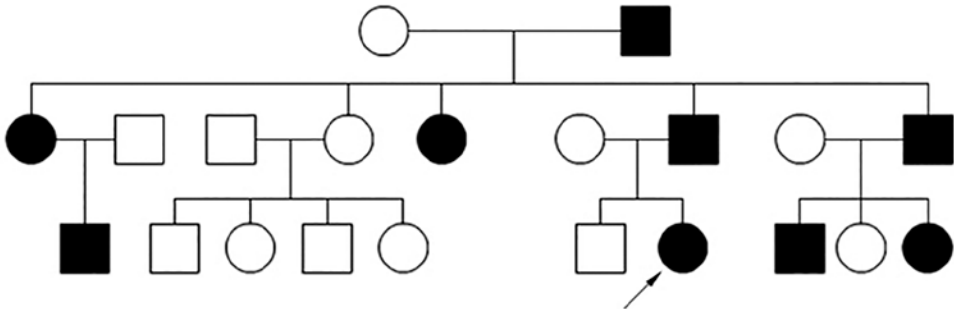
Існують організми, для дослідження яких гібридологічний метод не застосовують. Передусім це стосується генетичних досліджень людини. Людина є дуже складним об'єктом для таких досліджень через тривалий час статевого дозрівання, повільну зміну поколінь,

невелику кількість нащадків, а також через етичні обмеження. Замість цього в генетиці людини (та деяких інших організмів) використовують генеалогічний метод, або метод родоводів.

Генеалогічний метод полягає у вивченні родоводів організмів, щоб простежити характер успадкування різних варіантів певних ознак у ряді поколінь. У медичній генетиці чи селекції за його допомогою встановлюють генотип особин і вираховують імовірність прояву того чи іншого варіанта ознаки у майбутніх нащадків.

Медична генетика – наука про спадкові хвороби та порушення розвитку людини.

Родоводи складають у вигляді схем за певними правилами: організм жіночої статі позначають колом, чоловічої – квадратом. Позначки особин одного покоління розташовують у ряд і з'єднують між собою горизонтальними лініями, а позначки предків і нащадків – вертикальними. Позначки особин, які мають той чи інший варіант досліджуваної ознаки (наприклад, з хворобою), зафарбовують (мал. 32.2). Що більше поколінь людей або інших організмів включає родовід, то він повніший і результати генеалогічного аналізу достовірніші. Отже, генеалогічний метод включає два основних етапи: складання власне родоводу та здійснення генеалогічного аналізу успадкування тих чи інших варіантів ознак.



Мал. 32.2. Родовід, побудований за правилами (стрілочкою позначено пробанда – людину, для якої цей родовід було побудовано)

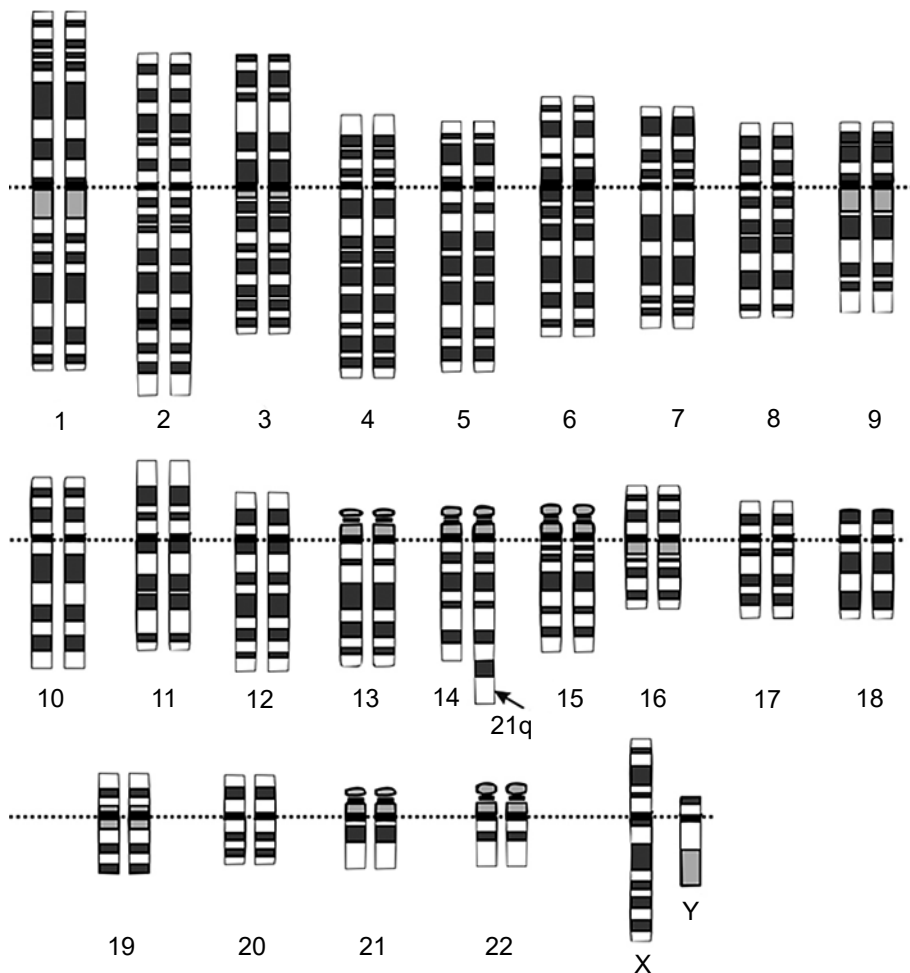
✓ **Дізнайтеся більше** про дальтонізм та альбінізм за QR-кодом.



Застосування **популяційно-статистичного методу** дає змогу встановити генетичну структуру популяцій, тобто які з можливих алелів усіх генів організмів певного виду поширені в певній популяції та з якою частотою вони трапляються. Цей метод використовують і в медичній генетиці для вивчення поширення алелів, які зумовлюють спадкові захворювання чи порушення розвитку в людини, тому його застосовують для прогнозування **ймовірності** народження дитини з певним варіантом генотипу.

Цитогенетичний метод базується на дослідженні особливостей хромосомного набору (каріотипу) організмів. Він дає змогу виявляти порушення, пов'язані зі зміною як кількості хромосом, так і будови окре-

мих з них. Каріотип вивчають у клітині на стадії метафази (*пригадаймо*: у цей період клітинного циклу структура хромосом виражена найчіткіше, див. 25.2). Забарвлення спеціальними барвниками, здатними зв'язуватися з певними ділянками хромосом, утворює своєрідний «штрихкод», за яким можна виявити порушення в будові хромосом (мал. 32.3).



Мал. 32.3. Один із варіантів каріотипу чоловіка із синдромом Дауна: найчастіше (близько 91 % випадків) він пов'язаний з появою зайвої (третьої) 21-ї хромосоми, але у 2–3 % випадків він може бути зумовлений перенесенням ділянки 21-ї хромосоми на іншу (найчастіше на 14-ту)

Біохімічні методи використовують для діагностики спадкових захворювань, пов'язаних з порушенням обміну речовин. За їхньою допомогою виявляють білки, а також проміжні продукти обміну, не властиві в нормі певному організму, що свідчить про наявність мутантних генів. Відомо понад 1000 спадкових захворювань людини, які спричиняють змінені гени. Важливо вчасно виявляти такі захворю-

вання, оскільки багато з них можна скоригувати за допомогою спеціальної дієти (як-от у випадку з фенілкетонурією) або запобігти їх прояву в майбутньому (наприклад, у разі цукрового діабету).

Близнюковий метод полягає у порівнянні формування варіантів ознак в однайцевих близнят, які завжди однієї статі, бо мають однакові генотипи (*пригадайте*, як виникають однайцеві близнята). Такі дослідження дають змогу з'ясувати роль чинників довкілля у формуванні фенотипу. В однайцевих близнят часто спостерігають прояв подібних захворювань, таких як бронхіальна астма, кір (збіг – понад 90 %), шизофренія, цукровий діабет (близько 50 %), туберкульоз (понад 50 %) тощо. За допомогою близнюкового методу підтверджено генетичну складову в хворобах, які раніше вважали неспадковими, наприклад, деяких інфекційних і серцево-судинних.

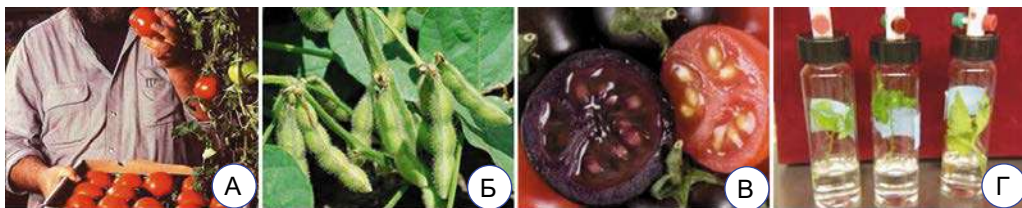
Науковці шукали способи визначення ризику розвитку певних захворювань, використовуючи **метод маркерів**. Одним із прикладів маркерних ознак є *дерматогліфіка*, що ґрунтується на вивченні рельєфу шкіри на пучках пальців, долонях і поверхні підшви людини. Її використовують для діагностики деяких спадкових захворювань (наприклад, на долонях людей із синдромом Дауна є лише одна поперечна та одна поздовжня згинальні борозни), а також у криміналістиці для доведення причетності до скоєння злочину.

Методи молекулярної генетики та генетичної інженерії дають змогу вивчити організацію геному, молекулярну структуру як окремих генів, так і всього генотипу, встановити механізми, від яких залежить імовірність реалізації спадкової інформації (експресія генів).

Існують сучасні методи, що дають змогу визначати функції генів, а також клонувати окремі гени або їхні групи, які становлять інтерес для дослідників. Методи, пов'язані з ДНК-діагностикою, надають можливість ідентифікувати особу, визначати видову належність організмів, установлювати ступінь спорідненості між окремими організмами, видами та іншими систематичними категоріями, а також виявляти в організмі наявність збудників захворювань.

Методи генетичної інженерії базуються на досягненнях молекулярної біології. За їхньою допомогою можна виділити з організмів окремі гени або синтезувати штучно, перебудувати і ввести їх у геном іншої клітини або організму. Науковці можуть сполучати гени різних видів в одній клітині, тобто поєднувати в одній особині спадкові ознаки, притаманні цим видам. Організми, отримані в такий спосіб, називають **трансгенними** (від лат. *транс* – через і грец. *генос* – рід, походження), або **генетично модифікованими** (скорочено – **ГМО**).

Цікаво знати. На малюнку 32.4 наведено приклади генетично модифікованих рослин. Зокрема, використано гени, що надають плодам помідорів *FlavrSavr* стійкості до пошкоджень під час транспортування та більшого терміну зберігання (мал. 32.4, А). У геном *RR-soi* впроваджено ген ферменту з агробактерій, що забезпечує стійкість до гербіциду гліфосату (мал. 32.4, Б). У геном помідора перенесено два гени антирину (у побуті цю рослину називають «ротики»). Завдяки їм плоди насичені антоціаніном (ліворуч), що є ефективним у профілактиці раку (мал. 32.4, В). У геном тополі вбудовано ген кролика, що кодує цитохром Р450 (цитохроми – мембранні білки, що включають ковалентно зв'язаний гем (містять йон Fe^{2+}). Такі тополі поглинають токсичний газ трихлоретилен і розщеплюють його до безпечних сполук (мал. 32.4, Г).



Мал. 32.4. Генетично модифіковані рослини

Згідно з Декларацією прав людини і різними міжнародними угодами заборонено будь-яке втручання у спадкову інформацію людини різними експериментальними методами досліджень.

Секвенування ДНК (від англ. *sequence* – «послідовність») – це метод, який дає змогу визначити порядок розташування нуклеотидів у ланцюзі молекули нуклеїнової кислоти. Цю технологію використовують для встановлення нуклеотидної послідовності як окремих генів, так і цілого геному. У медичній генетиці секвенування ДНК застосовують для виявлення змін у послідовності нуклеотидів, тобто мутацій.

Полімеразна ланцюгова реакція (скорочено **ПЛР**, від англ. *polymerase chain reaction, PCR*) – метод, який дає змогу багаторазово збільшити кількість певних фрагментів ДНК у біологічному матеріалі (мал. 32.5). Такі фрагменти можуть мати довжину від кількох сотень до кількох тисяч пар нуклеотидів і зазвичай містяться в дуже малій концентрації. Цей метод також дає змогу зрощувати фрагменти ДНК, а також вводити в них задані нуклеотидні послідовності.

ПЛР є високоточним методом, який широко застосовують не лише в біологічних дослідженнях, а й у медичній практиці – для діагностики інфекційних, паразитарних і спадкових захворювань (*поміркуйте*, на чому ґрунтується така діагностика). Наприклад, під час пандемії COVID-19 ПЛР-тестування використовували для виявлення вірусу або підтвердження відсутності захворювання. Також його використовують у криміналістиці для ідентифікації особи та встановлення батьківства.



Мал. 32.5. А. Ампліфікатор – прилад, за допомогою якого збільшують число копій фрагментів ДНК. Б. Кері Бенкс Малліс (1944–2019) – американський біохімік, який з колегами розробив метод ПЛР; лауреат Нобелівської премії з хімії (1993 р.)

Цікаво знати. ПЛР застосовують й у таких науках, як палеонтологія та антропологія. За його допомогою учені можуть аналізувати молекули ДНК вимерлих тварин і

давніх людей (наприклад, єгипетських мумій), вік яких становить десятки тисяч років; аналізувати харчові раціони за рештками насіння в розкопаних селищах тощо.

Узагальнення

Гібридологічний метод базується на застосуванні різних систем схрещувань організмів. Генеалогічний метод передбачає складання родоводів для вивчення характеру успадкування ознак у ряді поколінь. За допомогою популяційно-статистичного методу досліджують генетичну структуру популяцій. Близнюковий метод вивчає вплив умов навколишнього середовища на формування фенотипу. Біохімічні методи застосовують для діагностики захворювань, пов'язаних з порушеннями обміну речовин. Цитогенетичний метод ґрунтується на вивченні каріотипу організму, що дає змогу виявляти як зміни кількості хромосом, так і будову окремих хромосом. До сучасних методів належать також методи молекулярної генетики та генетичної інженерії, зокрема полімеразна ланцюгова реакція (ПЛР) і секвенування геному.

Поміркуйте

1. Для чого використовують метод складання родоводів у медичній генетиці?
2. Під час дослідження яких ще організмів (окрім людини) доцільно використовувати генеалогічний метод?
3. Які з методів генетичних досліджень можна використати для встановлення родинних зв'язків між організмами?

§ 33. Закономірності спадковості, встановлені Г. Менделем (I та II закони)



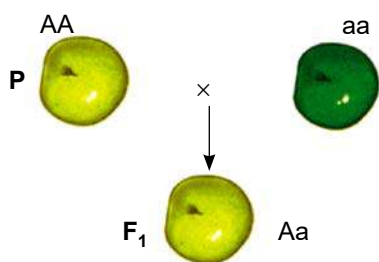
Чи можна вважати Грегора Менделя засновником генетики?

Дослідження Г. Менделя. Геніальні ідеї Г. Менделя (див. мал. 31.1, А), як це інколи буває, дещо випередили свій час. Адже коли він проводив свої дослідження, ще нічого не було відомо про гени, хромосоми, механізми розподілу спадкового матеріалу під час поділу клітини.

Ми вже згадували, що для своїх генетичних досліджень Г. Мендель вибрав дуже вдалий об'єкт – горох посівний – рослину з родини Бобові. Горох посівний здатний до самозапилення, його можна запилювати й перехресно. Це дає змогу здійснювати гібридизацію чистих ліній.

Результати досліджень Г. Мендель обробляв статистично, в кожному поколінні проводив багато схрещувань і підраховував велику кількість нащадків з певними варіантами ознак. Завдяки цьому йому вдалося встановити закономірності передавання спадкових ознак у низці поколінь гібридів, що розмножувалися статевим шляхом.

Перший і другий закони Г. Менделя. Свої дослідження Г. Мендель розпочав з *моногібридного* схрещування. Він схрестив між собою дві чисті лінії гороху посівного, які відрізнялися за кольором насіння, що мало відповідно жовтий або зелений колір (умовне позначення: Р – батьківські форми). Насіння, яке утворювали нащадки, отримані внаслідок такого схрещування (F_1 – гібриди першого покоління), ви-



Мал. 33.1. Моногібридне схрещування: прояв закону одноманітності гібридів першого покоління

явилося одноманітним – воно було лише жовтого кольору (мал. 33.1).

Так Г. Мендель встановив **закон одноманітності гібридів першого покоління**: у фенотипі гібридів першого покоління проявляється лише один з двох варіантів ознаки, а саме – домінантний. Згодом таку закономірність назвали **законом домінування**.

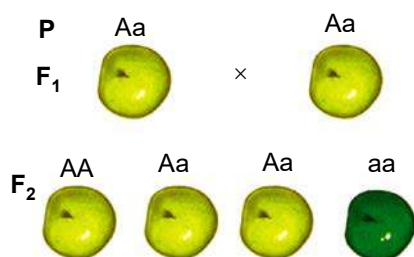
Потім Г. Мендель вирощував рослини з насіння, отриманого від гібридів першого покоління, і схрещував їх між собою (див. *Дізнайтеся більше* § 32). Їхні нащадки (гібриди другого покоління – F₂) утвори-

ли 8023 насінини, з яких 6022 були жовтого кольору, а 2001 – зеленого. Серед насіння, утвореного гібридами другого покоління, знову з'явилися насінини зеленого кольору (рецесивний варіант ознаки), які становили приблизно 1/4 від загальної кількості насіння, тоді як частка насіння жовтого кольору (домінантний варіант ознаки) становила приблизно 3/4.

Хід схрещування зручно записувати за допомогою решітки Пеннета. Її так назвали на честь англійського генетика Реджинальда Крандалла Пеннета (1875–1967), який уперше запропонував так позначати хід схрещування. По горизонталі записують гамети батьківської особини, а по вертикалі – материнської. У місцях перетину горизонтального та вертикального рядків указують генотипи нащадків. *Зверніть увагу* на символічні позначення, які використовують дослідники: символами ♀ та ♂ – відповідно позначають особини жіночої та чоловічої статі.

Запишемо за допомогою решітки Пеннета хід схрещування батьківських особин, гомозиготних за домінантним і рецесивним алелями:

♀ / ♂	a	a
A	Aa	Aa
A	Aa	Aa



Мал. 33.2. Прояв закону розщеплення

Виявлену закономірність назвали **законом розщеплення**: під час схрещування гібридів першого покоління між собою серед їхніх нащадків спостерігають розщеплення ознак: у фенотипі гібридів другого покоління рецесивний варіант ознаки проявляється у 1/4 випадків, а домінантний – у 3/4 (мал. 33.2).

Згідно із законом розщеплення у разі повного домінування серед гібридів другого покоління (F₂) спостерігають розщеплення за фенотипом у співвідношенні 3 (домінантний варіант ознаки) : 1 (рецесивний варіант ознаки). *Розщеплення* – це прояв

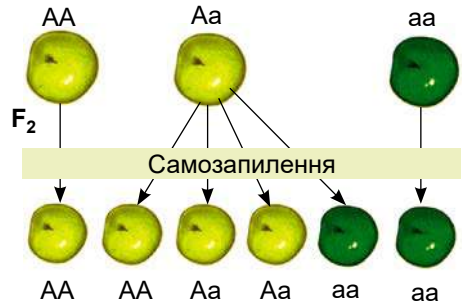
обох варіантів ознаки (як домінантного, так і рецесивного) у фенотипі нащадків гібридних особин. Запишемо за допомогою решітки Пеннета хід схрещування гетерозиготних батьківських особин.

♀ / ♂	A	a
A	AA	Aa
a	Aa	aa



Підрахуйте за малюнком у рубриці **Дізнайтеся більше** § 32 кількість жовтих і зелених насінин на гербарному екземплярі. Чи відповідає це розщеплення другому закону Менделя?

Г. Мендель простежив успадкування домінантного й рецесивного варіантів ознак і в наступних поколіннях гібридів (мал. 33.3). Він звернув увагу на те, що з насіння зеленого кольору вирости рослини, які після самозапилення утворювали лише зелене насіння. Натомість рослини, що проросли із жовтого насіння, поводитися по-різному: у третини з них після самозапилення все насіння було жовтим, а у двох третин – жовте й зелене насіння у співвідношенні 3 : 1. Отже, рослини, що дають жовте насіння, можуть відрізнятися за генотипом, а ті, що утворюють насіння з рецесивним варіантом ознаки (зеленим кольором), мають однаковий генотип.



Мал. 33.3. Розщеплення за генотипом та фенотипом серед нащадків другого покоління гібридів гороху посівного в разі самозапилення

Що таке аналізуюче схрещування та навіщо його проводять. Для встановлення генотипу особи з домінантним фенотипом (а це може бути гомозигота за домінантним алелем чи гетерозигота) її схрещують з особою, гомозиготною за рецесивним алелем. Такий варіант схрещування називають **аналізуючим**.

Припустімо, що популяція гороху посівного складається з особин, які мають генотипи **AA**, **Aa** та **aa**. При цьому домінантний алель визначає фіолетове забарвлення віночка, рецесивний – біле. Щоб з'ясувати генотип особин з фіолетовим забарвленням віночка, їх слід схрестити з особинами, які мають біле забарвлення віночка. Якщо особина, генотип якої хочуть перевірити, була гетерозиготною за домінантним алелем, хід схрещування буде таким:

♀ / ♂	a	a
A	Aa	Aa
a	aa	aa

Отже, якщо внаслідок аналізуючого схрещування серед нащадків спостерігають розщеплення за фенотипом у співвідношенні 1 : 1, то особина, чий генотип визначали, була гетерозиготною. Якщо ж серед

нащадків, отриманих унаслідок аналізуючого схрещування, розщеплення за фенотипом не спостерігають, то батьківська особина, генотип якої перевіряли, була гомозиготною. У селекції аналізуюче схрещування дає змогу визначити генотип особин, яких планують використати для отримання нащадків з певним фенотипом.

Цитологічні основи і статистичний характер законів спадковості.

Г. Мендель запропонував гіпотезу, яку згодом було підтверджено експериментально. Згідно з нею, гамети гібридного (гетерозиготного) диплоїдного організму «чисті», тобто кожна з його гамет у нормі має лише один алель певного гена і не може одночасно нести два чи більшу їх кількість. Ці погляди Г. Менделя розвинув англійський генетик В. Бетсон (див. мал. 31.1, Д). Відповідну закономірність названо **законом (гіпотезою) чистоти гамет**.

Гомозиготна особина формує лише один тип статевих клітин (вони мають лише домінантний або лише рецесивний алель певного гена), тоді як гетерозиготна – два типи в рівних кількостях (50 % з домінантним алелем певного гена і 50 % – з рецесивним).

Для того щоб установити виявлені закономірності, Г. Менделю довелося проаналізувати велику кількість схрещувань. У кожному окремому випадку нащадок гетерозиготної пари успадковує певний алель випадково. Це означає, що коли троє нащадків уже виявилися з домінантним фенотипом, то в четвертого не обов'язково проявиться рецесивний – навіть відповідно до закону розщеплення. Кожен новий нащадок має незалежну ймовірність успадкувати: $3/4$ – домінантний фенотип і $1/4$ – рецесивний.

✓ **Дізнайтеся більше** про цитологічні основи та статистичний характер законів спадковості за QR-кодом.



Один зі способів нестатевого розмноження – вегетативний. Чому за такого типу розмноження не спостерігають розщеплення ознак у потомстві?

Узагальнення

У результаті своїх досліджень Г. Мендель сформулював закони спадковості. Перший закон (закон домінування): у фенотипі гібридів першого покоління проявляється лише один з двох варіантів ознаки, а саме – домінантний. Другий закон (закон розщеплення) – у разі схрещування гібридів першого покоління між собою серед їхніх нащадків спостерігають розщеплення ознак: у фенотипі гібридів другого покоління рецесивний варіант ознаки проявляється у $1/4$ випадків, а домінантний – у $3/4$.



Поміркуйте

1. Чому Г. Мендель для своїх схрещувань брав рослини, які були представниками чистих ліній?
2. Чому під час аналізуючого схрещування, щоб дослідити генотип особини з домінантним фенотипом, підбирають рецесивного гомозиготного партнера?
3. Чи може дитина успадкувати один варіант ознаки від батька, а інший – від матері?

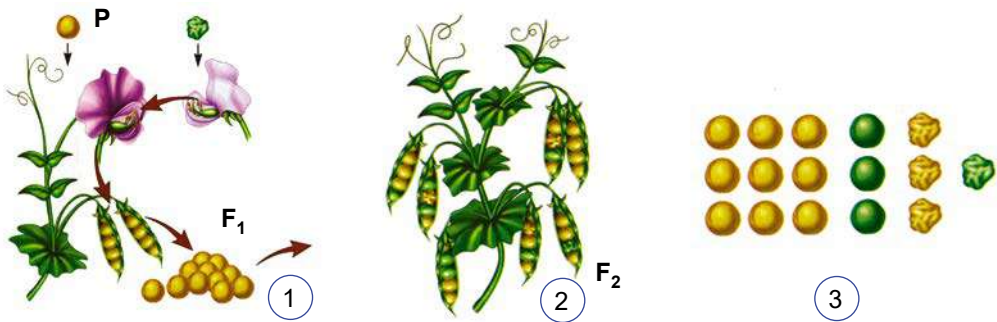
§ 34. Закономірності спадковості, встановлені Г. Менделем (закон незалежного комбінування ознак). Варіанти взаємодії алельних генів



Як різноманітність фенотипів організмів певного виду залежить від різних варіантів взаємодії алельних генів?

Третій закон Менделя. У подальших дослідженнях Г. Мендель ускладнив умови проведення дослідів. Він обрав рослини, які відрізнялися різними варіантами двох (**дигібридне схрещування**) або більшої кількості (**полігібридне схрещування**) досліджуваних спадкових ознак. Зокрема, він схрестив між собою чисті лінії гороху посівного, представники яких формували жовте насіння з гладенькою поверхнею та зелене – зі зморшкуватою (мал. 34.1). Отримані гібриди першого покоління (F_1) утворювали лише насіння жовтого кольору з гладенькою поверхнею (домінантні варіанти обох досліджуваних ознак).

Таким чином, Г. Мендель спостерігав прояв закону одноманітності гібридів першого покоління.



Мал. 34.1. Прояв закону незалежного комбінування ознак: 1 – гібриди першого покоління (F_1) утворюють лише один варіант фенотипу насіння; 2 – гібриди другого покоління (F_2) формували чотири фенотипові групи насінин; 3 – співвідношення фенотипових груп насінин, утворених гібридами другого покоління (F_2) при дигібридному схрещуванні (P – батьківські особини)

Схрестивши гібриди першого покоління (F_1) між собою, Г. Мендель виявив серед гібридів другого покоління (F_2) чотири фенотипові групи в таких співвідношеннях; ці рослини утворювали приблизно 9 частин насіння жовтого кольору з гладенькою поверхнею (315 насінин), 3 частини – жовтого кольору зі зморшкуватою поверхнею (101 насінина), ще 3 частини – зеленого кольору з гладенькою поверхнею (108 насінин), 1 частину – зеленого кольору зі зморшкуватою поверхнею (32 насінини).

Такий характер розщеплення пояснюється тим, що гени, які визначають забарвлення насіння та характер його поверхні, успадковуються незалежно один від одного.

Запишемо за допомогою решітки Пеннета хід схрещування гібридів першого покоління між собою (пригадайте правила її складання):

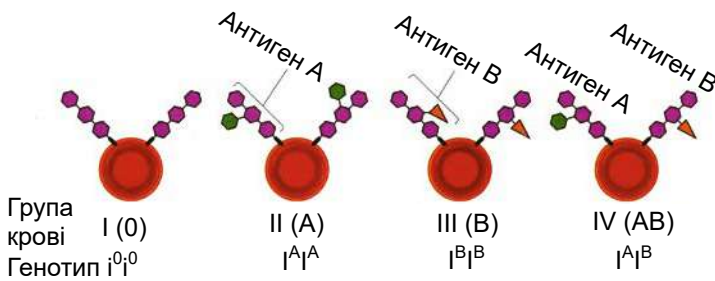
♀ / ♂	AB	Ab	aB	ab
AB	AABB жовті гладенькі	AABb жовті гладенькі	AaBB жовті гладенькі	AaBb жовті гладенькі
Ab	AABb жовті гладенькі	AAbb жовті зморшкуваті	AaBb жовті гладенькі	Aabb жовті зморшкуваті
aB	AaBB жовті гладенькі	AaBb жовті гладенькі	aaBB зелені гладенькі	aaBb зелені гладенькі
ab	AaBb жовті гладенькі	Aabb жовті зморшкуваті	aaBb зелені гладенькі	aabb зелені зморшкуваті

Щоб пояснити отримані результати, Г. Мендель простежив успадкування різних варіантів кожної з двох ознак окремо. Співвідношення насіння різного кольору, яке утворювали гібриди другого покоління, виявилось таким: приблизно 12 частин насіння мало жовтий колір, а 4 – зелений. Тобто розщеплення за ознакою кольору, як і в разі моногібридного схрещування, становило 3 : 1. Те саме він спостерігав й у разі розщеплення за ознакою характеру поверхні насіння: приблизно 12 частин насіння мало гладеньку поверхню, а 4 – зморшкувату. Таким чином, розщеплення за ознакою характеру поверхні насіння також було 3 : 1.

На підставі отриманих результатів Г. Мендель сформулював **закон незалежного комбінування ознак**: у разі ди- або полігібридного схрещування розщеплення за кожною ознакою відбувається незалежно від інших. Тобто дигібридне схрещування за умови, що один з алельних генів повністю домінує над іншим, становить, по суті, два моногібридних, які ніби накладаються одне на одне, тригібридне – три і т. д.

Варіанти взаємодії алельних генів. Трапляються випадки, коли у формуванні певного варіанта ознаки беруть участь обидва алельні гени. Прикладом може слугувати успадкування груп крові в людини. *Пригадаймо*: у складі мембран еритроцитів містяться антигени – аглютиногени, які позначають латинськими літерами **A** і **B**. Зі свого боку, у плазмі крові можуть бути присутні антитіла – аглютиніни, які позначають грецькими літерами α і β . Якщо зустрічаються сполуки **A** і α або **B** і β , між ними відбувається реакція, що нагадує реакцію «антиген – антитіло», й еритроцити склеюються між собою.

Наявність у мембрані еритроцитів антигенів певного типу зумовлюється дією алелів, які позначають як I^A та I^B . Алель i^0 є неактивною формою цього гена. Алелі I^A та I^B повністю домінують над i^0 . Тому в осіб із генотипами $I^A i^0$ або $I^B i^0$ проявляється дія домінантного алеля – відповідно формується друга (**A**) або третя (**B**) група крові. Однак I^A і I^B не домінують один над одним. Якщо в генотипі наявні обидва ці алелі ($I^A I^B$), у мембранах еритроцитів одночасно присутні антигени обох типів. У такому разі формується четверта група крові (**AB**) (мал. 34.2).



Мал. 34.2. Різні варіанти антигенів у мембранах еритроцитів людини

Участь обох алельних генів у визначенні певного варіанта ознаки гетерозиготної особини називають **кодомінантністю** (від лат. *co* – разом і *домінантіс*). Коли жоден з алелів не домінує над іншим, спостерігають **неповне домінування**. Наприклад, унаслідок схрещування гомозиготних рослин ротиків, одна з яких мала червоне забарвлення віночка квітки, інша – біле, нащадки, отримані шляхом такого схрещування, матимуть рожеві квітки (мал. 34.3).



Мал. 34.3. Приклад неповного домінування алелів, які визначають забарвлення віночка у ротиків: 1, 2 – батьківські форми; 3 – гібрид першого покоління

Є алелі, які, проявляючись у фенотипі, призводять до загибелі організму на певній стадії його розвитку. Їх називають **летальними** (від лат. *letalіs* – смертельний). Найчастіше летальні алелі рецесивні, тому можуть проявлятися у фенотипі зазвичай лише в гомозиготному стані. Прикладом домінантного летального алеля є алель гена гантингтину, який спричиняє хворобу Гантингтона – прогресування когнітивних і психічних порушень у віці 35–44 років.

Узагальнення

Третій закон спадковості Г. Менделя (закон незалежного комбінування ознак) стверджує, що в разі ди- або полігібридного схрещування розщеплення за кожною ознакою відбувається незалежно від інших. Існують різні варіанти взаємодії алельних генів. Крім повного домінування одного алеля над іншим, існує явище кодомінантності, коли обидва алелі певного гена беруть участь у визначенні певного варіанта ознаки гетерозиготної особини (це явище спостерігають при успадкуванні групи крові людини). Також відомий варіант взаємодії між алельними генами, коли жоден з них не домінує над іншим (явище неповного домінування). Є алелі, які проявляючись у фенотипі, призводять до загибелі організмів (летальні алелі).

Поміркуйте

1. Чому третій закон Менделя називають законом незалежного комбінування станів ознак?
2. За якої форми взаємодії алельних генів розщеплення за генотипом та за фенотипом є однаковим?
3. Чому в популяціях організмів зберігаються летальні алелі, незважаючи на те, що вони здатні викликати загибель особин, у чистому генотипі вони присутні?



Практична робота «Розв'язування елементарних вправ з генетики (моно- та дигібридне схрещування)».



§ 35. Явище зчепленого успадкування. Хромосомна теорія спадковості

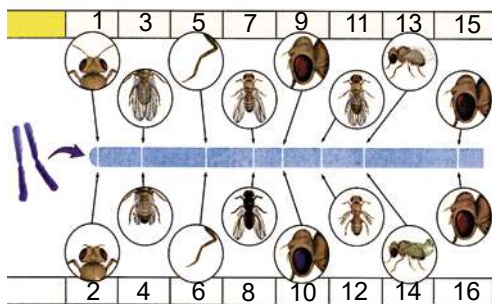


Чому характер розщеплення під час дослідження успадкування двох ознак може не відповідати третьому закону Менделя?

Учені, намагаючись повторювати досліди Г. Менделя на різних організмах (не тільки на рослинах, а й на тваринах), часто спостерігали варіанти розщеплення, які не відповідали очікуваним згідно зі встановленими ним законами спадковості. Деякі з причин цього ми згадували раніше: це неповне домінування, кодомінантність, вплив летальних алелів. Крім того, однією з основних причин відхилень варіантів розщеплення від передбачених законами спадковості є явище *зчепленого успадкування*.

Явище зчепленого успадкування. Кількість спадкових ознак організмів значно перевищує кількість хромосом у гаплоїдному наборі. Наприклад, у гаплоїдному наборі мухи дрозофіли лише чотири хромосоми, а кількість генів, які визначають різні спадкові ознаки, – близько 13,6 тис. Відповідно, у кожній хромосомі локалізований не один, а багато генів. Тому одночасно з ознаками, які успадковуються незалежно одна від одної, існують і такі, які успадковуються зчеплено, оскільки контролюються генами, розташованими в одній хромосомі. Гени, розташовані в одній хромосомі, утворюють *групу зчеплення*.

На малюнку 35.1 наведено частину генетичної карти хромосоми мухи дрозофіли з позначенням генів, що входять до складу цієї групи зчеплення. Кількість груп зчеплення в організмів певного виду дорівнює кількості нестатевих хромосом (аутосом) у гаплоїдному наборі й типів статевих хромосом. Наприклад, у самки дрозофіли кількість



Мал. 35.1. Група зчеплення, позначена на генетичній карті хромосоми дрозофіли (цифрами позначені алелі різних генів): 1 – довгі вусики; 2 – короткі вусики; 3 – довгі крила; 4 – короткі крила; 5 – довгі лапки; 6 – короткі лапки; 7 – сіре тіло; 8 – чорне тіло; 9 – червоні очі; 10 – фіолетові очі; 11 – нормальні крила; 12 – редукзовані крила; 13 – рівні крила; 14 – вигнуті крила; 15 – червоні очі; 16 – коричневі очі

груп зчеплення становить 4, оскільки в її каріотипі представлений лише один тип статевих хромосом – Х-хромосоми. А в самців кількість груп зчеплення – 5 (оскільки Х- та Y-хромосоми відрізняються за набором генів).

Генетичні карти хромосом становлять не тільки теоретичний інтерес. Їх широко використовують у селекції та генетичній інженерії (*поміркуйте*, як само їх можна використовувати).

Хромосомна теорія спадковості. Явище зчепленого успадкування досліджував видатний американський генетик Т. Х. Морган (мал. 35.2). Як свого часу Г. Мендель, Т. Х. Морган вдало обрав об'єкт для експериментів – муху дрозофілу. Цих комах легко утримувати в лабораторіях, для них характерні висока плодючість і швидка зміна поколінь (за оптимальних умов утримання нове покоління з'являється кожні півтора-два тижні), а також невелика кількість хромосом (у диплоїдному наборі – 4 пари).

Мал. 35.2. Томас Хант Морган (1866–1945): американський генетик, лауреат Нобелівської премії з фізіології та медицини 1933 року «За відкриття, пов'язані з роллю хромосом у спадковості»; разом з колегами обґрунтував хромосомну теорію спадковості



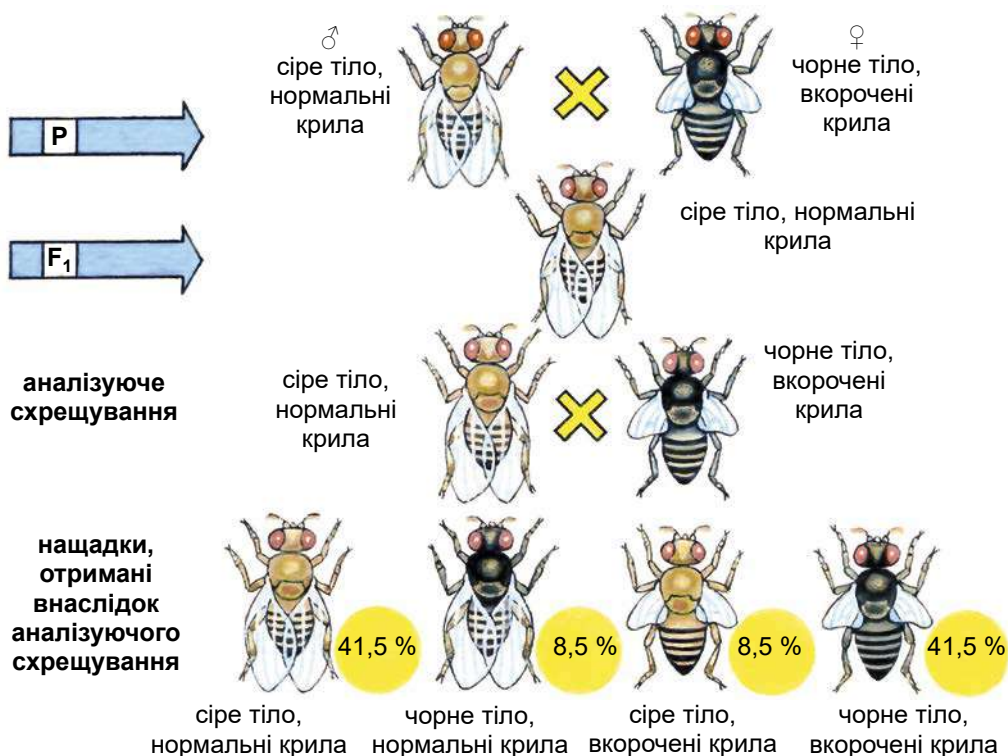
У своїх дослідженнях Т. Х. Морган схрестив дрозофіл, гомозиготних за домінантними алелями (які визначають сіре забарвлення тіла та нормально розвинуті крила) з особинами, гомозиготними за рецесивними алелями (визначають чорне забарвлення тіла та недорозвинені крила). Усі отримані гібриди першого покоління (F_1) мали домінантні варіанти відповідних ознак (сіре забарвлення тіла та нормально розвинуті крила) (мал. 35.3).

Для перевірки генотипу гібридів першого покоління Т. Х. Морган застосував аналізуюче схрещування: схрестив їх із гомозиготами за відповідними рецесивними алелями (чорне тіло та недорозвинені крила).

Теоретично, згідно із законами спадковості він міг би очікувати такий варіант розщеплення: 25 % нащадків повинні були мати сіре тіло та нормально розвинуті крила, 25 % – сіре тіло та недорозвинені крила, 25 % – чорне тіло та нормально розвинуті крила і ще 25 % – чорне тіло та недорозвинені крила. Тобто розщеплення за фенотипом мало б становити 1 : 1 : 1 : 1 (*поміркуйте* чому).

Реальні результати виявилися іншими: 41,5 % нащадків мали сіре тіло та нормально розвинуті крила, 41,5 % – чорне тіло та недорозвинені крила, 8,5 % – сіре тіло та недорозвинені крила та ще 8,5 % – чорне тіло й нормально розвинуті крила (мал. 35.3). Отже, цей варіант розщеплення наближується до такого, який можна було б очікувати в тому разі, якби гени, що визначають забарвлення тіла та розвиток крил, були б розташовані в одній хромосомі й передавалися зчеплено (розщеплення – 1 : 1).

Але серед нащадків були й два інших варіанти фенотипів, які можна було б очікувати в разі, якби гени забарвлення тіла і форми крил



Мал. 35.3. Зчеплене успадкування деяких ознак у дрозофілі (дослід Т. Х. Морган)

розташовувалися в негомологічних хромосомах й успадковувалися незалежно. Проте їхня частка була занадто малою.

Як Т. Х. Морган пояснив отримані результати? Він припустив, що гени, які визначають забарвлення тіла дрозофіл і розвиток їхніх крил, розташовані в одній хромосомі, тож успадковуються зчеплено. Але в процесі мейозу, який відбувається під час утворення статевих клітин, гомологічні хромосоми здатні обмінюватися своїми ділянками (процес кросинговеру; див. мал. 26.2). Саме тому і з'являються рекомбінантні особини.

• **Рекомбінація** – процес перерозподілу спадкового матеріалу, який спричиняє появу нових комбінацій алелів генів у хромосомах.

Завдяки дослідженням Т. Х. Морган та його колег було сформульовано **хромосомну теорію спадковості** – одну з основоположних теорій біології. Її положення такі:

- гени розташовані в хромосомі уздовж молекули ДНК у лінійному порядку;
- кожна з негомологічних хромосом має свій унікальний набір генів;
- кожен ген розташований у хромосомі в певному місці – локусі; алельні гени займають у гомологічних хромосомах ідентичні локуси;
- усі гени однієї хромосоми утворюють групу зчеплення, завдяки чому деякі ознаки успадковуються зчеплено;

- зчеплення між генами однієї групи порушується внаслідок обміну ділянками гомологічних хромосом у профазі першого мейотичного поділу (процес кросинговеру);
- «сила зчеплення» між двома генами, розташованими в одній хромосомі, обернено пропорційна відстані між ними: що більша відстань, то частіше відбувається кросинговер;
- частота кросинговеру між двома генами, розташованими в одній хромосомі, є величиною відносно постійною для кожної конкретної пари генів¹.

Відносну постійність частоти кросинговеру між різними парами генів однієї групи зчеплення використовують як показник відстані між окремими генами, а також для визначення послідовності їх розташування в хромосомі. Зокрема, визначення частот кросинговеру між різними парами генів використовують для складання генетичних карт хромосом (мал. 35.1).

Цікаво знати. Відстань між двома генами однієї хромосоми вимірюють у **сантиморганах**, або **сантиморганидах** (скорочено – сМ). Її названо на честь Т. Х. Моргана. 1 сантиморган відповідає такій відстані між двома генами, за якої процес кросинговеру відбувається в 1 гаметі з кожної сотні, тобто з імовірністю 1 %. Слід зазначити, що за відстані в 50 сантиморганив і більше гени успадковуються так, наче вони розташовані в негомологічних хромосомах.

Хромосомна теорія спадковості багато в чому визначила подальший розвиток не лише генетики, а й біології загалом. Так, стало зрозумілим, що хромосоми є носіями спадкової інформації, а її передавання пов'язане з передаванням нащадкам хромосом, у яких розташовані гени. Теорія також дала змогу з'ясувати матеріальну основу законів спадковості, встановлених Г. Менделем, і пояснити те, чому в певних випадках спостерігають відхилення від розщеплень, передбачуваних третім законом Менделя.

Узагальнення

Явище зчепленого успадкування досліджував американський генетик Т. Х. Морган. Він із співробітниками сформулював хромосомну теорію спадковості. Її основні положення: кожна з негомологічних хромосом має свій унікальний набір генів; кожен ген займає у хромосомі своє положення – локус; гени, розташовані в одній хромосомі, утворюють групу зчеплення, унаслідок чого спостерігають зчеплене успадкування деяких ознак; зчеплене успадкування може порушуватись унаслідок обміну ділянками гомологічних хромосом у процесі кросинговеру.

¹ Утім, на частоту кросинговеру можуть впливати деякі фактори зовнішнього і внутрішнього середовища (зміни в будові окремих хромосом, які ускладнюють або унеможливають процес кросинговеру, висока або низька температура, рентгенівські промені, деякі хімічні сполуки тощо); у деяких організмів виявлено залежність частоти кросинговеру від віку (наприклад, у дрозофіли) або статі (миші, кури).

Поміркуйте

1. Як можна довести, що гени розташовані в хромосомі в лінійному порядку?
2. Як можна довести явище зчепленого успадкування?
3. Чому відстань між генами в хромосомі впливає на частоту кросинговеру?

§ 36. Генетика статі. Успадкування, зчеплене зі статтю



Чому деякі спадкові ознаки в чоловіків і жінок можуть виявлятися з різною частотою?

Визначення статі організмів під час їхнього індивідуального розвитку – одна з найцікавіших проблем біології. Науковці давно звернули увагу на те, що хромосомні набори самців і самок різняться за будовою хромосом лише однієї з пар. У диплоїдних нестатевих клітинах самок багатьох видів тварин хромосоми всіх пар подібні за будовою, тоді як у самців хромосоми однієї з пар відрізняються за розмірами та особливостями будови. *Пригадаймо*: такі хромосоми називають **статевими**, або **гетерохромосомами**.

Наприклад, у самців дрізофіл одна зі статевих хромосом має паличкоподібну форму (X-хромосома), друга – гачкоподібну (Y-хромосома). У самок дрізофіл обидві статеві хромосоми мають однакову будову (X-хромосоми), тож їхній каріотип можна умовно позначити як $6A + XX$ (символом «А» позначають нестатеві хромосоми – аутосоми, однакові за будовою в особин різної статі, й дві X-хромосоми), каріотип самців – $6A + XY$ (одна X- та одна Y-хромосома). Різні набори хромосом притаманні й дводомним рослинам.

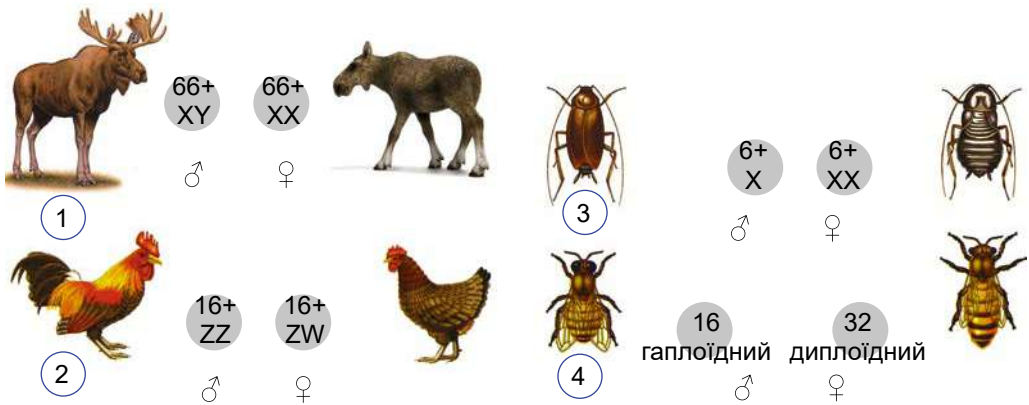
Оскільки під час мейозу гомологічні хромосоми розходяться до різних гамет, то в особин однієї статі формується лише один тип гамет (з хромосомами одного типу – **гомогаметна статъ**; від грец. *гомойос* – однаковий і *гамете* – жінка або *гаметес* – чоловік), тоді як в особин протилежної – два (**гетерогаметна статъ**; від грец. *гетерос* – інший). У багатьох організмів гомогаметною статтю є жіноча, а гетерогаметною – чоловіча (мухи, клопи, жуки, ссавці включно з людиною, більшість видів риб, деякі амфібії тощо), а в інших – навпаки (метелики, рептилії, птахи, деякі риби та амфібії) (мал. 36.1). У деяких видів особини різних статей відрізняються за кількістю статевих хромосом. Так, у коників або таргана чорного в диплоїдному наборі самки є дві статеві хромосоми, а самця – лише одна (мал. 36.1, 3).

У більшості роздільностатевих організмів стать майбутньої особини визначається в момент запліднення. Вона залежить від того, скільки та які саме зі статевих хромосом поєднуються в зиготі.

✓ **Дізнайтеся більше** про незвичні способи визначення статі за QR-кодом.

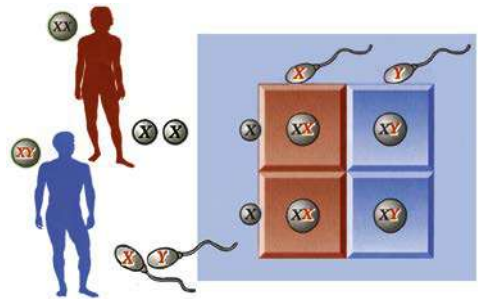


Хромосомний склад зиготи визначає, у якому напрямі розвиватимуться статеві залози. Наприклад, якщо в каріотипі зиготи ссавців присутні X- та Y-хромосоми, статеві зачатки розвиватимуться у сім'я-



Мал. 36.1. Механізми визначення статі у тварин: 1 – X–Y у ссавців (у людини, зокрема); 2 – Z–W у птахів¹; 3 – X–0 у деяких комах; 4 – гапло-диплоїдний у бджіл (у самців (трутнів) гаплоїдний набір хромосом ($1n = 16$), у самок (цариць і робочих особин) – диплоїдний ($2n = 32$))

ники. Зі свого боку, сім'яники виділятимуть чоловічий статевий гормон тестостерон, який циркулює зародком і зумовлює розвиток за чоловічим типом. Якщо ж в каріотипі зиготи поєдналися дві X-хромосоми, статеві зачатки розвиватимуться у яєчники. І такий зародок розвиватиметься в жіночий організм (мал. 36.2).



? Проаналізуйте малюнок 36.2. Зверніть увагу на те, що ймовірність народження в родині хлопчика або дівчинки становить 50 %. Але є родини, в яких народжуються лише хлопчики або лише дівчатка. Чому неможливо вирахувати наперед народження дитини певної статі?

Мал. 36.2. Механізм визначення статі у людини

✓ **Дізнайтеся більше** про порушення визначення статі та про організми, які здатні змінювати стать, за QR-кодом.

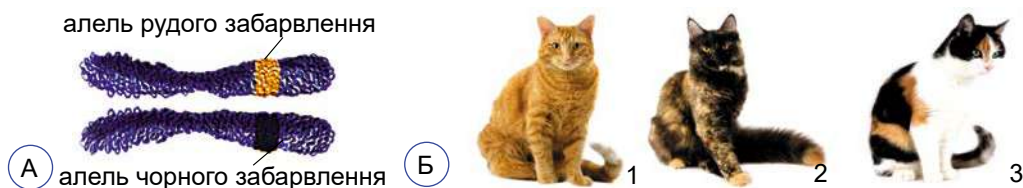


Явище успадкування ознак, зчеплених зі статтю, вивчав Т. Х. Морган. Він звернув увагу на те, що особини різної статі, які відрізняються набором статевих хромосом, можуть відрізнятися не тільки набором ознак, які називають вторинними статевими, а й частотою зустрічальності певних ознак. Так, Т. Х. Морган схрестив чисті лінії самок дрозофіли із червоним пігментом очей із самцями з білими очима (вони позбавлені пігменту).

¹ В організмів, у яких гетерогаметна стать не чоловіча, а жіноча, статеві хромосоми мають інше умовне позначення: статеві хромосоми, які трапляються в обох статей, позначають літерою Z, а ту, яка трапляється лише в гетерогаметної статі, – W. Це лише умовні позначення: не варто думати, що ці хромосоми схожі за формою на літери Z чи W.

Усі гібриди першого покоління мали червоні очі. Серед гібридів другого покоління, отриманих унаслідок схрещування гібридів першого покоління між собою, усі самки мали червоні очі, тоді як половина самців – червоні очі, а друга половина – білі. Такі результати Т. Х. Морган пояснив тим, що ген, який визначає пігментацію очей, розташований у Х-хромосомі, а Y-хромосома цього гена не має, тому на успадкування цієї ознаки не впливає.

Цікаво знати. У кішок зчеплено зі статтю успадковуються певні варіанти забарвлення шерсті. Відомо, що коти, на відміну від кішок, не мають черепахового забарвлення (вони або руді, або чорні). Це пояснюють тим, що алельні гени, які визначають руде або чорне забарвлення шерсті, розташовані лише в Х-хромосомі (мал. 36.3). При цьому жоден з алелів не домінує над іншим (*пригадаймо*, як називають це явище). Тому кішки, гетерозиготні за цим геном, мають черепахове забарвлення шерсті (а за умови втручання іншого, аутосомного, гена – великі руді й чорні плями на білому тлі).



Мал. 36.3. Визначення черепахового забарвлення у кішок. А. Локалізація гена, який визначає забарвлення шерсті котів. Б. Варіанти забарвлення: 1 – руде: гомозиготні руді кішки й коти з алелем рудого забарвлення; 2 – черепахове: кішка, гетерозиготна за геном забарвлення; 3 – плямисте: триколірна кішка (каліко): біле тло зумовлено мутацією білої плямистості в іншому гені.

У людини зчеплено зі статтю успадковується майже 150 ознак, зокрема деякі захворювання (див. мал. 28.3). Серед них – **дальтонізм** (нездатність розпізнавати деякі кольори), який визначається рецесивним алелем, розташованим у Х- і відсутнім у Y-хромосомі. Тому чоловік із цим рецесивним алелем у Х-хромосомі завжди хворіє на дальтонізм. У жінок відповідне порушення сприйняття кольорів виявляється лише в особин, гомозиготних за рецесивним алелем. Гетерозиготні жінки фенотипово здорові, хоча і є носіями цього алеля.

Так само успадковується і **гемофілія** (нездатність крові зсідатися, унаслідок чого людина може загинути навіть за незначних ушкоджень кровоносних судин). Рецесивний алель, який зумовлює це захворювання, передається з покоління в покоління гетерозиготними жінками-носіями.

Х- та Y-хромосоми людини мають і гомологічні ділянки. Гени, локалізовані в них, успадковуються як і гени, локалізовані в аутосомах (хоча можна відстежити, від якого саме з батьків успадкований той чи інший алель певного гена).

Крім того, Y-хромосома має ділянку, якої немає в Х-хромосомі. Локалізовані в ній гени успадковуються винятково за чоловічою лінією. Наприклад, це гени, які визначають овоłosіння краю вухної раковини та перетинки між пальцями ніг.

Узагальнення

Існує кілька механізмів визначення статі. Один із них ґрунтується на поєднанні статевих хромосом під час запліднення. Стать може бути гомо- або гетерогаметною. У людини чоловіки є гетерогаметними (мають набір статевих хромосом ХУ), а жінки – гомогаметними (ХХ). З генами, розташованими у статевих хромосомах, може бути пов'язане явище успадкування, зчепленого зі статтю. Ці захворювання частіше проявляються в чоловіків, оскільки в У-хромосомі відсутня ділянка з відповідним геном. Натомість серед жінок трапляються особини, гетерозиготні за цим геном. Вони не хворіють, але здатні передавати нащадкам рецесивні алелі, що визначають ці захворювання.

Поміркуйте

1. Чим можна пояснити той факт, що гетерогаметна стать менш життєздатна порівняно з гомогаметною?
2. Який сенс у тому, що Х- та У-хромосоми мають гомологічні ділянки, які містять однакові гени?
3. Чи можна визначити, якими алелями, домінантними або рецесивними, представлені гени, локалізовані в У-хромосомі?

§ 37. Геном як цілісна інтегрована система



Чому важливо розглядати не роботу окремих генів, а їхню взаємодію в усьому генотипі?

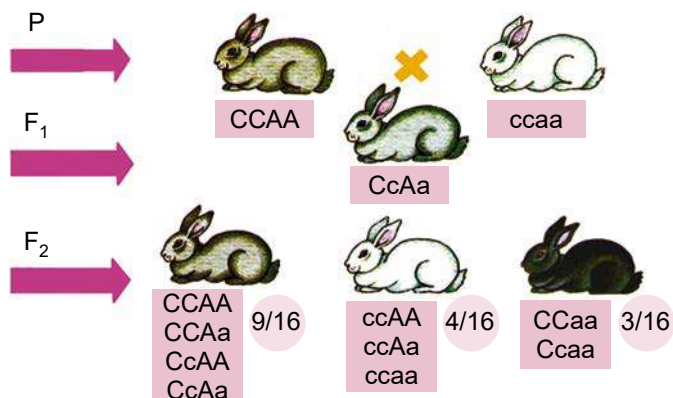
Тривалий час ген вважали неподільною й незмінною одиницею спадкової інформації. Проте згодом з'ясували, що мутації можуть зачіпати не цілісний ген, а лише певну його частину. Наприклад, під час кросинговеру гомологічні хромосоми можуть обмінюватися як цілісними генами, так і їхніми частинами. Мінімальна ділянка молекули нуклеїнової кислоти, яка може розділитися під час кросинговеру, становить лише 1–2 пари нуклеотидів.

Також тривалий час у генетиці існувало правило, згідно з яким кожен ген визначає структуру одного певного білка («один ген – один білок»). Однак подальші дослідження показали, що співвідношення «ген – ознака» значно складніші. Це пов'язано з явищами взаємодії як алельних, так і неалельних генів, а також множинної дії генів.

Типи взаємодій між собою неалельних генів. У разі **моногенного успадкування** (від грец. *монос* – один та *генос* – рід) такі варіанти взаємодії алельних генів: повне домінування, неповне домінування та кодомінантність. Проте формування певних ознак може залежати й від взаємодії кількох різних неалельних генів. У такому разі йдеться про **полігенне успадкування** (від грец. *поліс* – багато та *генос*).

Можна навести такий приклад взаємодії неалельних генів для формування того чи іншого варіанта ознаки. У тварин (мишей, кролів) для формування певного варіанта забарвлення шерсті потрібна взаємодія двох неалельних генів, один з яких визначає наявність пігменту, а

другий – його розподіл по волосині. Так, у кроля синтез темного пігменту визначає доміантний алель **C**. Інший, неалельний, ген визначає характер розподілу пігменту по волосині. Якщо в генотипі кроля присутній доміантний алель цього гена (**A**), пігмент концентрується біля основи волосини й тварина має сіре забарвлення хутра. Якщо ж кірль гомозиготний за рецесивним алелем гена, що визначає розподіл пігменту по волосині (генотипи – **ССаа**, **Ссаа**), то пігмент розподіляється рівномірно й забарвлення волосини стає чорним. Якщо ген, який відповідає за синтез темного пігменту, гомозиготний за рецесивним алелем, то пігмент взагалі не синтезується і народжуються білі особи (генотипи **ссАА**, **ссАа**, **ссaa**) (мал. 37.1).



Мал. 37.1. Формування забарвлення хутра в кролів унаслідок взаємодії неалельних генів

Вирізняють два основних типи взаємодії неалельних генів. Один з них полягає в тому, що для прояву у фенотипі певного варіанта ознаки потрібна взаємодія доміантних алелів двох або більшого числа неалельних генів. Так, завдяки взаємодії доміантних алелів двох неалельних генів синтезується пігмент антоціан, який забезпечує фіолетове забарвлення плодів баклажана. Якщо хоча б один із цих генів гомозиготний за рецесивним алелем, пігмент не утворюється і формуються безбарвні плоди (мал. 37.2).



Мал. 37.2. Приклад формування фіолетового забарвлення плодів баклажанів (1; генотипи: **DDPP**, **DDPp**, **DdPP**, **DdPp**), яке забезпечує пігмент антоціан; за відсутності цього пігменту формуються безбарвні плоди (2; генотипи: **ddPP**, **ddPp**, **DDpp**, **Ddpp**)

У людини розвиток нормального слуху також визначається домінуючими алелями двох неалельних генів, один з яких відповідає за нормальний розвиток завитки внутрішнього вуха, а другий – слухового нерва. Якщо хоча б один із цих генів гомозиготний за рецесивним алелем, людина не чує від народження.

Явище, за якого для формування певного варіанта ознаки потрібна присутність у генотипі домінуючих алелів двох неалельних генів, має назву **комплементарність**. Відповідно неалельні гени, домінуючі алелі яких потрібні для формування певного варіанта ознаки, називають **комплементарними**.

Інший варіант взаємодії неалельних генів – це явище, за якого алелі одного гена пригнічують прояв у фенотипі алелів іншого, неалельного. Такий тип взаємодії неалельних генів називають **епістазом** (від грец. *epi-stasis* – зупинка, перешкода). Пригнічувати прояв певного гена у фенотипі можуть як домінуючі, так і рецесивні алелі іншого, неалельного, гена (його називають епістатичним). Прикладом епістатичної взаємодії неалельних генів є формування певного забарвлення шерсті у собак породи лабрадор-ретривер (мал. 37.3).



Мал. 37.3. Приклад епістатичної взаємодії неалельних генів – формування забарвлення шерсті: 1 – коричневе (генотипи: bbEE, bbEe); 2 – жовте (генотипи: BBee, Bbee, bbee); 3 – чорне (генотипи: BBEE, BbEE)

У цих собак домінуючий алель одного гена (**B**) зумовлює синтез чорного пігменту, а рецесивний – коричневого (**b**). Домінуючий алель іншого, неалельного, гена (**E**) зумовлює наявність пігменту у волосках, тоді як у гомозигот за рецесивним алелем пігмент відсутній – і формується жовте забарвлення шерсті. Таким чином, у собак, гомозиготних за рецесивним алелем (**ee**), пригнічується прояв у фенотипі гена, який визначає певний варіант пігменту (коричневий або чорний).

Множинна дія генів. Раніше ми розглядали випадки, коли алелі одного гена впливали на формування різних варіантів однієї ознаки. Проте більшості генів властива множинна дія, за якої певний алель може впливати на формування тих чи інших варіантів кількох різних ознак одночасно. Це явище називають **плейотропією** (від грец. *плейон* – численний і *тропос* – поворот). Наприклад, у людини відоме захворювання – арахнодактилія (у перекладі з грецької – «павучі пальці») (мал. 37.4). При цьому домінуючий мутантний алель впливає на формування видовжених пальців на руках і ногах, зумовлює неправильне положення кришталика ока і вроджені вади серця.



Мал. 37.4. Прояв арахнодактилії як приклад множинної дії генів



Знайдіть інформацію, які порушення виникають у разі арахнодактилії. Чому в різних людей, хворих на арахнодактилію, прояви можуть бути різними?

✓ **Дізнайтеся більше** про серпоподібноклітинну анемію за QR-кодом.

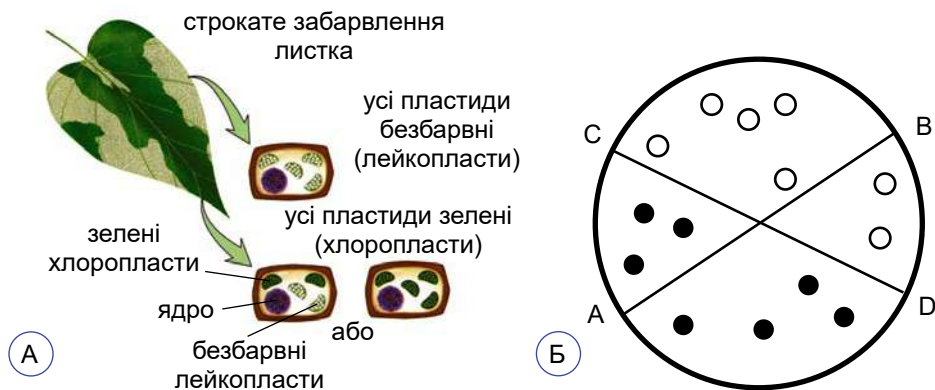


Причиною множинної дії генів є те, що кожен ген контролює певний етап обміну речовин. Оскільки різноманітні процеси обміну речовин часто взаємопов'язані, то порушення, які виникли на одному з його етапів, неодмінно впливатимуть на наступні й, зрештою, на формування різних ознак організму.

Цитоплазматична спадковість. Формування фенотипу може залежати й від цитоплазматичної спадковості. *Пригадаймо:* у клітинах евкаріотів спадковий матеріал зберігається не лише в ядрі клітини.

Власні молекули ДНК мають мітохондрії та пластиди, розташовані в цитоплазмі. Ці органели мають не лише власний спадковий матеріал, а й апарат, який забезпечує синтез власних білків. Тому цим організмам притаманна ще й **цитоплазматична спадковість** – успадкування ознак, які кодуються позаядерними генами. Позаядерні гени взаємодіють з ядерними і перебувають під контролем ядерної ДНК.

Цитоплазматична спадковість, пов'язана з генами пластид, відома для різних видів рослин. Серед них є форми з мозаїчними (строкатими) листками. Ця ознака передається материнською лінією і зумовлена тим, що частина пластид не здатна утворювати пігмент хлорофіл. Пластиди розмножуються поділом, тому їм притаманна генетична неперервність: зелені пластиди дають початок зеленим, а безбарвні, нездатні синтезувати хлорофіл, – безбарвним. Після поділу клітин з безбарвними пластидами в листках утворюються білі плями, які чергуються із зеленими ділянками (мал. 37.5).



Мал. 37.5. Механізм прояву цитоплазматичної спадковості в рослин. А. Клітини з різними наборами пластид. Б. Можливі варіанти поділу клітини з пластидами різних типів

Якщо перед поділом материнська клітина мала й білі, й зелені пластиди, якими будуть дочірні клітини, залежатиме від того, як відбудеться поділ цитоплазми (мал. 37.5, Б)



Поміркуйте, які дочірні клітини утворяться, якщо поділ станеться по осі АВ. А по осі CD (мал. 37.5, Б)?

У людини (як і в багатьох інших організмів) ознаки, зумовлені мітохондріальними генами, успадковуються винятково за материнською лінією (під час запліднення мітохондрії сперматозоїда не потрапляють у зиготу).

Узагальнення

Генотип – сукупність усіх генів організму і тих, що містяться в ядрі та поза ним. Він є цілісною системою, що складається з окремих генів, які можуть відокремлюватися один від одного й успадковуватися незалежно. Цілісність генотипу проявляється в тому, що формування варіантів більшості ознак організму є результатом взаємодії як алельних (повне домінування, неповне домінування, кодомінування тощо), так і неалельних (комплементарність, епістаз тощо) генів. Крім того, спостерігають і множинну дію генів (плейотропію), за якої один алель певного гена може впливати на формування різних варіантів кількох ознак одночасно. Особливий тип спадковості – цитоплазматична, зумовлена генами, локалізованими в мітохондріях (а в рослин – також у пластидах). Такі гени передаються переважно за жіночою лінією.

Поміркуйте

1. Чому деякі ознаки кодуються не одним, а кількома генами?
2. Пригадайте будову клітини бактерій (див. мал. 21.6). Чи спостерігають явище цитоплазматичної спадковості в прокаріотів?
3. Яке біологічне значення явищ взаємодії неалельних генів та множинної дії генів?

§ 38. Регуляція активності генів



Як чинники середовища можуть впливати на активність генів і в такий спосіб регулювати ступінь прояву ознак?

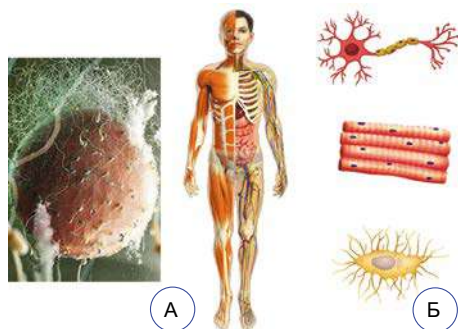
Необхідність регуляції активності генів. *Пригадаймо:* у клітинах еукаріотичних організмів кількість генів, які кодують певні білки (їх називають структурними), може сягати декількох десятків тисяч. Зрозуміло, що немає потреби в тому, щоби всі вони були активні одночасно. Наприклад, немає сенсу синтезувати ферменти, які в певний момент не задіяні у процесах метаболізму.

Хоча кожна клітина багатоклітинного організму успадковує від заплідненої яйцеклітини увесь набір генів, притаманних організмам певного виду, в клітинах різних типів (наприклад, епітеліальних, м'язових, нервових) активна лише частина з них. Унаслідок цього виникають різні типи клітин, які виконують різні функції в організмі (мал. 38.1).



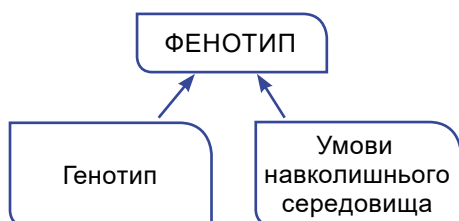
Як з однієї клітини – зиготи – утворюються різні типи клітин з різноманітними функціями, але однаковим геномом?

Регуляція активності генів дає змогу клітинам заощаджувати енергетичні та пластичні ресурси. Тому синтезуються лише ті сполуки, що



Мал. 38.1. Явище диференціації клітин. Усі клітини організму утворилися з однієї клітини – заплідненої яйцеклітини (А) і мають однаковий набір генів. Уся різниця в морфології та функції цих клітин (Б) залежить від специфічності набору активних генів

називають **пенетрантністю гена** (від лат. *пенетро* – проникаю, досягаю). Якщо за *повної пенетрантності* алель проявляється в усіх досліджуваних особин, то за *неповної* – лише у певного їх відсотка.



Мал. 38.2. Формування фенотипу організмів є результатом впливу як генотипу, так і умов навколишнього середовища

кодуються певними генами, і в тих кількостях, які потрібні для нормального функціонування клітини в певний період. Підраховано, що в еукаріотичних клітинах частка активних генів становить лише близько 15 %.

Як регулюється активність генів. Існує особлива група генів, яку називають **генами-модифікаторами** (від лат. *модифікаціо* – встановлення міри). Вони впливають на прояв ознак, що кодуються іншими генами, посилюючи або послаблюючи його. Завдяки цьому в особин із подібним генотипом фенотип може відрізнятись.

Частку особин з однаковим генотипом, у фенотипі яких проявляється ознака, кодована певним геном,

називають **пенетрантністю гена** (від лат. *пенетро* – проникаю, досягаю). Якщо за *повної пенетрантності* алель проявляється в усіх досліджуваних особин, то за *неповної* – лише у певного їх відсотка.

Іншим генам властивий різний ступінь вираженості спадкової ознаки у фенотипі. Навіть деякі моногенні хвороби, наприклад шизофренія, можуть мати різний прояв у різних людей. Обидва явища (неповна пенетрантність і варіабельна експресивність) є результатом дії генів-модифікаторів, які, зі свого боку, сприяють мінливості організмів. Через них також опосередковується вплив умов навколишнього середовища на формування фенотипу (мал. 38.2).

Як гени-модифікатори регулюють активність генів. Регулювати синтез і подальше використання білків можна на будь-якому з етапів реалізації генетичної інформації: транскрипції, трансляції та модифікацій кінцевого продукту (синтезованого білка). На сьогодні найкраще вивчено механізми регуляції транскрипції. Існують два основних механізми, які дають змогу контролювати цей процес: використання білкових факторів транскрипції та зміни щільності упакування хроматину.

Фактори транскрипції – це білкові молекули, які контролюють процес транскрипції: синтез молекули мРНК на ДНК, яка виконує роль матриці. Свою функцію фактори транскрипції виконують, зв'язуючись зі специфічними ділянками молекули ДНК. Однією з таких ділянок молекули ДНК є **промотор** – послідовність нуклеотидів, яка розташована перед кодувальною частиною гена (мал. 38.3). Ця ділянка забезпечує контроль процесів транскрипції та їхню ініціацію.

Деякі гени можуть мати декілька промоторів, які регулюються окремо. У еукаріотів у активації або пригніченні транскрипції може брати участь цілий комплекс білкових молекул. Ці молекули можуть або активувати, або знижувати експресію конкретного гена.

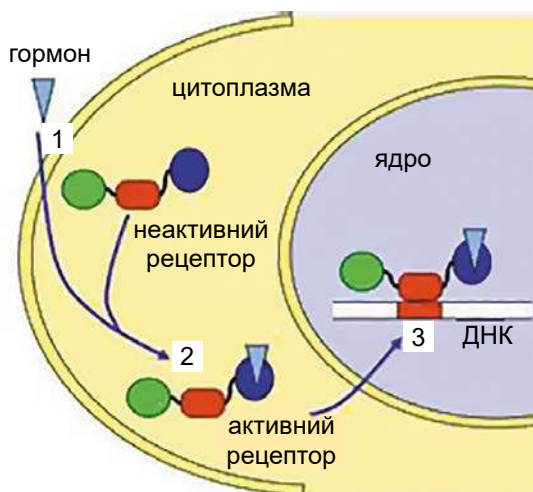


Мал. 38.3. Розташування промотора у складі гена прокаріотів

Гени, які кодують білки, що регулюють активність інших генів, називають **генами-регуляторами**.

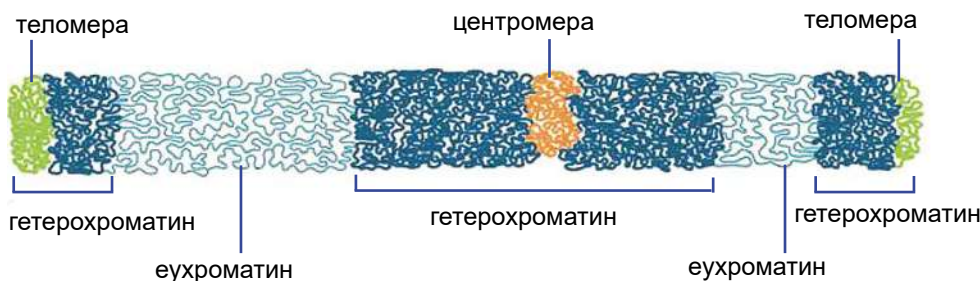
Часто клітина має оперативно реагувати на зміни навколишнього середовища. Така реакція (початок поділу, синтез потрібних речовин тощо) часто пов'язана з активацією відповідних генів. Зі свого боку, активація цих генів пов'язана із взаємодією з факторами транскрипції, які до того перебували в неактивному стані. Їхня активація залежить від впливу специфічних сигнальних молекул, у ролі яких можуть виступати гормони.

Регуляторні білки часто активуються, утворюючи комплекс з відповідними молекулами-акцепторами. Як наслідок, білок набуває певної просторової структури (конформації), завдяки чому переходить з неактивного стану в активний і починає виконувати свою функцію: активувати відповідні гени (мал. 38.4).



Мал. 38.4. Схема активації роботи генів стероїдними гормонами: гормон проходить крізь мембрану клітини (1), зв'язується з внутрішньоклітинним рецептором (2), цей комплекс транспортується в ядро, де активує гени-мішені (3)

Іншим механізмом регуляції процесів транскрипції еукаріотичних генів є керування станом упакування хроматину. *Пригадаймо*: молекули РНК активно синтезуються в неущільнених (неконденсованих) ділянках хроматину, їх називають **еухроматином** (мал. 38.5). На ділянках ущільненого (конденсованого) хроматину (**гетерохроматин**) ці процеси відбуваються неактивно або зовсім не відбуваються. Зрозуміло, що механізми активації чи пригнічення активності еукаріотичних генів тісно пов'язані з процесами, що забезпечують конденсацію чи деконденсацію хроматину.



Мал. 38.5. Ділянки гетеро- та еухроматину в складі хромосоми

✓ **Дізнайтеся більше** про альтернативний шлях дозрівання мРНК та РНК-інтерференцію за QR-кодом.



В останні роки сукупність зовнішніх чинників, які впливають на роботу генома, але не змінюють послідовність нуклеотидів у молекулі ДНК, позначають терміном **епігенетика**. Доведено, що фактори навколишнього середовища (ранній життєвий стрес, дитячі травми, стресові події в дорослому віці) через епігенетичні механізми можуть сприяти розвитку розладів, пов'язаних зі стресом. До основних епігенетичних механізмів належать: зміни структури хроматину, модифікації ядерних білків, хімічні зміни ДНК, а також регуляція за участю некодувальних і модифікованих молекул РНК. Завдяки відкриттям у цій галузі вже створено низку фармакологічних препаратів, що впливають на епігенетичні процеси, і нині активно розробляють нові. Епігенетика відкриває перспективи для пояснення ролі середовища у формуванні фенотипу й для пошуку нових методів лікування.

Узагальнення

У процесі розвитку різні типи клітин утворюються шляхом диференціації, але при цьому зберігають однаковий набір генів. Різноманітність їхньої будови та функцій забезпечується регуляцією активності генів. Завдяки такій регуляції клітини синтезують ті сполуки і в таких кількостях, які потрібні їм для нормального функціонування в цей період. Для цього активуються відповідні гени. Особливу роль у цьому відіграють гени-модифікатори. Вони впливають на експресію інших генів, посилюючи або послаблюючи її.

Поміркуйте

1. Як саме середовище може впливати на активність генів?
2. Чому в однойцевих близнят ступінь прояву активності генів може відрізнятися залежно від чинників середовища, у якому вони живуть?
3. У яких галузях науки та господарства людини можна використовувати явище РНК-інтерференції?

§ 39. Мінливість спадкова та неспадкова. Форми спадкової мінливості



Чому певна людина водночас має риси подібності з рідними та є унікально неповторною?

Види мінливості організмів. Завдяки мінливості організми в процесі як індивідуального (однієї особи) так й історичного (у процесі еволюції виду) розвитку здатні набувати нових ознак. Мінливість буває неспадковою, або модифікаційною, та спадковою. **Неспадкова (модифікаційна) мінливість** не успадковується, оскільки не пов'язана зі змінами в геномі. Натомість **спадкова мінливість**, пов'язана зі змінами в спадковому матеріалі, може успадковуватися. Спадкова мінливість може бути комбінативною та мутаційною.

Комбінативна мінливість зумовлена виникненням нових комбінацій алельних генів (рекомбінацій). Це може відбуватись:

- унаслідок незалежного розходження хромосом під час мейозу – до кожної з дочірніх клітин хромосоми, а отже, й алелі, які вони містять, потрапляють випадково;
- унаслідок кросинговеру під час кон'югації гомологічних хромосом (див. мал. 26.2);
- унаслідок випадкового поєднання алельних генів при злитті гамет під час запліднення.

Комбінативна мінливість зумовлює появу різних варіантів фенотипу в особин одного виду.

Цікаво знати. Як комбінативна мінливість впливає на успадкування в ряду поколінь? Річард Докінз у книзі «Егоїстичний ген» написав: «Ваші діти та навіть онуки можуть бути схожими на вас рисами обличчя, музичними талантами, кольором волосся. Але з кожним поколінням внесок ваших генів ставатиме вдвічі меншим. Дуже скоро він досягне таких значень, на які можна взагалі не зважати. Наші гени, можливо, й безсмертні, але сукупність генів, якою є будь-хто з нас, неминуче розпадеться. Королева Єлизавета II була прямим нащадком Вільгельма Завойовника, проте цілком можливо, що в ній не було жодного гена цього володаря з минулого».

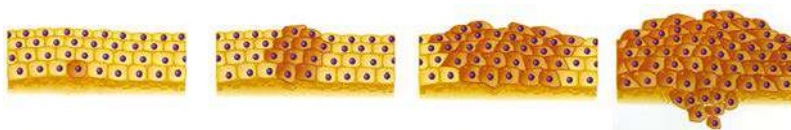
Мутаційна мінливість. *Пригадаймо:* підвалини вчення про мутації заклав голландський учений Гуго де Фріз (див. мал. 31.1, Б). Подальші дослідження показали, що здатність до мутацій – універсальна властивість усіх живих істот і неклітинних форм життя, таких як віруси.

- **Мутації** (від лат. *мутацио* – зміна) – стійкі зміни генетичного матеріалу, які виникають раптово й можуть призводити до зміни тих чи інших спадкових ознак організму.

Мутації можуть виникати в будь-яких клітинах організму і спричиняти різноманітні зміни генетичного матеріалу, а, відповідно, й фенотипу особин. Мутації поділяють на генеративні та соматичні. **Генеративні мутації** (від лат. *генеро* – народжую) виникають у статевих клітинах і можуть успадковуватися за статевого розмноження. **Соматичні мутації** (від грец. *сома* – тіло) відбуваються в нестатевих (соматичних) клітинах і за статевого розмноження нащадкам не передаються, оскільки клітини, що їх несуть, не беруть участі у статевому процесі. Вони можуть успадковуватися лише за нестатевого розмноження, зокрема вегетативного.



Соматичні мутації можуть призводити до тяжких захворювань. Наприклад, мутації клітин червоного кісткового мозку людини можуть спричинити **лейкоз** – злоякісне розмноження нетипових лейкоцитів, а клітин інших тканин – утворення пухлин (мал. 39.1).



Мал. 39.1. Утворення пухлини внаслідок мутації соматичної клітини (зверніть увагу на причину – неконтрольований поділ клітин)

Залежно від характеру впливу на життєдіяльність організмів розрізняють мутації летальні, сублетальні й нейтральні. **Летальні мутації** (від лат. *леталіс* – смертельний), проявляючись у фенотипі, призводять до загибелі особини ще під час зародкового розвитку або ж такі особини гинуть через певний час після народження, часто до набуття здатності до розмноження. Зазвичай летальні мутації пов'язані зі змінами в генах, що відповідають за розвиток і ріст організмів.

Летальні мутації можуть бути пов'язані як з домінантними, так і з рецесивними алелями. Домінантні летальні алелі проявляються у фенотипі як у гомозигот за цим алелем, так і в гетерозигот. Тому вони лише зрідка трапляються в популяціях (*поміркуйте чому*). Натомість рецесивні летальні алелі проявляються у фенотипі лише гомозигот за цим алелем. Таким чином, у популяціях такий алель, наявний у гетерозигот, у фенотипі не проявляється і, відповідно, не впливає на їхню життєздатність. У генофонді популяцій летальні рецесивні алелі можуть зберігатись тривалий час.

Сублетальні мутації знижують життєздатність або пристосованість організмів, не призводячи до негайної загибелі. Як приклад можна навести захворювання людини – серпоподібноклітинну анемію.

Нейтральні мутації (від лат. *нейтраліс* – той, що не належить ані тому, ані іншому) у звичних для організмів умовах існування не впливають на їхню життєздатність. У певних випадках, особливо за змін умов існування, нейтральні мутації можуть виявитися шкідливими або корисними.

✓ **Дізнайтеся більше** про зміни бачення шкідливості мутацій за QR-кодом.



Залежно від характеру змін генетичного матеріалу розрізняють мутації, пов'язані з:

- порушенням нормальної послідовності розташування окремих нуклеотидів у молекулах нуклеїнових кислот (**точкові мутації**);
- зміною будови окремих хромосом (**хромосомні мутації**);
- кратним збільшенням гаплоїдного набору хромосом або зменшенням вдвічі диплоїдного хромосомного набору, а також зміною кількості окремих гомологічних хромосом (**геномні мутації**).

Точкові мутації – стійкі зміни окремих послідовностей нуклеотидів у молекулах нуклеїнових кислот. Цей тип мутацій найпоширеніший. Він може зачіпати будь-які ознаки організму й необмежений час передаватися між послідовними поколіннями. Точкові мутації часто виникають унаслідок помилок під час подвоєння молекул ДНК або їхнього відновлення (репарації).

Відомі різні типи зміни будови окремих хромосом. Для таких **хромосомних мутацій** можуть бути характерні значні за масштабами зміни нуклеотидних послідовностей ДНК (до понад 2 млн пар нуклеотидів).

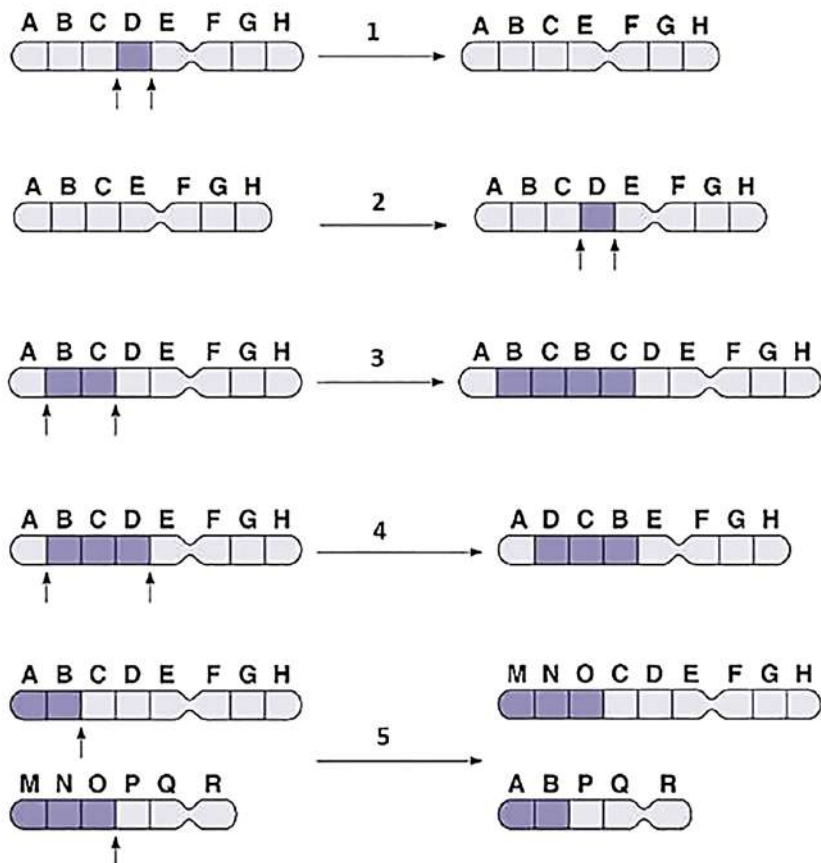
Перебудови хромосом бувають як *внутріньохромосомними* (відбуваються у межах однієї хромосоми), так і *міжхромосомними* (охоплюють різні хромосоми).

Можливі подвоєння певної ділянки хромосоми, як одноразові, так і багаторазові. Унаслідок таких мутацій збільшується кількість копій певного гена (генів). У разі *втрати ділянки* хромосома стає коротшою і втрачає певні гени (мал. 39.2, 1). У фенотипі гетерозиготних організмів можуть проявлятися рецесивні алелі, розташовані в ділянці іншої незміненої гомологічної хромосоми. Так, у людини в разі втрати короткого плеча п'ятої хромосоми спостерігають синдром «котячого крику». Плач малюків із цим порушенням нагадує нявкання котів, для них характерні маленькі розміри голови, уповільнений ріст та інтелектуальні порушення. Утрата ділянки 21-ї хромосоми людини спричиняє важку форму білокрів'я (лейкозу).

У хромосому може *вбудуватися додатковий фрагмент*, який належав гомологічній або негомологічній хромосомі (мал. 39.2, 2, 3). Як втрата певної ділянки, так і подвоєння певних фрагментів хромосоми можуть бути спричинені порушенням процесу кон'югації гомологічних хромосом під час мейозу (такий варіант кросинговеру називають несиметричним). Подвоєні копії генів можуть надалі змінюватися мутаціями і набувати нових функцій (так, унаслідок численних подвоєнь з предкового гена виникли гени різних ланцюгів гемоглобіну).

Мутації, за яких дві *негомологічні хромосоми обмінюються своїми ділянками* (мал. 39.2, 5), можуть спричиняти нездатність до статевого розмноження. Інколи *ділянка хромосоми, яка утворилася внаслідок двох розривів, повертається на 180° і за допомогою ферментів знову вбудовується в хромосому* (мал. 39.2, 4). При цьому кількість генів хромосоми може залишатися незмінною, однак змінюється послідовність їх розташування. Наслідком таких мутацій може бути стерильність організмів.

Переміщення ділянки всередині однієї хромосоми або ж в іншу хромосому змінює послідовність нуклеотидів (мал. 39.2, 5). Наприклад,



Мал. 39.2. Хромосомні мутації. 1. Втрата певної ділянки хромосоми. 2. Вбудовування додаткового фрагмента з негомологічної хромосоми. 3. Вбудовування додаткового фрагмента з гомологічної хромосоми (може призводити до подвоєння ділянок хромосоми). 4. Тип мутації, коли ділянка хромосоми, яка утворилася внаслідок двох розривів, повертається на 180° і за допомогою ферментів знову вбудовується в хромосому. 5. Мутації, за яких дві негомологічні хромосоми обмінюються своїми ділянками.

у дрозофіли один із генів X-хромосоми здатен переміщуватись в аутосому.

Спільними наслідками мутацій, пов'язаних зі зміною будови хромосом, можуть бути порушення процесу мейозу, зокрема кон'югації гомологічних хромосом. Наприклад, гомологічні хромосоми не розходяться після кон'югації й потрапляють лише до частини утворених гамет. Так виникають статеві клітини з відмінними хромосомними наборами.

Зміни кількості хромосом у каріотипі організму називають **геномними мутаціями**.

Мутації, пов'язані зі зміною **числа окремих гомологічних хромосом**, значно впливають на фенотип мутантних особин. Наприклад, зародок людини з хромосомним набором 44 аутосоми (A) + одна X-хромосома розвивається в жіночий організм зі значними порушеннями фізичного розвитку (крилоподібна згортка шкіри на шії, зміни

в будові кісток, кровоносної та сечостатевої систем, не розвиваються нормально статеві залози). Зародки з хромосомним набором $44A + XXX$ розвиваються в жінок, які можуть лише незначно відрізнятися від жінок з нормальним каріотипом.

✓ **Дізнайтеся більше** про наслідки змін кількості хромосом за QR-кодом.



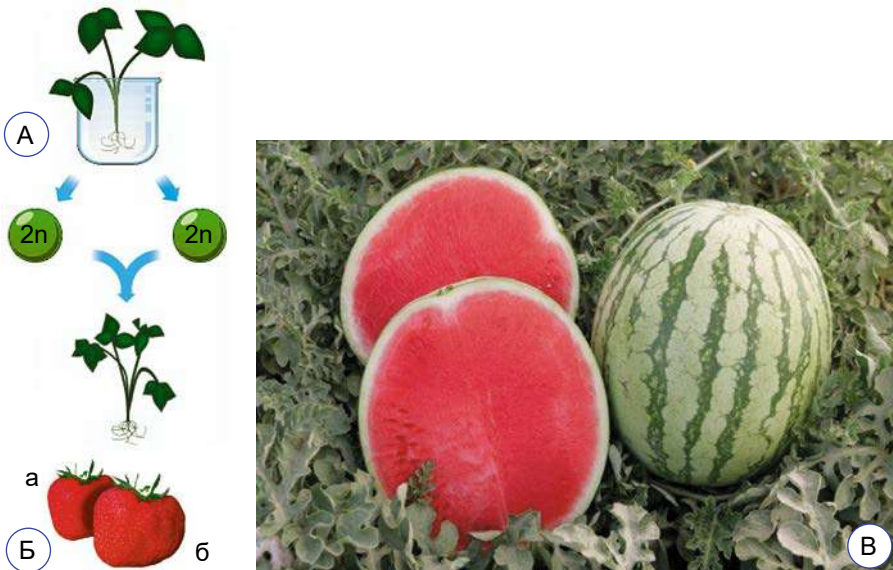
Зміна числа окремих хромосом може бути пов'язана з їхнім злиттям або розділенням. Злиття хромосом полягає у з'єднанні двох негомологічних хромосом в одну.

Кратне збільшення кількості хромосомних наборів зумовлює **поліплоїдію** (від грец. *поліплоос* – багаторазовий та *ейдос* – вид). Поліплоїдію найчастіше спостерігають у рослин, рідше – у тварин (переважно тих, які розмножуються вегетативно чи партеногенетично).

Поліплоїдія може виникати внаслідок:

- подвоєння загального числа хромосом, яке не супроводжується наступним поділом клітини;
- утворення гамет з не зменшеним унаслідок порушення процесу мейозу загальним числом хромосом.
- злиття нестатевих клітин або їхніх ядер.

Поліплоїдія часто сприяє збільшенню розмірів організмів і підвищенню продуктивності (мал. 39.3). Цей метод використовують у селекції рослин під час виведення високопродуктивних сортів (м'якої пшениці, цукрового буряку, суниць садових тощо).



Мал. 39.3. Використання явища поліплоїдії у селекції рослин. А. Схема утворення поліплоїдних полуниць: завдяки застосуванню алкалоїду колхіцину, який руйнує веретено поділу, отримують гамети з диплоїдним набором хромосом. При їхньому злитті виникає тетраплоїдна зигота ($4n$), з якої розвивається рослина. Б. Диплоїдні ($2n$) (а) та поліплоїдні ($4n$) (б) плоди полуниці. В. Кавун без насінин – штучно виведений сорт, що має триплоїдний набір хромосом

Якщо поліплоїдні організми, які мають парні набори хромосом (**4n**, **6n** тощо), зазвичай здатні нормально розмножуватись і давати плодючих нащадків, то ті, які мають непарні набори хромосом (**3n**, **5n** тощо), часто стерильні. Це пов'язано з тим, що в таких організмів порушується нормальний розподіл гомологічних хромосом між дочірніми клітинами під час мейозу (*поміркуйте*: це відбувається під час першого мейотичного поділу або під час другого).



✓ **Дізнайтеся більше** про виникнення м'якої пшениці за QR-кодом.

Цікаво знати. Людина належить до видів, які мають диплоїдний набір хромосом. Але в її організмі трапляються поліплоїдні клітини (наприклад, клітини печінки (гепатоцити), серцевого м'яза (кардіоміоцити)).



Ймовірність того, що мутація, яка щойно виникла, виявиться корисною, дуже мала. Тому потрібно захищати спадкову інформацію людини та інших організмів від дії чинників, здатних спричиняти мутації.

Узагальнення

Мінливість – здатність організмів набувати нових ознак і властивостей – буває спадкова та неспадкова (модифікаційна). Спадкова мінливість буває комбінативною та мутаційною. Комбінативна мінливість є наслідком нових комбінацій алельних генів (рекомбінацій). Мутаційна мінливість виникає в разі появи мутацій – стрибкоподібних змін генетичного матеріалу. За місцем виникнення мутації бувають соматичні та генеративні. За впливом на організм – летальні, нейтральні та сублетальні. За зміною спадкового апарату виокремлюють: точкові (стійка зміна порядку розташування нуклеотидів у молекулах нуклеїнових кислот), хромосомні (зміна будови окремих хромосом) та геномні (пов'язані із числом хромосом) мутації.



Поміркуйте

1. Чиїх генів – батька чи матері – більше в генотипі дитини?
2. Чому дитина може бути схожа на прадідуся чи прабабусю?
3. Підтвердьте або спростуйте вислів: «Ми харчуємося плодами поліплоїдії».



Лабораторне дослідження «Вивчення мінливості у рослин і тварин».



§ 40. Причини виникнення мутацій. Властивості мутацій



Чи можна передбачити точну появу тих чи інших мутацій в організмі?

Спонтанні мутації. У живих істот час від часу виникають **спонтанні** (від лат. *спонтанеус* – самочинний) **мутації**, наприклад помилки під час відтворення генетичного матеріалу. Їх можуть також спричиняти переміщення фрагментів ДНК з однієї ділянки молекули до іншої, природний радіаційний фон.

Частота спонтанних мутацій залежить від віку клітин та організмів загалом. Так, зі збільшенням віку матерів підвищується частота мутацій, пов'язаних з нерозходженням гомологічних хромосом під час мейозу. Тому частота народження дітей із синдромом Дауна зростає від 0,1 % у 30-річних жінок до 2 % у 45-річних. Загальна ймовірність виникнення різноманітних спонтанних мутацій у дітей, народжених матерями віком понад 42 роки, становить близько 30 %. На частоту спонтанних мутацій впливає і вік батька. Так, у 40-річних чоловіків кількість нащадків з карликовим зростом, укороченими кінцівками, сидлоподібним носом зростає вдсятеро порівняно з 20-річними. Жінці, яка планує відкласти материнство із соціальних причин (кар'єра, пошук партнера, фінансова стабільність) або через медичні рекомендації, радять процедуру кріоконсервації – замороження яйцеклітин. Це дає їй можливість, використовуючи збережений власний генетичний матеріал, мати здорових дітей у майбутньому.

✓ **Дізнайтеся більше** про спонтанні мутації за QR-кодом.



Мутагенні фактори. Тривалий час причини мутацій залишалися нез'ясованими. Лише 1927 р. американський генетик Герман Джозеф Меллер (1890–1967), опромінюючи рентгенівськими променями дрозофіл, викликав у цих мух різноманітні мутації.

Фактори, здатні впливати на спадковий матеріал і спричиняти мутації, називають **мутагенними** (від лат. *мутацио* – зміна та грец. *генезис* – походження). Мутації, спричинені мутагенними факторами, називають **індукованими** (від лат. *індуктіо* – спонукання).

За походженням розрізняють фізичні, хімічні та біологічні мутагенні фактори (скорочено – **мутагени**). Серед **фізичних мутагенів** найбільше значення має іонізуюче випромінювання, зокрема рентгенівське (мал. 40.1). Проходячи крізь живу речовину, рентгенівські промені вибивають електрони із зовнішньої оболонки атомів або молекул, унаслідок чого ті стають позитивно зарядженими. Вибиті електрони можуть спричинити неконтрольовані хімічні перетворення різних сполук організмів. Найбільшу небезпеку мутагенна дія іонізуючого випромінювання становить для клітин, що активно діляться (*поміркуйте*, які це групи клітин в організмі людини).



Мал. 40.1. Безвухий кролик, що народився поблизу японської атомної станції Фукусіма після аварії на ній

До фізичних мутагенів також належить ультрафіолетове випромінювання. На відміну від іонізуючого, воно має низьку проникну здатність і може впливати лише на клітини, розташовані на поверхні тіла. Під дією ультрафіолету в ДНК утворюються здвоєні нуклеотиди – димери; як наслідок, виникають генні мутації.

Хімічні мутагени було відкрито пізніше за фізичні. Значний внесок у їхнє вивчення зробила українська генетична школа, очолювана академіком С. М. Гершензоном. Хімічні мутагени здатні взаємодіяти з різними компонентами ДНК і спричиняти мутації шляхом хімічної модифікації цих компонентів. До хімічних мутагенів, зокрема, належать нітритна кислота, гідроген пероксид, формальдегід (метаналь), акридинові барвники, деякі лікарські препарати тощо. Хімічними мутагенами є також більшість речовин, що входять до складу тютюнового диму. Дослідники щорічно відкривають нові хімічні мутагени.



Алкоголь та інші токсичні речовини також є сильними мутагенами. Зокрема, вживання майбутніми матерями, а також батьками наркотиків, алкоголю, певних лікарських препаратів, які не пройшли належної перевірки, куріння тютюну можуть призвести до порушень нормального формування зародка. Унаслідок цього народжується дитина зі спадковими хворобами або порушеннями психофізичного розвитку. У молодому та зрілому віці шкідливі звички можуть призвести до розвитку ракових пухлин через дію мутагенів на процеси мітозу або мейозу.

Механізми **біологічного мутагенезу** пов'язані з перенесенням і вбудовуванням фрагментів чужорідної ДНК у структурну послідовність гена. Основними переносниками таких фрагментів є віруси. Так, у клітинах, уражених вірусами, мутації відбуваються значно частіше, ніж у здорових. Віруси можуть вбудовувати свою ДНК у хромосоми хазяїна й вивільняти її, часто захоплюючи при цьому фрагменти ДНК клітини-хазяїна, і в такий спосіб переносити спадкову інформацію між різними організмами (так зване *горизонтальне перенесення генів*). Також до біологічних мутагенів належать *транспозони*, або *стрибаючі гени*, – послідовності ДНК, здатні до самостійного переміщення геномом.

Біологічні антимутаційні механізми. Існують механізми, здатні захищати генетичний матеріал організмів від мутацій. *Пригадаймо*: більшість амінокислот закодовано не одним, а кількома триплетами, а частина генів багато разів повторюється в геномі організмів. У клітинах існують особливі системи виправлення помилок (системи *репарації*), які виникають під час подвоєння молекул ДНК та їхніх змін під впливом мутагенів (*пригадайте*, як відбувається репарація молекул ДНК). За нормальних умов мутації окремих алелів відбуваються зрідка. Але оскільки кількість генів організму значна, то й загальна кількість мутацій також помітна. Наприклад, у дрозофіли приблизно 5 % гамет містять різноманітні мутації.

Загальні властивості мутацій. Здатність до змін спадкової інформації у процесі історичного розвитку є універсальною властивістю живого. Загальні властивості мутацій такі:

- мутації виникають раптово;
- зміни, до яких призводять мутації, можуть успадковуватися;
- подібні мутації можуть виникати неодноразово й незалежно від інших;
- мутації можуть бути шкідливими, нейтральними або корисними;

- фактори, які призводять до мутацій (мутагени), універсальні, тобто здатні спричиняти зміни спадкового матеріалу в організмах усіх видів;

- один і той самий фактор, який діє з однаковою інтенсивністю на генетично ідентичні організми (наприклад, на однойцевих близнят), може спричиняти в них різні мутації;

- ступінь вираження змін у фенотипі організмів не залежить від інтенсивності й тривалості дії мутагенного фактора: слабкий мутаген, який діє нетривалий час, іноді здатен спричиняти значніші зміни у фенотипі, ніж сильний;

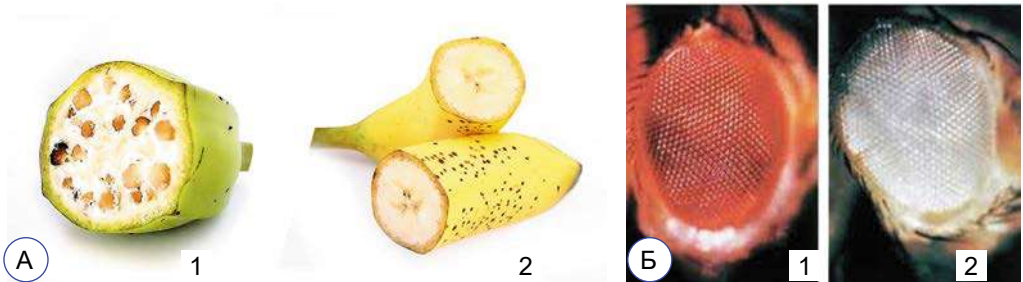
- частота виникнення мутацій зі зростанням інтенсивності дії мутагенного фактора зростає лише до певної межі;

- для мутагенних факторів не існує нижньої межі інтенсивності дії (нижнього порогу дії), нижче за яку вони не здатні впливати на спадковий матеріал; ця властивість свідчить про те, що спадковий матеріал організмів потрібно захищати від усіх мутагенів, незалежно від сили та тривалості їхнього впливу;

- ступінь впливу мутагенного фактора на організм визначається **дозою мутагенного фактора** – добутком тривалості та інтенсивності його дії.

Значення мутацій у природі й житті людини. Мутації є джерелом спадкової мінливості – одного з факторів еволюції. Завдяки їм з'являються нові алелі певних генів (їх називають *мутантними*). Натомість алель, який найчастіше трапляється в популяціях, називають *алелем дикого типу*. Експресуючись, такі алелі визначають дикий тип фенотипу організмів (мал. 40.2).

Завдяки мутаціям виникають нові варіанти генотипів, а отже, зростає біорізноманіття нашої планети. Тому не буде перебільшенням стверджувати, що все різноманіття сучасних і вимерлих форм живих істот завдячує саме мутаціям.



Мал. 40.2. А. Плоди банана: дикий тип (1), на відміну від культурного (2), містить велику кількість насінин. Б. Забарвлення очей у дрозофіли: дикий тип – червоне (1) та мутантне – біле (2)



Поміркуйте, як можна розмножувати культурні форми банана, якщо в їхніх плодах насінин майже немає.

Загальним наслідком мутаційної мінливості зазвичай є порушення спадкових програм клітин та організмів загалом. Більшість мутацій шкідлива для живих істот, оскільки вони, проявляючись у фенотипі,

знижують пристосованість до умов існування. Нейтральні ж мутації, які не впливають на життєздатність організмів, можуть виявитися корисними за певних змін середовища.

Штучно спричинені мутації збільшують різноманіття вихідного матеріалу під час селекції рослин і мікроорганізмів, від чого залежить її ефективність. Зокрема, багато культурних рослин є поліплоїдними, тоді як предкові види мали меншу кількість хромосомних наборів (м'яка пшениця, садові суниці, деякі сорти цукрових буряків тощо) (див. мал. 39.3, В).



Поміркуйте: чому мутагени майже не застосовують у селекції тварин?

✓ **Дізнайтеся більше** про використання мутацій у біологічних методах боротьби зі шкідниками за QR-кодом.



Узагальнення

Мутації бувають спонтанні та індуковані (спричинені мутагенами). Мутагени – фактори, що спричиняють мутації. За природою мутагени поділяють на хімічні та біологічні тощо. Існують біологічні антимутаційні механізми, які захищають організм від мутацій. Мутації у природі є джерелом спадкової мінливості – одним із факторів еволюції. Штучно спричинені мутації збільшують різноманіття вихідного матеріалу під час селекції рослин і мікроорганізмів; також мутації застосовують для боротьби зі шкідниками сільського господарства. Для людини поява мутацій може бути причиною розвитку різних хвороб.



Поміркуйте

1. Чому мутаційну мінливість вважають одним із чинників еволюції?
2. Як забруднене хімічними речовинами середовище може впливати на частоту появи мутацій в організмах?
3. Пігментна ксеродерма – спадкове захворювання людини, за якого знижується активність ферменту, що здійснює репарацію ДНК під час утворення димерів. Особи, хворі на ксеродерму, не можуть перебувати на сонці. Чому?

§ 41. Модифікаційна мінливість – наслідок взаємодії генотипу та умов довкілля



Чому в представників одного виду спостерігають різноманітні прояви певної ознаки?

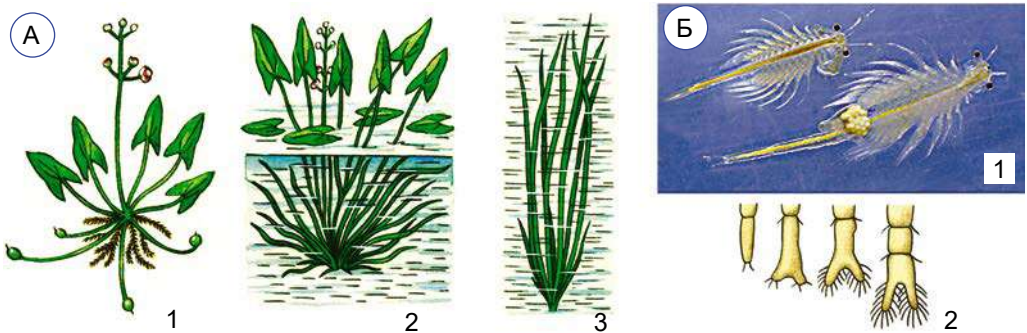
Модифікаційна мінливість. Крім спадкової мінливості (комбінативної та мутаційної), існує й неспадкова, або модифікаційна. **Модифікаційні зміни (модифікації)** – це реакції організмів на зміну інтенсивності дії певних чинників довкілля. Неспадкова, або модифікаційна (від лат. *модус* – міра, вигляд і *фаціо* – роблю), мінливість – це зміни фенотипу, набуті під час індивідуального розвитку організму, спричинені впливом умов довкілля і не пов'язані зі змінами генотипу.

Модифікаціям притаманні такі властивості.

- **Модифікації однакові для всіх генотипово однорідних істот.**

Спадкова програма будь-якого організму реалізується не тільки під контролем генів, а й під впливом навколишнього середовища (див. мал. 38.2). Наприклад, у всіх занурених у воду особин рослини стрілици звичайної (цю рослину ще називають стрілолистом) утворюються довгі й тонкі листки, а в тих, що ростуть на суходолі, – стрілоподібні. У рослин, частково занурених у воду, формуються листки обох типів (мал. 41.1, А).

- **Ступінь прояву модифікацій прямо залежить від інтенсивності й тривалості дії певного чинника на організм.** Так, у дрібного рачка артемії ступінь опушеності задньої частини черевця залежить від солоності води: вона то більша, що нижча концентрація солей у воді (мал. 41.1, Б). З власного досвіду ви знаєте: що більше часу проводити на сонці, то інтенсивніша засмага. Що вище людина піднімається в гори і що триваліше вона перебуває в умовах високогір'я, то більша концентрація еритроцитів у її крові.



Мал. 41.1. Модифікаційна мінливість. А. Стрілиця звичайна (1) та модифікації її листків: 2 – листки стрілоподібної форми, що вирости над водою; 3 – стрічкоподібні листки, що розвинулися під водою. Б. 1. Рачки артемії (зовнішній вигляд). 2. Опушення черевця артемії за різних умов солоності (зліва направо: від більшої солоності до меншої)

- **Модифікації можуть зникати протягом життя особини, якщо припиняється дія фактора, який їх спричиняє.** Наприклад, засмага, набута влітку, поступово зникає протягом осінньо-зимового періоду. Після нетривалого перебування в умовах високогір'я кількість еритроцитів у крові знижується до норми, коли людина повертається в долину (*пригадайте*, скільки еритроцитів у нормі міститься в 1 мл крові людини).

- **Деякі модифікації, які виникли на ранніх етапах індивідуального розвитку, можуть зберігатися протягом усього життя особини.** Наприклад, викривлення кісток нижніх кінцівок у людини, яка в дитинстві перехворіла на рахіт (*пригадайте*, що спричиняє таке захворювання), зберігається протягом усього її життя. Але діти батьків, що хворіли на рахіт, не матимуть такого порушення розвитку, якщо вчасно отримуватимуть потрібну кількість вітаміну D.

Інший приклад модифікацій, які зберігаються протягом усього життя, – це диференціація личинок медоносної бджоли з диплоїдним

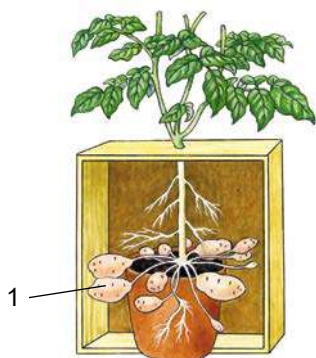


Мал. 41.2. Диференціація самок медоносної бджоли на цариць (1; диплоїдні плодючі особини) та робочих особин (2; диплоїдні особини, не здатні до розмноження)

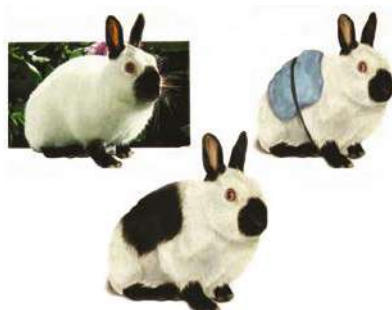
набором хромосом на цариць і робочих особин (мал. 41.2). Ті з личинок, що розвиваються у великих комірках стільників і живляться лише «молочком», яке виробляють особливі залози робочих особин, розвиваються в цариць. А ті, яких вигодовують пергою (сумішшю меду і пилку) у комірках звичайних розмірів, згодом стають робочими особинами – не здатними до розмноження самками. Отже, диференціація личинок жіночої статі на цариць і робочих особин залежить від якості їхнього живлення. Якщо на ранніх етапах розвитку поміняти місцями личинок, з яких мали б розвинутися цариця та робоча особина, то відповідно зміняться характер їхнього живлення та подальший тип розвитку.

• **Модифікаційна мінливість** зазвичай забезпечує пристосування до змінних умов середовища існування. Наприклад, зміна форми листків стрілиці звичайної (мал. 41.1, А) зі стрілоподібної на підводну стрічкоподібну захищає ці рослини від ушкодження течією. Заміна шерсті ссавців під час осіннього линня на густішу забезпечує захист організму від дії низьких температур, а засмага людини – від шкідливої дії сонячного випромінювання. Усе це дає підстави вважати, що такі пристосувальні модифікації виникли в процесі історичного розвитку виду як певні реакції на зміни умов довкілля, з якими постійно стикаються організми. *Пригадаймо*: пристосування організмів до умов середовища життя називають **адаптаціями** (від лат. *адато* – пристосовую).

Цікаво знати. Не всі модифікації мають пристосувальне значення. Так, якщо затінити нижню частину стебла картоплі, то можуть розвинутися надземні бульби, не захищені ґрунтом (мал. 41.3). Модифікації, позбавлені пристосувального значення, виникають тоді, коли організми опиняються у незвичних умовах, з якими не доводилося стикатися їхнім предкам.



Мал. 41.3. Приклад модифікації, позбавленої адаптивного значення: у разі затінення нижньої частини стебла картоплі бульби утворюються не лише у ґрунті, а й над його поверхнею (1)



Мал. 41.4. Горностаєве забарвлення хутра кролів: на спинному боці тіла вигодили ділянки, до яких прикладали лід; під впливом низьких температур на них відростала не біла, а темна шерсть

Модифікаційна мінливість пов'язана не зі змінами в спадковому матеріалі організмів, а зі зміною експресії генів під впливом чинників навколишнього середовища. На ступінь прояву варіантів багатьох кількісних ознак (наприклад, зріст і маса організмів, площа листкової пластинки тощо) впливають переважно умови довкілля. Наприклад, температура впливає на забарвлення шерсті кролів (мал. 41.4). У сіамських кішок так само кожна ділянка шкіри має власний температурний поріг, який визначає те чи інше забарвлення шерсті.

Статистичні закономірності модифікаційної мінливості. Модифікаційна мінливість підпорядковується певним статистичним закономірностям.

За модифікаційної мінливості фенотипові ознаки організмів можуть змінюватися лише у певних, окреслених генотипом, межах; такі межі мають назву **норма реакції**. Вона має певні межі для кожної ознаки. Найвужча норма реакції властива ознакам, які визначають життєздатність організмів (наприклад, значення температур, за яких більшість ферментів є активними, надзвичайно вузькі), а для таких, що мають менш важливе значення, – може бути ширшою (маса тіла, зріст). Широка норма реакції свідчить про здатність організмів адаптуватись до широкого діапазону умов існування.

Для вивчення мінливості певної ознаки складають **варіаційний** (від лат. *variaċio* – зміна) **ряд** – послідовність кількісних показників певної ознаки (варіант), розміщених у порядку зростання чи зменшення (мал. 41.5). Довжина ряду свідчить про розмах модифікаційної мінливості. Він залежить від умов навколишнього середовища: що вони стабільніші, то коротший варіаційний ряд, і навпаки.

Мал. 41.5. Варіаційний ряд листків лавровишні



Розподіл варіант можна зобразити графічно у вигляді варіаційної кривої (мал. 41.6). **Варіаційна крива** показує межі модифікаційної мінливості та частоту зустрічальності окремих варіант у межах варіаційного ряду. За її допомогою можна встановити середні показники й норму реакції певної ознаки.

Уважно розгляньте малюнок 41.6 і зверніть увагу: найбільша кількість варіант припадає на середню частину ряду, тобто переважає середнє значення певної ознаки. Такий розподіл пояснюють тим, що мінімальні й максимальні значення певної ознаки проявляються, коли більшість екологічних факторів діє в одному напрямку – найбільш чи найменш сприятливому. Але зазвичай одні



Мал. 41.6. Варіаційна крива кількості колосків у колосі пшениці

чинники сприяють розвитку певної ознаки, інші, навпаки, гальмують. Саме тому ступінь розвитку тієї чи іншої ознаки в більшості особин популяції та виду усереднений. Так, більшість людей має середній зріст, і лише небагато з них дуже високі або занадто низькі.



Узагальніть інформацію про модифікаційну та мутаційну мінливість за QR-кодом. Що спільного та відмінного між мутаційною та модифікаційною мінливістю?



Узагальнення

Модифікаційна мінливість – форма неспадкової мінливості, за якої під впливом умов довкілля змінюється фенотип. Генотип при цьому не змінюється. За модифікаційної мінливості фенотипові ознаки організмів можуть зазнавати змін лише в певних межах, визначених генотипом. Такі межі мають назву норма реакції. Хоч модифікації й не успадковуються, вони, однак, мають велике значення для пристосованості організмів до умов середовища існування. Разом із процесами спадкової мінливості модифікаційна мінливість забезпечує велику різноманітність фенотипів живих істот.



Поміркуйте

1. Із чим пов'язана зміна кількості еритроцитів у крові під час сходження в гори і повернення назад?
2. Чому норма реакції маси мозку менша, ніж норма реакції маси тіла?
3. Яка ймовірність появи відмінностей в однайцевих близнятах, що живуть у різних умовах?



Лабораторне дослідження «Побудова варіаційного ряду і варіаційної кривої».



§ 42. Генетика людини



Людина не є зручним об'єктом для генетичних досліджень. Але такі дослідження проводили в минулому й надалі вони триватимуть. Поміркуйте чому.

Генетика людини – розділ генетики, що досліджує особливості організації й функціонування геному людини, а також закономірності її спадковості.

Усі основні закономірності спадковості, встановлені для тварин і рослин, справедливі й для людини. Водночас людина як об'єкт генетичних досліджень має низку особливостей, які зумовлюють специфіку наукових методів і підходів. Серед них такі.

- **Неможливість застосування гібридологічного методу.** Адже люди беруть шлюб вільно, не зважаючи на генотип партнера, і не ставлять перед собою при цьому будь-яку наукову мету. Тому основними методами в генетиці людини є генеалогічний, близнюковий, популяційно-генетичний і цитогенетичний.

- **Тривалий період статевого дозрівання та зміни поколінь.** Від народження до настання статевої зрілості минає понад 10 років, а для вступу нащадків у вік розмноження – щонайменше 18–20 років. Це

значно ускладнює спостереження за передаванням ознак у популяції у низці поколінь.

- **Вплив соціальних чинників на успадкування.** Релігійні переконання, соціально-економічний статус, умови життя, а також психологічні й поведінкові риси впливають на вибір шлюбного партнера. Усе це зумовлює відхилення від випадкового комбінування ознак.

- **Незначна кількість нащадків у сім'ях.** Від однієї подружньої пари здебільшого народжується недостатня для статистичних розрахунків кількість дітей, що ускладнює підтвердження закономірностей успадкування.

- У деяких соціальних групах доволі часто трапляються **споріднені шлюби** (шлюби між людьми, які мають спільних предків принаймні протягом попередніх шести поколінь). Це підвищує ризик народження нащадків із генетичними відхиленнями. У фенотипі таких нащадків можуть проявитись рецесивні алелі (серед яких можуть бути летальні та сублетальні), що не проявились у гетерозиготних батьків. У нащадків вони можуть перейти в гомозиготний стан. Небезпека народження дитини з певними спадковими захворюваннями або генетичними порушеннями розвитку зростає зі збільшенням ступеня спорідненості осіб, які беруть шлюб. Тому споріднені шлюби в багатьох країнах заборонені.

- **Висока виживаність осіб зі спадковими відхиленнями.** На відміну від популяцій тварин, де особини із серйозними відхиленнями зазвичай не залишають потомства, у людському суспільстві навіть ті, хто має серйозні відхилення від норми, можуть жити повноцінним життям, створювати сім'ї та мати дітей. Унаслідок цього патологічні алелі зберігаються й передаються нащадкам.

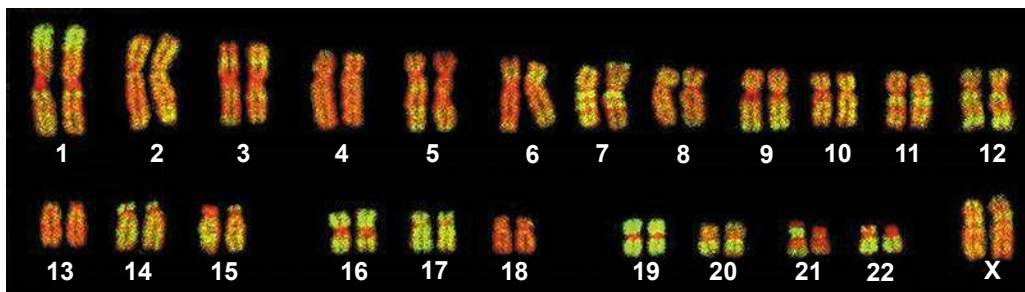
Останнім часом у генетиці людини активно використовують також методи біоінформатики та комп'ютерного моделювання. Ці методи дають змогу аналізувати та порівнювати послідовності ДНК для потреб медичної та еволюційної генетики, передбачати за нуклеотидними послідовностями генів структуру та функцію білків, які вони кодують, наслідки мутаційних змін у геномі, а також моделювати складні біологічні процеси за допомогою потужних обчислювальних систем.

Цікаво знати! Створена й функціонує база даних OMIM (Менделівська Спадковість у Людини Онлайн (Online Mendelian Inheritance in Man; <https://www.omim.org/>) – каталог усіх відомих генів людини. Станом на 2019 р. вона містить близько 25 тис. записів, але лише 9 тис. з них висвітлюють зв'язок між генотипом і фенотипом.

Пригадаємо: основні характеристики геному людини були з'ясовані завдяки масштабному міжнародному проєкту «Геном людини» та іншим подібним дослідженням. Встановлено, що послідовності нуклеотидів ДНК у різних людей подібні приблизно на 99,5 %. Отже, лише 0,5 % геному визначає різноманітність ознак людини. Такі незначні генетичні відмінності свідчать, що біологічних підстав для поділу людей на раси чи нації немає. Усі відмінності між ними зумовлені насамперед культурними, історичними та соціальними чинниками, а також впливом природних умов (наприклад, клімату), у яких формувалися різні групи людей.

Типи успадкування в людини. **Пригадаймо:** каріотип людини складається з 22 нестатевих хромосом (аутосом) та двох статевих (XX –

у жінок та ХУ – у чоловіків). Для точнішої ідентифікації хромосом, їхніх специфічних ділянок та опису хромосомних аномалій застосовують спеціальні методи забарвлення хромосом, які базуються на використанні специфічних барвників і процедурах їх попереднього оброблення під час виготовлення мікроскопічних препаратів (мал. 42.1).

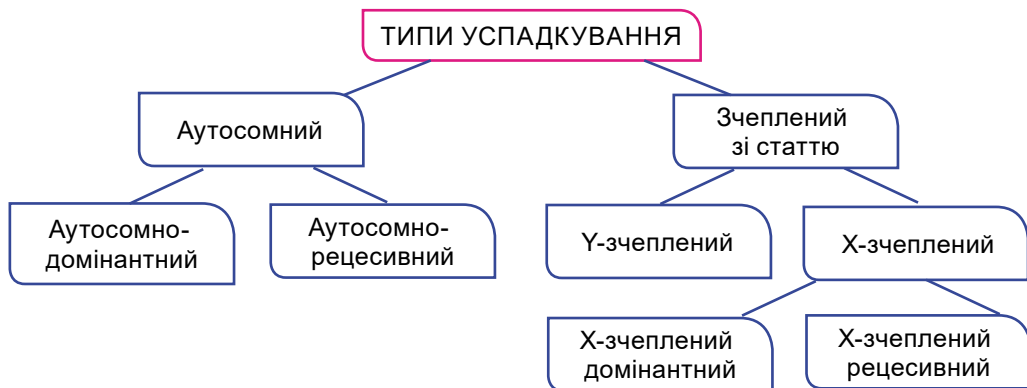


Мал. 42.1. Кольорова мікрофотографія каріотипу людини (введення у хромосоми флуоресцентних міток дає змогу отримати чіткіше зображення); цифрами позначені різні пари гомологічних нестатевих хромосом (аутосом)



Уважно роздивіться малюнок 42.1 й визначте, чий каріотип на ньому наведено: чоловіка чи жінки. Відповідь обґрунтуйте.

На малюнку 42.2 наведено типи успадкування ознак у людини. Якщо певний варіант спадкової ознаки визначається домінантним алелем, локалізованим у нестатевій хромосомі (аутосомі), йдеться про **аутосомно-домінантний тип успадкування**. Такий варіант ознаки-проявляється з однаковою частотою як серед чоловіків, так і серед жінок і може передаватись нащадкам.



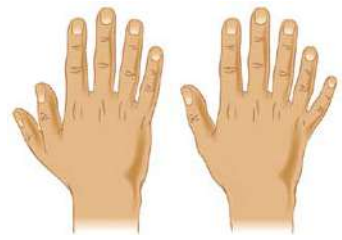
Мал. 42.2. Типи успадкування ознак у людини

За аутосомно-домінантним типом успадковуються такі ознаки, як темний колір волосся та шкіри, карі очі, кучеряве волосся, ніс із горбинкою, ямочки на щоках, довгі вії, щілина між зубами (діастема), товсті губи тощо. Також за цим типом часто успадковуються мутації, що спричиняють захворювання: полідактилію (мал. 42.3), брахідактилію (вкорочені пальці), целіакію (несприйнятливість до глютену – білка, що міститься в зерні більшості культурних злаків).

Варто пам'ятати, що домінантність алеля не означає переважання відповідної ознаки в популяції. Її поширеність визначається частотою зустрічальності алеля. Наприклад, полідактилія зумовлена домінантним алелем, але більшість людей мають нормальну кількість пальців. Це пояснюється тим, що домінантний алель, відповідальний за полідактилію, трапляється в популяції значно рідше, ніж рецесивний алель, який визначає нормальну кількість пальців.

Якщо ж певний варіант ознаки визначає рецесивний алель, розташований в аутосомі, то йдеться про **аутосомно-рецесивний тип успадкування**. У такому разі в обох батьків з рецесивним варіантом ознаки діти з домінантним варіантом ознаки народитись не можуть.

Як аутосомно-рецесивні успадковуються блакитні очі, пряме волосся, прямий ніс, відсутність ямочок на щоках, короткі вії, відсутність діастеми, тонкі губи, руде волосся та ін. Аутосомно-рецесивні захворювання людини зазвичай зумовлені дефіцитом певного білка, тому такі патології насамперед є порушеннями обміну речовин. Серед них – муковісцидоз, альбінізм, фенілкетонурія, серпоподібноклітинна анемія.



Мал. 42.3. Приклад спадкового захворювання людини – полідактилії (поява 6-го, рідше 7-го пальця на всіх чи деяких кінцівках)

✓ **Дізнайтеся більше** про деякі домінантні та рецесивні варіанти ознак у людини за QR-кодом.



Особливостями **успадкування, зчепленого зі статтю**, є те, що Х-та Y-хромосоми відрізняються за набором генів. Оскільки Y-хромосома коротша, ніж X-хромосома, то в Y-хромосомі відсутні певні гени, наявні в X-хромосомі. Отже, певні гени в геномі чоловіка представлені не двома алельними генами, а одним (*пригадаймо*, як успадковуються дальтонізм і гемофілія).



Використовуючи різні джерела, знайдіть інформацію про ці захворювання людини.

Домінантні ознаки, зчеплені з X-хромосою, можуть проявлятися як у жінок, так і в чоловіків. Але домінантний алель від батька – носія цього алеля – не передається до сина (оскільки він отримує від батька Y-хромосому). З іншого боку, у такого батька всі доньки обов'язково успадкують цю ознаку. Крім того, такий варіант ознаки частіше трапляється серед жінок, ніж серед чоловіків (*поміркуйте чому*). У людини за згаданим механізмом успадковуються рахіт, нечутливий до вітаміну D, та гіпоплазія (потоншення) зубної емалі.

X-зчеплені рецесивні ознаки в гетерозиготному стані у фенотипі жінки не проявляються, а у фенотипі чоловіка проявляються завжди. За цим типом успадковуються такі патології, як гемофілія, дальтонізм, міопатія Дюшена (дистрофія м'язів, що прогресує).

У разі **успадкування ознак, зчеплених з Y-хромосою**, ознака проявлятиметься винятково в чоловіків та передаватиметься від батька до сина зі 100-відсотковою імовірністю.



Мал. 42.4. Ознака, яка передається зчеплено з Y-хромосомою: оволосіння вушної раковини у чоловіків

Цікаво знати! На відміну від X-хромосоми, Y-хромосома несе небагато генів (за останніми даними – 41 ген). Частина з них гомологічна генам, розташованим у X-хромосомі, інші – контролюють визначення статі та процеси утворення сперматозоїдів. Мутації певних генів, розташованих в Y-хромосомі, спричиняють, наприклад, оволосіння вушної раковини у чоловіків (мал. 42.4).

Окрему групу становлять *мітохондріальні хвороби*, спричинені мутаціями в мітохондріальній ДНК і пов'язані з порушенням функцій цих органел. Мітохондріальні генетичні хвороби спричиняють деякі психічні та м'язові розлади, такі як синдром Пірсона (пов'язаний з порушенням функцій підшлункової залози та утворення лейкоцитів, особливо нейтрофілів), міоклональна епілепсія, міокардіопатія тощо. Такі захворювання передаються до дітей обох статей лише за материнською лінією.

Узагальнення

Генетика людини – це розділ генетики, що вивчає особливості організації та функціонування геному людини та закономірності її спадковості. Людина є біосоціальним видом. Це визначає її особливості як об'єкта досліджень, що зумовлює, наприклад, неможливість застосування гібридологічного методу. У людини ознаки можуть успадковуватися за різними типами: аутосомно-домінантним, аутосомно-рецесивним, зчепленим із X- чи Y-хромосомою тощо.

Поміркуйте

1. Що впливає на вибір методів дослідження в генетиці людини?
2. Чому більшість спадкових захворювань успадковується за рецесивним типом?
3. Деякі дослідники вважають, що гетерогаметна стать (у людини – чоловіча) менш життєздатна, ніж гомогаметна (в людини – жіноча). Поміркуйте чому.

§ 43. Медична генетика. Медико-генетичне консультування



Багато людей виступає проти медико-генетичного консультування з міркувань біоетики. Запропонуйте аргументи за і проти цієї позиції.

Медична генетика розробляє методи діагностики спадкових захворювань, їхньої профілактики та лікування. Сучасна медична генетика насамперед орієнтується на профілактику спадкових захворювань, зокрема запобігання народженню дітей з певними спадковими захворюваннями або вадами. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, 5 зі 100 новонароджених мають те чи інше важке спадкове захворювання, ще 5 мають генетичні порушення розвитку, а ще 2 народжуються мертвими внаслідок цих порушень. Ці показники щороку

зростають через забруднення довкілля різноманітними мутагенами. Нині відомо близько 8000 спадкових захворювань і захворювань зі спадковою схильністю, тоді як 1958 р. було відомо не більше ніж 500. *Пригадаймо: спадковими захворюваннями* називають хвороби, причинами яких є зміни спадкового апарату, тобто мутації.

Захворювання з генетичною схильністю – це хвороби, для яких існує підвищена ймовірність розвитку внаслідок поєднання спадкових факторів і впливу довкілля. Навіть за наявності відповідної генетичної основи такі захворювання проявляються не в усіх людей. Важливу роль у їх виникненні відіграють умови життя і стан здоров'я організму. До прикладів належать психічні розлади (шизофренія, епілепсія), серцево-судинні захворювання (гіпертонія, ішемічна хвороба серця), ревматизм, цукровий діабет тощо.

Спадкові захворювання можуть мати різні прояви:

- порушення будови організму, наприклад «вовча паща» (виникнення щілини, що сполучає носову та ротову порожнини, внаслідок розщеплення верхніх губи, щелепи та піднебіння); «заяча губа» (розщеплення верхньої губи); багатопалість (див. мал. 42.3) чи зрощення пальців тощо;
- розлад фізіологічних функцій, наприклад гемофілія та дальтонізм;
- порушення процесів обміну речовин, зокрема цукровий діабет.

Деякі зі спадкових захворювань, наприклад синдром Дауна, проявляються відразу після народження. Інші, наприклад хорея Гентінгтона (захворювання клітин нервових вузлів, яке супроводжується мимовільними рухами, інтелектуальними порушеннями, що поступово прогресують, тощо), починають проявлятися лише після 35–40 років.

Певні спадкові захворювання та генетичні вади зумовлені **змінюю кількості або структури хромосом** (наприклад, поява додаткових хромосом у 13-й, 18-й чи 21-й парі). У першому випадку (синдром Патау) спостерігають деформацію вухної раковини, ушкодження шкіри голови, вовчу пащу, шестипалість, порушення функцій мозочка, вади серця, глухоту, затримку психічного розвитку та інші патології. У другому випадку (синдром Едвардса) – деформацію вухної раковини, вкорочення великого пальця ноги, порушення функцій мозочка, вади серця, тяжку форму затримки розумового розвитку, часту захворюваність тощо. Прикладами захворювань, пов'язаних зі зміною числа хромосом у каріотипі, є синдроми Дауна, Шерешевського – Тернера (відсутність однієї з X-хромосом; зміни, які відбуваються в організмі такої жінки, ми згадували раніше) тощо.

Багато спадкових захворювань людини пов'язані з виникненням точкових мутацій. Серед них виділяють моногенні та полігенні. **Моногенні захворювання** пов'язані з мутаціями одного гена. Прикладами таких захворювань є альбінізм, серпоподібноклітинна анемія, муковісцидоз (ураження легень, потових залоз, травної системи, що спричиняє хронічні захворювання органів дихання і травлення) тощо. Саме вони й є мішенями для генотерапії на рівні зиготи.

Полігенні захворювання спричиняють мутації декількох генів. Як приклади можна навести деякі форми гіпертонії, цукрового діабету або бронхіальної астми.

✓ **Дізнайтеся більше** про цукровий діабет за QR-кодом.



Методи профілактики й лікування спадкових хвороб людини. Для запобігання спадковим захворюванням, за можливості – лікування їх чи принаймні поліпшення якості життя людей з такими патологіями біологія й медицина напружували різні методи.

У профілактиці спадкових захворювань важливу роль відіграє **медико-генетичне консультування**. У медико-генетичних консультаціях працюють фахівці різних спеціальностей – генетики, біохіміки, цитологи, імунологи тощо. За допомогою різноманітних методів вони виявляють носіїв алелів, які зумовлюють прояви спадкових захворювань або вад; вираховують імовірність успадкування і прояву спадкових захворювань у нащадків. Коли ймовірність появи нащадків зі значними спадковими порушеннями розвитку висока, майбутнім батькам пропонують утриматись від народження дитини. Це передусім спрямовано не лише на запобігання народженню дітей з певними генетичними дефектами, а й на запобігання подальшому передаванню мутантних алелів наступним поколінням.

Для пошуку носіїв певних спадкових хвороб можуть застосовувати **скринінгові методи** – масові дослідження, які дають змогу виявити таких носіїв і запобігти ризику народження дітей з патологіями.



У разі ймовірності народження в родині дітей з генетичними хворобами або спадковими порушеннями розвитку фахівці повинні не лише оцінити рівень небезпеки цього, а й допомогти майбутнім батькам прийняти важливе для них рішення – народити дитину, незважаючи на наявні ризики, або відмовитись від цього.

Багато спадкових захворювань може бути діагностовано ще до того, як починають проявлятися їхні симптоми. Для цього застосовують різні методи генетичних досліджень (*поміркуйте* які). Деякі зі спадкових захворювань може бути діагностовано ще до народження дитини. Тому одним із завдань медико-генетичного консультування є встановлення генотипу особини, так зване **генетичне тестування**. Фахівці з медико-генетичного консультування насамперед рекомендують пройти генетичне тестування таким категоріям людей:

- майбутнім матерям, чий вік старший за 35 років (оскільки що старший вік жінки, то більша імовірність виникнення хромосомних патологій у плода);
- майбутнім батькам, якщо в них або серед їхніх найближчих родичів відомі особи зі спадковими хворобами або порушеннями розвитку;
- батькам, у яких раніше народжувались діти зі спадковими хворобами або порушеннями розвитку;
- подружжям, члени якого є близькими родичами;
- особам, чиї умови праці або спосіб життя (наприклад, у разі впливу іонізуючої радіації, наявності шкідливих звичок тощо) можуть негативно впливати на перебіг вагітності та розвиток плода.

Для виявлення спадкових патологій застосовують пренатальне (допологове) генетичне тестування. Його проводять у разі високої ймо-

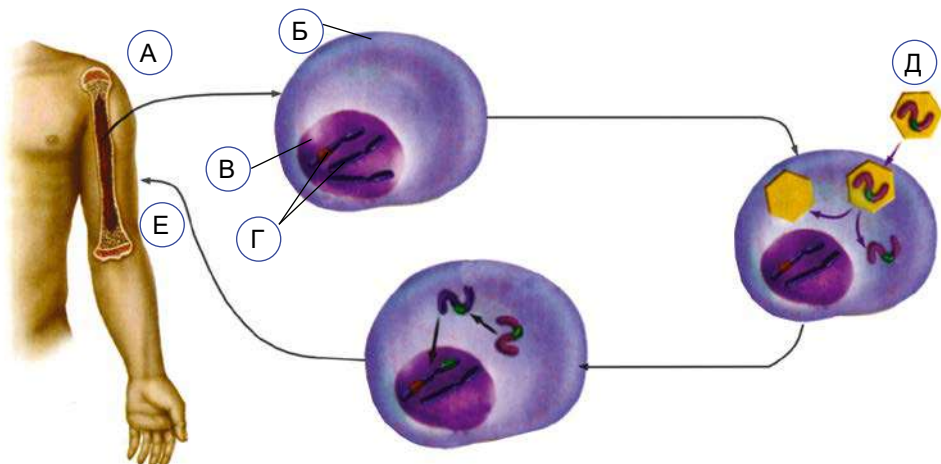
вірності того, що плід має хромосомні порушення або генотип, пов'язаний із тяжким спадковим захворюванням. Для цього отримують клітини плода, зазвичай із зовнішньої зародкової оболонки або з навколоплідної рідини. Така процедура пов'язана з певними ризиками, тому її застосовують лише за наявності вагомих підстав.

Для діагностики багатьох моногенних спадкових хвороб використовують методи ДНК-аналізу (такі як полімеразна ланцюгова реакція (ПЛР), секвенування геному тощо).

Деякі зовнішні прояви спадкових хвороб можуть бути скориговані хірургічно (наприклад, «заяча губа» чи «вовча паща»). Для лікування або полегшення перебігу спадкових захворювань, пов'язаних із вродженими порушеннями обміну речовин, фахівці пропонують спеціальну дієту, щоби компенсувати негативний вплив цих порушень. Так, якщо осіб з фенілкетонурією (діти із цим захворюванням не здатні засвоювати амінокислоту фенілаланін, через що вона накопичується у крові й заважає нормальному розвитку головного мозку) майже одразу після народження перевести на дієту без умісту фенілаланіну в продуктах харчування, то основні симптоми захворювання взагалі не проявляються.

Специфічна дієта також потрібна в разі галактоземії (неможливість засвоювання моносахариду галактози, що входить до складу молочного цукру – лактози; накопичення цієї сполуки у крові та інших тканинах спричиняє токсичну дію на центральну нервову систему, печінку тощо). Тому з раціону дітей, хворих на галактоземію, одразу після народження вилучають молоко та молочні продукти, що містять галактозу.

Генотерапія (генна терапія) – сукупність методів лікування спадкових (генетичних) захворювань шляхом введення у геном певних послідовностей нуклеїнових кислот, що здатні виправляти «помилки» у структурі гена. Генотерапія дає можливість у людини із захворюванням вилучити певні типи клітин, замінити їхні дефектні алельні гени на нормальні, після чого повернути їх в організм (мал. 43.1).

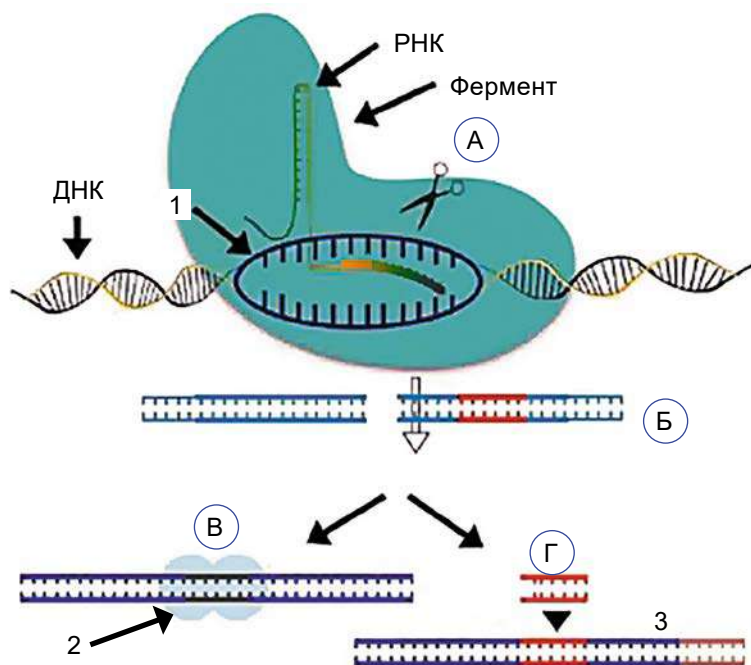


Мал. 43.1. Метод генної терапії. Зі шкіри руки (А) отримують клітину епітелію (Б). У її ядрі (В) містяться хромосоми (Г). Нормальні гени (Д), призначені для введення в хромосоми. Е. Введення клітин з нормальними генами в організм людини

Завдяки цьому в організмі людини із захворюванням починають синтезуватись білки, яких до цього не вистачало. Розглядають також моделі корекції генів на рівні зиготи. Як мішені для генотерапії зручнішими є моногенні хвороби, як-от муковісцидоз.

До 80 % розробок генної терапії спрямовано на боротьбу з пухлинними захворюваннями. За певних онкологічних та інфекційних захворювань методами генної терапії можна пригнічувати активність генів, не притаманну нормальній клітині, або посилювати її (наприклад, для збільшення синтезу гемоглобіну у хворих на серпоподібноклітинну анемію).

Протягом останніх десятиліть розроблено і вдосконалено **методи-ки редагування геному**. За допомогою спеціальних штучно створених молекул білків або комплексів РНК та білків впізнають задану послідовність геному, де роблять розріз обох ланцюгів ДНК. Залежно від того, яким буде перебіг репарації утвореного дволанцюгового розриву, певний ген може втратити свою функцію чи бути замінений на нормальну копію (мал. 43.2). Для цього вдалося застосувати притаманну деяким бактеріям систему розпізнавання, перевірки та розрізання чужорідної ДНК (наприклад, ДНК бактеріофагів або плазмід), яку позначають як CRISPR-Cas9 (від англ. *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* – короткі паліндромні повтори, регулярно розташовані групами). Вона дає змогу знаходити й розрізати будь-яку



Мал. 43.2. Редагування геному. А. За допомогою комплексу молекул РНК та ферменту ділянка молекули ДНК розкручується та вирізається (1). Б. Ділянки молекули ДНК, утворені внаслідок двох розрізів. В. Дві частини розрізаної ДНК за участі ферменту (2) зшиваються; ген, який цікавив дослідників, при цьому втрачає здатність до експресії. Г. У ділянку між двома розрізами вставляється новий ген (3)

нуклеотидну послідовність, комплементарну керуючий РНК (мал. 43.2, 1). Цю систему використовують для:

- розрізання ДНК у потрібних місцях;
- редагування ДНК (заміна окремих ділянок певних генів);
- регулювання активності генів (зміни в регуляторних ділянках, що сприяють експресії генів);
- діагностування певних спадкових хвороб за допомогою маркування притаманних їм геномних послідовностей (наприклад, приєднання міток, які дають змогу побачити такі послідовності під час мікроскопіювання).

Узагальнення

Медична генетика розробляє методи діагностики та профілактики спадкових захворювань, що дає змогу запобігати народженню дітей із генетичними захворюваннями і вадами. До спадкових хвороб належать ті, що виникають унаслідок змін спадкового матеріалу – точкових, хромосомних чи геномних мутацій. Крім того, існують захворювання з генетичною схильністю. Спадкові хвороби поділяють на моногенні, зумовлені мутацією одного гена, та полігенні – пов'язані з мутаціями кількох генів. Для виявлення носіїв алелів, що спричиняють спадкові захворювання або вади розвитку, застосовують медико-генетичне консультування.

Поміркуйте

1. Які етичні проблеми виникають під час медико-генетичного консультування?
2. Які переваги та проблеми можуть мати методи генотерапії, що базуються на редагуванні геному?
3. Що впливає на прояв хвороб зі спадковою схильністю?

Підіб'ємо підсумки з теми

І. Досліджую природу

1. Учні проводили дослідження «Вивчення частоти прояву мутацій очей та крил у плодової мушки дрозофіли, вирощеної власноруч». Які методи дослідження вони використовували?

- А** спостереження та моніторинг
- Б** моніторинг і математично-статистичний
- В** математично-статистичний та експериментальний
- Г** експериментальний та моніторинг

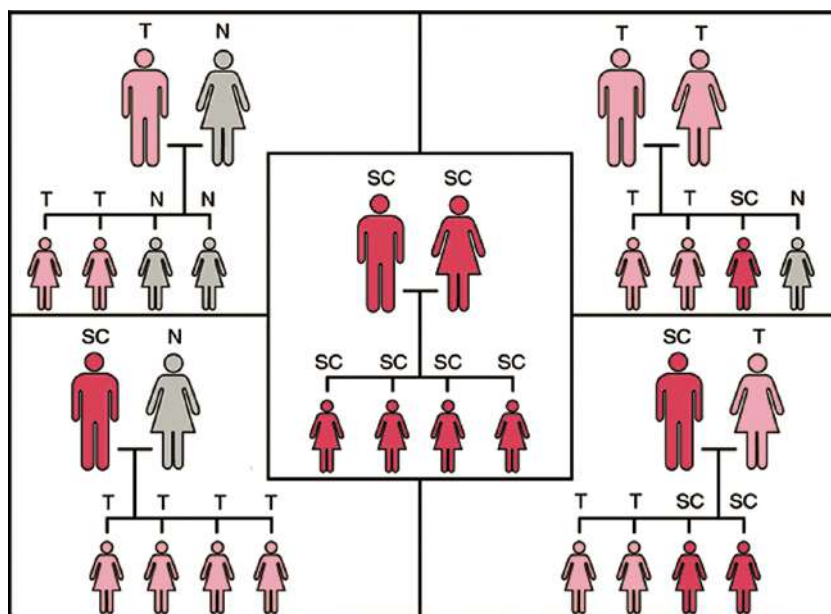
2. Під час підготовки до «Дослідження залежності антропометричної характеристики окружності голови у школярів відносно зросто-масового індексу» учень визначив окружність голови в школярів як залежну змінну. Учениця додала, що потрібно контролювати склад групи учнів, які брали участь у дослідженні. Хто з них має рацію?

- А** учениця
- Б** учень
- В** обидва мають рацію
- Г** обидва помиляються

II. Опрацювую та використовую інформацію

1. Серпоподібноклітинна анемія – це тип спадкового захворювання крові, названий так через серпоподібну форму, якої набувають еритроцити. Серпоподібна форма еритроцитів виникає через рецесивну мутацію гена, що призводить до зміни в гемоглобіні, за якої клітини не отримують достатньо кисню. Ця нестача кисню також призводить до швидшого руйнування клітин крові. Для розвитку хвороби потрібно два рецесивних гени від обох батьків. Гетерозиготи є носіями ознаки, але в них переважно ознаки хвороби не проявляються.

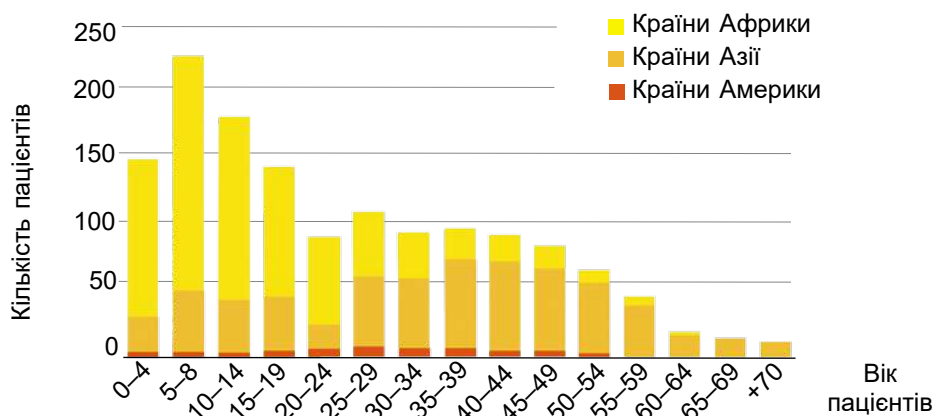
1.1. Розгляньте схеми схрещування людини в разі серпоподібноклітинної анемії. Дайте відповіді на запитання: «Так» чи «Ні».



T – людина – носій хвороби N – здорова людина SC – людина з хворобою

У батьків із хворобою народжуються діти з хворобою	Так	Ні
У батьків – носіїв ознаки можуть народитись діти з хворобою, а можуть народитися здорові діти	Так	Ні
Серпоподібноклітинна анемія успадковується за аутосомно-домінантним типом	Так	Ні
В еритроцитах у формі серпа більше гемоглобіну, незважаючи на форму клітини	Так	Ні
На схемі людей із хворобою позначено літерами SC	Так	Ні
На схемі літерою N позначено людей, які домінують за геном серпоподібноклітинної анемії та не мають захворювання	Так	Ні

1.2. Розгляньте діаграму «Розподіл пацієнтів із серпоподібноклітинною анемією за віком і належністю до території певних країн».



Якого віку люди з хворобою трапляються в найбільшій кількості серед країн Азії?

- A** 20–24 роки **В** 55–59 років
Б 35–39 років **Г** 65–69 років

1.3. Понад 200 пацієнтів із серпоподібноклітинною анемією зафіксовано у країнах

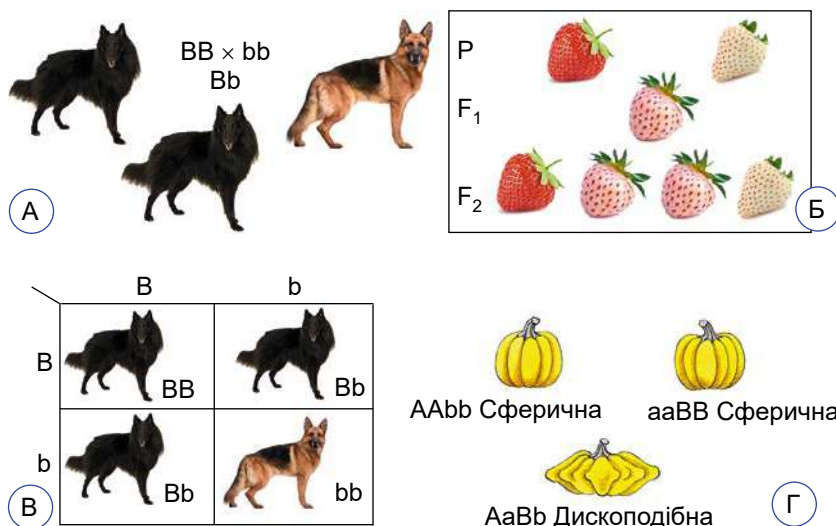
- А** Африки **В** Америки
Б Азії **Г** у всіх країнах Африки, Азії та Америки

1.4. Пацієнтів віком старше 60 років, хворих на серпоподібноклітинну анемію, не зафіксовано в країнах

- А** Африки та Азії
Б Азії та Америки
В Америки та Африки
Г Азії, Африки, Америки

III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Проаналізуйте інформацію на малюнках. Визначте, на якому з них проілюстровано другий закон Г. Менделя.



2. Утворіть пари між схемою схрещування помідорів (1–4) та його результатом (А–Д) (червоні плоди – **А**, жовті – **а**, кругла форма плодів – **В**, видовжена форма – **в**).

1 AABV x aabb

А $\frac{1}{4}$ – червоні круглі; $\frac{1}{4}$ – червоні видовжені; $\frac{1}{4}$ – жовті круглі; $\frac{1}{4}$ – жовті видовжені

2 AaBb x AaBb

Б усі червоні круглі

3 AaBb x aabb

В 9 червоних круглих; 3 червоних видовжених; 3 жовті круглі; 1 жовтий видовжений

4 Aabb x aabb

Г $\frac{3}{4}$ – червоні круглі; $\frac{1}{4}$ – жовті видовжені

Д $\frac{1}{2}$ – червоні видовжені; $\frac{1}{2}$ – жовті видовжені

3. Учень та учениця розглядали схему послідовності етапів біосинтезу білка.

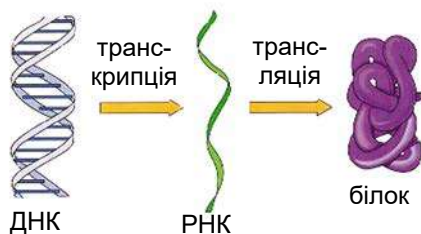
Учениця сказала, що на ній є помилка, оскільки трансляція має відбуватися перед транскрипцією. Учень зауважив, що результатом транскрипції є синтезована молекула білка. Хто з них має рацію?

А учень

В обидва мають рацію

Б учениця

Г обидва помиляються



4. Із запропонованих тверджень виберіть три, що характеризують модифікаційну мінливість.

1. Розвиток медоносної бджоли з личинки залежить від корму: може вирости як робоча особина, так і цариця.

2. Чоловік тренувався у спортзалі й може піднімати штангу; його новонароджений син, коли підросте, без тренувань також зможе піднімати штангу.

3. Наявність у мухи дрозофіли крил різної довжини або їхня відсутність залежить від впливу світла на розвиток личинок.

4. Поява в людини сивини чи пігментних плям на обличчі або нігтях – це наслідок впливу на організм сонця або підвищеної температури.

5. Якщо поліпшувати корми для домашньої худоби, то приріст маси та надої зростатимуть.

6. Кількість виростів на тілі в рачка артемії залежить від солоності води: у прісній воді їх з'являється більше, у солоній – менше.

Компетентнісно орієнтоване завдання

Ольга подивилася з батьками й старшою сестрою Наталкою фільм компанії «Нетфлікс» «Тест на тещу» («Socogico», Франція, Бельгія, 2024 р.). За сюжетом, Аліс і Франсуа вирішили одружитися та влаштовують зустріч своїх батьків. Із цієї нагоди Аліс дарує батькам результати ДНК-тестів, які розраховують, серед іншого, їхню етнічну належність. Комедійний сюжет побудований на дещо несподіваних результатах, які визначив тест.

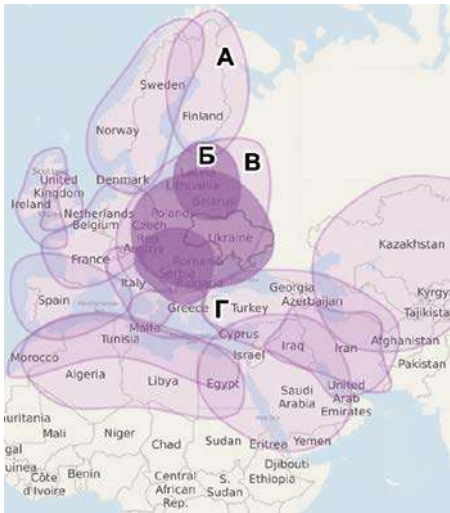
По завершенні фільму Наталка розповіла, що давно цікавиться генеалогією, побудувала власний родовід у сервісі MyHeritage і навіть зробила нещодавно аналіз ДНК.

MyHeritage – безкоштовний сервіс побудови родоводів, який має 6,6 мільярда профілів користувачів по всьому світу й 58 мільйонів родинних дерев (на кінець 2025 року). Останнім часом сервіс опрацьовує світлини (колонізує й анімує), а також проводить аналіз ДНК, зокрема й щодо етнічної належності.

✓ **Дізнайтеся більше** про етнічні групи в MyHeritage за QR-кодом.



Ольгу, звісно, дуже зацікавила та частина тесту, в якій йшлося про етнічну належність: «Наш тато, випадково, не наполовину німець, як герой фільму?». Наталка пояснила, що належність визначають у відсотках, що відповідають збігам з маркерами різних етнічних груп.



Східна Європа 81,3 %
 Б балти 70,2 %
 балканці 67,8 %
 В ашкеназькі євреї 9,8 %
 А фіні 9,5 %
 скандинави 6,7 %
 Г уродженці Західної Азії 5,3 %

Мапу побудовано для користувачів з України, за різними етнічними групами, чиї гени наявні в сучасних українців. Відсоткове значення представляє частку користувачів програми (MyHeritage DNA) в Україні, що мають таку етнічність (належність до певних етнічних груп). Наприклад, у 81,3 % користувачів з України є генетичні варіації, притаманні групі «Уродженці Східної Європи». У 9,8 % користувачів – генетичні варіації, притаманні ашкеназьким євреям (походять із єврейських спільнот Центральної та Східної Європи), а в 6,7 % – скандинавам.

1. Установіть відповідність між історичними подіями, які могли бути причиною спільних генів у населення України з певними етнічними групами (за *мапою*).

А входження частини українських земель у Велике князівство Литовське

Б експансія Османської імперії у XVI–XVII ст.

В визначення владою Російської імперії *межі осілости* – територій, де євреям було дозволено проживати

Г евакуація мирного населення з України під час Другої світової війни

2. «А наші гени які?» – запитала Ольга. «По-перше, – відповіла Наталка, – не *наші*, а *мої*: в тебе може бути дещо інший профіль. А по-друге, нічого такого екзотичного, жодних команчів». І показала свій етнічний профіль, а також згенеровану ШІ картосхему. Якої помилки припустився ШІ, створюючи цю схему?



Уродженці Східної Європи	Балти	Фіні	Балканці
72,4 %	14,2 %	9,8 %	3,6 %



- А** показав групу «Уродженці Східної Європи» надто темною
Б не виділив етнічну групу «Балканці»
В виділив етнічну групу «Скандинави» замість «Фіни»
Г помилився з межами етнічної групи «Балти»

«Але, – провадила далі Наталка, – неочікуване таки було. Програма шукає можливих родичів серед зареєстрованих користувачів і надає можливість з ними законтакувати (звісно, за їхньої згоди). Тож у мене є троюрідна кузина Єва, моя ровесниця, яка мешкає у Нідерландах...». – «Не у мене, а в нас», – не утрималася від шпильки Ольга, але сестра не звернула уваги й продовжила: «Виявилося цілих 5,6 % збігів у маркерах етнічної належності! Програма порівняла мій профіль з профілем Єви (див. таблицю) це допомогло визначити, в якій етнічній групі були наші спільні предки».

	Наталка	Єва
Європа	100 %	100 %
Східна Європа	90,2 %	34,5 %
Уродженці Східної Європи	72,4 %	0,0 %
Балканці	3,6 %	0,0 %
Балти	14,2 %	34,5 %
Північна і Західна Європа	9,8 %	40,6 %
Англіїці	0,0 %	1,6 %
Ірландці, шотландці, валлійці	0,0 %	0,0 %
Уродженці Північно-Західної Європи	0,0 %	36,4 %
Скандинави	0,0 %	2,6 %
Фіни	9,8 %	0,0 %
Ашкеназькі євреї	0,0 %	24,9 %
	100 %	100 %

3. До архівів яких країн Наталці варто звернутися, щоб знайти спільних предків із Свою?

- А** Болгарії та Хорватії
Б Литви й Латвії
В Фінляндії та Естонії
Г Данії та Норвегії

4. Наталка згадала, де зустрічала небуденне слово «ашкеназі» – у статті про синдром Тея – Сакса: «Хвороба Тея – Сакса – це аутосомно-рецесивне генетичне захворювання, зумовлене мутацією гена *HEXA*, який локалізований на 15-й хромосомі. У деяких етнічних групах (таких, як франкомовні канадці зі Східного Квебеку, ашкеназькі євреї) цей мутантний алель трапляється в сотні разів частіше, ніж в інших людських популяціях. Так, імовірність того, що здоровий за фенотипом представник євреїв-ашкеназі може бути носієм мутантного алеля, дорівнює 1/30». Яку пораду може дати Наталка Єві?

- А** ніколи не одружуватися з ашкеназьким євреєм
Б перевірити, чи не хворіє Єва на хворобу Тея – Сакса в легкій формі
В здати аналіз ДНК на наявність рецесивного алеля гена *HEXA*
Г заморозити яйцеклітини, щоб знизити ризик появи мутантного алеля

Поясніть, чому обрали саме цю пораду серед наведених.

Тема 4.

Розмноження та індивідуальний розвиток організмів



Як «стратегії розмноження» (запліднення, тип розвитку, турбота про потомство) організмів у природі забезпечують продовження існування виду?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Ембріональна індукція: історія відкриття та перспективи застосування»; «Способи вегетативного розмноження культурних рослин»; «Життєві цикли тварин і рослин: спільне та відмінне».

Практико-орієнтований проєкт:

складання буклета «Стовбурові клітини та регенеративна здатність організму».

Творчий проєкт:

«Організми, в яких трапляється явище партеногенезу»; «Організми, в яких трапляється явище поліембріонії»; написання есе (твору, розповіді) про акселерацію та її вплив на постембріональний розвиток людських спільнот; складання колажу «З яких зародкових листків формуються органи хордових тварин?»

Науково-дослідницький проєкт:

«Дослідження етапів прямого / непрямого розвитку та біологічних особливостей росту організмів (розміри, пропорції тіла тощо) на прикладі тварин (акваріумні риби, жаби, молюски, домашні рептилії, птахи та ссавці)».

Ігровий проєкт:

«Чим цікава репродукція різних тварин?»

§ 44. Здатність до репродукції – універсальна властивість організмів. Будова статевих клітин



Чи могло б життя на Землі досягти значного різноманіття, якби не виникли статеві клітини?

Розмноження – притаманна всім організмам властивість відтворення собі подібних. Завдяки цьому забезпечуються неперервність і спадковість життя. Основні форми розмноження живих істот – нестатеве та статеве.

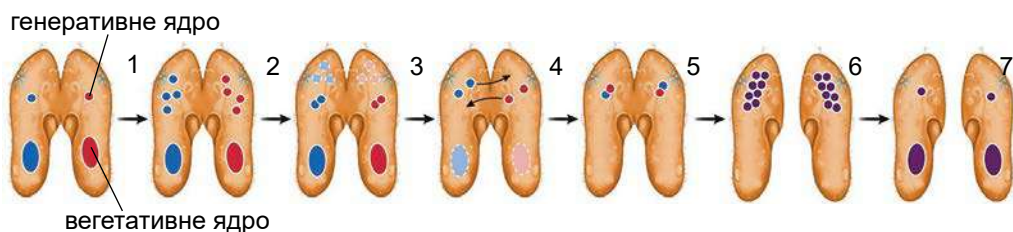
За нестатевого розмноження наступне покоління організмів розвивається з нестатевих (соматичних) клітин. Нестатеве розмноження спостерігають як в одноклітинних організмів (прокаріотів та еукаріотів), так і в багатоклітинних (багатоклітинні водорості, вищі рослини, багатоклітинні гриби й тварини).

Статевий процес – це поєднання в одній клітині спадкового матеріалу двох різних клітин. Він забезпечує урізноманітнення геному нащадків і генофонду популяції загалом. А що різноманітніший генофонд популяції, то більше в неї шансів пристосуватись до змін умов

навколишнього середовища (*поміркуйте чому*). Статевий процес може відбуватися у формі кон'югації та злиття спеціалізованих статевих клітин. Він забезпечує урізноманітнення генотипів нащадків.

Кон'югація (від лат. *кон'югаціо* – сполучення) – це форми статевого процесу, під час якого клітини одноклітинних (як прокаріотів, так і евкаріотів) та деяких багатоклітинних (деякі гриби, нитчасті зелені водорості) організмів обмінюються спадковим матеріалом. Наприклад, в одноклітинних евкаріотів інфузорій у процесі кон'югації спостерігають складні перетворення ядерного апарату, які супроводжуються обміном ядрами (мал. 44.1).

Пригадаймо: у клітині інфузорії-туфельки є два ядра – велике (вегетативне, воно керує процесами біосинтезу білків) та менше (генеративне; забезпечує зберігання та передавання спадкової інформації). Під час кон'югації дві клітини інфузорії-туфельки зближуються, і між ними формується цитоплазматичний місток (1). Вегетативне ядро поступово зникає, а генеративне поділяється шляхом мейозу з утворенням 4 гаплоїдних ядер (2). Три ядра зникають, а ядро, що залишилося, поділяється ще раз (3). Одне з двох утворених ядер переходить в іншу клітину (4). Два ядра в кожній клітині (власне й мігруюче) зливаються (5). Клітини розходяться, утворене диплоїдне ядро кілька разів поділяється (6). Згодом у клітин відновлюється нормальний набір ядер (7).



Мал. 44.1. Кон'югація в інфузорії-туфельки

✓ **Дізнайтеся більше** про кон'югацію у спірогірі за QR-кодом.



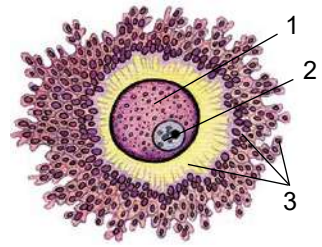
Біологічне значення кон'югації полягає в тому, що різні особини обмінюються своїм спадковим матеріалом, урізноманітнюючи його. Процес кон'югації відбувається без утворення спеціалізованих статевих клітин (гамет).

Статевий процес може бути пов'язаний і з утворенням спеціалізованих статевих клітин та їхнім подальшим злиттям – **заплідненням**. Запліднення є основою статевого розмноження у різних груп евкаріотів (як одноклітинних, так і багатоклітинних).

Будова статевих клітин. Основна функція статевих клітин (гамет) – передавання спадкової інформації від особин батьківського покоління нащадкам. Порівняно з нестатевими клітинами вони мають удвічі менший набір хромосом, наприклад, у диплоїдних організмів – гаплоїдний. У заплідненій яйцеклітині (зиготі) відновлюється набір хромосом, характерний для соматичних клітин виду.

Жіночі статеві клітини – **яйцеклітини** – часто мають значний запас поживних речовин та оточені кількома оболонками (мал. 44.2). Вони виконують захисну і живильну функцію.

Цікаво знати. Розміри яйцеклітини залежать від кількості запасних поживних речовин у цитоплазмі. Наприклад, у більшості ссавців, зародки яких отримують поживні речовини від організму матері через плаценту, розміри яйцеклітин (без урахування зовнішніх оболонок) варіюють від 50 мкм (мишоподібні гризуни – полівки) до 180 мкм (вівці). У людини діаметр яйцеклітини становить близько 90 мкм. Якщо в яйцеклітині міститься значний запас поживних речовин (жовток), її діаметр може сягати до 5–7 см (акули), 8 см (страуси) тощо. А з урахуванням зовнішніх оболонок розміри таких яйцеклітин ще більші. Наприклад, яйце африканського страуса може бути завдовжки понад 15 см.



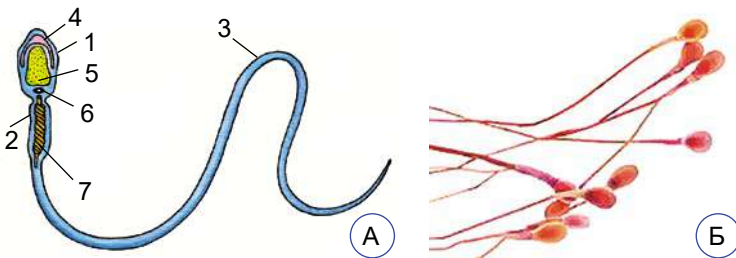
Мал. 44.2. Будова яйцеклітини ссавців:

1 – цитоплазма;
2 – ядро; 3 – оболонки

Чоловічі гамети – **сперматозоїди** (у покритонасінних і голонасінних рослин – **спермії**). У багатьох організмів вони мають джгутики і здатні до активного руху (зелені водорості, вищі спорові рослини, більшість тварин тощо). У червоних водоростей, голонасінних і покритонасінних рослин, грибів, частини тварин (нематоди, річкові раки, краби) чоловічі гамети позбавлені джгутиків. У нематод, наприклад, вони можуть пересуватись за допомогою псевдоподій (*пригадаймо*: такий рух називають амебоїдним).

Сперматозоїд ссавців має коротку **головку**, в якій міститься ядро, оточене невеликою кількістю цитоплазми, тому спадкова інформація упакована дуже щільно (мал. 44.3, А, 1). У передній частині головки є **акросома** (мал. 44.3, А, 4). Ця органела виникає завдяки видозміні комплексу Гольджі. Вона містить ферменти, які розчиняють оболонку яйцеклітини, забезпечуючи процес запліднення. За головою розташована звужена частина – **шийка** (мал. 44.3, А, 2). У ній міститься **центріоль** (інша центріоль дає початок комплексу мікротрубочок хвоста), яка під час запліднення проникає до яйцеклітини та бере участь у поділі зиготи.

Видовжений **хвіст** – найдовша частина сперматозоїда. Його довжина становить близько 50 мкм, тоді як довжина головки – близько 5 мкм (мал. 44.3, А, 3). Хвіст забезпечує рух сперматозоїда. Особливості його будови нагадують будову джгутика еукаріотичних клітин.



Мал. 44.3. А. Будова сперматозоїда ссавців: 1 – головка; 2 – шийка; 3 – хвіст; 4 – акросома; 5 – ядро; 6 – центріоль; 7 – мітохондрії. Б. Фото сперматозоїдів

За шийкою розташовані впорядковані мікротрубочки, навколо яких зосереджені мітохондрії. Вони постачають енергію для роботи джгутика, завдяки чому сперматозоїд пересувається в рідкому середовищі.

Цікаво знати. Сперматозоїди людини здатні пересуватись у рідкому середовищі зі швидкістю 1–3 мм за хвилину.

У багатоклітинних еукаріотів сперматозоїди зазвичай дрібніші за яйцеклітини, оскільки великі розміри ускладнили б їхнє пересування. Головна функція сперматозоїдів – перенесення своєї частини спадкового матеріалу до яйцеклітини.

Запліднення – це процес злиття чоловічої та жіночої статевих клітин з утворенням зиготи, з якої розвивається новий організм. У статевому процесі зазвичай беруть участь дві особини. Тварини, які мають лише один тип статевих залоз – або чоловічі (сім'яники), або жіночі (яєчники), утворюють лише один тип статевих клітин (сперматозоїди або яйцеклітини). Таких тварин називають **роздільностатевими** (наведіть приклади). Особини різних статей тварин можуть бути подібні зовнішньо (більшість медуз, багатощетинкові черви, двостулкові молюски тощо) або різнитися між собою.

Явище, за якого самці та самки різняться між собою, дістало назву **статевий диморфізм** (від лат. *di* – два та *морфе* – форма). Він може стосуватись розмірів особин різних статей (наприклад, у більшості ссавців самці зазвичай більші за самок, тоді як у павуків – навпаки), забарвлення, деталей будови тощо. Це явище повністю проявляється в період статевої зрілості й пов'язане не тільки з розбіжностями в будові статевих органів, а й із розвитком вторинних статевих ознак. *Пригадаймо: вторинні статеві ознаки* – сукупність особливостей, за якими, додатково до власне статевих органів, відрізняються особини різних статей.

✓ **Дізнайтеся більше** про зовнішнє та внутрішнє запліднення за QR-кодом.



Партеногенез. Дочірні організми можуть розвиватись і з незаплідненої яйцеклітини шляхом **партеногенезу** (від грец. *партенос* – дівчина і *генезис* – походження). Є організми, популяції яких складаються переважно із самок, які розмножуються партеногенетично (наприклад, у мешканців прісних водойм України рачків-щитнів на 100 самок може припадати лише 1 самець). В інших (сріблястий карась, ящірки, рачки артемії) – існують популяції, одні з яких складаються із самців і самок, інші – тільки із самок. У медоносної бджоли з незапліднених яйцеклітин розвиваються самці – трутні. Партеногенез також відомий у вищих спорових і насінних рослин. Завдяки цьому способу розмноження за сприятливих умов чисельність популяцій може досить швидко зростати, а самки, які за певних обставин опинилися ізольованими від самців, мають змогу залишити нащадків.

Біологічне значення процесів запліднення. Під час запліднення відновлюється хромосомний набір, притаманний особинам виду. Крім того, з кожної пари гомологічних хромосом одна успадковується від

одного з батьків, друга – від іншого. Такі нащадки генетично відмінні від кожного з батьків.

Узагальнення

Розмноження – це властивість організмів відтворювати собі подібних. Основні форми розмноження живих істот – статеве та нестатеве. Статевий процес – це поєднання в одній клітині спадкового матеріалу двох різних клітин. Він може відбуватись у формі кон'югації та злиття статевих клітин – гамет (запліднення). Гамети бувають двох типів: жіночі (яйцеклітини) та чоловічі (сперматозоїди). Якщо яйцеклітина не запліднюється сперматозоїдом, але з неї розвивається нове покоління, цей процес має назву партеногенез. Він забезпечує можливість самкам залишати нащадків за відсутності самців.

Поміркуйте

1. Чим можна пояснити те, що яйцеклітини людини й більшості ссавців містять значно менше поживних речовин, ніж у рептилій або птахів?
2. Чому кон'югація як статевий процес обміну спадковим матеріалом не набула великого поширення серед багатоклітинних організмів?
3. Які механізми спрямовані на унеможливлення запліднення яйцеклітини тварин одного виду сперматозоїдами іншого?



Лабораторне дослідження «Вивчення будови статевих клітин тварин».



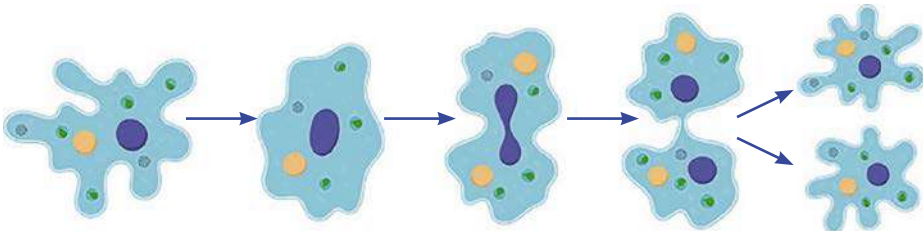
§ 45. Основні форми нестатевого розмноження організмів. Поліембріонія



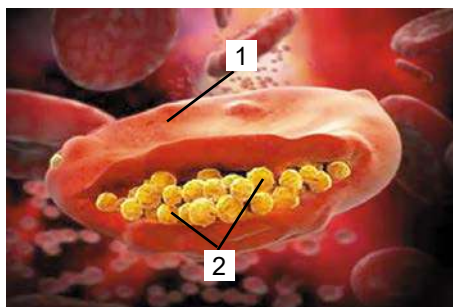
Чому в природі одночасно існують дві форми розмноження: статеве та нестатеве, й жодна форма не витіснила іншу?

Нестатеве розмноження, на відміну від статевого, відбувається без участі спеціалізованих статевих клітин (гамет). Його спостерігають як в одноклітинних організмів (прокаріотів та еукаріотів), так і багатоклітинних (водоростей, вищих спорових рослин, грибів, тварин).

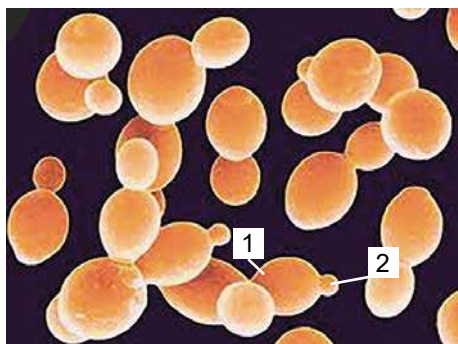
Нестатеве розмноження може відбуватися за рахунок окремих нестатевих (соматичних) клітин. У разі **поділу клітини навпіл** утворюються дві дочірні клітини, удвічі дрібніші за материнську (мал. 45.1).



Мал. 45.1. Поділ навпіл клітини амеби



Мал. 45.2. Множинний поділ малярійного плазмодія всередині еритроцита: 1 – уражений еритроцит; 2 – клітини паразита, що утворилися шляхом множинного поділу материнської клітини



Мал. 45.3. Брунькування у дріжджів: 1 – материнська клітина; 2 – брунька

ня. Вони можуть мати джгутики (як-от у хламідомонади; мал. 45.4, А) або позбавлені їх (хлорела: мал. 45.4, Б, вищі спорові рослини тощо).

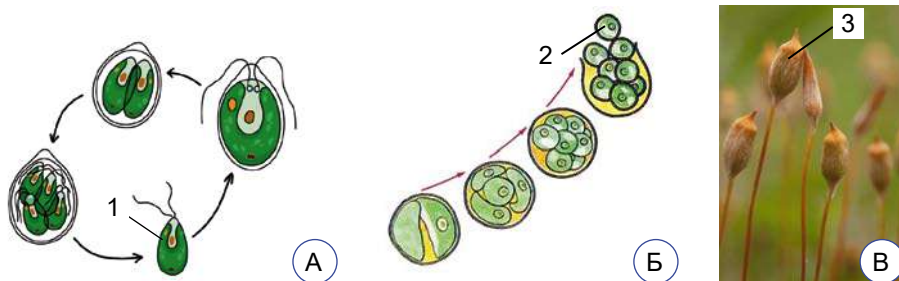
Спори із джгутиками (зооспори) здатні активно пересуватись, а спори, які їх не мають, поширюються водою, вітром, різними організма-

Дочірні клітини живляться, ростуть і починають розмножуватись лише тоді, коли сягнуть розмірів материнської.

Під час **множинного поділу** спочатку багаторазово ділиться ядро материнської клітини, завдяки чому вона стає багатоядерною. Потім ділиться її цитоплазма й утворюється певна кількість дрібних дочірніх клітин. Така форма нестатевого розмноження притаманна, наприклад, паразиту крові людини – малярійному плазмодію (мал. 45.2). Завдяки цьому чисельність клітин паразита швидко зростає.

У разі **брунькування** від материнської клітини відокремлюється менша (дочірня) (мал. 45.3). Серед одноклітинних організмів брунькування відоме у дріжджів, деяких інфузорій тощо.

Розмноження спорами відоме у різних груп еукаріотів: як одноклітинних (як-от зелені водорості хламідомонада та хлорела), так і багатоклітинних – грибів, водоростей, мохів, хвощів, плаунів, папоротей. **Пригадаймо: спори** (від грец. *спора* – насінина, посів) – спеціалізовані клітини, які слугують не тільки для розмноження, а й для переживання несприятливого періоду та поширення.

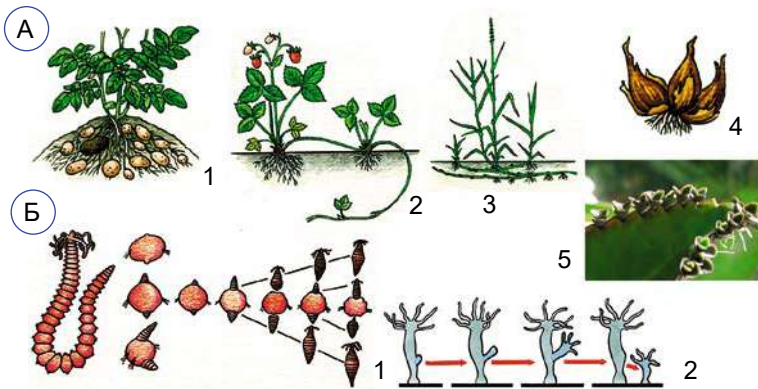


Мал. 45.4. Утворення спор в одноклітинних зелених водоростей: А – утворення зооспор (1) у хламідомонади. Б – утворення нерухомих спор (2) у хлорели. В. Спорангій політриха (зозулиного льону) (3), в якому формуються спори

ми. Узагальнена назва органів нестатевого розмноження, в яких формуються спори, – **спорангії** (мал. 45.4, В).

Вегетативне розмноження. Нестатеве розмноження, за якого у багатоклітинних організмів відокремлюються групи нестатевих клітин, називають **вегетативним**.

Вегетативне розмноження у багатоклітинних водоростей, вищих рослин і грибів може відбуватися **фрагментацією**, тобто відокремленням певних багатоклітинних частин тіла (відокремлення стеблових живців у верби або листкових у сеньполії, глоксинії); за рахунок видозмінених пагонів (стеблові бульби картоплі або топінамбура, вуса суниць, кореневища хвоща, конвалії, пирію); цибулинами (як-от цибуля городня); спеціалізованими виводковими бруньками, здатними відокремлюватись від материнської особини (росичка, бріюфілюм) (мал. 45.5, А). Вегетативне розмноження вищих рослин можливе й за рахунок кореня – кореневими паростками, які розвиваються з додаткових бруньок (вишня, слива), бульбокоренями (жоржини).



Мал. 45.5. Способи вегетативного розмноження. А. Вегетативне розмноження у рослин: 1 – бульбами в картоплі; 2 – вусами в суниць; 3 – ділянками кореневища у пирію; 4 – дочірніми цибулинами у тюльпана; 5 – виводковими бруньками в бріюфілюма. Б. Вегетативне розмноження у тварин: 1 – фрагментацією з наступним брунькуванням у багатошестинкового черва додекацерії; 2 – брунькуванням у гідри

Способи вегетативного розмноження багатоклітинних тварин також різноманітні: брунькування, впорядкований поділ, фрагментація тіла тощо (мал. 45.5, Б). Здатність до **фрагментації** у деяких тварин може бути дивовижною. Наприклад, багатошестинковий черв додекацерія може розпадатись на окремі сегменти. Згодом кожен з них відбруньковує від себе чотири дочірні особини (мал. 45.5, Б, 1). Під час **брунькування** від материнського організму відокремлюється одна або кілька багатоклітинних бруньок, що згодом розвиваються в самостійні організми (поліпи жалких, наприклад, гідри, деякі кільчасті черви) (мал. 45.5, Б, 2). Коли ж бруньки залишаються зв'язаними з материнським організмом, виникають колоніальні тварини (наприклад, коралові поліпи).

Вегетативне розмноження ґрунтується на явищі регенерації.

✓ **Дізнайтеся більше** про регенерацію за QR-кодом.



Біологічне значення нестатевого розмноження. У деяких груп організмів нестатеве розмноження – це єдина можливість залишити потомство (як-от у амеб, евглени зеленої, хлорели). У видів, здатних також до статевого розмноження, цим способом можуть розмножуватись особини, які за певних причин опинилися ізольованими від інших. Через деякий час так можуть виникати нові популяції, що заселяють нові території. Види з короткими життєвими циклами завдяки нестатевому розмноженню за невеликий проміжок часу можуть значно збільшувати свою чисельність.

У результаті нестатевого розмноження дочірні особини за набором спадкової інформації є точними копіями батьків. Людина використовує цю особливість для розмноження культурних рослин, підтримуючи з покоління в покоління властивості певних сортів.

Поліембріонія. Особливим способом розмноження організмів є *поліембріонія* (від грец. *поліс* – численний та *ембріон* – зародок). Це процес розвитку кількох зародків з однієї заплідненої яйцеклітини – зиготи (мал. 45.6, А). При цьому зигота починає ділитися, але в певний момент розпадається на окремі частини. Згодом з кожної такої частини розвивається самостійний організм.

Поліембріонія поширена серед різних груп тварин (війчасті й кільчасті черви, членистоногі, риби, птахи і ссавці). Організми, які виникають унаслідок поліембріонії, називають *однойцевими*, або *монозиготними, близнятами* (мал. 45.6, Б) Усі вони однієї статі та мають однаковий набір спадкової інформації. Трапляється поліембріонія й у рослин: коли в одній насініні розвивається декілька зародків (тюльпани, лілії, латаття, суніці тощо).

Цікаво знати. У людини поліембріонія – випадкове явище. За статистикою, двоє однойцевих близнят народжуються раз на 80 пологів, троє – на 6500, четверо – на 510 000, ще рідше – п'ятеро. Натомість поліембріонія у деяких видів іздців або серед представників ссавців, наприклад панцирників (мал. 45.6, В), явище закономірне.



Мал. 45.6. Поліембріонія. А. Процес утворення однойцевих близнят: 1 – зигота; 2 – зигота починає поділятися і розпадається на частини, з яких розвиватимуться однойцеві близнята. Б. Однойцеві близнята у людини. В. Самка панцирника з дитинчатами

Біологічне значення поліембріонії полягає в тому, що завдяки цьому процесу зростає число нащадків, інколи – у значній кількості. Наприклад, у деяких видів їздців (комахи з ряду Перетинчастокрилі) з однієї зиготи може розвинутих до 3000 зародків.

Процес поліембріонії нагадує нестатеве розмноження (*поміркуйте*, який саме спосіб), але їй передувє процес запліднення. Тому однояйцеві близнята хоча і мають подібний набір спадкової інформації (як у разі нестатевого розмноження), але за її складом відрізняються від батьків (як у разі статевого розмноження).

Узагальнення

Нестатеве розмноження може відбуватися в результаті поділу клітини навпіл, множинного поділу клітини, брунькування, розмноження спорами та відокремлення груп нестатевих клітин (вегетативно). Вегетативне розмноження – поширене явище у рослин та безхребетних тварин. Воно ґрунтується на здатності організмів до регенерації. Способами вегетативного розмноження є: фрагментація, брунькування, упорядкований поділ тощо. У результаті нестатевого розмноження дочірні особини є точними копіями материнського організму. Нестатеве розмноження забезпечує можливість відтворювати собі подібних організмів у разі обмеження або унеможливлення зустрічі особин різних статей. Особливим способом розмноження організмів є поліембріонія – здатність до утворення кількох зародків з однієї зиготи.

Поміркуйте

1. Що спільного та відмінного між нестатевим розмноженням і партеногенезом?
2. З якою метою багато овочевих і плодово-ягідних культур (картоплю, цибулю, часник, малину, суницю тощо) розмножують вегетативно?
3. У яких груп тварин переважає нестатеве розмноження, а яким притаманне лише статеве?



Практична робота «Характеристика різних способів вегетативного розмноження рослин і тварин».



§ 46. Етапи індивідуального розвитку організмів. Ембріональний період розвитку



Чому, досліджуючи розвиток ембріона ссавців, можна побачити закономірності розвитку ембріонів хордових тварин загалом?

У багатоклітинних організмів після запліднення розвиток нової особини розпочинається послідовними поділами зиготи з подальшою диференціацією клітин, формуванням тканин та органів.

Індивідуальний розвиток, або онтогенез (від грец. *онтос* – існуюче і *генезис* – походження), – розвиток особини від зародження до завершення життя (смерті або поділу особини на дочірні у разі нестатевого розмноження). У різних груп організмів онтогенез має свої особливості та тривалість.

✓ **Дізнайтеся більше** про довгожителів серед різних організмів за QR-кодом.



В онтогенезі виокремлюють ембріональний (зародковий) і постембріональний (післязародковий) періоди. **Ембріональний** (від грец. *ембріон* – зародок) **період** – час, коли нова істота зароджується та розвивається всередині материнського організму, яйця, насінини тощо. Він завершується народженням (виходом з оболонок яйця, проростанням насінини).

Постембріональний (від грец. *пост* – після та *ембріон*) **період** триває від моменту народження і до смерті особини (або до моменту поділу материнського організму на дочірні). Він супроводжується збільшенням розмірів (ростом) та якісними змінами організму (розвитком).

Етапи ембріонального розвитку тварин. Процеси ембріонального розвитку (ембріогенезу) тварин починаються з дроблення зиготи (або незаплідненої яйцеклітини у разі партеногенезу).

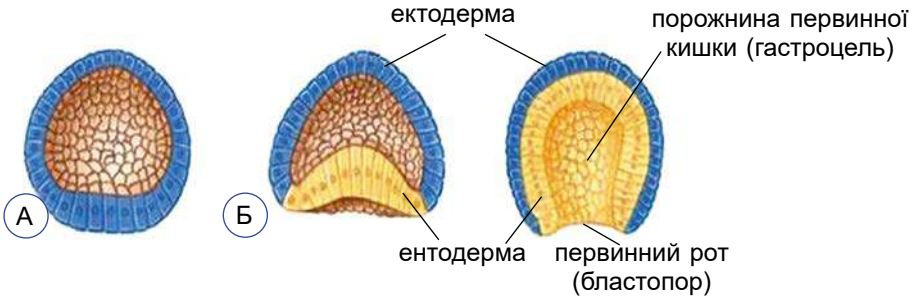
Дроблення – низка послідовних мітотичних поділів зиготи (мал. 46.1). Утворені внаслідок дроблення клітини – **бластомери** (від грец. *бластом* – зародок і *мерос* – частина) – в інтерфазі не ростуть, тому в цей час маса та об'єм зародка не змінюються, а залишаються такими, як у зиготи.



Мал. 46.1. Процес утворення бластули: з кожним поділом зиготи кількість бластомерів збільшується, але їхні розміри зменшуються

Дроблення завершується утворенням **бластули** (мал. 46.1), яка має вигляд порожнистого утвору різної форми. Її стінки утворені зазвичай одним шаром бластомерів. У деяких жалких, плоских червів, членистоногих, більшості ссавців унаслідок дроблення утворюється стадія **морули**. Вона передує стадії бластули й становить собою скупчення бластомерів, більш або менш щільно притиснутих один до одного. Цим морула нагадує зовні плід шовковиці, звідки й походить її назва (від лат. *морум* – ягода шовковиці).

Після утворення бластули починається формування дво- або тришарового зародка – **гастроули** (від грец. *гастер* – шлунок). Спочатку виникають два шари клітин: зовнішній – **ектодерма** (від грец. *ектос* – ззовні та *дерма* – шкіра) та внутрішній – **ентодерма** (від грец. *ентос* – усередині та *дерма*). Ці шари називають **зародковими листками** (мал. 46.2). На етапі двошарової гастроули завершується ембріональний розвиток жалких (поліпів і медуз). У дорослих особин цих тварин тіло складається лише з двох шарів клітин.



Мал. 46.2. Один зі способів утворення гастрული – інвагінація (вгинання):

А. Бластула. Б. Утворення гастрული вгинанням шару бластомерів

У більшості тварин після завершення процесу утворення двошарової гастрული між зовнішнім (ектодермою) і внутрішнім (ентодермою) зародковими листками формується третій (середній) зародковий листок – **мезодерма** (від грец. *мезос* – середній).

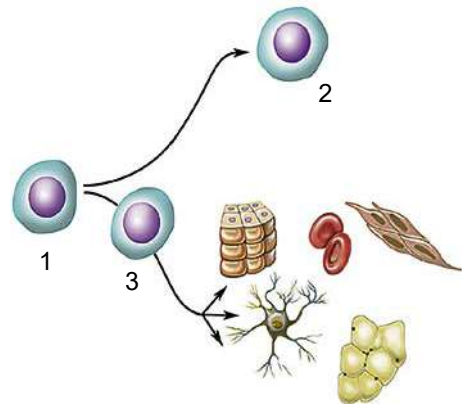
Під час формування гастрული відбувається **гістогенез** (від грец. *хістос* – тканина та *генезис* – походження) – сукупність процесів, які забезпечують формування тканин з похідних різних зародкових листків. У цих процесах важливу роль відіграють міжклітинні взаємодії, вплив біологічно активних речовин тощо, а також стовбурові клітини.

Диференціація (від лат. *диферентія* – розбіжність) – виникнення під час онтогенезу різних типів клітин з початково однорідних. Завдяки диференціації клітин згодом формуються різні тканини та органи.

Водночас із формуванням тканин (гістогенезом) відбувається й **органогенез** (від грец. *органон* – орган та *генезис*) – розвиток органів та їхніх систем.

Стовбурові клітини дають початок новим клітинам під час формування тканин зародка або в процесі регенерації (мал. 46.3). Іншими типами клітин є **напівстовбурові** та **диференційовані**. Ці типи клітин диференційовані, але напівстовбурові зберігають здатність до поділу (*поміркуйте*, які типи клітин організму людини можна віднести до напівстовбурових).

Стовбурові клітини можуть ділитися майже необмежену кількість разів. Активність стовбурових клітин та їхня здатність до подальшого диференціювання регулюється цілим комплексом генів (нині їх відомо понад 600). Під час старіння організму кількість стовбурових клітин зменшується, відповідно знижується його здатність до регенерації.



Мал. 46.3. Властивості стовбурових клітин: після поділу материнської стовбурової клітини (1) одна з дочірніх залишається недиференційованою стовбуровою (2) і зберігає здатність до подальшого поділу; інша (3) – згодом перетворюється на один з типів диференційованих клітин

Клітинна терапія – використання живих клітин різного походження, які при введенні в організм пацієнта здатні до активного функціонування, внаслідок чого відновлюються або поліпшуються функції певного органа або тканини.



Підтримання здоров'я власного організму (регулярне загартовування, постійні заняття спортом, здоровий спосіб життя, раціональне харчування, дотримання необхідного балансу вітамінів тощо) є запорукою підтримання нормальної здатності до регенерації.

Стовбурові клітини людини поділяють на два типи. Перший – **ембріональні стовбурові клітини**, які здатні безперервно розмножуватись і давати початок будь-якому типу спеціалізованих клітин. Цей тип стовбурових клітин можна утримувати поза організмом у недиференційованому стані необмежений час. Такі культури широко використовують як в експериментальних дослідженнях, так і в клітинній терапії.

Другий тип стовбурових клітин – **стовбурові клітини дорослого організму** (наприклад, стовбурові клітини червоного кісткового мозку). Після народження в людини в її органах є певний запас стовбурових клітин (приблизно 30 %), який поступово витрачається протягом життя. Є припущення, що стимулюванням розмноження цих клітин у важливі для організму періоди можна підвищити тривалість життя принаймні до 120 років.

Перспективним напрямом вважають застосування стовбурових клітин для лікування захворювань центральної нервової системи, таких як хвороба Паркінсона, мозковий інсульт, ранні стадії хвороби Альцгеймера, а також травматичних уражень нервової системи. Активні дослідження у цьому напрямі нині проводять у багатьох країнах.

Цікаво знати. Значний внесок у вивчення факторів росту та процесів регенерації тканин зробила відома німецька фахівчиня-біохімік Сабіна Вернер (народ. 1960 р.). Результати її досліджень можуть бути застосовані під час вивчення причин і лікування онкологічних захворювань.

Процеси регенерації у людини вивчає регенеративна медицина. Це сучасний напрям медицини, який опікується відновленням пошкодженої внаслідок травми або хвороби тканини чи органа стимулюванням внутрішніх відновлювальних процесів за участю власних стовбурових клітин або шляхом трансплантації цих клітин, отриманих від донора.

Цікаво знати. Науковці з Вістарського інституту (Філадельфія, США) відкрили у мишей ген (його позначення – p21), який блокує здатність до регенерації. За відсутності цього гена (або ж коли цей ген стає неактивним) у тварин з'являлася здатність відновлювати ушкоджені або втрачені частини. Виявляється, що пригніченням здатності клітин до необмежено активного поділу він охороняє організм від утворення пухлин, серед яких і злоякісні.

Особливості органогенезу хордових тварин. В органогенезі хордових після формування тришарової гастрული виділяють послідовні фази утворення нервової трубки та формування інших органів. *Нервова трубка* починає утворюватися після закладання мезодерми. З ектодер-

ми формується *нервова пластинка*. Її бічні краї загинаються та з'єднуються в нервову трубку. Особливі біологічно активні речовини визначають, який саме з кінців нервової трубки розвинеться в головний мозок. Ектодерма над нервовою трубкою зростається і дає початок епітелію шкіри.

У зародків хребетних тварин передній кінець нервової трубки диференціюється на п'ять первинних мозкових пухирів, які відповідають відповідним частинам головного мозку (довгастому, задньому, середньому, проміжному та передньому (кінцевому) мозку). В обидва боки від майбутнього проміжного мозку видуються очні пухирі, з яких розвиваються очі. Процес утворення нервової пластинки та нервової трубки називають *нейруляцією*, а зародок хордових тварин на цій стадії – *нейрулою* (від грец. *нейрон* – нерв) (мал. 46.4, Б).



Проаналізуйте зміни, які відбуваються під час формування нейрули.



Мал. 46.4. Органогенез – процес формування органів у зародка.

А. Гастрола. Б. Нейрула

Водночас із утворенням нервової трубки під нею формуються хорда та кишка. *Пригадаймо*: хорда – еластична скелетна вісь у хордових тварин. У більшості хордових тварин хорда існує лише в зародків, а в дорослих її заступає хрящовий або кістковий хребет.

У формуванні різних тканин, органів та їхніх систем беруть участь різні зародкові листки. З ектодерми виникають нервова тканина, елементи органів чуття, зовнішній шар покривів (епідерміс) та шкірні залози, передня та задня кишки у безхребетних тварин, зовнішні зябра амфібій тощо. Ентодерма дає початок органам травлення та травним залозам (печінці, підшлунковій залозі), плавальному міхуру, легеням, частинам деяких залоз внутрішньої секреції (гіпофіза, щитоподібної залози та ін.).

З мезодерми беруть початок м'язові, хрящова та кісткова тканини, кровоносні та лімфатичні судини, серце, статеві залози, протоки видільних органів, сполучнотканинні шари шкіри (дерма), плевра, епітелій, що оточує порожнину тіла, навколосерцева сумка (перикард). Отже, в утворенні багатьох органів тварин і людини беруть участь різні зародкові листки.

Явище ембріональної індукції. Розвиток багатоклітинних тварин становить складні та узгоджені між собою процеси: поділ клітин, їхню міграцію, взаємодію та диференціацію. Вони регулюються завдяки

активності тих чи інших генів і впливу біологічно активних речовин. Будь-який негативний вплив, що порушує регуляторні механізми, може спричиняти порушення розвитку і навіть загибель зародка.

За нормальних умов формування окремих частин зародка та організму загалом узгоджене за місцем і часом. Це пояснюють тим, що відповідні структури беруть початок від певних бластомерів. Подальша доля кожного з бластомерів може бути генетично визначеною ще на початкових етапах зародкового розвитку. Крім того, зачатки одних органів розвиваються під впливом взаємодій із зачатками інших, закладених раніше.

Явище взаємного впливу різних частин зародка під час ембріогенезу має назву **ембріональна індукція** (від лат. *індуктіо* – спонукання). Частини зародка, які закладаються раніше і здатні впливати на закладання й розвиток інших частин, називають *індукторами (організаторами)*, а ті, що сприймають цей вплив, – *реагуювальною системою*. Індуктори впливають на реагуювальні системи або за безпосереднього контакту, або на відстані за допомогою біологічно активних речовин.

✓ **Дізнайтеся більше** про відкриття явища взаємодії між частинами зародка за QR-кодом.



Дослідження показали, що ембріональна індукція властива всім хордовим і багатьом безхребетним тваринам. Її прояв можливий лише за умови, коли клітини реагуювальної системи здатні сприймати вплив індуктора та відповідати на нього формуванням відповідних структур. Реагуювальна система згодом сама може стати індуктором щодо інших частин, які розвиваються пізніше. Отже, ембріональний розвиток становить ланцюг послідовних індукційних взаємодій.

✓ **Дізнайтеся більше** про особливості ембріонального розвитку вищих рослин за QR-кодом.



Узагальнення

Онтогенез поділяють на ембріональний (зародковий) період, який триває до народження або вилуплення з яйця (у рослин – проростання насінини або спори), та постембріональний (післязародковий) – від народження до смерті. Ембріональний розвиток тварин відбувається в кілька основних етапів: дроблення зиготи, утворення бластули, гастрული, процесів гістогенезу та органогенезу. Важливу роль у процесах онтогенезу відіграють стовбурові клітини – недиференційовані клітини, здатні до багаторазового поділу та перетворення на різні типи клітин організму. Під час розвитку зародка одні з його частин, які закладаються раніше, впливають на напрям розвитку інших, що закладаються пізніше. Таку взаємодію називають ембріональною індукцією.

Поміркуйте

1. Чим можна пояснити те, що бластомери під час дроблення не ростуть?

2. Як стимулювання процесів регенерації можна використати у медицині?
3. Чи можна використовувати стовбурові клітини як панацею від усіх хвороб?



Лабораторне дослідження «Дослідження різних етапів ембріонального розвитку тварин».



§ 47. Післязародковий розвиток і ріст організмів



Чому існує велика різноманітність тривалості життя у тварин?

Післязародковий (постембріональний) розвиток тварин і людини.

За цей час організм росте, розвивається, набуває здатності до розмноження, старіє та вмирає. Деякі тварини (мал. 47.1) та більшість однорічних рослин одразу після розмноження гинуть. В інших (більшість хребетних тварин, річковий рак, багаторічні рослини тощо) репродуктивний період триває досить довго. Після нього смерть настає не одразу, а через деякий час (від кількох днів у комах до кількох років і десятків років у великих ссавців, дерев тощо). Це *період старіння*, коли поступово знижується рівень обміну речовин та настають незворотні зміни в організмі.

Таким чином, у тварин виокремлюють два періоди постембріонального розвитку: *передрепродуктивний* (організми ще нездатні до статевого розмноження) та *репродуктивний* (коли особини набувають здатності до статевого розмноження).

Постембріональний розвиток тварин може бути прямим або непрямим (мал. 47.2). За **прямого розвитку** щойно народжена тварина загалом нагадує дорослу. Прямий розвиток відбувається внаслідок ембріонізації.

Ембріонізація розвитку – явище, коли зародковий період подовжується за рахунок живлення зародка поживними речовинами материнського організму (як-от плацентарні ссавці, деякі хрящові риби, скорпіони) або яйця (як-от рептилії, птахи). Біологічне значення ембріонізації розвитку полягає в тому, що тварина народжується на більш високому ступені розвитку, що зменшує її вразливість перед зовнішніми чинниками.

Прямий розвиток характерний для деяких жалких (гідри), ракоподібних (дафнії, річковий рак), молюсків (прісноводні та наземні черевоногі), а також війчастих і дощових черв'яків, павуків, хрящових риб, рептилій, птахів, ссавців.

Непрямий розвиток супроводжується глибокими змінами в організації організму, завдяки яким личинка перетворюється на дорослу особину. **Личинка** – фаза постембріонального розвитку багатьох безхребетних (більшість жалких, плоских черв'яків, двостулкові молюски, багатошестинкові черви, нематоди, комахи тощо) і деяких хребетних



А

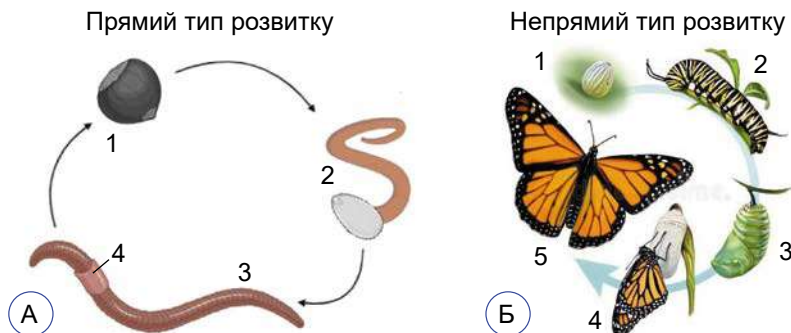


Б

Мал. 47.1. Тварини, які гинуть одразу після розмноження.

А. Комаха одноденка.

Б. Горбуша



Мал. 47.2. Постембріональний розвиток дощового черв'яка: 1 – яйцевий кокон (у ньому містяться яйця); 2 – молода нестатевозріла особина виходить з яйця; 3 – статевозріла особина: ознакою статевої дозрілості є пояс (4). Б. Постембріональний розвиток метелика: 1 – кладка яєць; 2 – личинка (гусінь); 3 – лялечка; 4 – метелик виходить з лялечки; 5 – статевозріла особина (імаго)

(ланцетники, кісткові риби, амфібії) тварин. Від статевозрілих особин вона відрізняється не лише розмірами, а й особливостями будови, час-то процесами життєдіяльності та середовищем існування.

У процесі непрямого розвитку комах з повним перетворенням (метелики, жуки, перетинчастокрилі тощо) виокремлюють фази яйця, личинки, лялечки та дорослої комахи (мал. 47.2, Б). При цьому особливе значення має фаза лялечки, на якій організм комахи зазнає значної перебудови.

✓ **Дізнайтеся більше** про біологічні функції личинки за QR-кодом.



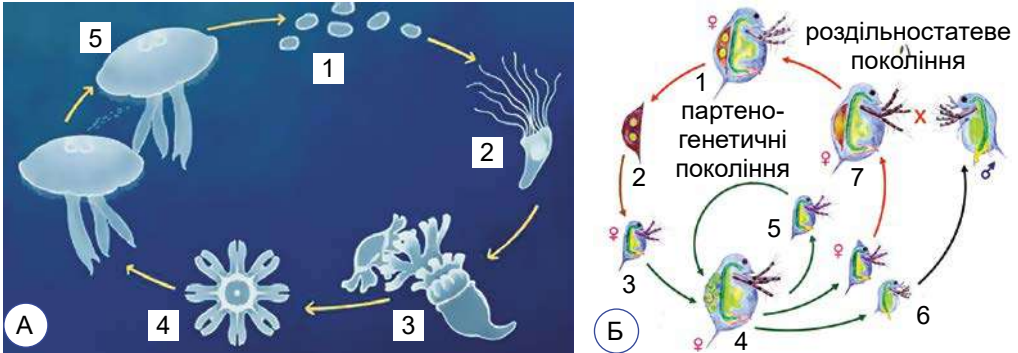
Постембріональний період супроводжується ростом і розвитком організмів. *Обмежений ріст* спостерігають у тих випадках, коли особина, сягаючи певних розмірів, його припиняє (зазвичай набувши здатності до розмноження: комахи, нематоди тощо). За *необмеженого росту* збільшення розмірів і маси організмів триває до їхньої смерті (більшість вищих рослин, багатощетинкових червів, молюсків, хрящових і кісткових риб та ін.).

Тип росту особин кожного виду визначається спадково і залежить від дії факторів навколишнього середовища. У тварин ріст регулюють насамперед гормони та нейрогормони, у рослин – фітогормони. Наприклад, нестача або надлишок гормону росту може спричинити карликовість або гігантизм людини і тварин (собак, котів, великої рогатої худоби тощо).

Поняття про життєвий цикл. *Життєвий цикл* – це період між однаковими фазами розвитку двох або більшої кількості послідовних поколінь. Розрізняють прості й складні життєві цикли.

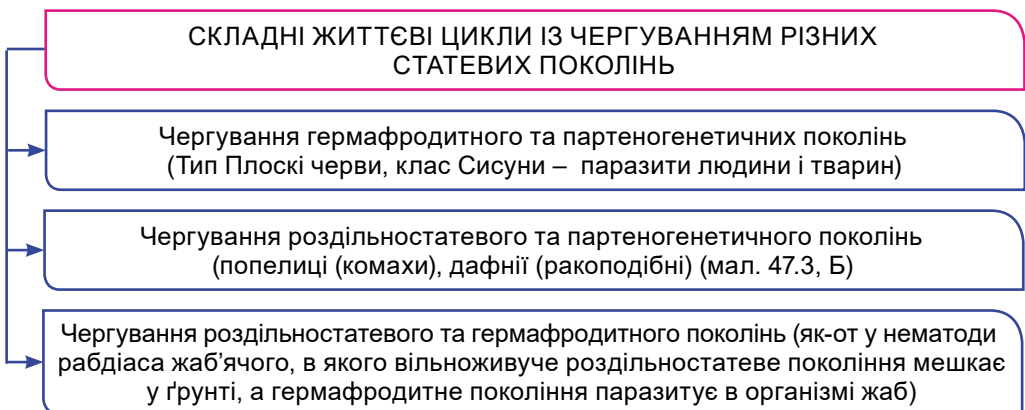
Під час *простих життєвих циклів* не відбувається закономірної зміни різних поколінь (наприклад, статевого та нестатевого), й організми не зазнають значної перебудови. Прикладами є життєві цикли багатьох одноклітинних еукаріотів (як-от амеби протей, евглени зелені), таких тварин, як гідри, дощові черви (мал. 47.2, А), рептилії, птахи, ссавці тощо.

Для складних життєвих циклів характерне чергування різних поколінь, кожне з яких може відрізнятися від інших особливостями будови, наборами хромосом, способами розмноження тощо. Або ж під час складних життєвих циклів організм кардинально перебудовується, наприклад, на фазі лялечки у комах, які розвиваються з повним перетворенням (мал. 47.2, Б, 3). Під час складного життєвого циклу можуть закономірно змінюватися статеве та нестатеве покоління (як-от одноклітинні евкаріоти – форамініфери, бурі та червоні водорості, вищі рослини, більшість представників жалких) (мал. 47.3, А).



Мал. 47.3. Приклади складних життєвих циклів. А. У життєвому циклі аурелії чергуються статеве (медузи) та нестатеве (поліпи) покоління: 1 – вільноплаваюча личинка; 2 – поліп, що розмножується шляхом брунькування; 3 – шляхом поперечного поділу поліп дає початок личинкам – ефірам (4), з яких розвиваються роздільностатеві медузи (5). Б. У життєвому циклі дафній чергуються партеногенетичні та роздільностатеве покоління: 1 – запліднені яйця у тілі самки; 2 – запліднені яйця виводяться у воду; 3 – із запліднених яєць виходять диплоїдні самки, які розмножуються партеногенетично (4); вони дають початок наступним поколінням партеногенетичних самок (5), а за настання несприятливих умов – і самцям (6); 7 – після появи самців відбувається процес запліднення; із запліднених яєць виходять лише самки, здатні до партеногенетичного розмноження (1).

У складному життєвому циклі різних представників тварин спостерігають чергування різних статевих поколінь (мал. 47.4).



Мал. 47.4. Варіанти чергування різних статевих поколінь у життєвому циклі тварин

Чергування різних поколінь має важливе біологічне значення. Наприклад, статеве розмноження забезпечує безперервність існування виду в мінливих умовах довкілля, а партеногенез дає змогу повною мірою використовувати сприятливі періоди для швидкого нарощування чисельності популяції.

Узагальнення

У постембріональному розвитку розрізняють передрепродуктивний період, коли організми ще не здатні до статевого розмноження, та репродуктивний, коли особини набувають здатності до розмноження. Постембріональний розвиток тварин може бути прямим або непрямим. За прямого розвитку новонароджена тварина за своєю будовою подібна до дорослої. За непрямого розвитку народжується личинка, що відрізняється від статевозрілих особин особливостями будови, іноді – способом живлення та середовищем мешкання. Період між однаковими фазами розвитку двох або кількох послідовних поколінь організмів називають життєвим циклом. Розрізняють життєві цикли прості та складні.

Поміркуйте

1. У життєвому циклі квіткових рослин чергуються статеве і нестатеве покоління. Поміркуйте, чим представлене кожне із цих поколінь.
2. Які переваги та недоліки мають складні життєві цикли порівняно з простими?
3. Чому в деяких тварин личинка відрізняється за будовою та способом живлення від статевозрілих особин?

Підіб'ємо підсумки з теми

I. Досліджую природу

1. Учні та учениці планували «Дослідження та порівняння етапів прямого розвитку та біологічних особливостей росту птахів – курей свійських – на прикладі порід плімутрок і леггорн». Учениця запропонувала використати метод спостереження, а учень додав, що під час порівняння особливостей росту представників двох порід варто застосувати як спостереження, так і експериментальний метод. Хто з них має рацію?

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| А учень | В обидва мають рацію |
| Б учениця | Г обидва помиляються |

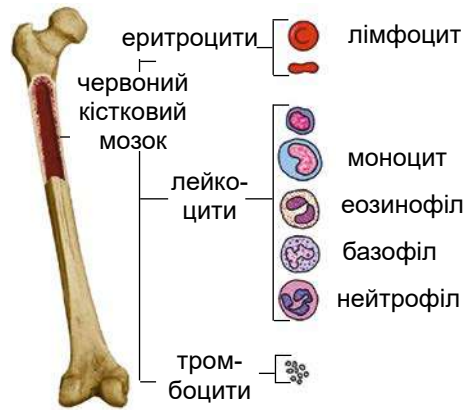
2. У фермерському господарстві родини Петренків отелилися дві корови породи симентальська. Федір (син Петренків) запропонував своїй однокласниці Катерині дослідити, як харчовий раціон корови впливає на ріст теляти. Федір визначив масу телят як залежну змінну. Катерина контрольованою змінною визначила те, що обидві корови були однієї породи. Хто з них має рацію?

- | | |
|-------------------|-----------------------------|
| А Федір | В обидва мають рацію |
| Б Катерина | Г обидва помиляються |

II. Опрацьовую та використовую інформацію

1. Опрацюйте інформацію та розгляньте малюнок. Виберіть твердження «Так» чи «Ні».

В організмі дорослої людини органом кровотворення є червоний кістковий мозок. Стовбурові клітини кісткового мозку дають початок клітинам-попередникам, які інтенсивно діляться і поступово диференціюються у зрілі формені елементи крові. На перших етапах кровотворення гемоцитобласт розгалужується на дві лінії: мієлоїдну (дає початок еритроцитам, мегакаріоцитам, гранулоцитам і моноцитам) та лімфоїдну (дає початок В-лімфоцитам, Т-лімфоцитам і природним кілерам (NK-клітинам)). Пізніше виділяється лінія мегакаріоцитів, уламки яких дають початок тромбоцитам. Формені елементи крові постійно відновлюються для підтримання гомеостазу.



Червоний кістковий мозок дорослої людини розташований у кістках і містить стовбурові клітини, що забезпечують кровотворення	Так	Ні
Лімфоцити та еритроцити утворюються з однієї лінії гемоцитобластів	Так	Ні
Еритроцити утворюються з мієлоїдної лінії гемоцитобластів	Так	Ні
Тромбоцити утворюються з тієї ж лінії, що й лімфоцити	Так	Ні
Клітини крові постійно утворюються з клітин червоного кісткового мозку для підтримання сталості складу крові	Так	Ні
Клітини крові дозрівають шляхом диференціації	Так	Ні
Кровотворення людини завершується у віці 22–25 років	Так	Ні

2. Опрацюйте матеріал про ембріональну індукцію. Виконайте тестові завдання.

Ембріональна індукція – це взаємодія між різними частинами зародка, під час якої одна частина (індуктор), впливаючи на іншу, визначає напрям її розвитку. Це явище відкрив німецький учений Ганс Шпеман 1901 року. Під час дослідів на ранній стадії розвитку (гаструли) зародка гребінчастого (непігментованого) тритона ділянку ектодерми, з якої зазвичай формується нервова система, пересадили під ектодерму черевного боку іншого зародка звичайного (пігментованого) тритона, де за нормальних умов утворюється шкіра. У результаті на черевному боці другого зародка почали формуватися нервова трубка та інші осьові органи, а згодом утворився додатковий зародок. Дослідження показали, що більшість тканин цього додаткового зародка сформувалася з клітин самого зародка-реципієнта.

2.1. Виберіть правильні твердження щодо описаного експерименту Х. Шпемана.

I. Досліди Х. Шпемана проводили на ембріонах ящірок, коли вивчали формування другого зародка.

II. Ембріональна індукція в досліді Х. Шпемана проявлялася, коли клітини індуктора забезпечували формування в реципієнта додаткового зародка.

A правильне перше твердження

B обидва твердження правильні

B правильне друге твердження

Г обидва твердження неправильні

2.2. Яка частина зародка в межах ембріональної індукції впливає на розвиток нервової системи?

A клітини ектодерми

B клітини хорди

B клітини ентодерми

Г клітини мезодерми

Розділ 4

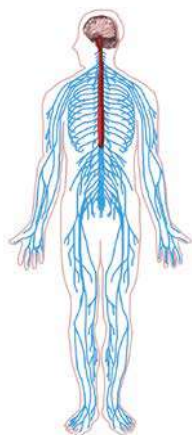
2.3. Яким був результат пересадження донорської ділянки ектодерми гастрული непігментованого тритона під шкіру пігментованого тритона?

А сформувався додатковий зародок непігментованого тритона

Б сформувався додатковий зародок пігментованого тритона

В клітини додаткового зародка сформувалися з мезодерми донора

Г клітини додаткового зародка сформувалися з ентодерми реципієнта



III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Виберіть ознаки ембріонального розвитку, притаманні системі органів людини, зображеній на малюнку.

Зародковий шар клітин, з якого утворюється об'єкт	Стадія розвитку зародка, на якій відбувається формування	Як називають зародок на стадії закладання об'єкта?
1 ектодерма	1 дроблення	1 морула
2 мезодерма	2 гастрюляція	2 бластула
3 ентодерма	3 органогенез	3 гастрולה

2. Установіть відповідність між способами розмноження (1–4) та організмами, яким вони притаманні (А–Д).

1 статевий, частинами тіла

2 брунькування і статевий

3 статевий і спорами

4 поділ клітини навпіл і кон'югація



А



Б



В

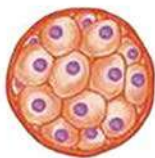


Г



Д

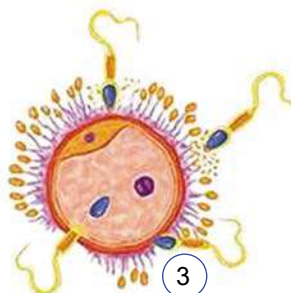
3. Установіть відповідність між зображенням певної стадії ембріогенезу (1–4) та процесами, які відбуваються під час цієї стадії ембріогенезу (А–Д).



1



2



3



4

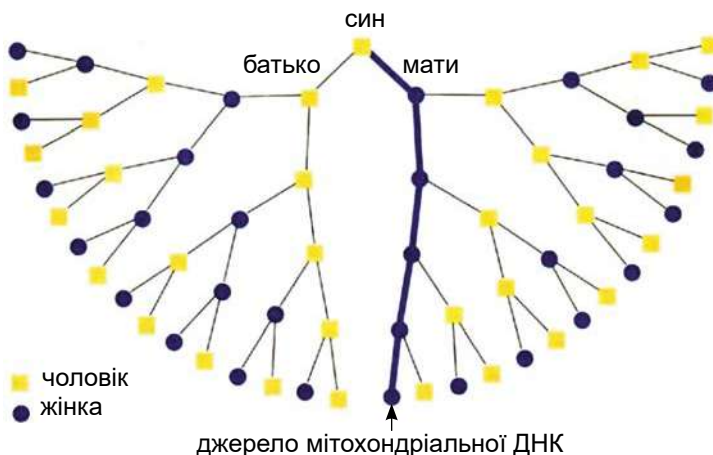
А стадія злиття гамет з утворенням зиготи

- Б** під час цього етапу відбувається мітотичний поділ зиготи на бластомери
В стадія, під час якої бластомери вишиковуються в один ряд клітин
Г стадія двошарового ембріона з утворенням гастрুলи
Д стадія органогенезу, під час якої закладається нервова трубка

Компетентнісно орієнтоване завдання

Мітохондріальна Єва на кубиках. У 1990-х рр. Аллан Вілсон і Ребека Канн застосували концепцію «молекулярного годинника» еволюції (див. § 40) до аналізу відмінностей у мітохондріальних ДНК сучасних людей. На базі даних про 182 типи мтДНК, зібраних у представників різних етнічних груп по всій земній кулі, науковці шляхом порівняння точкових замін у них побудували родовід, який дав змогу стверджувати, що всі люди є нащадками (по жіночій лінії спорідненості) однієї жінки, яка жила приблизно 200 тис. років тому, найімовірніше, в Африці. Ця концепція дістала назву «мітохондріальна Єва». Утім, самі автори писали: «Не будемо забувати, що за її часів жили й інші жінки. Їй просто пощастило... Це просто первісне джерело всіх родоводів, як і біблійна Єва».

✓ **Дізнайтеся більше** про родовід «мітохондріальної Єви» за QR-кодом.



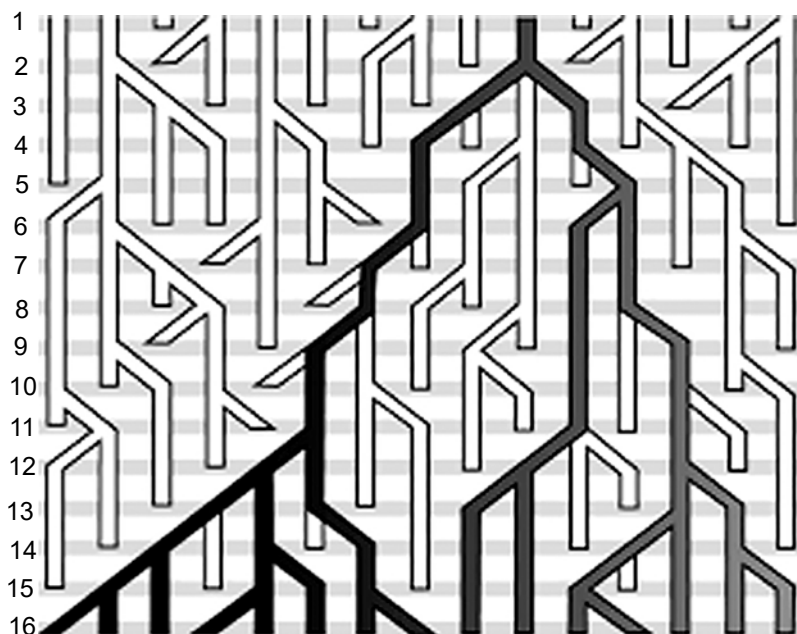
Дмитро й Андрій цікавляться родоводами, але ця інформація їх здивувала. Учителька намалювала для них схему, яка на прикладі родоводу одного індивіда проілюструвала різницю між ядерною та мітохондріальною спадковістю. Усі 32 предки з п'яти поколінь зробили рівний внесок у формування його ядерної ДНК. Однак мітохондріальна лінія спорідненості (синя) веде кожне покоління тільки до однієї людини.

«Це відбувається тому, – пояснила вчителька, – що мітохондрії зі сперматозоїда не потрапляють у яйцеклітину під час запліднення й успадковуються тільки від матері».

1. На яку форму розмноження схожа наведена схема успадкування? Поясніть свій вибір.

- А** нестатеве **Б** статеве **В** партеногенез **Г** поліембріонія

2. У статті було наведено приклад генеалогічного дерева мтДНК, у кожному поколінні якого присутні 15 жінок, і наведено кількість дочок у кожної. За цим деревом усі жінки покоління № 16 походять від «Єви» з покоління № 2.



Андрій і Дмитро ретельно проаналізували кількість нащадків у кожній з жінок у цьому родоводі та встановили, що співвідношення кількостей становить приблизно:

	Кількість нащадків на жінку			
	0	1	2	3
А	1	2	1	0
Б	2	1	1	0
В	2	4	1	1
Г	4	9	5	2

3. Дмитро зацікавився, чому на кожну жінку припадає так мало нащадків, хоча навіть у сучасних людей кількість дітей на родину більша (а є ще й багатодітні сім'ї). Наведіть два **різних** міркування.

4. Андрій згадав, що й у чоловіків є дещо, що успадковується чітко від батька до сина, але не дочки і не від матері. «Тож – підсумував він, – можливо, була не тільки Єва, а й Адам!» Поміркуйте, як звали цього чоловіка – «...Адам».

5. Хлопці вирішили: «Змоделюймо його!» Узяли гральний кубик, написали на гранях маркером цифри: 0, 1, 2, 3. На аркуші написали у верхній частині номери 15 чоловіків і, кидаючи кубик, визначали випадковим чином кількість хлопчиків у кожного з батьків. Доволі швидко з'ясувалося, що роди зі співвідношенням 0–0–1–1–2–2 досить швидко вимирають, і довелося змінювати цифри на кубик. Стабільні групи нащадків вони отримали з кубиком, на гранях якого були цифри 0–1–1–2–2–3.



Поясніть, чому в цій моделі для стабільного роду треба більше, ніж у попередній, нащадків на батька. Наведіть міркування та/або відомі вам реальні факти.

Тема 5.

Біологія як основа селекції, біотехнології та медицини



Чому більшість міжвидових гібридів є безплідними? Чому бройлерів не ефективно розводити в домашніх умовах?

Науково-дослідницький проєкт:

«Дослідження приросту біомаси сільськогосподарських тварин / домашніх улюбленців залежно від корму (на прикладі курей, кролів, хом'яків, морських свинок тощо)»; «Визначення схожості кількох сортів культурної рослини та вплив стимуляторів росту на біологічні ознаки вирощуваних рослин»; «Дослідження швидкості процесів бродіння у різних штамів дріжджів (різних виробників) та продуктивність їх під час випікання хліба».

Творчий проєкт:

написання есе (твору, розповіді) на теми: «Трансгенні організми: за і проти»; «Клонування організмів: за і проти»; «Хліб: дріжджовий чи бездріжджовий?»; «Кефір, йогурт, айран, ряжанка – подібність і відмінність виробництва»; «Біоетика – зміна поглядів на етичні питання у зв'язку з новими біотехнологічними відкриттями»; створення лепбука: «Види гібридизації рослин», «Види гібридизації тварин».

Практико-орієнтований проєкт:

виготовлення пам'яток, плакатів: «Районовані сорти сільськогосподарських культур, які вирощують у вашій місцевості»; «Породи сільськогосподарських тварин (велика та дрібна рогата худоба, коні, свині, кури, качки, гуси тощо), поширені у господарствах вашого регіону»; «Породи домашніх улюбленців у вашій школі (класі) або вдома»; «ГМО навколо нас».

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Внесок українських науковців у розвиток селекції та біотехнологій»; «Біотехнологія: від давніх часів до сьогодення»; «Застосування біотехнології у фармакології та медицині»; «Успіхи і проблеми клонування організмів»; «Проблеми використання біотехнологічних процесів та біобезпека».

Ігровий проєкт:

рольова гра: «Ти – біотехнолог: створення нових продуктів для майбутнього людства».

§ 48. Завдання сучасної селекції. Основні методи селекції: штучний добір, гібридизація

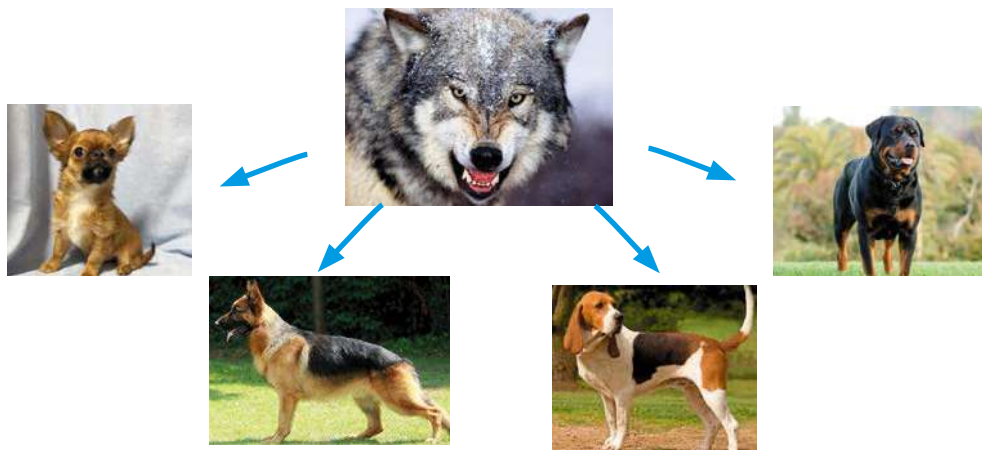


Чи можна стверджувати, що без селекції сучасне людство не мало б достатньо їжі?

Селекція (від лат. *селектіо* – вибір, добір) – наука про теоретичні основи та методи створення нових і поліпшення якостей існуючих сортів рослин, порід тварин і штамів мікроорганізмів, пристосованих до сучасних вимог сільського господарства та промисловості. Теоретичні основи селекції слугують результати генетичних досліджень і вчення про штучний добір. Для досягнення ефективних результатів сучасний селекціонер має бути добре обізнаним з особливостями роз-

множення, індивідуального розвитку та процесів життєдіяльності видів, з якими він працює.

Пригадаймо: породою тварин або сортом рослин називають сукупність особин одного виду з певними спадковими ознаками (особливостями будови, процесів життєдіяльності, продуктивності тощо), створену людиною внаслідок штучного добору (мал. 48.1).



Мал. 48.1. Групи порід собак



Порівняйте вовка – предка собак – з породами, зображеними на малюнку 48.1. Знайдіть назви порід і поясніть мету їх створення.

Штам – це чиста культура мікроорганізмів (тобто нащадки однієї клітини) (мал. 48.2). Від однієї материнської клітини за допомогою селекції можна отримати різні штами, які відрізняються продуктивністю, чутливістю до антибіотиків тощо. Штами мікроорганізмів вирощують на поживних середовищах, наприклад на агарі, який отримують із червоних водоростей. Від складу поживного середовища часто залежить продуктивність того чи іншого штаму.



Мал. 48.2. Штам мікроорганізму, вирощений на поживному середовищі

Селекція відіграє важливу роль у забезпеченні максимального обсягу виробництва високоякісних харчових продуктів за мінімальних вкладених коштів і витрат енергоносіїв. В Україні селекційну роботу здійснюють у відповідних наукових установах Національної аграрної академії наук (НААН) та

Національної академії наук (НАН) України, а також у широкий мережі селекційних станцій, на сортовипробувальних ділянках та в племінних господарствах.

Одним з найвідоміших у світі центрів селекції пшениці є Миронівський інститут пшениці (Київська область), який тривалий час очолював видатний український селекціонер академік В. М. Ремесло (мал. 48.3).

Тепер цей інститут має його ім'я. Під керівництвом В. М. Ремесла створено 20 сортів пшениці, які вирощують у багатьох країнах. Найвідомішим є сорт «Миронівська-808», який вважають шедевром світової селекції пшениці.



Мал. 48.3. А. Василь Миколайович Ремесло (1907–1983). Б. Монета номіналом 2 гривні, випущена Національним банком України і присвячена 110-й річниці з дня народження академіка Василя Ремесла

✓ **Дізнайтеся більше** про найбільші селекційні установи в Україні за QR-кодом.



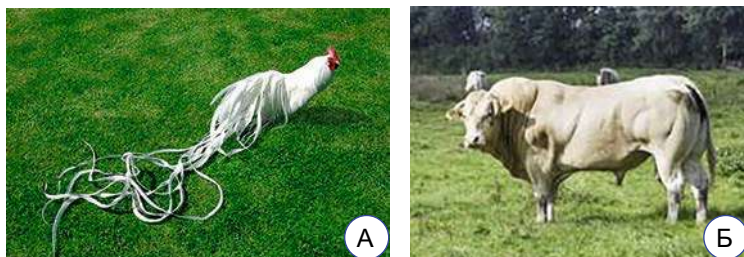
Породи тварин і сорти рослин, які мають високу продуктивність в одних географічних зонах, не завжди придатні для використання в інших. Тому вчені всебічно досліджують властивості нових порід і сортів та перевіряють їхню придатність для використання в певній кліматичній зоні, тобто здійснюють районування.

Районування – комплекс заходів, спрямованих на перевірку відповідності властивостей тих чи інших порід або сортів умовам певної кліматичної зони. Це необхідна умова раціонального використання порід і сортів у межах будь-якої країни.

Класичні методи селекції – штучний добір і гібридизація. **Штучний добір** – це відбір людиною найбільш цінних щодо господарських цілей тварин, рослин, мікроорганізмів для отримання від них нащадків з бажаними ознаками. Він є найважливішим елементом будь-якої селекційної роботи, необхідним для збереження та подальшого вдосконалення досягнутих результатів. Основи теорії штучного добору розробив видатний англійський учений Чарльз Роберт Дарвін (1809–1882).

Штучний добір здійснюють у кілька послідовних етапів. Серед багатьох тварин або рослин певного виду обирають особин, які відрізняються від інших цікавими для людини варіантами ознак, і використовують їх для подальшого розмноження. З покоління в покоління бажаний варіант ознаки проявляється дедалі більше, оскільки як плідників відбирають особин, у яких він виражений краще. Одночасно за допомогою гібридизації людина може поєднувати в нащадках різні корисні для неї ознаки батьківських форм. Штучний добір зазвичай приводить і до змін деяких інших ознак, а через певний час – до помітної перебудови самого організму, тобто до створення нового сорту або породи.

Ознаки, які відбирає людина, не завжди виявляються корисними для самих організмів. Створені породи чи сорти часто не здатні до самостійного існування і потребують постійної турботи з боку людини (мал. 48.4).



Мал. 48.4. Півні породи Фенікс (А) мають довгий хвіст, який за рік може відростати на 90 см. Б. Самець (бугай) української м'ясної породи: маса його тіла може сягати до 1270 кг



Чи можуть півень породи фенікс та бугай української м'ясної породи самостійно жити в природі?

За Ч. Дарвіном, формування порід і сортів почалося з приручення людиною диких видів тварин і вирощування диких видів рослин. Основою різноманіття певних порід і сортів є один або кілька видів диких предків. Наприклад, предком усіх порід свійської собаки (яких налічують близько 500) вважають вовка (мал. 48.1), а свійської свині – дику свиню (кабана).

Застосовують масову та індивідуальну форми штучного добору. За *масового добору* з вихідного матеріалу відбирають групи особин з певними фенотиповими особливостями. Хоча масовий добір простий у застосуванні й дає на початку непогані результати, він має низку недоліків. Групи ззовні подібних особин можуть виявитися генетично різнорідними (*пригадаймо*: особини, гомозиготні за домінантними алелями, та гетерозиготні можуть мати подібний фенотип), що знижує ефективність добору.

За *індивідуального добору* кожного плідника обирають на підставі детального вивчення як його фенотипу, так і генотипу. Інформацію про генотип цих організмів можна отримати, вивчаючи родоводи або за допомогою аналізуючих схрещувань тощо.



Використовуючи різні джерела інформації, зокрема інтернет-портал <http://agro.ua.net/> (на ньому представлені всі сорти рослин і породи тварин, які використовують в Україні), знайдіть ті, які виведені в нашій країні. Для цього оберіть певну категорію, наприклад «зернові культури», «овочеві культури», «велика рогата худоба» тощо.

Основні типи схрещувань, які використовують у селекції. Ефективність селекції залежить не лише від форми штучного добору, а й від застосування відповідної системи схрещування організмів – **гібридизації**.

Гібридизація можлива як між особинами одного (внутрішньовидова), так і різних видів (міжвидова, або віддалена). **Внутрішньовидова гібридизація** буває спорідненою і неспорідненою. Найтісніші форми

спорідненої гібридизації (*інбридингу*; від англ. *inbreeding*; *in* – всередині та *breeding* – розведення) спостерігають серед самозапильних рослин. В організмів з перехресним заплідненням найбільш тісні форми спорідненого схрещування спостерігають у разі парування нащадків спільних батьків і батьків із власними нащадками. Унаслідок низки послідовних споріднених схрещувань з кожним наступним поколінням підвищується гомозиготність нащадків.

Біологічним результатом спорідненого схрещування може бути ослаблення або навіть виродження нащадків унаслідок експресії летальних чи сублетальних рецесивних алелів, які можуть перейти у гомозиготний стан. Тісний інбридинг часто призводить до появи організмів з різноманітними спадковими аномаліями.

У селекції споріднене схрещування застосовують для отримання чистих ліній. Інбридинг дає можливість отримати цінні ознаки в гомозиготному стані та закріпити їх серед нащадків. Отримання чистих ліній організмів з бажаними властивостями може бути кінцевим результатом селекційної роботи, або чисті лінії можуть бути використані для подальшої гібридизації (*пригадайте* досліди Г. Менделя) та наступного добору.

Неспоріднене схрещування (аутбридинг; від англ. *outbreeding*; *out* – поза та *breeding* – розведення) – гібридизація представників різних ліній, сортів чи порід одного виду. *Пригадаймо:* неспорідненими вважають особин, спільних предків у яких не було принаймні протягом попередніх шести поколінь. Неспоріднене схрещування здійснюють, щоб поєднати в нащадках цінні властивості, притаманні різним лініям, породам чи сортам. За своїми генетичними наслідками аутбридинг прямо протилежний інбридингу: за неспорідненого схрещування з кожним наступним поколінням підвищується гетерозиготність нащадків. У нащадків, отриманих унаслідок неспорідненого схрещування, часто спостерігають явище гібридної сили, або гетерозису.

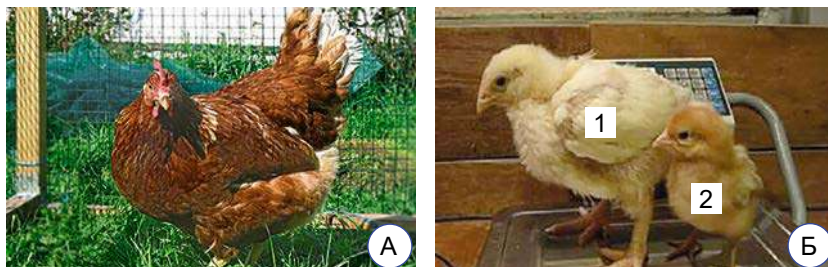
• **Гетерозис** (від грец. *гетерос* – інший, різний та *озис* – стан) – явище, коли перше покоління гібридів, отриманих унаслідок неспорідненого схрещування, має підвищені життєздатність і продуктивність порівняно з батьками.

У гетерозисних особин сублетальні й летальні рецесивні алелі можуть переходити у гетерозиготний стан, завдяки чому їхній несприятливий вплив не проявляється у фенотипі. До того ж у генотипі гібридних особин можуть поєднуватися сприятливі домінантні алелі, які були в різному наборі в обох батьків.

Прикладом явища гетерозису є бройлери – скоростиглі гібриди свійських тварин (курей, качок, кролів тощо), отримані схрещуванням між собою представників різних порід (мал. 48.5).

Гетерозис найчіткіше проявляється в першому поколінні гібридів. У наступних поколіннях він слабшає й до восьмого покоління зазвичай сходить нанівець. У рослин гетерозисні зміни фенотипу передаються нащадкам під час вегетативного розмноження.

Явище гетерозису широко застосовують у сільському господарстві, оскільки воно дає змогу значно підвищити продуктивність різних культурних рослин (наприклад, кукурудзи до 20–25 %). У тваринництві схрещування представників різних порід прискорює ріст і статеве



Мал. 48.5. Явище гетерозису. А. Бройлер породи Редбро: маса курей сягає 4 кг, півнів – 7 кг; кури починають нести яйця з 4-місячного віку; за рік одна курка відкладає до 300 яєць. Б. Курчата одного віку: бройлер (1) та курча вихідної м'ясної породи (2)

дозрівання, поліпшує якість м'яса, молока тощо. У результаті схрещування несучих порід курей між собою (наприклад, леггорнів з австралорнами) продуктивність гібридів зростає на 20–25 яєць на рік.

Віддалену гібридизацію – схрещування представників різних видів – використовують також для отримання високопродуктивних гібридів. За допомогою віддаленої гібридизації створено гібриди пшениці та пирію, що вирізняються високою продуктивністю (до 300–450 ц/га зеленої маси) та стійкістю до полягання; пшениці з житом (тритикале) – має вищу морозостійкість, ніж вихідні види, стійкість до збудників хвороб, більший уміст білків у насінинах; китайської цукрової тростини з дикими видами (що дало змогу підвищити вміст цукрів). Відомі міжвидові гібриди й серед плодових культур (малини й ожини (мал. 48.6, А), сливи та терену, горобини та сибірського глоду тощо).

У тваринництві також виведено значну кількість міжвидових гібридів. Гібриди кобили й віслюка (мул; мал. 48.6, Б) чи одnogорбого й двогорбого верблюдів вирізняються значною силою, витривалістю і довголіттям. Гібрид білуги та стерляді (бістер) вирізняється швидким ростом і високими смаковими якостями (мал. 48.6, В).



Мал. 48.6. Приклади міжвидових гібридів у тварин і рослин. А. Гібрид малини та ожини. Б. Мул – гібрид самки коня і самця віслюка. В. Бістер (гібрид білуги та стерляді): довжина тіла – до 170 см, маса – до 30 кг

У селекції застосовують також серії **зворотних схрещувань** – гібридів першого та наступних поколінь нащадків, що мають потрібну ознаку, схрещують з однією з батьківських форм. Завдяки цьому в кожному наступному поколінні в генотипі гібридних особин дедалі більше концентруються бажані для селекціонерів алельні гени однієї з батьківських ліній.

✓ **Дізнайтеся більше** про проблеми міжвидової гібридизації за QR-кодом.



Узагальнення

Селекція – це наука про створення нових і поліпшення якостей існуючих порід тварин, сортів рослин і штамів мікроорганізмів. До основних методів селекції належать штучний добір та гібридизація. Штучний добір буває масовий та індивідуальний. Людина застосовує штучний добір для вибору цінних ознак у тварин, рослин і мікроорганізмів та отримання нащадків з бажаними ознаками. Гібридизація буває внутрішньовидова (споріднена й неспоріднена) та міжвидова (віддалена). Під час неспорідненої та внутрішньовидової гібридизації може проявлятися ефект гетерозису – гібридної сили.



Поміркуйте

1. Як довести, що предком усіх порід собак є вовк?
2. Чому нащадки, отримані шляхом спорідненого схрещування, менш продуктивні, ніж нащадки, отримані шляхом неспорідненого?
3. Чому у тварин стерильність міжвидових гібридів важко подолати створенням поліплоїдних форм?

§ 49. Особливості селекції рослин, тварин і мікроорганізмів



Чому підходи до методів селекції рослин, тварин і мікроорганізмів відрізняються?

Особливості селекції рослин. Культурні рослини часто мають короткий життєвий цикл і високу плодючість, що робить їх зручними об'єктами для селекції. До того ж багато видів здатні до самозапилення та вегетативного розмноження. За вегетативного розмноження всі дочірні особини фактично є *клонами* – вони мають ідентичні генотипи.

Вегетативне розмноження у селекції рослин використовують для швидкого отримання великої кількості рослин з бажаними характеристиками. Для перехреснозапильних рослин спочатку отримують чисті лінії. Для однодомних рослин застосовують штучне самозапилення (наприклад, у кукурудзи) або низку близькоспоріднених схрещувань й отримують інбредні лінії (як-от у селекції коноплі). У подальшому ці лінії використовують для отримання гетерозисних гібридів.

У селекції рослин є можливість використовувати різні форми штучного добору (як масовий, так й індивідуальний). Для підвищення різноманітності вихідного матеріалу в селекції рослин застосовують різні форми гібридизації спільно з використанням штучного мутагенезу.

Міжвидові гібриди рослин часто безплідні, проте їх розмножують вегетативно (якщо це можливо) або долають безпліддя, подвоюючи число хромосом гібридів. Зокрема, створено поліплоїдні високопродуктивні сорти різних культурних рослин: картоплі, полуниць, цукро-

вого буряку, гречки, льону, кавуна, м'якої пшениці, жита, кукурудзи, проса тощо.

Штучний мутагенез у селекції рослин. У 20–30-х роках ХХ століття вітчизняні генетики академік А. О. Сапегін і Л. М. Делоне (мал. 49.1, А, Б) вперше використали іонізуюче випромінювання для отримання цінних мутантних форм пшениці. Їхні праці започаткували застосування радіаційного експериментального мутагенезу в селекції рослин. Після відкриття хімічного мутагенезу почалося активне використання в селекції хімічних речовин, які збільшують частоти мутацій у десятки і сотні разів. На основі хімічного мутагенезу створено багато сортів картоплі, тютюну, помідорів, перцю та інших культур.

В Україні напрям мутаційної селекції активно розвинув академік В. В. Моргун (мал. 49.1, В). Використовуючи експериментальний мутагенез, науковець отримав велику кількість високопродуктивних сортів і ліній пшениці та кукурудзи.

Мутаційний процес – неспрямований, тому дуже важко передбачити, які з мутацій будуть корисними для селекційної роботи, а які – шкідливими.



Мал. 49.1. Українські учені, які застосовували штучний мутагенез у селекції рослин. Академік Академії наук України Андрій Опанасович Сапегін (1883–1946) (А) та професор Лев Миколайович Делоне (1891–1969) (Б) уперше використали іонізуюче випромінювання у селекції пшениці. В. Володимир Васильович Моргун (1938–2025), академік НАН України, колишній директор Інституту фізіології рослин і генетики НАН України, Герой України

✓ **Дізнайтеся більше** про щеплення рослин за QR-кодом.



Особливості селекції тварин. Особливостями селекції тварин є те, що свійським тваринам притаманне лише статеве розмноження, тому вегетативне розмноження безплідних міжвидових гібридів неможливе. У селекції тварин майже не застосовують масовий добір, оскільки кількість нащадків незначна і тому кожна особина має значну цінність. Також свійські тварини не здатні до самозапліднення, їм притаманні досить тривалі життєві цикли, й селекціонерам складно отримувати поліплоїдні форми.

У селекції тварин застосовують як споріднене (для переведення певних генів у гомозиготний стан), так і неспоріднене схрещування, а також віддалену гібридизацію (для виведення міжвидових гібридів). Широко використовують і явище гетерозису. Наприклад, схрещуючи

дюрок-джерсійську та беркширську породи свиней, отримують швидкостиглих нащадків, які за неповний рік сягають значної маси (до 300 кг і більше) (мал. 49.2, 2, 3).

Селекцію тварин насамперед здійснюють у напрямі виявлення перспективних плідників породи. При цьому важливе значення має підбір плідників за **екстер'єром** (від лат. *екстеріор* – зовнішній) – сукупністю зовнішніх фенотипових ознак, притаманних цій породі. Екстер'єр – це зовнішній вигляд, який включає статуру, пропорції тіла, особливості форми та будови тіла, вік і стать.



Мал. 49.2. Кабан (1) та породи свійських свиней: 2 – дюрок-джерсійська; 3 – беркширська; 4 – українська степова біла

Деякі практично важливі спадкові ознаки можуть не проявлятися у фенотипі в особин однієї зі статей. Наприклад, у самців великої рогатої худоби не проявляються такі характеристики, як молочність і жирномолочність, у півнів – несучість (кількість яєць, відкладених куркою упродовж певного періоду, наприклад року). Тому для виявлення подібних властивостей застосовують **метод визначення якостей плідників за властивостями нащадків**. При цьому порівнюють продуктивність нащадків протилежної статі (наприклад, корів – дочок певного бугая) із середніми показниками по породі. Відібраних перспективних плідників схрещують.

Одним з видатних селекціонерів тварин, робота якого пов'язана з Україною, був академік М. Ф. Іванов (мал. 49.3). Він створив такі відомі породи, як асканійська порода тонкорунних овець та українська степова біла порода свиней (мал. 49.2, 4). З його ініціативи 1925 р. засновано племінну станцію в Асканії-Нова (Херсонська обл.), нині – Інститут тваринництва степових районів ім. М. Ф. Іванова «Асканія-Нова», Національний науковий селекційно-генетичний центр з вівчарства.



Мал. 49.3.
Академік
Михайло
Федорович
Іванов
(1871–1935)

Також у селекції тварин використовують сучасні **репродуктивні технології**: штучне запліднення та запліднення «у пробірці» (*пригадайте ці методики*). У разі штучного запліднення гаметами найпродуктивніших самців запліднюють велику кількість самок і отримують значну кількість нащадків від одного перспективного плідника. Гамети такого плідника в умовах низьких температур можуть зберігатися тривалий час, навіть після його смерті.

У разі запліднення «в пробірці» яйцеклітини перспективних для селекційної роботи самок (їх можна утримувати в умовах низьких тем-

ператур до декількох десятків років) запліднюють спермою найпродуктивніших самців, а отримані зиготи чи ембріони на ранніх стадіях розвитку підсаджують у матку інших самок (ці технології ми розглянемо згодом). Поліплоїдія серед тварин трапляється зрідка, тому її використовують у селекції невеликої кількості видів (наприклад, шовковичного шовкопряда та деяких видів риб).

✓ **Дізнайтеся більше** про центри походження культурних рослин і свійських тварин за QR-кодом.



Селекція мікроорганізмів. Мікроорганізми – дуже зручний об’єкт для селекції: є велика кількість вихідного матеріалу (за короткий проміжок часу на поживному середовищі виростають мільйони клітин); структура геному мікроорганізмів простіша, ніж у рослинних і тваринних клітин. Утім, традиційна гібридизація для більшості видів мікроорганізмів неможлива через відсутність статевого розмноження.

Багато прокаріотів мають гаплоїдний набір генів – єдину кільцеву молекулу ДНК (див. мал. 20.3), тому мутації проявляються вже в першому поколінні нащадків. Завдяки високим темпам розмноження можна швидко отримати потрібну кількість «мутантів» з певними властивостями. За допомогою вірусів-бактеріофагів, здатних переносити спадкову інформацію від однієї бактеріальної клітини до іншої, штучно об’єднують спадковий матеріал клітин з різних штамів чи видів. Це робить селекцію мікроорганізмів ефективнішою.

Нині виокремлюють три основних підходи до селекційної роботи з мікроорганізмами:

- форму штучного добору, за якої відбирають і розмножують окремі клітини з корисними мутаціями, отримуючи велику кількість нащадків однієї клітини з ідентичними генотипами (клони);
- експериментальний мутагенез, за допомогою якого урізноманітнюють спадковий матеріал;
- методи генетичної та клітинної інженерії.

Мікроорганізми (прокаріоти та деякі мікроскопічні еукаріоти, наприклад дріжджі) широко використовують у харчовій, мікробіологічній, виноробній та інших галузях, для біологічної боротьби зі шкідниками, очищення навколишнього середовища тощо.

Селекцію мікроорганізмів здійснюють і для виробництва так званих **рекомбінантних вакцин**, які мають низку переваг перед традиційними:

- у них знижений (або взагалі відсутній) уміст домішок (синтезується чистий білок, який стимулює необхідну імунну відповідь);
- вони майже повністю безпечні та мають низьку вартість.

Для виробництва рекомбінантних вакцин застосовують технологію рекомбінантної ДНК, за якої генетичний матеріал певних видів мікроорганізмів (наприклад, ДНК бактерій, що кодує антиген) вбудовують у клітини бактерій, дріжджів, комах або ссавців, які починають продукувати цей антиген. Цей антиген виділяють у чистому вигляді й на його основі створюють рекомбінантну вакцину. Прикладом такої рекомбінантної вакцини може слугувати вакцина проти гепатиту В.

Існують рекомбінантні ДНК-вакцини. При цьому плазмиду, отриману з клітин певних видів прокаріотів, уводять в організм людини або внутрішньом'язово, або за допомогою генної гармати (англ. *Gene gun*). Такі вакцини, наприклад, можуть активувати Т-лімфоцити (*пригадаймо їхні функції*).

✓ **Дізнайтеся більше** про використання генних гармат за QR-кодом.



Створюють рекомбінантні вакцини і на основі мРНК (ці молекули слугують проміжним продуктом між ДНК та молекулами білка, які цікавлять дослідників). Такі вакцини досить ефективні, їх використовують для профілактики різних інфекційних захворювань (зокрема коронавірусної інфекції – COVID-19).

Цікаво знати. Для створення РНК-вакцини проти збудника певного вірусного захворювання не потрібен сам збудник, дослідникам достатньо мати його розшифрований (секвенований) геном. Дослідники створюють РНК-вакцину на основі послідовності нуклеотидів, що кодують антиген – вірусний білок. Далі синтезовану мРНК поміщають у ліпідну наночастинку, у складі якої вона проникає у клітину.

Узагальнення

У селекції рослин використовують масовий та індивідуальний штучний добір, внутрішньовидове неспоріднене схрещування, а для отримання чистих ліній – споріднене, а також віддалену гібридизацію. У селекції рослин також застосовують штучний мутагенез з метою отримання цінних мутантних форм. У селекції тварин переважно використовують індивідуальний штучний добір, споріднене й неспоріднене схрещування, а також віддалену гібридизацію. У селекції мікроорганізмів широко застосовують методи генетичної та клітинної інженерії.

Поміркуйте

1. Чому в селекції тварин не застосовують штучний мутагенез?
2. Чи можуть нащадки, отримані клонуванням, мати генотип, відмінний від материнського організму?
3. Яке значення селекції мікроорганізмів у житті людини?

§ 50. Біотехнологія



Які перспективи в майбутньому відкриває перед людством застосування біотехнологій?

Біотехнологія (від грец. *біос* – життя, *техне* – мистецтво, майстерність і *логос* – учення) – сукупність промислових методів, у яких використовують організми або біологічні процеси. Завдання цієї науки – розв'язувати актуальні проблеми сучасного людського суспільства: забезпечення його продовольством, джерелами енергії, лікарськими препаратами, збереження та поліпшення стану навколишнього середовища.

Цікаво знати. Уперше термін «біотехнологія» 1917 р. застосував угорський інженер Карл Ерекї (1878–1952) для описання процесу широкомасштабного вирощування свиней. К. Ерекї запропонував використовувати цукровий буряк (сировину) як корм для свиней (біотрансформація) для отримання їхнього дешевого м'яса (кінцевий продукт).

Людина з давніх часів використовує біохімічні процеси для виробництва різних речовин і харчових продуктів (сирів, молочних продуктів, тіста, пива тощо), але сам термін «біотехнологія» у нинішньому його розумінні запропоновано лише в 70-х роках ХХ ст.

Біотехнологія застосовує методики й технічні засоби різних наук, спрямовані на використання різних біологічних систем (вірусів, бактерій, одноклітинних і багатоклітинних еукаріотів) для отримання комерційного продукту, яким можуть бути як самі організми, так і продукти їхньої життєдіяльності (ферменти, інтерферони, антибіотики, вітаміни тощо).

Важко переоцінити роль біотехнології в галузі збереження здоров'я людини. За допомогою біотехнологій створено багато нових високо-ефективних лікарських препаратів (антибіотиків, вакцин, вітамінів, амінокислот, гормонів та ін.), засобів, призначених для ранньої діагностики захворювань тощо. Використовуючи високопродуктивні штами мікроорганізмів, людина збільшує випуск високоякісних харчових продуктів (кисломолочних, сирів тощо) і кормів для тварин (силос, кормові дріжджі тощо). Мікроорганізми виробляють основну кількість харчової лимонної кислоти.

Селекціонери створили штами грибів, здатні синтезувати кормові білки з відходів рослинництва, нафти й нафтопродуктів, та штами бактерій, які можуть вилучати сполуки цінних рідкоземельних елементів і дорогоцінні метали з руд і промислових відходів. Бактерії поглинають їх з навколишнього середовища та накопичують у своїх клітинах.

В останні роки біотехнології дедалі ширше використовують для отримання **біопалива**. Це органічні матеріали, які людина використовує для отримання енергії (деревина, сільськогосподарська продукція, спирти тощо). Біопаливом вважають будь-яке паливо, в якому вміст продуктів, отриманих від організмів, становить не менше ніж 80 % від його об'єму.

Переваги біопалива над традиційними джерелами енергії (нафтою, природним газом, кам'яним вугіллям та ін.) полягають у тому, що воно є прикладом відновлюваних джерел енергії. Біопаливо повністю розкладається мікроорганізмами і тому не забруднює довкілля.

Останнім часом як сировину для отримання біопалива використовують сільськогосподарські рослини, такі як кукурудза та соя (у США), льон і ріпак (у країнах Європи), цукрова тростина (у Південній Америці), пальмова олія (у Південно-Східній Азії). За участі мікроорганізмів можна перетворювати побутові та промислові відходи на біогаз.

Біотехнологічні методи застосовують для очищення навколишнього середовища, зокрема стічних вод і ґрунтів, від побутового і промислового забруднення. Вони базуються на здатності гетеротрофних бактерій і грибів розкладати органічні сполуки – забруднювачі, наприклад пестициди. Штучно створені штами руйнують сполуки, стійкі до впли-

ву природних мікроорганізмів. У відходах харчової промисловості та залишках харчових продуктів залишається ще багато корисних для людини сполук. Отримати їх також допомагають сучасні методи біотехнології.

На великих фермах і птахофабриках личинок багатьох видів мух завдяки спеціальним біотехнологічним методикам використовують для швидкого перероблення посліду. Ці продукти перероблення використовують як добриво; а багатих на білки личинок фіксують гарячою водяною парою та у свіжому чи висушеному і розмеленому вигляді додають до кормів; це збільшує приріст біомаси свійських тварин.

Так само для перероблення органічних решток використовують деякі види дощових черв'яків, наприклад каліфорнійського червоного черв'яка (інша назва – гнойовий черв'як). Наслідком діяльності цього виду є створення високоефективного добрива – *біогумусу* (мал. 50.1). За допомогою селекції створено високопродуктивні поліплоїдні форми гнойового черв'яка.



Мал. 50.1. Гнойового черв'яка (1) широко використовують для перероблення компостів (2) (суміш рослинних решток та посліду тварин); наслідком діяльності цього виду є отримання біогумусу (3)

У своїй роботі біотехнологи використовують різні типи біологічних систем: віруси, мікроорганізми, багатоклітинні організми, їхні клітинні лінії тощо. Досить часто такі біологічні системи зазнають генетичної модифікації: їхній спадковий матеріал змінюють. Класичним об'єктом, який застосовують у біотехнології, є бактерія кишкова паличка. Ця бактерія входить до складу нормальної мікрофлори кишки людини, але трапляється і за її межами, наприклад у ґрунті та водоймах.

Основні напрями досліджень у сучасній біотехнології такі:

- розроблення наукових засад створення нових технологій за допомогою методів молекулярної біології, генетичної та клітинної інженерії;
- одержання й використання біомаси мікроорганізмів і продуктів мікробіологічного синтезу.

Нині понад сотню різноманітних видів мікроорганізмів (бактерій, актиноміцетів, одноклітинних евкаріотів) активно застосовують у біотехнологічних процесах у промисловому виробництві, сільському господарстві, медицині, очищенні навколишнього середовища від забруднення.

Узагальнення

Біотехнологія – це сукупність промислових методів, у яких використовують організми або біологічні процеси. Завдання біотехнології – розв’язувати актуальні проблеми сучасного людства: забезпечення його продовольством, джерелами енергії, лікарськими препаратами, збереження та поліпшення стану навколишнього середовища. Біотехнологічні процеси застосовують у різних галузях промисловості: харчовій, хімічній, збереження здоров’я, для виробництва біопалива, очищення стічних вод, ґрунтів тощо.

Поміркуйте

1. Чи можна випікання хліба вважати біотехнологічним процесом?
2. Для яких процесів перероблення молока використовують біотехнології?
3. Чи можна застосовувати біотехнологічні процеси для зменшення кількості сміття?

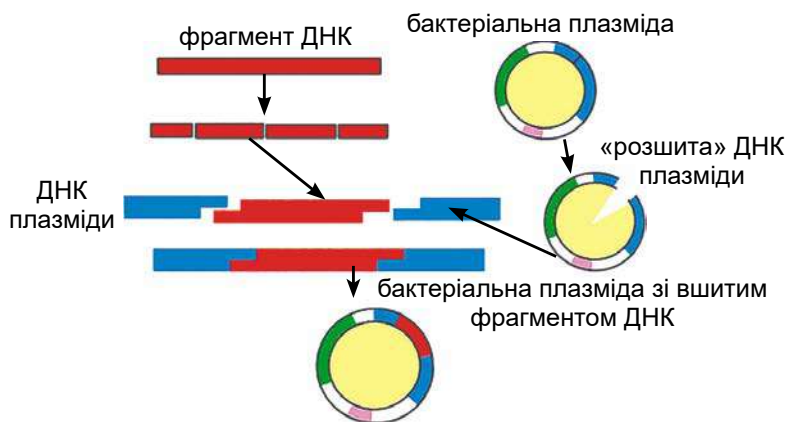
§ 51. Генетична інженерія. Генетично модифіковані організми. Клітинна інженерія



Як генетична інженерія впливає на хід історії людства?

Генетична інженерія – це сукупність прийомів, методів і технологій виділення генів з організму чи клітини або їхній синтез поза організмами, здійснення маніпуляцій з такими генами та введення їх у ті ж самі або інші організми. Завданнями генетичної інженерії є розроблення та вдосконалення методів перебудови геномів організмів та неклітинних форм життя шляхом видалення або введення окремих генів чи їхніх груп. На методах генетичної інженерії – отриманні рекомбінантних ДНК – часто базуються сучасні біотехнологічні процеси.

Під **рекомбінантними** розуміють молекули ДНК, утворені шляхом об’єднання двох або більшої кількості фрагментів ДНК, виділених з різних джерел (мал. 51.1).



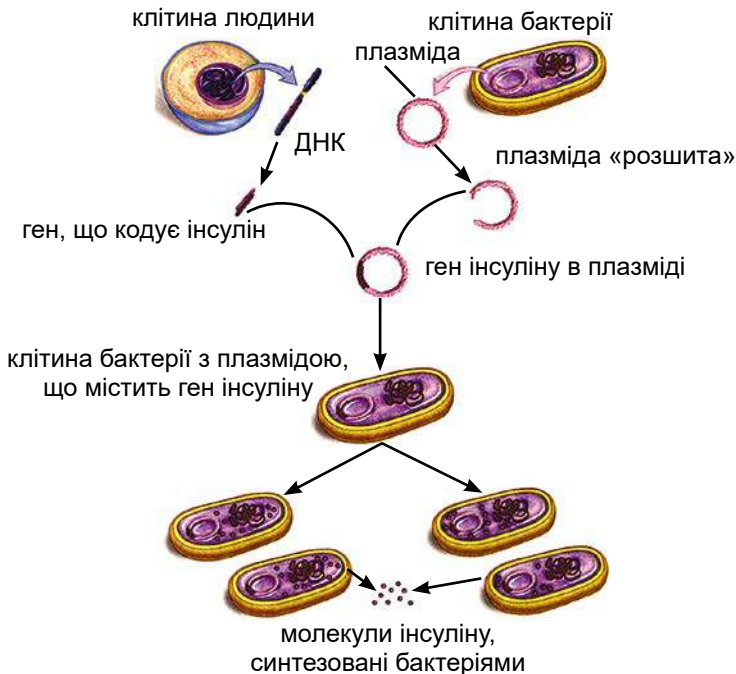
Мал. 51.1. Технологія створення рекомбінантної молекули ДНК

Генетично трансформовані організми створюють у кілька послідовних етапів. Спочатку здійснюють пошук потрібного гена та вирізають його з геному за допомогою специфічних ферментів. Потім створюють **вектор** – особливу ДНК-конструкцію, призначену для внесення гена в клітину. Цей вектор, крім потрібного гена, має містити послідовності нуклеотидів, необхідні для вбудовування в геном клітини або для здатності до самостійного копіювання (реплікації).

Як переносники (вектори) рекомбінантних молекул ДНК використовують віруси та плазмиди прокаріотів. Наприклад, виділяють молекулу мРНК, яка містить певний ген, що цікавить дослідників, і на ній синтезують комплементарну нитку ДНК. Так виникає ДНК-РНК-комплекс, з якого мРНК видаляють, а на нитці ДНК, що залишилася, за принципом комплементарності синтезують другу. Її вбудовують у молекулу ДНК плазмиди, яка слугує переносником. За іншої методики молекулу ДНК розділяють на окремі фрагменти. Далі ці фрагменти сполучають із заздалегідь переведеною у лінійну форму молекулою векторної ДНК. У такому вигляді вони потрапляють усередину клітини, відокремлюються від переносника та приєднуються до ДНК хазяїна.

Методика рекомбінантної ДНК пов'язана з перенесенням генетичного матеріалу (молекули нуклеїнової кислоти або її фрагмента) з одного організму в інший.

Об'єктами досліджень генетичної інженерії раніше були переважно прокаріоти. Наприклад, у геном бактерій було введено гени пацюка і людини, які відповідають за синтез гормону інсуліну, потрібного хворим на цукровий діабет I типу (мал. 51.2). Але часто недостатньо просто ввести гени еукаріотів у прокаріотичну клітину. Вони мають там



Мал. 51.2. Перенесення генів у бактеріальну клітину

«працювати». А для цього потрібно, щоб ці гени потрапили під контроль регуляторних елементів клітини хазяїна.

Цікаво знати. Важливий внесок у методику редагування геному організмів здійснили Дженіфер Даудна (народ. 1964 р.), американська вчена у галузі біохімії та генетики, та Емманюель Шарпантьє (народ. 1968 р.), французька мікробіологиня. Вони застосували так звані генетичні «ножиці», за допомогою яких з високою точністю можна редагувати геном організмів. Їхнє відкриття, яке вважають одним з найвизначніших у галузі молекулярної біології та генетичної інженерії, створило нові перспективи для селекції різних груп організмів, а також лікування онкологічних та спадкових захворювань. За результати своїх досліджень ці вчені були удостоєні 2020 р. Нобелівської премії з хімії.

Практичне застосування результатів генетичної інженерії. Завдяки методам генетичної інженерії від генетично змінених бактеріальних клітин отримано білки інтерферони (*пригадаймо*: вони є однією з ланок неспецифічного гуморального імунітету), гормон росту (дає можливість лікувати деякі форми карликовості під час росту організмів людини і свійських тварин), вакцини проти збудників дифтерії, гепатиту В та інших важких захворювань. Перелік медичних препаратів, отриманих за допомогою методів генетичної інженерії, щорічно зростає. Наприклад, з використанням різних штамів цвілевих грибів, актиноміцетів, бактерій отримують понад 4500 різних видів антибіотиків.

Будь-який ген (відповідний фрагмент ДНК) можна синтезувати біохімічним шляхом. Уперше це зробив американський учений Гар Гобінд Корана (1922–2011), який 1970 р. синтезував ген тРНК дріжджів.

Результати досліджень у галузі генетичної інженерії важливі і для розвитку теоретичної біології. Завдяки їм було зроблено важливі відкриття про будову та функціонування генів, структуру геномів різних видів та ін. Для генетичної інженерії важливим є створення банків генів, тобто колекцій генетичного матеріалу. Банки генів широко застосовують у селекції та для збереження біорізноманіття нашої планети.

Застосування методів генетичної інженерії в медицині. Перспективним напрямом медичної генетики є *генна терапія* – медична процедура, під час якої у хворого вилучають певні типи клітин (крові, епітелію шкіри або кишки тощо), замінюють їхні дефектні алельні гени нормальними, а потім вводять генетично змінені клітини в організм. Завдяки цьому в організмі хворої людини можуть синтезуватися білки, яких до цього не вистачало. За певних онкологічних та інфекційних захворювань методами генної терапії можна пригнічувати активність генів, не притаманну нормальній клітині, або, навпаки, посилювати її (наприклад, для посилення синтезу гемоглобіну в осіб із серпоподібноклітинною анемією).

Ще одним напрямом генної терапії, що ґрунтується на методиках визначення алелів, які зумовлюють певні спадкові захворювання або схильність до них, є *молекулярна діагностика спадкових захворювань*. Вона базується на застосуванні методів молекулярної генетики, які дають змогу виявляти мутації, здатні спричинити генетичні захворювання та вади. За допомогою методів молекулярної діагностики можна поставити діагноз задовго до появи симптомів захворювання і, відповідно, розпочати його вчасну профілактику або лікування.

Генетично модифіковані організми. Нині багато уваги приділяють *генетично зміненим*, або *трансгенним*, *організмам* (їх ще називають *генетично модифікованими організмами* – **ГМО**). Наприклад, методами генетичної інженерії в геном рослин вводять певні гени, які забезпечують стійкість до дії пестицидів, шкідників, збудників захворювань, інших несприятливих факторів навколишнього середовища. Зокрема, до геному певних сортів картоплі вводять гени бактерій, що робить цю рослину неїстівною для колорадського жука.

Генетично модифіковані організми часто мають підвищені показники продуктивності та плодючості, що важливо для розв'язання проблеми забезпечення людства продуктами харчування. З 1996 р. у США, Канаді, Аргентині та інших країнах розпочали масово вирощувати генетично змінені рослини. Але до таких організмів, доки вони не пройдуть належної всебічної перевірки, слід ставитись обережно. Є побоювання, що споживання генетично змінених рослин може спричиняти в людини харчові алергії та отруєння, погіршення здоров'я тощо. Невідомо також, як впливатимуть генетично змінені організми на природні екосистеми та їхнє біологічне різноманіття.

Цікаво знати. Дискусії щодо трансгенних організмів зумовили ухвалення в Україні закону «Про державну систему біобезпеки під час здійснення генетично-інженерної діяльності». Він передбачає обов'язкове наукове оцінювання ризику застосування генетично модифікованих організмів.

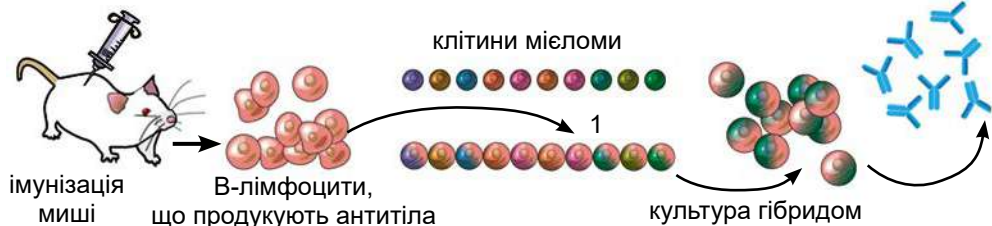
Клітинна інженерія – галузь біотехнології, у якій використовують методи виділення клітин з організму, їхньої перебудови і вирощування на поживних середовищах (створення культури клітин; так звані *цитотехнології*). Культури клітин дають змогу отримати важливі сполуки: вітаміни, гормони, фітогормони, лікарські препарати (наприклад, женьшеню) у потрібних кількостях, що значно знижує їхню собівартість. Вони слугують для різноманітних експериментів, наприклад, вивчення дії лікарських препаратів та інших речовин тощо.

Культури клітин застосовують і для культивування вірусів, які згодом можуть бути використані як переносники (вектори) в генетичній інженерії для діагностики вірусних захворювань чи отримання вакцин. Ще один з важливих напрямів цитотехнології – діагностування патологій різних органів завдяки дослідженню виділених з них клітин.

Методами клітинної інженерії здійснюють *віддалену гібридизацію соматичних клітин* організмів, яку неможливо зробити іншим способом (людини і миші, людини і моркви, курки і дріжджів тощо). За допомогою цього методу можна з'єднати в одну кілька попередньо оброблених соматичних клітин (зокрема, у клітин рослин треба зруйнувати клітинні оболонки), які належать віддаленим щодо систематичного положення організмам. Для рослин така процедура може мати результатом виведення нового сорту з новими властивостями.

За допомогою гібридизації лімфоцитів (здатних виробляти антитіла певного типу) та пухлинних клітин (здатних необмежено тривалий час розмножуватись у культурі) отримують так звані *гібридоми* – клітини, що не тільки виробляють високоспецифічні антитіла, а й можуть розмножуватись тривалий час (мал. 51.3). Вони знищують клітини злоякісних пухлин, не діючи на здорові.

уведення антигенів



Мал. 51.3. Технологія отримання гібридом: 1 – злиття клітин В-лімфоцитів та мієломних клітин, унаслідок чого отримують гібридами

Також за допомогою гібридизації клітин здійснюють: штучне запліднення – злиття статевих клітин, яке неможливе природним шляхом; перенесення клітин з культури в організм тощо. Генетично модифіковані ембріональні клітини (після їх розмноження в культурі) вводять у зародок на стадії бластули та поміщають такий зародок у сурогатну матір.

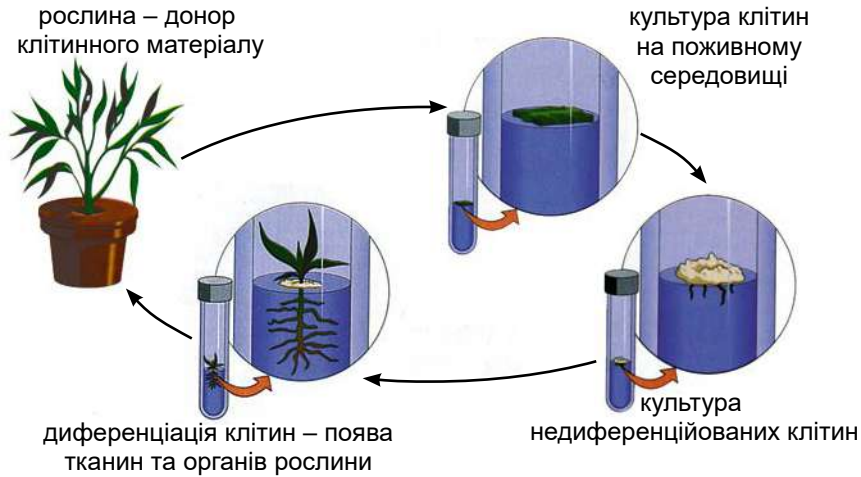
Одним з напрямів клітинної інженерії є використання стовбурових клітин для відновлення ушкоджених тканин та органів. У лабораторних умовах можна стимулювати стовбурові клітини до розмноження та подальшої спеціалізації. Властивістю стовбурових клітин є те, що вони можуть кровоносною системою просуватись до джерела ураження й відновлювати пошкоджені органи та тканини. Це відкриває перспективи отримати тканини та органи людини й тварин поза організмом з метою їхнього подальшого введення в організм (трансплантації).

Трансплантація (від лат. *трансплантацио* – пересаджування) – процес пересадження реципієнту (особині, яка потребує подібної операції) органів або тканин (їх називають трансплантатами), взятих у донора або клонованих у лабораторних умовах.

Як вихідний матеріал стовбурових клітин людини використовують, наприклад, клітини пупкового канатика, що сполучає зародок з організмом матері, або плаценти. Встановлено, що пуповинна кров, яка містить стовбурові клітини, може бути використана в майбутньому житті людини при лікуванні різноманітних захворювань.

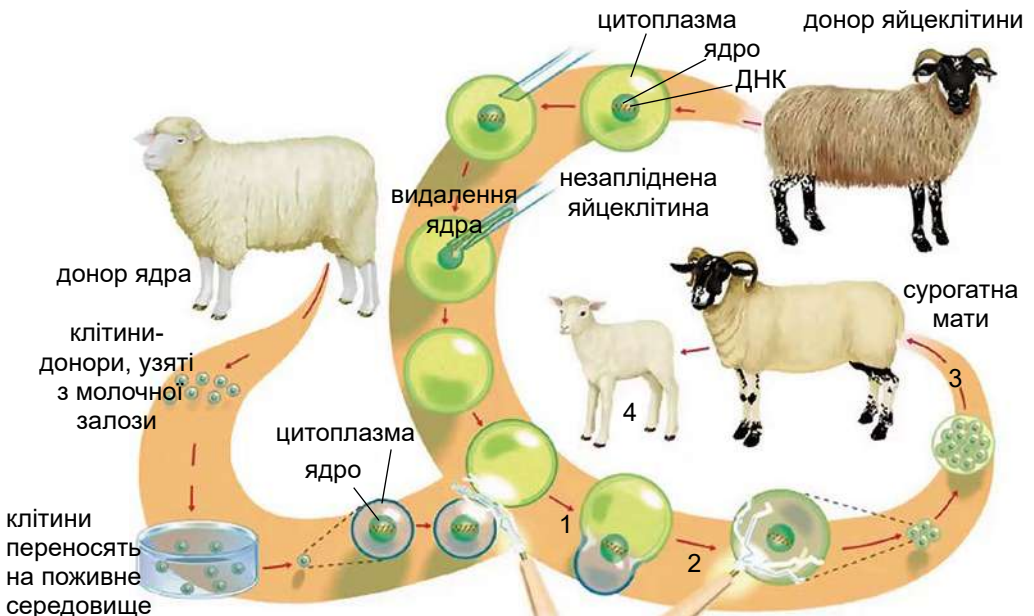
Крім етичних проблем, на шляху до широкого впровадження методик пересаджування стовбурових клітин або отриманих з них тканин чи органів є багато невирішених наукових питань. Зокрема, важко досягти того, щоб організм розпізнавав введені тканини чи органи як «свої» та не боровся з ними. Тому нині стовбурові клітини використовують для лікування лише незначної кількості захворювань.

Клонування організмів – ще один напрям клітинної інженерії. **Клон** – це сукупність клітин або особин, отриманих від спільного предка нестатевим шляхом. Клон складається з генетично однорідних клітин або організмів. Клонування організмів базується на тому, що кожна соматична клітина містить повну генетичну інформацію, притаманну цьому організму. Тому з неї, за певних умов, теоретично можна виростити цілий організм. Для рослин, які здатні розмножуватися вегетативним шляхом, така процедура є звичайною в сучасній біотехнології (мал. 51.4).



Мал. 51.4. Клонування рослин

Методика клонування тварин починається з того, що з незаплідненої яйцеклітини видаляють ядро і пересаджують до неї ядро соматичної клітини іншої особини. Після цього таку штучну зиготу імплантують у матку самки – сурогатної матері, де й розвивається ембріон (мал. 51.5). Цю методику створено в розрахунку на можливість отримувати від цінних за своїми якостями плідників необмежену кількість нащадків, які є їхньою точною генетичною копією. Але оскільки в



Мал. 51.5. Перша успішно клонована тварина – вівця Доллі (1996 р.). Схематично показано основні етапи створення клону: 1 – перенесення ядра з клітини молочної залози в яйцеклітину без ядра; 2 – злиття клітин під впливом електричних імпульсів; 3 – імплантація ембріона в організм сурогатної матері; 4 – вівця Доллі

кожній спеціалізованій соматичній клітині тварин певні групи генів заблоковано, для клонованих організмів (клони отримано уже для багатьох хребетних тварин) характерний високий рівень смертності, вкорочений час життя та поява різних аномалій.

Отже, хоча роботи з клонування тварин мають вагомий науковий інтерес, практична цінність їх наразі залишається невисокою. У принципі можна клонувати й людину, проте в багатьох країнах це заборонено законодавством, насамперед з етичних міркувань.

Гістотехнології – напрям досліджень, який розробляє методики тривалого зберігання (консервації) тканин поза організмом і виготовлення тканинних та клітинних препаратів для наступного вивчення й практичного застосування. Гістотехнологічні методи дають змогу вчасно встановити наявність патологічних змін у тканинах, які свідчать про розвиток певного захворювання, зокрема злоякісних пухлин.

✓ **Дізнайтеся більше** про метод отримання трансгенних тварин за QR-кодом.



Стрімкий науковий прогрес, зокрема й у галузі біології та медицини, іноді ставить дослідників перед питанням: чи варто з метою отримання швидкого результату нехтувати певними моральними засадами, яких людське суспільство дотримувалося впродовж багатьох віків. Зокрема, це стосується прав людини та поваги до життя тварин. Дати відповіді на ці питання покликана біоетика.

✓ **Дізнайтеся більше** про використання сучасних біологічних знань у медицині та про біоетику за QR-кодом.



Узагальнення

Генетична інженерія – це сукупність прийомів, методів і технологій, що дають змогу виділяти гени з організму або клітини, синтезувати їх поза організмом, переносити й вводити в ті самі чи інші організми. У результаті отримують генетично модифіковані організми (ГМО), генотип яких змінено штучно. Клітинна (цитотехнології) та тканинна (гістотехнології) інженерія – це напрями біології, що вивчають та застосовують методи культивування рослинних і тваринних клітин і тканин поза організмом для отримання сполук, потрібних людині. Ці технології використовують також під час клонування рослин і тварин. Клон – це сукупність клітин або особин, отриманих від спільного предка нестатевим шляхом.

Поміркуйте

1. Яка роль генетичної інженерії в розвитку теоретичної біології?
2. Батькам під час народження дитини часто пропонують збирати пуповинну кров і зберігати її в умовах низьких температур у банках крові. Яке це може мати значення для подальшого збереження здоров'я такої людини?
3. Які проблеми етичного плану можуть виникнути під час клонування людини?

Підіб'ємо підсумки з теми

І. Досліджую природу

1. Учні, готуючись до дослідження «Визначення схожості кількох сортів культурної рослини та вплив стимуляторів росту на біологічні ознаки вирощуваних рослин», визначали змінні. Учень визначив схожість рослин як залежну змінну, а вплив стимуляторів – незалежну. Учениця додала, що певні сорти рослини та препарати стимуляторів будуть контрольованими змінними. Хто з них має рацію?

- А учень
- Б учениця
- В обидва мають рацію
- Г обидва помиляються

2. Прочитайте інформацію про дослідження «Урожайність зерна гібридів кукурудзи в різних агрокліматичних зонах». Проаналізуйте інформацію, зібрану науковцями в таблиці. Виберіть гіпотезу, яку найімовірніше науковці висували до дослідження.

В екологічному випробуванні гібридів кукурудзи, яке щорічно проводять науковці компанії «Маїс» в 17 екопунктах України, 2021 року нові гібриди найповніше розкрили свій генетичний потенціал. Урожайність зерна в різних агрокліматичних зонах й у гібридів різних груп стиглості (ФАО) коливалась у межах 9,05–14,59 т/га. ФАО – індекс скоростиглості гібридів кукурудзи. Що менше ФАО, то швидше досягає гібрид.

Урожайність гібридів кукурудзи в екологічному випробуванні в 2021 р. (середнє значення з трьох повторень), т/га

Гібриди	ФАО	Степ			Лісостеп	
		Дніпропетровська обл.		Кіровоградська обл.	Черкаська обл.	Тернопільська обл.
		Солоне	Верхньодніпровськ	Успенка	Катеринопіль	Чортків
ДМС Ефес	250	12,97	10,25	9,05	11,55	14,19
ДМС Прайм	260	12,07	10,58	11,07	11,43	14,59
ДМС Гроно	260	11,76	11,58	9,19	12,11	12,99
ДМС Альянс	290	10,71	9,75	9,41	11,09	11,55
ДМС Шатл	310	14,20	9,34	9,34	12,40	13,64
ДМ Експенсів	320	14,13	11,60	10,35	12,28	11,72

А на врожайність гібридів кукурудзи не впливають відмінності в агрокліматичних зонах

Б найвищу врожайність у степовому регіоні формуватимуть скоростиглі гібриди; у достатньо зволоженому, але помірно прохолодному регіоні – пізніших груп

В індекс скоростиглості гібридів кукурудзи не впливає на урожайність зерна гібридів кукурудзи

Г найвищу врожайність у степовому регіоні формуватимуть гібриди пізніших груп; у достатньо зволоженому, але помірно прохолодному регіоні – скоростиглі

II. Опрацювую та використовую інформацію

1. Розгляньте схему «Генотерапія». Прочитайте та проаналізуйте твердження.

1.1. I. Для заміни дефектного гена на нормальний використовують віруси.

II. Генетичні помилки в організмі людини з хворобою виправляють, вводючи в нього векторний вірус із рекомбінантною ДНК.

А правильне лише I твердження

Б правильне лише II твердження

В обидва твердження правильні

Г немає правильних тверджень

1.2. I. У людини з хворобою беруть клітину з дефектним геном, вводять нормальний ген і повертають до організму.

II. РНК-умісні віруси використовують як вектори під час перенесення спадкового матеріалу, оскільки вони вводять спочатку рекомбінантну РНК.

А правильне лише I твердження

Б правильне лише II твердження

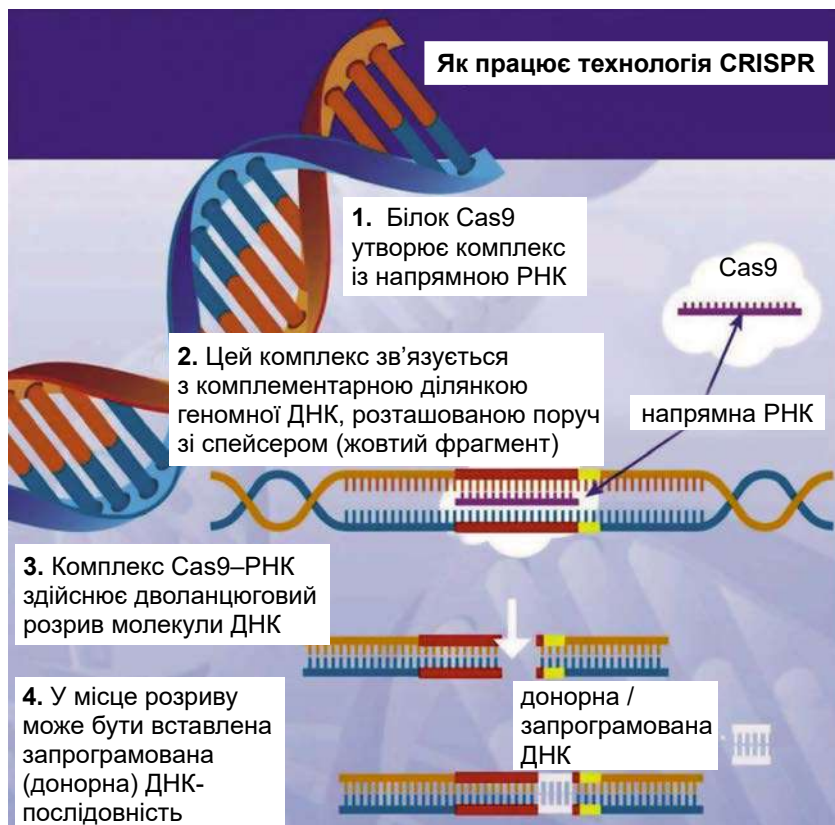
В обидва твердження правильні

Г немає правильних тверджень



2. Опрацюйте інформацію та розгляньте малюнок. Виберіть твердження «Так» чи «Ні».

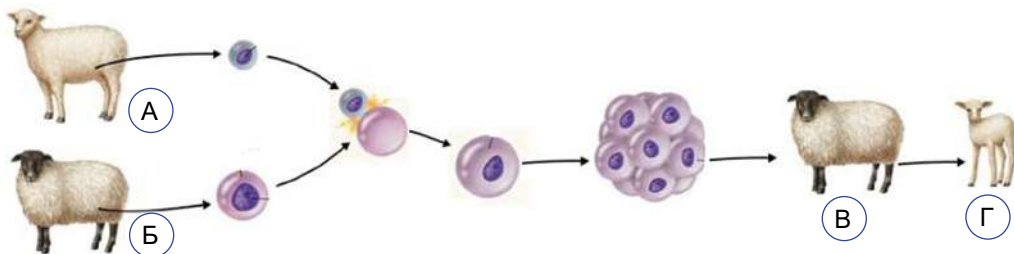
Одним з методів генної терапії стала технологія CRISPR (Clustered regularly interspaced short palindromic repeats), яку подано на схемі. Наприкінці лютого 2018 року вчений із Шеньчженьського університету оголосив, що вперше у світі йому вдалося успішно відредагувати геном людської яйцеклітини. Для цього він використав технологію редагування ДНК – CRISPR/Cas9, а потім здійснив штучне запліднення. Метою редагування було наділити дітей резистентністю до ВІЛ – вимкнути ген CCR5, який кодує білок, що дає змогу вірусу потрапити до клітини. Головна перевага такої системи – здатність до ідентифікації дуже маленької ділянки ДНК. Потенційно цей метод може допомогти подолати захворювання – від спадкових до тих, що поки ще залишаються невиліковними (рак, ВІЛ, хвороба Альцгеймера). Унаслідок застосування цієї технології патологічний ген може втратити свою функцію чи буде замінений на нормальну копію.



Уперше успішне редагування геному вчені Шеньчженьського університету провели на прикладі клітини молочної залози вівці	Так	Ні
Ця технологія дає можливість ввести в організм на місце нормальних генів додаткові гени з новими ознаками, взяті від тварини	Так	Ні
Для редагування геному дітей і вироблення стійкості до ВІЛ було використано ген CCR5	Так	Ні
Перспектива використання технології CRISPR у тому, що можна впливати на невиліковні хвороби, змінюючи патологічні гени	Так	Ні
Застосування технології CRISPR має результатом синтез мРНК на базі мутантної ДНК	Так	Ні
Одним з етапів технології CRISPR є знаходження дефектного фрагмента ДНК та заміна його на нормальну копію	Так	Ні
Під час використання технології CRISPR дефектні гени не виправляються, вводяться ферменти для зміни обміну речовин	Так	Ні

III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Укажіть роль вівці В у клонуванні вівці Доллі.



А є джерелом генетичної інформації
Б є сурогатною матір'ю, що виносила клон

В є донором соматичної клітини
Г є донором яйцеклітини

2. На малюнку зображено агрус, смородину та їхній гібрид (1). Така гібридизація належить до (2).



А 1 – грейпфрут, 2 – міжвидової
Б 1 – йохшта, 2 – міжвидової

В 1 – церападус, 2 – внутрішньовидової
Г 1 – тайберрі, 2 – внутрішньовидової

3. Утворіть пари між методом селекції (1–4) та прикладом його застосування (А–Д).

- 1 штучний мутагенез
- 2 неспоріднена внутрішньовидова гібридизація
- 3 споріднена внутрішньовидова гібридизація
- 4 міжвидова (віддалена) гібридизація

А отримання цілої рослини гібіскусу з групи клітин, які ростуть на поживному середовищі

Б вплив іонізуючого опромінення на пшеницю тверду для отримання мутантних форм

В самозапилення кукурудзи протягом кількох поколінь для отримання чистих ліній

Г отримання продуктивних гібридів F1 кавуна від схрещування двох сортів або чистих ліній

Д виведення рафанобрасики – гібриду капусти та редьки

Компетентнісно орієнтоване завдання

М'ясо в гаражі. Ілля побачив в ютубі ролик аматора, який планує вирощувати у власному гаражі м'ясо як культуру клітин, і звернувся до двоюрідного брата Миколи, який вчиться в магістратурі на факультеті біотехнології, з питанням: чи справді таке можливо? Микола відповів, що сподівання саме цього аматора сумнівні, насамперед тому, що навряд він зможе забезпечити відповідний рівень стерильності, без якого все загине за добу.

«Зважмо на те, що обладнання доволі вартісне: термостат-інкубатор з відео коштує десь 2 тис. євро (€), а ще йому знадобляться шафа для маніпуляцій (теж 1,5–2 тис. €), 3D-біопринтер (професійний – від 10 до 30 тис. €) і лабораторний мінімум (піпетки,

пробірки, фільтри тощо, теж на 500 €). Інвестиційний мінімум стартапу 15–20 тис. €. Ми підраховували з партнерами з Люксембургу, навіть оцінили, скільки коштуватимуть клітинний матеріал і середовища для росту на 1 кг готового продукту – покажу».

«Утім, – продовжив Микола – цей ринок цілком бурхливо розвивається. Є вже з півтори сотні компаній, частина навіть отримала дозволи й продає свою продукцію. Наприклад, в Ізраїлі компанія Aleph Farms фокусується саме на вирощуванні яловичини. До того ж намагається зробити саме «повноцінний шматок» м'яса (стейк), а не просто м'ясний фарш».

✓ **Дізнайтеся більше** про вирощене м'ясо за QR-кодом.



1. Ілля прочитав перелік компаній, які працюють на ринку вирощеного м'яса (cultivated meat). Його зацікавило, чому серед десяти компаній три з Ізраїлю (і дві з Сінгапуру)? Наведіть два **різних** міркування.

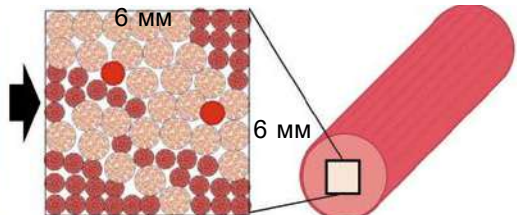
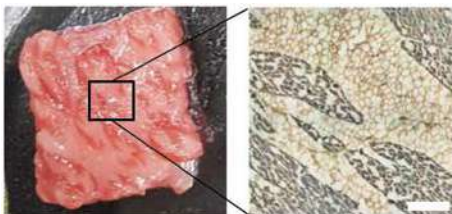
2. Після ознайомлення з основами технології вирощеного м'яса у проєкті Миколи, Ілля узагальнив: «Тож для вирощування м'яса треба три клітинні лінії (м'язові, жирові й сполучнотканинні). Але ж вони не в повітрі й не просто у воді!» – «Так, – погодився Микола, – потрібен желеподібний матрикс (гідрогель) з альгінату й колагену».

«Альгінат? Я, здається, бачив його в продуктовому магазині, його з водоростей отримують, так?» Микола посміхнувся: «Ну, колаген ти теж бачив у магазині!».

Який з харчових продуктів містить колаген?



3. «І який відсоток об'єму займає матрикс?» Микола запропонував: «Сам розрахуй за нашим малюнком».



● Волокна з м'язових клітин $\varnothing$ 0,5 мм, 42 шт.

● Волокна із жирових клітин $\varnothing$ 0,75 мм, 26 шт.

● Волокна сполучної тканини (фіброblastи) $\varnothing$ 0,6 мм, 2 шт.

Демонстраційний шматок вирощеного м'яса (ліворуч), мікропрепарат (по центру) і схема складання вирощених волокон (праворуч) комерційного м'яса.

Розділ 4

Розрахуйте, спираючись на дані схеми, який відсоток займає простір між окремими волокнами (**підказка: згадайте формулу площі кола**).

Відповідь: _____%

4. «Схоже, це не найбільша стаття витрат у культивуванні, – підсумував Ілля. – А що коштувало найбільше? Ти обіцяв показати ваші розрахунки!»

Микола показав таблицю:

	Відсоток вмісту в м'ясі	Вартість на 1 кг продукту, €	Вартість у продукті на 1 % вмісту, €
М'язові клітини	45,8	916,2	20
Жирові клітини	45,8	1374,3	30
Фібробласти	2,6	39,3	15
Гідрогель		57,5	10

«Ого! – жажнувся Ілля, – це ж _____ €/кг, дорожче, ніж найдорожча мармурова яловичина в супермаркеті!»

5. «І, – продовжив міркувати Ілля, – чи не забагато жиру (який, до слова, й коштує в культивуванні дорожче)? Якщо взяти менше жирової тканини, більше м'язових волокон, ну, наприклад, 70 % м'яз : 20 % жир : 5 % фібробласти : 5 % гідрогель? Дивись, у мене така діаграма вийшла!»

«Більше м'язових клітин? Ні, так точно буде дорожче!» – сказав Микола.

Чи правильно Микола оцінив вартість клітинних компонентів? Наведіть розрахунк.

☐ Так ☐ Ні

6. Микола розповів, що вони проводили SWOT-аналіз – оцінювали **Strengths** (переваги) і **Weaknesses** (недоліки) їхнього стартапу й **Opportunities** (можливості) та **Threats** (загрози) зовнішнього середовища.

Оберіть ДВІ найбільші загрози для цього стартапу:

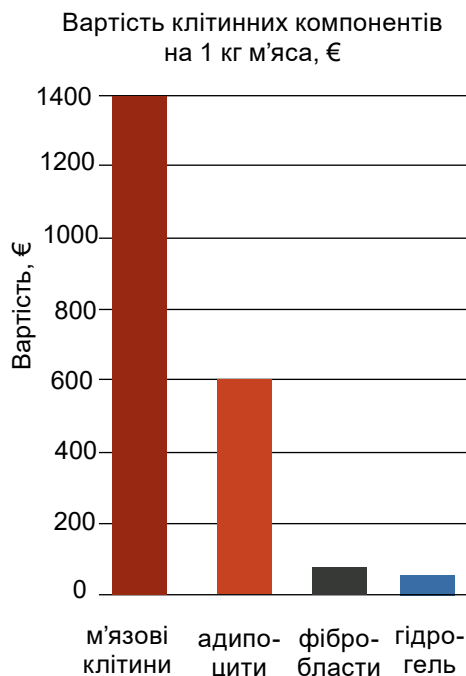
А неготовність споживачів їсти м'ясо, яке ніколи не було частиною живої тварини

Б регуляторні аспекти: відсутність законодавчої бази в Україні й відсутність дозволів у ЄС

В необхідність дотримання високого рівня біобезпеки (стерильність, утилізація відходів)

Г висока вартість вирощеного м'яса порівняно із ціною на традиційне

Д заперечення з боку організацій, які опікуються станом навколишнього середовища, біоетикою, правами тварин



Тема 6.

Людина і біосфера



До яких наслідків може призвести зникнення певного трофічного рівня в трофічному ланцюзі?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Біосферні заповідники України»; «Види тварин і рослин Червоної книги України своєї місцевості»; «Екологічні катастрофи на території України, їхні наслідки»; «Основні причини зниження біорізноманіття нашої планети»; «В. Вернадський – видатний український науковець».

Творчий проєкт:

«Які екологічні піраміди можуть бути перевернуті?»; написання есе (твору, розповіді): «Мої кроки на шляху до сталого розвитку»; «Урбанізація та її наслідки для довкілля»; створення лепбука «Природоохоронні території України»; створення колажу «Продуктивність екосистем у біосфері».

Практико-орієнтований проєкт:

«Розпізнавання екологічного маркування на предметах побуту та продуктах харчування»; «Дослідження власного екологічного (вуглецевого, водного тощо) сліду для планування покупки продуктів (товарів) для родини».

Науково-дослідницький проєкт:

«Виявлення рівня антропогенного впливу на екосистеми своєї місцевості»; «Дослідження особливостей структури місцевих екосистем та впливу на них урбоекосистем».

Ігровий проєкт:

гра «Екологічне лото»; розв'язання екологічних дилем.

§ 52. Структура та функціонування екосистем.

Зв'язки, що виникають між організмами в екосистемах



Чи відрізняється функціонування малих і великих за розміром екосистем?

Екологія як природнича наука існує вже понад 155 років. Назву «екологія» запропонував 1866 р. видатний німецький біолог Е. Геккель (мал. 52.1).

Цікаво знати. Ернст Генріх Геккель – один з авторів біогенетичного закону. Він перший запропонував зіставляти дані різних наук для встановлення родинних зв'язків між різними групами організмів. Розробив спосіб графічного відображення родинних зв'язків між різними групами організмів у вигляді філогенетичних дерев.

Екологія (від грец. *ойкос* – середовище, житло та *логос* – вчення) виникла як наука про взаємозв'язки організмів та їхніх угруповань між собою і навколишнім



Мал. 52.1. Ернст Генріх Геккель (1834–1919)

середовищем, про структуру та функціонування надорганізмових систем (популяцій, екосистем, біосфери тощо).

✓ **Дізнайтеся більше** про основні завдання та методи дослідження екології за QR-кодом.



Сучасна екологія розширила предмет своїх досліджень за межі біологічних систем різного рівня організації. Із суто біологічної науки вона перетворилася на комплексну дисципліну, увібравши в себе дані інших наук: географії, геології, хімії, фізики, соціології, економіки тощо. У зв'язку із цим український учений В. Ю. Некос (мал. 52.2) запропонував називати сучасний стан екології *неоекологією*.



Мал. 52.2. Некос Володимир Юхимович (1938–2010): відомий український еколог, професор Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Брав активну участь у розвитку екологічної освіти в Україні

Неоекологія (від грец. *неос* – новий) – комплекс наук, які вивчають розвиток, функціонування та прогнозування сучасного розвитку біосфери, розробляють принципи та методи управління взаємовідносинами у системі «природа – людське суспільство» для їхньої гармонізації та забезпечення екологічно безпечного існування.

Популяція як структурна одиниця виду та екосистеми. Одним із рівнів організації живого є популяційно-видовий.

- **Популяція** (від лат. *популюс* – народ, населення) – це сукупність особин виду, які тривалий час мешкають у певній частині його ареалу, частково чи повністю ізольовано від інших подібних сукупностей особин цього самого виду, і характеризуються певним генофондом (сукупністю всіх алельних генів, притаманних особинам цієї популяції).

Кожна популяція є **структурно-функціональною одиницею виду**. Це пов'язано з тим, що будь-який вид становить собою систему взаємопов'язаних популяцій. Лише зрідка вид може бути представлений однією популяцією (як-от у деяких рідкісних і зникаючих видів або видів-ендемів¹).

Унаслідок взаємодії популяції певного виду з комплексом усіх екологічних чинників середовища існування (як неживої природи, так і з особинами популяцій інших видів) формується власна *екологічна ніша*.

- **Екологічна ніша** – це трофічне (визначається характером їжі, яку споживають організми) й просторове положення популяції певного виду в екосистемі. Вона формується внаслідок взаємодії з популяціями інших видів та факторами неживої природи.

Усі популяції організмів, які входять до складу певної екосистеми, пов'язані між собою більш-менш тісними взаємозв'язками. Зв'язки між популяціями різних видів бувають антагоністичними, нейтральними та мутуалістичними.

¹ Вид-ендем (від грец. *ендемос* – місцевий) – вид, який має дуже обмежений ареал.

За **антагоністичних взаємозв'язків** (наприклад, конкуренція, паразитизм) кожна із взаємодіючих популяцій різних видів зазнає негативного впливу іншої. Найчіткіше цей вплив відчувається, коли особини різних видів змагаються за обмежені ресурси.

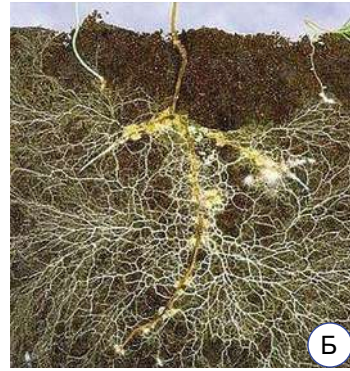
Конкуренція (від лат. *конкуро* – бігти разом, збігатися) – тип взаємовідносин між особинами одного (*внутрішньовидова*) або різних (*міжвидова*) видів, які змагаються за їжу, місця проживання та інші важливі для існування умови, негативно впливаючи одне на іншого. Найгострішу конкуренцію спостерігають між представниками виду / видів з подібними екологічними вимогами. Прикладом внутрішньовидової конкуренції може слугувати **одновіковий сосновий ліс** (мал. 52.3).



Мал. 52.3. Приклад внутрішньовидової конкуренції – одновіковий сосновий ліс (швидкорослі особини пригнічують тих, які ростуть повільніше)

За **нейтральних взаємозв'язків** жоден з видів, що мешкають на спільній території, не відчуває на собі безпосереднього негативного чи позитивного впливу з боку іншого. Наприклад, популяції хижаків різних видів, які живляться різними видами здобичі, можуть не конкурувати між собою.

За **мутуалістичних (взаємовигідних) зв'язків** кожен із взаємопов'язаних видів має певну користь (*пригадаймо* взаємозв'язки бульбочкових бактерій і бобових рослин, одноклітинних джгутикових евкаріотів і комах, у кишці яких вони мешкають, тощо). Приклади мутуалістичних відносин наведено на малюнку 52.4.



Мал. 52.4. Приклади мутуалістичних відносин: А – рак-самітник та актинія; Б – мікориза (гриби і коренева система дерева)



Яку користь від мутуалістичних відносин має кожен з організмів, зображених на мал. 52.4?

✓ **Дізнайтеся більше** про показники, що характеризують стан популяцій, за QR-кодом.



Біоценоз та екосистема. Популяції різних видів існують у природі не відокремлено, а пов'язані між собою різноманітними зв'язками.

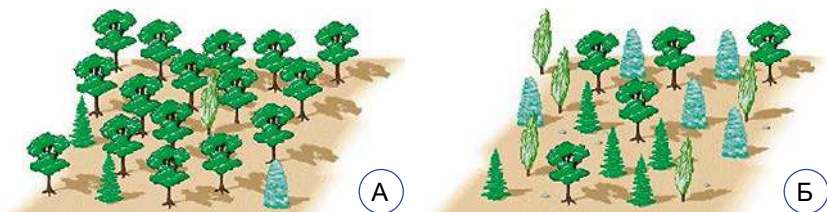
Угрупування взаємопов'язаних між собою популяцій організмів різних видів, які населяють ділянку місцевості з однорідними умовами існування, називають **біоценозом** (від грец. *біос* – життя та *койнос* – спільний).

Екосистема (від грец. *ойкос* та *система* – поєднання) – сукупність популяцій організмів різних видів, які взаємодіють між собою і з неживою природою таким чином, що всередині такої системи виникають потоки енергії та колообіг речовин. Поняття «екосистема» запропонував 1935 р. англійський учений Артур Тенслі (1871–1955). Він розглядав екосистеми як функціональні одиниці природи нашої планети, що можуть охоплювати будь-які ділянки біосфери.

На початку 40-х років ХХ ст. було запропоновано термін **біогеоценоз** (від грец. *біос*, *ге* – земля та *койнос*). Під цим терміном розуміють певну територію з більш або менш однорідними умовами життя, населену взаємопов'язаними популяціями різних видів, які об'єднані між собою та фізичним середовищем існування колообігом речовин і потоками енергії. Основою будь-якого біогеоценозу є угруповання організмів, здатних до фотосинтезу. Екосистема, на відміну від біогеоценозу, не обов'язково охоплює ділянку місцевості з однорідними умовами існування.

В екосистемі виокремлюють *біотичну* (сукупність популяцій організмів – біоценоз) та *абіотичну* (умови фізичного середовища існування) частини. Кожна екосистема характеризується певним видовим багатством, біомасою, продуктивністю, густотою видових популяцій, площею або об'ємом, яку вона займає. *Видове багатство* екосистеми визначається числом видів, популяції яких входять до її складу. Є екосистеми з незначним (пустелі, тундра) і значним (тропічні ліси, коралові рифи) видовим багатством.

Термін *видове багатство* враховує лише кількість видів, які населяють певну територію або водойму, тоді як термін *видове різноманіття* характеризує не тільки кількість видів, а й співвідношення їхньої чисельності (мал. 52.5). Наприклад, одні види переважають інших за числом особин у певній екосистемі, тоді як інші можуть бути представлені лише поодинокими особинами. Цей показник часто характеризує внесок окремих видів у забезпечення функціонування певної екосистеми.



Мал. 52.5. А. Екосистема з високим ступенем домінування певного виду.

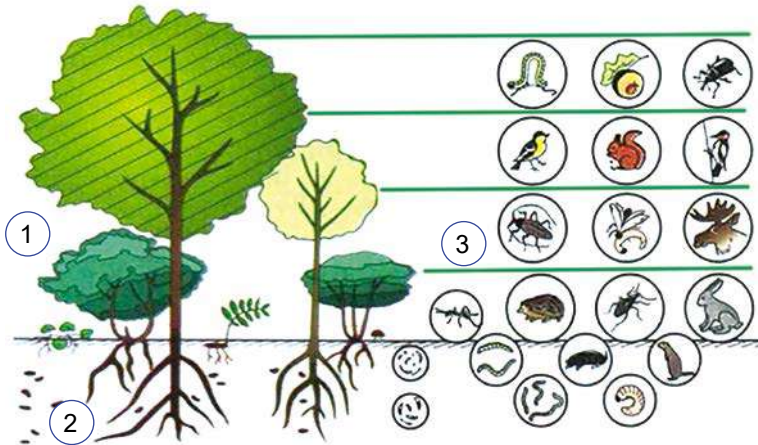
Б. Екосистема, де відсутнє чітке домінування окремих видів



Зробіть припущення щодо можливих причин високого ступеня домінування окремих видів в екосистемі.

Видове багатство часто залежить від тривалості існування екосистеми: у процесі становлення та її розвитку число видів здебільшого зрос-

тає. Види з найчисленнішими популяціями визначають характер екосистеми (наприклад, ковила в ковиловому степу, дуб і граб – у дубово-грабовому лісі). Кожна екосистема характеризується певною видовою та просторовою структурою. **Видова структура** зумовлена як видовим багатством, так і співвідношенням чисельності й густоти популяцій окремих видів. Види, які переважають чисельно, називають **домінуючими** (від лат. *домінантіс* – панівний). **Просторова структура** визначається насамперед **ярусністю**. Ярусне розташування в екосистемі рослин (оскільки різні види мають різну висоту) знижує конкуренцію за світло, тварин – за кормові ресурси (мал. 52.6).



Мал. 52.6. Вертикальна ярусність лісової екосистеми: надземна (1) та підземна (2) ярусність рослин; 3 – рослини визначають і ярусне розташування організмів, пов'язаних з ними (грибів, тварин, мікроорганізмів)

Узагальнення

Екологія – наука, що вивчає взаємозв'язки між організмами та навколишнім середовищем, а також структуру й функціонування надорганізмових біологічних систем. Популяція – це сукупність особин виду, які тривалий час мешкають у певній частині його ареалу, частково чи повністю ізольовано від інших подібних сукупностей особин цього самого виду, і характеризуються певним генофондом. Кожна популяція в екосистемі займає свою екологічну нішу, що визначається трофічним та просторовим рівнем її особин в екосистемі. Популяції різних видів існують взаємопов'язано та формують біоценоз. Екосистема – сукупність популяцій організмів різних видів, які взаємодіють між собою і з неживою природою таким чином, що всередині такої системи виникають потоки енергії та колообіг речовин.

Поміркуйте

1. У той час, коли було запропоновано термін «біогеоценоз», уже існувало поняття «екосистема». Чим, на вашу думку, була зумовлена необхідність введення терміну «біогеоценоз»?

2. Чи існують взаємозв'язки між біотичною та абіотичною частинами екосистеми? Наведіть приклади.

3. Чи можуть два види тварин або рослин займати одну екологічну нішу в певній екосистемі?

§ 53. Потоки енергії та колообіг речовин в екосистемах



Як відбувається потік енергії в екосистемі?

Взаємозв'язки між організмами в екосистемах. Різні групи організмів, які разом становлять біотичну частину екосистеми, об'єднані між собою просторовими і трофічними (кормовими) зв'язками. Їх об'єднують у такі групи:

- **продуценти** (від лат. *продуцентіс* – той, що створює) – популяції автотрофних організмів, здатних синтезувати органічні речовини з неорганічних (фототрофні або хемотрофні організми);

- **консументи** (від лат. *консумо* – споживаю) – популяції гетеротрофних організмів, які споживають готову органічну речовину: вони живляться живими істотами (як-от фітофаги, хижаки, паразити), продуктами їхньої життєдіяльності чи рештками організмів (наприклад, сапротрофи);

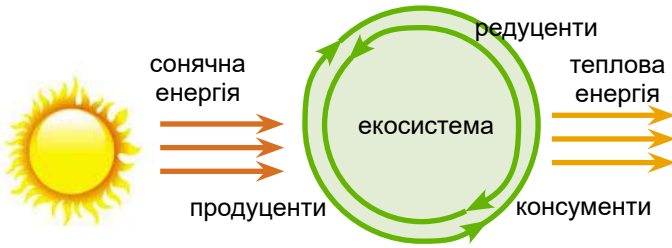
- **редуценти** (від лат. *редуцентіс* – той, що повертає, відновлює) – популяції організмів, які, споживаючи органічну речовину решток організмів (чи продукти життєдіяльності), здатні розкласти її до неорганічних сполук (різноманітні бактерії, гриби).

Трофічні зв'язки між популяціями різних видів в екосистемі та їхня взаємодія із чинниками неживої природи забезпечують **колообіг речовин** – обмін речовинами між **абіотичною (неживою)** та **біотичною (живою)** частинами екосистем. Саме колообіг речовин і потоки енергії, які виникають усередині екосистеми, зв'язують усі їхні складові в єдину цілісну функціональну систему.

Перетворення енергії в екосистемах. Основним джерелом енергії для екосистем нашої планети є сонячне світло. Фотосинтезуючі організми (фототрофи) вловлюють його і перетворюють на енергію хімічних зв'язків органічної речовини, яку вони синтезують. Частину накопиченої енергії рослини витрачають на забезпечення власних процесів життєдіяльності, інша переходить до організмів, які споживають зелені рослини або їхні рештки (мал. 53.1).

Гетеротрофи отримують необхідну їм енергію внаслідок ферментативного розщеплення готових органічних речовин. Вони засвоюють для синтезу речовин свого тіла лише незначну частину енергії, що міститься у сполюках їжі (близько 10–20 %); решта енергії, витрачаючись на забезпечення процесів життєдіяльності, розсіюється у вигляді тепла. Подібне спостерігають і під час поїдання фітофагів хижакими тощо (мал. 53.1).

Оскільки на кожному етапі передавання енергії від одних організмів до інших більша частина її витрачається (розсіюється у вигляді тепла), то лише незначна частка перетворюється на потенційну енергію хімічних зв'язків синтезованих ними сполук.

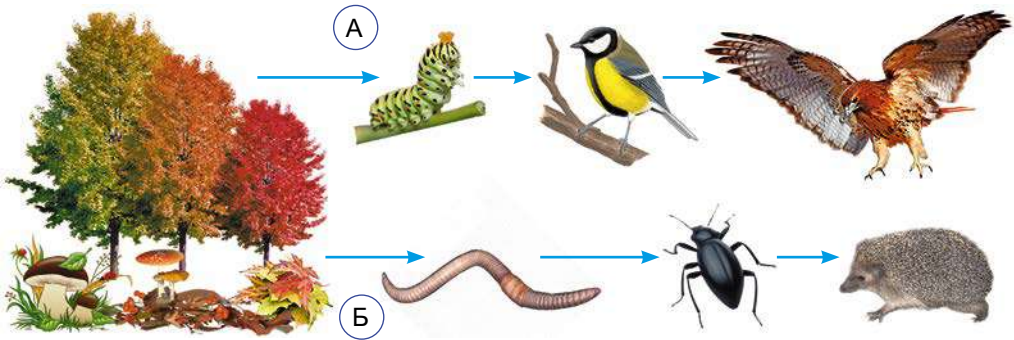


Мал. 53.1. Екосистема як відкрита біологічна система



Прокоментуйте схему, наведену на малюнку 53.1.

Послідовності, в яких особини одного виду, їхні рештки або продукти життєдіяльності слугують об'єктом живлення для організмів іншого, називають **трофічними ланцюгами (ланцюгами живлення)**. Кожен трофічний ланцюг складається з певної кількості ланок (мал. 53.2). Оскільки під час переходу від попередньої ланки до наступної значна частина енергії втрачається, то кількість ланок обмежена і зазвичай не перевищує 4–5.



Мал. 53.2. Типи трофічних ланцюгів: А – пасовищний (виїдання), починається з продуцентів; Б – детритний (розкладання), починається з мертвої органіки



Проаналізуйте структуру наведених на малюнку 53.2 трофічних ланцюгів й установіть трофічні рівні організмів, що входять до їхнього складу; запропонуйте свої варіанти пасовищного й детритного трофічних ланцюгів.

Популяція кожного виду займає в трофічному ланцюзі певне положення – **трофічний рівень**. Здебільшого першою ланкою у трофічному ланцюзі є продуценти. Наступні трофічні рівні належать консументам. Вони визначаються кількістю ланок, через яку до них з їжею надходить енергія, накопичена продуцентами. Так, рослиноїдні тварини займають наступний після продуцентів трофічний рівень (**консументи I порядку**), далі йде рівень хижаків, які живляться рослиноїдними видами (**консументи II порядку**) тощо.

Якщо консументи споживають різні види їжі, вони можуть перебувати на різних трофічних рівнях у різних трофічних ланцюгах. Наприклад, сіра ворона може живитися зерном (як консумент I порядку); пташенятами зерноїдних (як консумент II порядку) чи комахоїдних (як консумент III порядку) видів птахів.

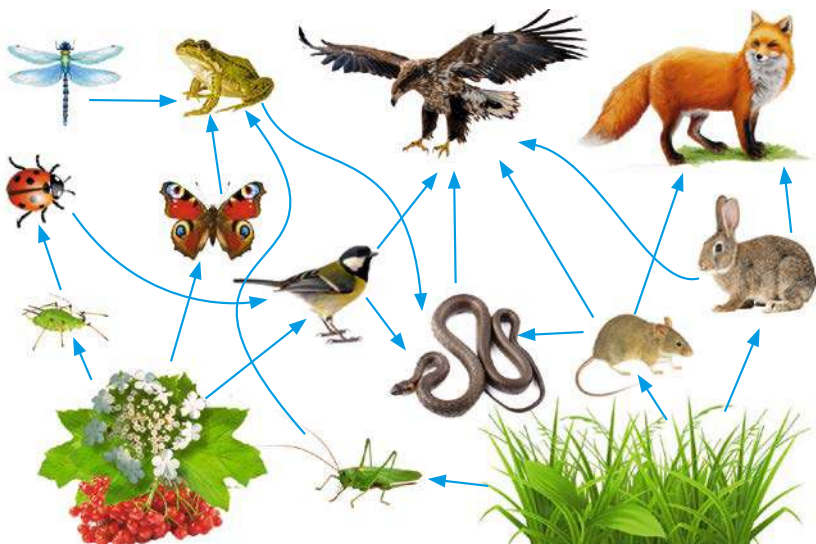
Відмерлі продуценти або їхні частини, як-от листяний опад, рештки чи продукти життєдіяльності організмів, також становлять кормо-

ву базу для консументів і редуцентів, які в кілька етапів розкладають такі органічні сполуки до неорганічних.

Отже, в екосистемі енергія у вигляді хімічних зв'язків органічних сполук накопичується на рівні продуцентів, проходить через організми консументів і редуцентів, але на кожному з послідовних трофічних рівнів значною мірою розсіюється у вигляді тепла.

Оскільки під час передавання енергії від нижчого трофічного рівня до вищого більша її частина втрачається у вигляді тепла, колообіг енергії в екосистемах, на відміну від колообігу речовин, неможливий. Тому для функціонування екосистеми потрібне постійне надходження енергії ззовні.

Трофічна мережа. У будь-якій екосистемі трофічні ланцюги тісно переплетені завдяки тому, що представники одного й того самого виду можуть бути ланками різних ланцюгів. Переплітаючись, ці джерела їжі формують *трофічну мережу (трофічну сітку; мал. 53.3)*. Її існування забезпечує стійкість екосистеми, бо в разі зниження чисельності популяцій певних видів і навіть зникнення окремих видів ці джерела їжі можуть бути замінені на інші. При цьому сумарна продуктивність екосистеми може не змінюватися. Що розгалуженіша трофічна мережа, то стійкіша екосистема.



Мал. 53.3. Приклад трофічної мережі



Спробуйте визначити окремі трофічні ланцюги та схарактеризуйте їх.

Продуктивність екосистем. Кожна екосистема характеризується певною продуктивністю. *Продуктивність екосистеми* визначається масою органічної речовини, створеної за одиницю часу, в перерахунку на одиницю площі або об'єму (наприклад, 5000 т/1000 м² на рік). Розрізняють продуктивність *первинну* та *вторинну*, створену відповідно автотрофними та гетеротрофними організмами.

Закономірності передавання енергії та біомаси в екосистемі від нижчих трофічних рівнів до вищих дістали назву **правила екологіч-**

ної **піраміди**: на кожному попередньому трофічному рівні кількість біомаси та енергії, що запасуються організмами за одиницю часу, значно більша, ніж на наступних.

Графічно це правило можна зобразити у вигляді піраміди, складеної з окремих блоків. Кожен із таких блоків відповідає продуктивності організмів на відповідному трофічному рівні трофічного ланцюга. Так, кількісні закономірності передавання маси органічної речовини від одного трофічного рівня трофічного ланцюга до іншого, вищого, відображає **піраміда біомаси** (мал. 53.4).



Мал. 53.4. Приклад екологічної піраміди біомаси

Піраміда біомаси демонструє таку закономірність: консументи I порядку запасують у 5–10 разів меншу біомасу, ніж продуценти, яких вони споживають. І так само далі: з кожною наступною ланкою трофічного ланцюга біомаса, яку запасують організми вищого трофічного рівня, зменшується приблизно у 5–10 разів порівняно з тією, яку вони споживають.



Визначте трофічні рівні, на яких розміщені організми, що входять до трофічних ланцюгів піраміди біомаси.

Відповідні закономірності передавання енергії від однієї ланки трофічного ланцюга до іншої демонструє **піраміда енергії**. Кожний її блок відповідає кількості хімічної енергії, яка запасується на відповідному трофічному рівні. Піраміда енергії показує, що більша частина енергії під час передавання з нижчого трофічного рівня на вищий витрачається у вигляді тепла, а запасується лише 10–20 % порівняно з попереднім.



До складу екосистем входять такі екологічні групи організмів: продуценти, консументи та редуценти. Без якої з них, на вашу думку, можуть існувати екосистеми? Відповідь обґрунтуйте.

Узагальнення

За трофічними зв'язками організми певної екосистеми об'єднують у три групи: продуценти, консументи та редуценти. Послідовності, у яких особини одного виду, їхні рештки або продукти життєдіяльності слугують об'єктом живлення для організмів іншого виду, називають трофічними ланцюгами. Переплітаючись, трофічні ланцюги формують трофічну мережу екосистеми. Передавання енергії та біомаси від нижчих трофічних рівнів до вищих підпорядковане правилу екологічної піраміди: на кожному попередньому рівні кількість біомаси та енергії, що запасується організмами, значно більша, ніж на наступному.

Поміркуйте

1. Які екосистеми продуктивніші – із більш розгалуженою чи менш розгалуженою трофічною мережею?
2. Чому в піраміді біомаси біомаса продуцентів має переважати над біомасою організмів, що перебувають на вищих трофічних рівнях?
3. Без яких трофічних рівнів можуть функціонувати екосистеми?



Практична робота «Складання різних типів трофічних ланцюгів».



Практична робота «Розв'язання елементарних вправ з екології (вправи на правило екологічної піраміди)».

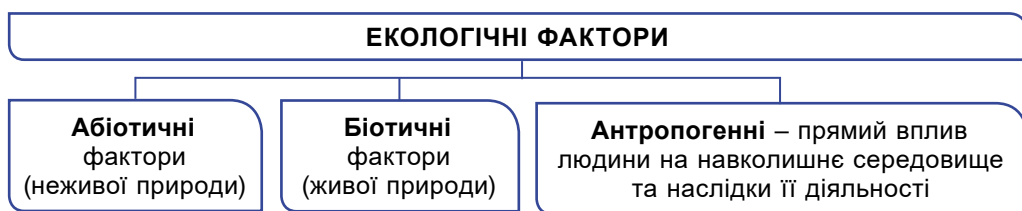


§ 54. Екологічні фактори. Стабільність екосистем і причини її порушення



Як різні екологічні фактори впливають на зміни в екосистемах?

Екологічні фактори та їхня класифікація. Усі складові навколишнього середовища, що впливають на стан і властивості організмів та їхніх угруповань, називають *екологічними факторами (екологічними чинниками)*. Залежно від природи та особливостей дії їх ділять на абіотичні, біотичні та антропогенні (мал. 54.1).

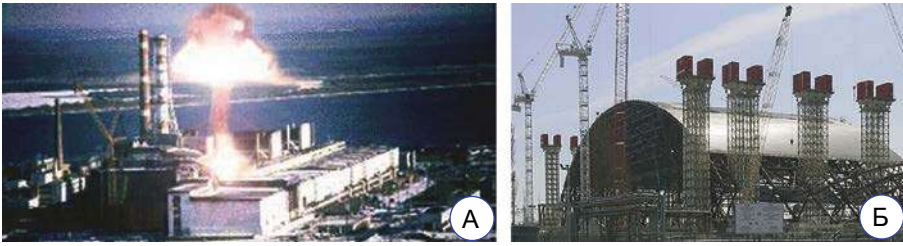


Мал. 54.1. Класифікація екологічних факторів

Абіотичні фактори – це компоненти та властивості неживої природи (температура, освітленість, вологість, газовий склад повітря, тиск, сольовий склад води тощо), які прямо або опосередковано впливають на окремі організми та їхні угруповання.

Біотичні фактори – це різні форми взаємодій між особинами в популяціях (*внутрішньовидові зв'язки*) і між популяціями різних видів (*міжвидові зв'язки*) в угрупованнях.

Антропогенні (антропічні) фактори – різні форми господарської діяльності людини та їхні наслідки, що змінюють стан середовища існування всіх видів живих істот, серед яких – і сама людина. За відносно короткий період існування людини як біологічного виду її господарська діяльність докорінно змінила вигляд нашої планети, і щорічно цей вплив на природу зростає. Інколи антропогенний вплив набуває форми екологічної катастрофи, як, наприклад, вибух на Чорнобильській атомній електростанції 1986 р. (мал. 54.2) або на атомній електростанції у Фукусімі (2011 р., Японія).



Мал. 54.2. А. Катастрофа на Чорнобильській атомній електростанції 1986 р.
Б. Спорудження оновленого саркофага над зруйнованим четвертим блоком (2016 р.)

Інтенсивність дії екологічних факторів – це певні їхні кількісні значення (наприклад, показники температури, вологості, освітленості тощо). Інтенсивність дії деяких екологічних факторів може залишатися відносно постійною протягом тривалих історичних періодів розвитку біосфери (наприклад, сонячне випромінювання, сила тяжіння, сольовий склад морської води, газовий склад атмосфери). Однак більшість з них має мінливу інтенсивність дії (температура, вологість, освітленість тощо).

Принцип єдності організмів та їхнього середовища існування полягає в тому, що особини кожного виду протягом тривалого історичного розвитку пристосовуються (адаптуються) до умов певного середовища існування, внаслідок чого в них формуються відповідні адаптації.

✓ **Дізнайтеся більше** про вплив екологічних факторів на організми за QR-кодом.



Стабільність екосистем. Становлення певної екосистеми – складний і тривалий історичний процес, під час якого організми різних видів адаптуються до умов фізичного середовища існування, а також одне до одного. За цей час ускладнюється структура екосистеми, формуються такі її властивості, як цілісність, стійкість, здатність до самовідтворення та саморегуляції.

Цілісність екосистем забезпечують взаємодії популяцій різних видів усередині такої системи між собою та з фізичним середовищем (чинниками неживої природи). Такі взаємодії, як вам уже відомо, створюють потоки енергії та колообіг речовин.

Здатність екосистем до самовідтворення зумовлена властивістю організмів відновлювати свою чисельність та умови власного існування.

Стійкість екосистем проявляється в їхній здатності протистояти несприятливим зовнішнім впливам без руйнування власної структури.

Саморегуляція екосистем полягає в тому, що кількісні та якісні показники їхньої продуктивності, густоти популяцій різних видів, швидкості колообігу речовин і потоків енергії коливаються навколо певних оптимальних значень.

Регульовальними факторами при цьому є як внутрішньовидові, так і міжвидові зв'язки, що корегують чисельність та густоту окремих популяцій, унаслідок чого підтримується гомеостаз екосистеми загалом.

Щойно густота популяції певного виду перевищить деякий середній (оптимальний) рівень, в екосистемі починають діяти регулювальні механізми (наприклад, вплив популяцій хижаків на популяції здобичі, паразитів – на популяції хазяїна, фітофагів – на популяції рослин тощо). Під **гомеостазом екосистеми** розуміють динамічну сталість її складу та властивостей, що забезпечується різноманітними зв'язками між різними компонентами біотичної (живої) та абіотичної (неживої) частин.

Вплив екологічних факторів на зміни в екосистемах. Будь-яка екосистема може нормально функціонувати лише за більш-менш стабільних умов довкілля, що потрібно для здійснення колообігу речовин. Хоча екосистеми до певної міри здатні підтримувати сталість своєї структури, однак у них можуть відбуватися циклічні або поступальні зміни. *Циклічні зміни* є наслідком пристосувань екосистем до періодичних (добових, сезонних тощо) змін навколишнього середовища.



Пригадайте, які сезонні зміни відбуваються в екосистемах вашої місцевості.

Поступальні зміни відбуваються в разі відновлення зруйнованих екосистем (наприклад, відтворення лісів і степів на місці згарищ тощо) або незворотних змін у певному напрямі кліматичних умов (вологості, середньорічної температури тощо). Вони зрештою можуть призводити до заміни екосистеми одного типу на інший.

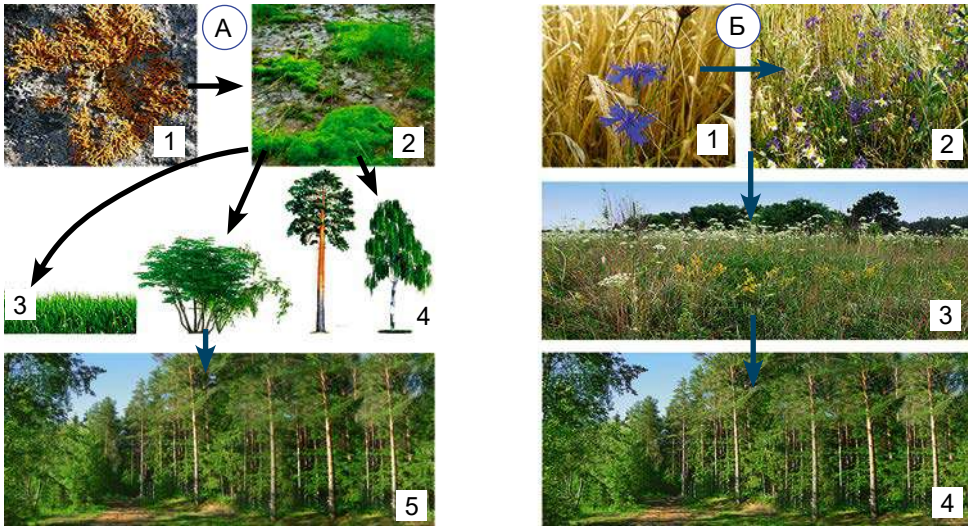
Спрямовані послідовні зміни угруповань організмів, які з плином часу зумовлюють перетворення самої екосистеми, називають **сукцесією** (від лат. *сукцесіо* – наступність, спадкування).

Угруповання організмів, які існують на початкових етапах сукцесії, мають незначне видове різноманіття, слабко розгалужені трофічні мережі, у них спостерігають різкі коливання чисельності й густоти окремих популяцій. Із часом вони заміщуються більш конкурентоспроможними видами, видове багатство екосистем поступово зростає. Як наслідок, підвищується здатність екосистем до саморегулювання. Цей процес триває, аж поки не сформується багатовидова екосистема з максимально можливим у відповідних умовах ступенем стійкості (доки не стабілізуються колообіг речовин і потоки енергії).

Сукцесії можуть бути первинними і вторинними. **Первинні сукцесії** – це поява й розвиток рослинних угруповань у місцях, де рослинності раніше не було (оселення вищих рослин на піщаних узбережжях або лишайників на скельних породах тощо) (мал. 54.3, А). Наприклад, оселення сосни звичайної на пісках істотно змінює умови існування такого угруповання: затінюючи поверхню ґрунту, сприяючи надходженню до нього органіки, утриманню ґрунтової води, сосна створює можливість для оселення інших видів рослин. Тип рослинного угруповання, зі свого боку, визначає і видовий склад тварин.

Вторинні сукцесії – відновлення природної рослинності після певних порушень, наприклад відновлення лісів після пожеж. Вторинну сукцесію, зокрема, можна спостерігати на прикладі кинутого поля (мал. 54.3, Б). Культурні рослини витісняються більш конкурентоспроможними дикорослими трав'янистими, згодом можлива поява кущів і дерев.

Сукцесія завершується формуванням зрілих стійких екосистем зі значним видовим різноманіттям, розвинутими механізмами саморегу-



Мал. 54.3. Приклади сукцесії: А – первинна сукцесія: 1 – оселення лишайників на скельній породі; 2 – заселення первинного ґрунту мохами; 3 – утворення трав'янистого рослинного покриву; 4 – формування угруповання із світлолюбних деревних і трав'янистих рослин; 5 – формування екосистеми лісу; Б – вторинна сукцесія: замість культурних рослин (1) розвиваються бур'яни (2); 3 – формування трав'янисто-чагарникової рослинності; 4 – формування молодого соснового лісу

ляції, здатністю до самовідтворення. Такі дозрілі екосистеми перебувають у стані рівноваги з фізичним середовищем.

Прикладом штучної екосистеми є **агроценози** (від грец. *агрос* – поле та *койнос*) – збіднені видами високопродуктивні угруповання рослин, тварин, грибів і мікроорганізмів, створені людиною для отримання сільськогосподарської продукції. Від природних екосистем агроценози докорінно відрізняються властивостями та особливостями функціонування. Незначне видове різноманіття та погано розгалужені трофічні мережі зумовлюють слабку стійкість агроценозів, але високу продуктивність одного чи кількох видів у їхньому складі.

Незважаючи на те, що до складу агроценозів можуть входити представники дикої фауни та флори, без яких вони не здатні існувати, в агроценозах, на відміну від природних екосистем, майже відсутня саморегуляція. Без постійного втручання людини вони руйнуються і зникають.

Унаслідок вирощування на значних площах протягом років одного чи кількох видів культурних рослин в агроценозах можливе масове розмноження бур'янів, шкідників і паразитів рослин (комах, гризунів, паразитичних грибів тощо) (*поміркуйте*, як можна цьому запобігти).

Для забезпечення функціонування агроценозів людина має постійно запобігати процесам сукцесії, оскільки культурні рослини менш конкурентоспроможні, ніж дикі. На відміну від природних екосистем, в агроценозах не відбувається колообіг речовин, оскільки більшу частину їхньої продукції людина вилучає у вигляді врожаю. Створюючи агроценози, людина повинна враховувати зв'язки, що існують між

організмами в природних угрупованнях, а також ті, які можуть виникати між культурними та дикими організмами за їхнього спільного існування.

За високі врожаї людина розплачується високими витратами матеріальних ресурсів, зокрема за внесення мінеральних та органічних добрив, обробіток ґрунтів, полив тощо.



За допомогою вчительки / вчителя та використовуючи різні джерела інформації, запропонуйте заходи з підвищення стійкості та продуктивності агроценозів. Поясніть необхідність наукових досліджень для розв'язання таких завдань.

Узагальнення

Усі складники навколишнього середовища, що впливають на стан, розвиток і властивості організмів та їхніх угруповань, називають екологічними факторами (екологічними чинниками). Їх поділяють на абіотичні (умови неживої природи), біотичні (вплив живих організмів) та антропогенні (вплив діяльності людини). Спрямовані послідовні зміни угруповань організмів, що можуть призвести до заміни екосистеми одного типу іншим, називають сукцесією. Розрізняють природні екосистеми та штучні, створені людиною, – агроценози.



Поміркуйте

1. Чому до дії одних і тих самих абіотичних факторів різні організми можуть адаптуватися по-різному?
2. У яких випадках варто зменшувати вплив антропогенного чинника на агроценози?
3. Чому продуктивність лісу та парку різна?

§ 55. Біосфера як цілісна глобальна екосистема. Учення В. І. Вернадського про біосферу та ноосферу



Чому біосфера не становить окремої самостійної оболонки Землі?

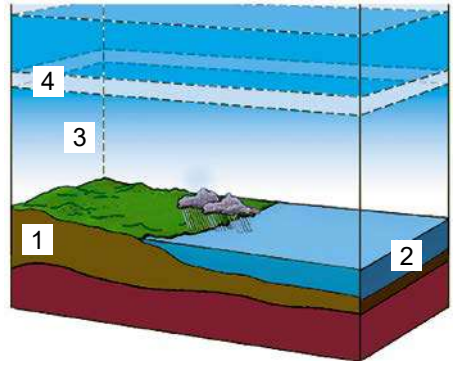
Загальна характеристика біосфери. Планета Земля оточена оболонками (мал. 55.1): твердою (літосферою), рідкою (гідросферою) та газоватою (атмосферою). **Літосфера** (від грец. *літос* – камінь та *сфера* – куля, сфера) – зовнішня тверда оболонка Землі. Вона складається з поверхневого шару переважно осадових порід, сформованого за участю живих істот (вапняк, крейда, кремнезем тощо), граніту (середній шар) та базальту (нижній шар). У літосфері життя сконцентровано здебільшого у поверхневих шарах – ґрунті. На глибинах 2–4 км можуть існувати лише деякі групи бактерій, переважно в нафтоносних шарах.

Сукупність усіх водойм (океанів, морів, річок, озер тощо) утворює водну оболонку – **гідросферу** (від грец. *хідор* – вода та *сфера*), яка охоплює майже 71 % поверхні планети та в деяких місцях сягає понад 11 км завглибшки. У гідросфері життя існує на будь-яких глибинах.

Атмосфера (від грец. *атмос* – пара та *сфера*) – це газова оболонка, розташована над поверхнею літосфери та гідросфери. Поширення організмів у атмосфері (переважно у вигляді спор і цист) визначається розташуванням озонового екрана, бо вище за нього майже все живе гине під дією космічного випромінювання.

Озоновий екран (озоносфера) – шар атмосфери, у межах якого концентрація молекул озону (O_3) майже в 10 разів вища, ніж біля поверхні планети. Озоновий екран у різних ділянках атмосфери розташований на висоті від 15 до 35 км. Його товщина може варіювати залежно від сезону та географічного положення. Висока концентрація молекул озону забезпечує поглинання ультрафіолетової частини сонячного випромінювання (насамперед з короткою довжиною хвиль), яке згубно впливає на організми, зокрема здатне спричиняти мутагенну дію.

Біосфера (від грец. *біос* – життя та *сфера*) не утворює окремої оболонки Землі, а охоплює верхню частину літосфери, всю гідросферу та нижній шар атмосфери. Вона є сукупністю всіх екосистем Землі, тобто єдиною глобальною екосистемою. Найвищу концентрацію біомаси в біосфері спостерігають у місцях з найбільш різноманітними умовами існування, а саме: на межах літосфери та атмосфери, атмосфери та гідросфери, гідросфери та літосфери.



Мал. 55.1. Межі біосфери:
1 – літосфера; 2 – гідросфера;
3 – атмосфера; 4 – озоновий екран

Цікаво знати. Поняття «біосфера» 1875 р. запропонував австрійський геолог Едуард Зюсс (1831–1914), а вчення про неї як частину геологічних оболонок Землі, населену організмами, створив видатний український учений В. І. Вернадський.

Учення В. І. Вернадського про ноосферу. Розвиток природничих наук сприяв розумінню того, що людина повинна підпорядковуватися законам природи як її складова частина, а не намагатися їх змінити. Ще в першій половині XX ст. В. І. Вернадський передбачав, що біосфера під впливом наукової думки й людської праці переходить у новий стан – ноосферу.

• **Ноосфера** (від грец. *ноос* – розум та *сфера*) – якісно нова форма організації біосфери, яка формується внаслідок її взаємодії з людським суспільством, коли буде досягнуто гармонійне співіснування природи та людини.

Сучасний стан біосфери – **біотехносфера** – зумовлений прямим або опосередкованим впливом технічних засобів для забезпечення матеріальних і соціально-економічних потреб людини. Це призводить до вичерпання природних ресурсів, зниження відновлювальних можливостей біосфери внаслідок порушення природного колообігу речовин та потоків енергії. Тому перетворення біосфери на ноосферу є одним з головних завдань, які стоять перед людством, неодмінною умовою його виживання.

До розв'язання будь-яких проблем людина повинна підходити з позицій **екологічного мислення**, тобто підпорядкування повсякденної практичної діяльності законам природи та вимогам охорони навколишнього природного середовища.

Жива речовина біосфери та її властивості. Усю сукупність організмів на планеті Земля В. І. Вернадський називав **живою речовиною**. Основними її характеристиками є сумарна біомаса, хімічний склад та енергія. *Енергія живої речовини біосфери* насамперед проявляється у здатності організмів до розмноження та поширення. Життя на нашій планеті має значну стійкість до змін інтенсивності дії різних екологічних факторів. Тому організмів у межах біосфери немає лише в товщі льодовиків і кратерах діючих вулканів.

Однією з властивостей живої речовини є її *постійний обмін з довкіллям*. Організмам потрібні певні речовини й енергія, які вони отримують з навколишнього середовища, істотно змінюючи його. Як наслідок, різні хімічні елементи надходять у живі істоти, можуть у них накопичуватись і виходити в довкілля через певний час або лише після їхньої загибелі. Жива речовина (фототрофні організми) здатна вловлювати сонячну світлову енергію, перетворюючи її на енергію хімічних зв'язків синтезованих сполук. Сумарна продукція автотрофних організмів визначає біомасу біосфери загалом.

Цікаво знати. Завдяки фотосинтезу щорічно жива речовина Землі продукує близько 160 млрд тонн сухої органічної речовини, з якої приблизно 1/3 припадає на екосистеми Світового океану, а 2/3 – суходолу.

✓ **Дізнайтеся більше** про біохімічні функції живої речовини за QR-кодом.



Роль організмів у перетворенні оболонок Землі. Організми беруть участь в утворенні осадових порід, ґрунту, формуванні атмосфери, змінюючи оболонки Землі. Осадові породи виникають на дні водойм унаслідок нашарування різних нерозчинних речовин, значна частина яких має біогенне походження. З решток істот, які накопичують у своїх скелетах, мушлях, панцирах карбонати, фосфати, силіцій(II) оксид, утворюються різноманітні осадові породи (вапняк, крейда, кремнезем, радіоларити, діатоміти), які часто сягають значної товщини.

У накопиченні кремнеземних осадових порід (SiO_2) беруть участь одноклітинні евкаріоти – радіоларії та діатомові водорості. Радіоларити (осадові породи, утворені переважно зі внутрішньоклітинних скелетів радіоларій) представлені кременистими глинами, родовищами напівкоштовних каменів (яшми, опалів, халцедону). Поклади фосфоритів та апатитів (солей ортофосфатної кислоти, що їх застосовують як мінеральні добрива та сировину для промисловості) утворені залишками особливих вимерлих груп морських тварин, які мали черепашки із кальцій ортофосфату.

Кам'яне та буре вугілля утворилося за особливих умов з відмерлих решток рослин. Поклади залізної руди – це здебільшого наслідки діяльності хемотрофних залізобактерій. Є гіпотези біогенного походження нафти, природного газу тощо.

Організми беруть участь і у вивітрюванні (руйнуванні) гірських порід. Наприклад, лишайники, оселяючись на скелях, виділяють органічні кислоти, які руйнують гірські породи. Цим процесам сприяють і гіфи грибів, що проникають у тріщини скельних порід.

Організми забезпечують основні ґрунтоутворювальні процеси: розкладання органічної речовини до мінеральних сполук, які споживають рослини, утворення гумусу (що становить запас органічних сполук у ґрунті) тощо. Унаслідок цього мінеральні елементи літосфери включаються в біогенну (за участі організмів) частину колообігу речовин.

Завдяки життєдіяльності організмів підтримується сталий газовий склад атмосфери. Так, атмосферний кисень має фотосинтетичне походження. Рослинність Землі щорічно поглинає десятки мільярдів тонн вуглекислого газу і виділяє сотні мільярдів тонн кисню, який використовують у процесі дихання всі аеробні організми.

Цікаво знати. В. І. Вернадський заснував науку – **біогеохімію**, яка вивчає біогеохімічні процеси, що відбуваються в біосфері за участі живої речовини. 1918 р. він організував першу у світі біогеохімічну лабораторію.

Узагальнення

Біосфера – це цілісна глобальна екосистема нашої планети, яка оточена кількома оболонками: літосферою, гідросферою й атмосферою. Біосфера частково охоплює літосферу й атмосферу та повністю – гідросферу. В. І. Вернадський створив вчення про ноосферу – нову форму організації біосфери, що виникає внаслідок взаємодії природи з людським суспільством. Усю сукупність організмів на Землі вчений назвав живою речовиною. Організми беруть активну участь у перетворенні оболонок нашої планети, зокрема в утворенні осадових порід і ґрунту, формуванні атмосфери, змінюючи інші оболонки Землі.

Поміркуйте

1. З якими умовами стикаються організми, що мешкають на найбільших глибинах гідросфери?
2. Чому в атмосфері можливість існувати організмам обмежена озоновим шаром?
3. Як людина може змінювати біосферу?

§ 56. Сучасні екологічні проблеми у світі та в Україні



Яка взаємозалежність між екологічними проблемами сучасності та кількістю населення Землі?

Сучасні екологічні проблеми. Людина на певному етапі розвитку цивілізації почала активно перетворювати природу. Її вплив на довкілля посилювався з кожним століттям, доки антропогенні чинники не стали провідними. Перелік екологічних проблем, породжених діяльністю людини, досить великий: вони поставили людство на межу всеосяжної екологічної кризи.

Зростання чисельності населення. За підрахунками вчених, у VII тисячолітті до нашої ери населення Землі налічувало не більше ніж 10 млн; на початку нашої ери – близько 300 млн; у середині XVII ст. – близько 700 млн; за XX ст. зросло майже вчетверо; 2016 р. воно становило майже 7,4 млрд; 2021 р. – понад 7,9 млрд; на початок 2025 р. – близько 8,09 млрд, а 2030 р. може сягнути 9 млрд осіб. Лише за останні 50 років населення нашої планети збільшилося вдвічі, що змушує говорити про справжній *демографічний вибух*, наслідки якого можуть бути непередбачуваними.

Зростання населення Землі та розвиток промисловості супроводжуються інтенсивною розбудовою міських поселень (процес *урбанізації*), зокрема появою велетенських міст – *мегаполісів* (мал. 56.1). Нині у містах проживає понад 40 % населення, хоча вони охоплюють не більше ніж 0,5 % площі нашої планети.



Мал. 56.1. Проблеми сучасних мегаполісів. А. Інтенсивна забудова зменшує площі зелених зон – своєрідних легень міста. Б. Інтенсивна робота промисловості та рух транспорту значно забруднюють повітря, що негативно впливає на здоров'я мешканців. В. Великі міста стикаються з проблемою утилізації побутових і промислових відходів

Міста та їхні околиці є прикладом антропогенно зміненого природного середовища, для якого характерно: майже повне знищення природних екосистем; високий рівень забруднення промисловими та побутовими відходами; інтенсивний рух транспорту; світлове та шумове забруднення тощо. У містах унаслідок скупчення населення постійно існує високий ступінь ризику розвитку епідемій інфекційних захворювань (коронавірусу, грипу, туберкульозу та ін.).

Забезпечення населення Землі продуктами харчування потребує постійного збільшення площі орних земель. При цьому вплив знарядь і способів обробки ґрунту, вирубування лісів, які захищають ґрунти від дії вітрів, та інші фактори спричиняють ерозію ґрунтів.

Ерозія ґрунтів – це зменшення товщі їхнього верхнього найродючішого шару в результаті знесення вітром або водою (мал. 56.2). Через ерозію та інші явища (засолювання тощо) запаси родючих ґрунтів щорічно зменшуються на 24 млн т, а площа пустель лише за останні 20 років збільшилася на понад 100 млн га.

Знищення лісів. Протягом останніх 10 тис. років під впливом діяльності людини площа лісів на нашій планеті скоротилася не менше ніж на третину (мал. 56.3). Нині площа угруповань деревних рослин щоріч-



Мал. 56.2. Яружна ерозія ґрунту – приклад водної ерозії: виникнення та збільшення розмірів ярів унаслідок впливу води робить такі землі непридатними для сільськогосподарського використання



Мал. 56.3.
Вирубання лісів у Карпатах загрожує екологічною катастрофою

но скорочується на 17 млн гектарів, насамперед за рахунок тропічних лісів, які відіграють провідну роль у підтриманні екологічної рівноваги на нашій планеті. Зокрема, зменшення площі лісів є однією з причин зростання концентрації в атмосфері вуглекислого газу.

Проблема достатності енергоресурсів також тісно пов'язана з екологічним станом планети. Ефективне використання енергоресурсів дає змогу знизити не тільки собівартість виробництва, а й рівень видобутку корисних копалин і тим самим зменшити рівень забрудненості довкілля. Збільшення споживання електроенергії потребує будівництва нових електростанцій, серед яких – і атомні (АЕС).

Експлуатація АЕС, які діють у більш ніж 30 країнах світу, пов'язана з розв'язанням проблем їхньої безаварійної роботи, забруднення довкілля радіонуклідами, захоронення відпрацьованого палива тощо. Так, термін експлуатації контейнерів, у яких їх зберігають, важко зіставити з періодом напіврозпаду радіоактивних сполук (у деяких ізотопів він може перевищувати 24 тис. років). Не виключена і можливість аварій на АЕС, унаслідок яких великі території стають непридатними для проживання та господарського використання. Такі аварії сталися в березні 1979 р. на АЕС у Три Майл Айленд (США), у квітні 1986 р. на Чорнобильській АЕС, у березні 2011 р. на АЕС «Фукусіма-1» (Японія). Одним із напрямів розв'язання цієї проблеми є використання альтернативних джерел енергії.

Альтернативні джерела енергії – це відновлювані джерела, до яких відносять енергію сонячного випромінювання, вітру, морів, річок, біомаси, теплоти Землі, та вторинні енергетичні ресурси (наприклад, використання відходів промисловості) (мал. 56.4). Важливе використання нових джерел енергії, зокрема біопалива. На відміну від інших природних енергетичних ресурсів (нафта, вугілля, ядерне паливо), біопаливо – відновлюване джерело енергії; його повністю розкладають мікроорганізми, і тому воно безпечне для навколишнього середовища.

Кліматичні зміни. Однією з причин змін клімату Землі є діяльність людини. Зокрема, інтенсивний розвиток промисловості та енергетичного комплексу збільшує концентрацію вуглекислого газу в атмосфері,



Мал. 56.4. Приклади використання альтернативних джерел енергії:
А – заряджання електромобіля; Б – сонячні батареї; В – вітрові електростанції

що спричиняє так званий тепличний, або парниковий, ефект. За останні двісті років уміст CO_2 в атмосферному повітрі збільшився майже на 25 %, а температура біля поверхні Землі зросла на $0,5^\circ\text{C}$. Наслідки таких кліматичних змін ми можемо спостерігати нині (високі температури влітку, як наслідок – посуха та лісові пожежі, що охоплюють значні площі тощо). Усе це впливає і на розселення організмів: наприклад, деякі південні види дедалі просуваються вглиб на північ.

Вплив діяльності людини на стан атмосфери. Забруднення атмосфери спричиняють викиди шкідливих для здоров'я людини та інших організмів відходів промислових підприємств, вихлопних газів автомобільного транспорту (H_2S та SO_2 , NH_3 та NO_2 , CO , важких металів тощо). Підприємства будівельної і вугільної промисловості (цементні та гіпсові заводи, відкриті вугільні кар'єри тощо) є джерелами забруднення атмосфери пилом.

Особливу небезпеку для довкілля становлять **кислотні дощі**, спричинені реакцією між водою і такими забруднювачами атмосфери, як H_2S та NO_2 . Унаслідок таких реакцій утворюються сильні неорганічні кислоти – сульфатна (H_2SO_4) та нітратна (HNO_3). Кислотні дощі призводять до тяжких наслідків: гинуть екосистеми лісів та прісних водойм (мал. 56.5).



Мал. 56.5. Наслідки кислотних дощів

Іншою небезпекою для здоров'я людини може стати послаблення озонового екрана. Це відбувається внаслідок потрапляння в атмосферу хлорфлуорвуглецевих сполук, які, наприклад, використовують в охолоджувальних агрегатах, кондиціонерах, аерозольних балончиках – розпилювачах лаків, фарб, парфумів тощо.

Вплив діяльності людини на гідросферу. Діяльність людини негативно впливає і на водні екосистеми. Це, зокрема, забруднення промисловими та побутовими відходами, пестицидами й добривами,

які змиваються з полів, зведення гідротехнічних споруд, осушення, витік нафтопродуктів тощо. Погіршення санітарного стану водойм, а також виснаження водних ресурсів (насамперед прісних водойм і ґрунтових вод) загострює проблему питної води. Навіть очищені стічні води варто лише обмежено використовувати для потреб промисловості, енергетики, зрошування орних земель тощо.

Зникнення видів. Інтенсивний вплив людини на природні екосистеми спричинює вимирання певних видів тварин і рослин унаслідок прямого їхнього винищення, руйнування місць їхнього існування, забруднення довкілля тощо. За підрахунками вчених, за останнє тисячоліття з нашої планети зникло понад 63 види та 70 підвидів ссавців, близько 94 види і 164 підвиди птахів, а кількість зниклих видів безхребетних тварин, рослин і грибів взагалі важко підрахувати.

Екологічні проблеми України. України як частини світу стосуються всі екологічні проблеми сучасності. Унаслідок інтенсивної господарської діяльності людини, особливо починаючи з другої половини XIX ст., природні ландшафти України дуже змінилися. Спотворено середовища існування диких видів тварин і рослин. Нині площа, охоплена природними угрупованнями, становить лише 29 % території країни. Зокрема, лісові масиви скоротилися до 14,3 % порівняно із 28 % 1850 р. та 45 % на межі I та II тисячоліть. Майже повністю знищено цілинний степ, змінено гідрологічний режим багатьох територій через побудову гребель, водосховищ, осушення боліт Полісся та обводнення територій степової зони. Зокрема, унаслідок створення каскаду «штучних морів» у Дніпрі майже зникли осетрові риби через перекриття їм доступу із Чорного моря на нерест (осетер, білуга тощо).

Аварії на великих гідроелектростанціях (ГЕС) можуть спричинити непередбачувані наслідки. Так, через підрив російськими військами греблі Каховської ГЕС у червні 2023 р. (мал. 56.6) у Чорне море потрапило близько 14 км³ прісної води, що могла б задовольнити потреби України впродовж 1,5 року. При цьому вода затопила близько 600 км², змила десятки населених пунктів і зруйнувала багато природних екосистем, завдавши шкоди й природно-заповідному фонду України. Унаслідок цього теракту висохло Каховське водосховище, вилов риби в якому щорічно становив близько 3 тис. тонн. Від ще жахливіших наслідків осушені території врятувала верба та інші види рослин, які оселилися на цих ділянках і почали формувати нові екосистеми.



Мал. 56.6. Підрив Каховської ГЕС російськими військами, що спричинило екологічну катастрофу

Надмірне антропогенне забруднення значних територій природних екосистем хімічними сполуками, радіонуклідами створює загрозу генофонду багатого й різноманітного тваринного та рослинного світу України. В Україні зменшується чисельність видів птахів і ссавців – об'єктів полювання, знижується вилов риби у водоймах.



Використовуючи різні джерела інформації, підготуйте доповідь – мініпроект на тему «Найбільш актуальні екологічні проблеми мого краю».

Узагальнення

У сучасному світі людина активно змінює природу, що призводить до виникнення численних екологічних проблем. Основною причиною цього є зростання чисельності населення планети та постійне збільшення споживання природних ресурсів. Унаслідок господарської діяльності людини відбувається забруднення та ерозія ґрунтів, зменшення площі лісів, вичерпання енергоресурсів, забруднення атмосфери й гідросфери, зміна клімату, зникнення видів. Україна стикається з тими самими екологічними проблемами, що і більшість країн світу.

Поміркуйте

1. Які екологічні проблеми спричинили активні воєнні дії на території України?
2. Із чим пов'язане зменшення біорізноманіття нашої планети?
3. Які альтернативні джерела енергії є найбільш безпечними для навколишнього середовища?

§ 57. Види забруднення, їхні наслідки для біосфери. Якість довкілля



Як на якість довкілля впливають забруднювачі?

Забруднювачі – різноманітні природні або штучні агенти, які потрапляють у навколишнє середовище в концентраціях, що перевищують звичайний природний фон і негативно впливають на організми, порушуючи рівновагу в екосистемах.

Екологічна рівновага – це відносний баланс стабільності видового складу організмів, їхньої чисельності та густоти популяцій, просторового розміщення, продуктивності, потоків енергії, колообігу речовин та інших процесів у природних або змінених людиною екосистемах.

Види забруднення. За своїм походженням забруднення буває природним та антропогенним (антропічним) (мал. 57.1). **Природне забруднення** відбувається без втручання людини (наприклад, унаслідок вивержень вулканів, пожеж через удари блискавок, потрапляння певних видів організмів у невласливі їм екосистеми). **Антропогенне забруднення** є результатом впливу діяльності людини на екосистеми.



Мал. 57.1. Природні (1) та антропогенні (2) забруднення: 1 – виверження вулкана Кілауеа на Гавайях; 2 – птах, забруднений нафтою

(як-от, забруднення довкілля побутовими та промисловими відходами, отрутохімікатами, викидами радіонуклідів унаслідок аварій на АЕС).

За своєю природою забруднення може бути механічним, фізичним, хімічним або біологічним.

Механічне забруднення – надходження до середовища хімічно та біологічно інертних для організмів твердих матеріалів (наприклад, твердих побутових та промислових відходів, частинок ґрунту, які зі стоками потрапляють у водойми) (мал. 57.2). Особливо небезпечним є забруднення полімерними матеріалами (наприклад, пластиковими виробами: пляшками, пакетами тощо).



Мал. 57.2. Механічне забруднення довкілля виробами з пластику: 1 – річку Цитарум на острові Ява (Індонезія) вважають найбільш бруднішою у світі; 2 – пластик міститься в організмах майже 90 % морських птахів



Вироби з пластмас дуже повільно розкладаються, а їхнє щорічне виробництво тільки зростає. Підготуйте інформацію про можливі шляхи розв'язання цієї екологічної проблеми.

Фізичне забруднення. Залежно від природи розрізняють: теплове, світлове, шумове, електромагнітне та радіоактивне (радіаційне) забруднення. *Теплове забруднення* пов'язане з надходженням у повітря, ґрунт або водойми надлишкової теплової енергії (у вигляді нагрітого повітря або води). Часто воно пов'язане з інтенсивним використанням енергоносіїв (робота ТЕЦ та АЕС, транспорту тощо) (див. мал. 56.4).

Одним з основних шляхів запобігання тепловому забрудненню є економне використання традиційних енергетичних ресурсів (нафти, вугілля) і перехід на відновні джерела енергії (енергія водних потоків, припливів і відпливів, сонячна та вітрова енергія тощо).

Цікаво знати. Теплове забруднення довкілля може спричинити появу в екосистемах нових, невластивих їм теплолюбних видів. Так, у водоймі Південноукраїнської АЕС з'явився африканський вид риб – тилипія (ряд Окунеподібні).

Світлове забруднення – порушення інтенсивності й ритму природної освітленості певних територій у результаті дії штучних джерел світла (мал. 57.3). Воно може впливати на реакції організмів на тривалість світлової частини доби (явище фотоперіодизму).

Шумове, або акустичне, забруднення – форма фізичного забруднення, яка проявляється у вигляді збільшення рівня механічних коливань



Мал. 57.3. Сильне світлове забруднення у мегаполісі

у середовищі понад природний фон. Основним джерелом шумового забруднення є діяльність транспорту: автомобільного, авіаційного, залізничного. Шум інтенсивністю понад 75 дБ порушує сон, спричиняє негативні емоції (роздратованість), знижує працездатність тощо.



Використовуючи різні джерела інформації, дізнайтесь, чим небезпечне світлове та шумове забруднення для мешканців міст.

Електромагнітне забруднення.

Джерела електромагнітних полів антропогенного походження – це лінії електропередач (найпотужніше), промислові та побутові електроприлади, електротранспорт, засоби зв'язку тощо. Проте загалом нині немає неспростовних доказів щодо негативного впливу побутового електромагнітного випромінювання на екосистеми та здоров'я людини.

Радіоактивне (радіаційне) забруднення – це перевищення інтенсивності іонізуючих випромінювань або вмісту радіоактивних ізотопів хімічних елементів, притаманних природному радіаційному фону. Це може призвести до виникнення мутацій, загибелі клітин, спричинення онкологічних захворювань. *Пригадаймо:* іонізуюче випромінювання найбільше впливає на клітини, здатні до активного поділу (наприклад, червоного кісткового мозку та епітелію кишки).

Хімічне забруднення. Хімічні елементи та речовини, які за досягнення певної концентрації в середовищі спричиняють токсичний ефект, називають **токсикантами**. Натомість отруйні сполуки, які виробляють організми, називають **токсинами**, до них належать бактеріотоксини (виробляють бактерії), мікотоксини (виробляють гриби), зоотоксини (виробляють тварини). Вони зазвичай небезпечні для людини, але відіграють певну роль у природі (*поміркуйте яку*).

Речовини, які синтезує людина і які є чужорідними для біосфери, називають **ксенобіотиками** (від грец. *ксенос* – чужорідний та *біос* – життя). Це пестициди, мінеральні добрива, мийні засоби, барвники, паливно-мастильні матеріали, лікарські препарати тощо. Вони надзвичайно повільно розкладаються, майже не залучені в біогеохімічні цикли і тому накопичуються у довкіллі. Потрапляння ксенобіотиків усередину організму людини і тварин може спричинити отруєння, алергічні реакції, порушити обмін речовин, знизити імунітет, виявити мутагенну дію тощо.

Пестициди важко піддаються розкладанню організмами і характеризуються вираженими токсичними властивостями. Тому є відповідні вимоги до застосування пестицидів: токсична дія має бути спрямована лише на шкідників; мінімальне забруднення довкілля й швидке розкладання.

Цікаво знати. Р. Л. Карсон – відома американська біологиня, фахівчиня у галузі охорони природи, письменниця (мал. 57.4). Одним з головних напрямів її досліджень

було вивчення шкідливого впливу пестицидів (насамперед ДДТ) на навколишнє середовище. Цій проблемі присвячена одна з її всесвітньо відомих книжок – «Мовчазна весна». Ця та інші книжки Р. Л. Карсон сприяли розвитку екологічних рухів у різних країнах світу.



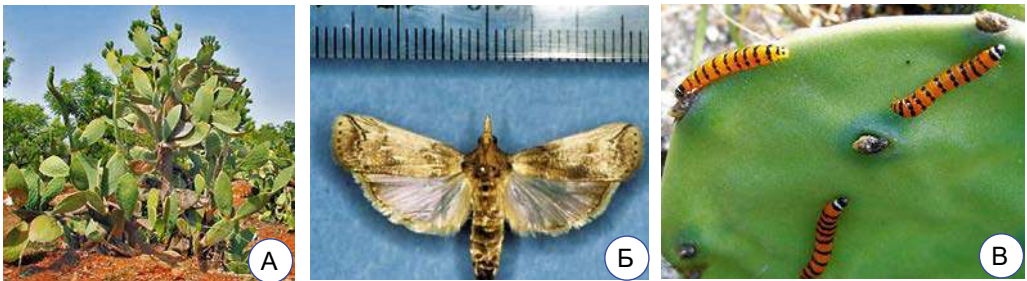
Мал. 57.4. Рейчел
Луїз Карсон
(1907–1964)

Біологічне забруднення довкілля – поява та поширення в екосистемах чужорідних для них видів організмів, що спричиняє негативні наслідки. Це призводить до порушення сформованих раніше біотичних зв'язків, швидкого виснаження ресурсів середовища, зникнення аборигенних видів тощо. Свідоме або випадкове переселення певного виду організмів за межі його природного ареалу в нові місцевості називають *інтродукцією* (від лат. *інтродуктіо* – введення), а самі види – *інтродукованими*. *Пригадаймо*: процес адаптації виду до нових умов існування називають *акліматизацією*.

Часто інтродуковані види виявляються більш конкурентоспроможними порівняно з місцевими (аборигенними) і здатними витіснити їх зі звичних місцевостей. Наприклад, медоносна бджола, акліматизована в Австралії, витіснила місцевий вид, позбавлений жала.

До того ж паразити і шкідники інтродукованих видів можуть переходити на місцеві, спричиняючи їхню масову загибель (*поміркуйте чому*). Тому перед інтродукцією певного виду людина повинна прогнозувати можливі наслідки появи інтродукованого виду в новій для нього місцевості.

Цікаво знати. Багато прикладів біологічного забруднення можна знайти в історії колонізації Австралії. Наприклад, кактус опунція потрапив на територію Австралії в першій половині XIX ст. як декоративна рослина. Згодом опунція поширилася за межами осель людини настільки, що перетворилася на небезпечний бур'ян. Довелося завозити з батьківщини опунції (Американського континенту) її природного ворога – метелика кактусової вогнівки, гусениці якої живляться цим кактусом (мал. 57.5). Це приклад біологічного методу боротьби з видами-шкідниками.



Мал. 57.5. А. Кактус опунція. Б. Метелик кактусова вогнівка. В. Гусінь кактусової вогнівки

Прикладами інтродукованих в Україні видів є: серед рослин – амброзія полинолиста і борщівник Сосновського; серед тварин – колорадський жук, черевоногий молюск рапана венозна, мохнорукий краб китайський, кліщ вароа тощо (мал. 57.6).

Цікаво знати. Амброзія полинолиста належить до карантинних бур'янів. Вона завдає шкоди не тільки сільському господарству, а й здоров'ю людини як небезпечний алерген. Пиллок амброзії, потрапляючи в дихальні шляхи, спричиняє сльозотечу, запалення слизових оболонок, підвищує температуру тіла. Сік борщівника Сосновського (природний ареал – Кавказ) у разі потрапляння на шкіру людини під дією ультрафіолетових променів здатен спричинити важкі опіки, які довго загоюються. Мохнорукий краб китайський зі своєї батьківщини – узбережжя Жовтого моря (узбережжя Китаю та Корейського півострова) – швидко поширився водоймами Європи. В Україні трапляється у північно-західній частині Чорного моря та Дніпро-Бузькому лимані. Має здатність своїми норами руйнувати греблі. Кліщ вароа – небезпечний паразит медоносної бджоли. Його батьківщина – Південна Азія. Нині поширений майже повсюдно (крім Австралії), спричиняє масову загибель бджіл.



Мал. 57.6. Види, інтродуковані на територію України. А. Амброзія полинолиста. Б. Борщівник Сосновського. В. Мохнорукий краб китайський. Г. Кліщі вароа на тілі лялечки медоносної бджоли

Карантинними називають види, шкідливі для здоров'я людини та її господарства, які відсутні на території даної країни або ж чисельність яких обмежують спеціальними заходами.

Одним з варіантів біологічного забруднення є мікробіологічне забруднення: привнесення до навколишнього середовища (води, атмосфери, ґрунту, продуктів харчування або предметів побуту) та розмноження у ньому мікроорганізмів, які спричиняють інфекційні хвороби або псують харчові продукти, руйнують матеріали.

Запам'ятаймо деякі знаки, що попереджають про небезпеку:



отруйні речовини;



радіаційна небезпека;



іонізуюче опромінення;



радіовипромінення;



біологічна небезпека (патогенні віруси, бактерії)



Довідайтеся, чи трапляються у вашій місцевості інтродуковані види рослин і тварин та підготуйте відповідні доповіді чи презентації.

Поняття про якість довкілля. *Якість довкілля* – це ступінь відповідності умов середовища існування (природних і штучних екосистем, а також тих природних екосистем, що зазнали значного антропогенного впливу) потребам людини та інших живих істот. Установлення параметрів окремих компонентів навколишнього середовища, які визначають межі прийнятних і допустимих змін їхнього складу та властивостей, називають *нормуванням якості навколишнього середовища*.

✓ **Дізнайтеся більше** про нормативи впливу на навколишнє середовище за QR-кодом.



Раціональне використання природних ресурсів передбачає відновлюваність колообігу речовин і потоків енергії як в окремих екосистемах, так і в біосфері загалом.

Головними завданнями **концепції якості життя** є забезпечення фізичного та психічного здоров'я людини, збільшення споживання екологічно чистих харчових продуктів, поліпшення умов праці та відпочинку. Важливе значення для забезпечення належної якості довкілля має **екологічна експертиза** – система державних природоохоронних заходів, спрямованих на перевірку відповідності планів та проєктів у галузі використання природних ресурсів, будівництва тощо вимогам законодавства.

✓ **Дізнайтеся більше** про екологічну експертизу за QR-кодом.



Для визначення характеру та інтенсивності впливу будь-якої господарської діяльності, а також її можливого небезпечного впливу на стан довкілля і здоров'я населення, здійснюють **оцінку впливу на довкілля (ОВД)** (її ще називають **оцінкою впливу на навколишнє середовище (ОВНС)**). Проведення оцінки впливу на довкілля господарської та іншої діяльності забезпечує ухвалення екологічно обґрунтованого рішення щодо ведення такої діяльності з урахуванням громадської думки та розробленням заходів із зменшення негативних її наслідків і запобігання їм. В Україні створений Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля.

Узагальнення

Унаслідок діяльності людини в навколишнє середовище систематично надходять забруднювачі – різноманітні природні або штучні речовини й агенти, які потрапляють у довкілля в концентраціях, що перевищують природний фон і негативно впливають на живі організми, порушуючи рівновагу в екосистемах. За походженням розрізняють природне та антропогенне забруднення. За своєю природою воно може бути фізичним, хімічним, механічним, біологічним тощо. Якість довкілля – це ступінь відповідності умов середовища існування потребам людини й інших живих істот.

Поміркуйте

1. Чому перед реалізацією бізнесових проєктів слід обов'язково проводити попередні екологічні дослідження (екологічну експертизу)?
2. Чому без проведення екологічної експертизи замість прибутків можна отримати фінансові збитки?
3. Як кожна людина може впливати на зменшення кількості забруднювачів?

§ 58. Екологічна політика в Україні. Сучасні напрями охорони природи та захисту навколишнього середовища в Україні та світі



Чому стабільність біосфери залежить від біорізноманіття на Землі?

Головним органом у системі виконавчої влади України щодо формування та реалізації державної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища, лісового, мисливського та водного господарства, використання надр, здійснення державного контролю у сфері охорони навколишнього природного середовища, раціонального використання, відтворення та охорони природних ресурсів і радіаційної безпеки є **Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України**.

✓ **Дізнайтеся більше** про політику України в галузі охорони природного середовища за QR-кодом.



Охорона природи – це прикладна галузь знання про збереження стану біосфери, для якої екологія слугує теоретичною базою.

Основні напрями збереження різноманітності організмів. Збереження та поліпшення стану біосфери неможливе без збереження біологічного різноманіття (біорізноманіття) організмів, які населяють нашу планету. Для збереження видового різноманіття багато країн світу (серед яких і Україна) приєдналися до розробленої **Міжнародною спілкою охорони природи (МСОП; англ. International Union for Conservation of Nature, скорочено IUCN) Всесвітньої стратегії охорони природи**.

Розуміння необхідності ретельного обліку рідкісних і зникаючих видів організмів зумовило створення 1948 р. при МСОП постійної Комісії з видів рослин і тварин, яким загрожує зникнення. Результатом роботи цієї комісії стало створення **Міжнародної Червоної книги** (її ще називають **Червоною книгою МСОП**), окремі випуски якої почали видавати з 1963 р. Водночас проводять роботу зі складання **Червоних списків МСОП** – всеосяжної збірки відомостей про охоронний статус не тільки тварин (як-от у Міжнародній Червоній книзі), а й рослин і грибів (мал. 58.1, А).



А



Б

Мал. 58.1. А. Емблема Червоного списку МСОП. Б. Емблема Всесвітнього фонду природи – велика панда

Іншою міжнародною громадською організацією є **Всесвітній фонд природи** (англ. *World Wide Fund for Nature*, скорочено WWF). Ця найбільша у світі неурядова організація опікується збереженням і відновленням навколишнього середовища. Символ Всесвітнього фонду природи – велика панда (мал. 58.1, Б).



Використовуючи різноманітні джерела інформації, дізнайтеся, які заходи вживають для збереження цього виду.

Існують і *Чорні списки тварин*, куди заносять ті види, які зникли з нашої планети, починаючи з 1500 р. Підставою для внесення певного виду до Чорного списку є відсутність достовірних його знахідок принаймні протягом останніх 50 років. За даними МСОП, лише за останні 500 років повністю вимерло близько 850 видів тварин і рослин.

✓ **Дізнайтеся більше** про деякі вимерлі види за QR-кодом.



Формують списки видів, які потребують охорони на теренах окремих континентів, а також національні Червоні книги.

Червона книга України – державний документ про сучасний стан видів тварин, рослин і грибів, які перебувають під загрозою зникнення, а також про заходи щодо їхнього збереження та науково обґрунтованого відтворення. До неї заносять види, які постійно чи тимчасово (наприклад, перелітні птахи) мешкають у природних умовах на території України або в межах її територіальних вод. Нині до Червоної книги України (4-те видання) занесено 672 види рослин, 61 вид водоростей, 124 види грибів та лишайників, 687 видів тварин (див. форзац І).

Цікаво знати. Перше видання Червоної книги України побачило світ 1980 р., два наступних вийшли 1994–1996 рр. та 2009 р. 2019 р. було підготовлено 4-те видання, яке так і не було надруковано.

Українські фахівці вперше у світі розробили **Зелену книгу**, до якої заносять рідкісні й типові для певної місцевості рослинні угруповання, що потребують встановлення особливого режиму їх використання. Нині в ній представлено 126 рідкісних і типових рослинних угруповань, що потребують охорони. Уперше ідею створення Зеленої книги висловив видатний український ботанік, академік НАН України Ю. Р. Шеляг-Сосонко (мал. 58.2).

Види, занесені до Червоної книги, охороняють насамперед на різноманітних природоохоронних територіях. Використання цих територій, які є національним надбанням, здійснюються згідно із Законом України «Про природно-заповідний фонд» (1992 р.).

Природно-заповідний фонд України становлять ділянки суходолу та водного простору, природні комплекси та об'єкти, які мають особливу природоохоронну, наукову, естетичну й іншу цінність і виділені з метою збереження природної різноманітності ландшафтів, генофонду



Мал. 58.2.
Юрій Романович
Шеляг-Сосонко
(1933–2019)

тваринного та рослинного світу, підтримання загального екологічного балансу.

До природно-заповідного фонду України відносять як природні території та об'єкти (біосферні та природні заповідники, національні природні та регіональні ландшафтні парки, заказники, пам'ятки природи, заповідні урочища), так і штучні (ботанічні сади, зоологічні парки, дендропарки, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва).

Нині до складу природно-заповідного фонду України входить понад 8 тис. об'єктів загальною площею близько 3,3 млн га (що становить понад 6 % площі нашої країни). Серед них – п'ять *біосферних заповідників* (Карпатський, Чорноморський, Дунайський, Чорнобильський радіаційно-екологічний, біосферний заповідник «Асканія-Нова» ім. Ф. Е. Фальц-Фейна), які мають міжнародне значення і створені з метою збереження у природному стані найтипівіших природних комплексів біосфери та проведення екологічного моніторингу. У біосферних заповідниках здійснюють міжнародні наукові та природоохоронні програми.

Цікаво знати. Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник, створений 2016 р., розташований на території Зони відчуження Чорнобильської АЕС, – найбільший об'єкт природно-заповідного фонду України, що охоплює 226 964,7 га. Флора заповідника налічує близько 1400 видів вищих рослин, а фауна – понад 300 видів хребетних тварин (з яких 75 занесено до Червоної книги України).

Природні заповідники – це природоохоронні науково-дослідні установи загальнодержавного значення, які створюють з метою збереження у природному стані типових для даної місцевості або унікальних природних комплексів, вивчення природних процесів і явищ, що в них відбуваються, розроблення наукових засад охорони природи. На території України нині існує 19 природних заповідників, розміщених у всіх природних зонах.

У зоні мішаних лісів розташовані Древянський, Поліський, Рівненський, Черемоський; лісостеповій – Канівський, «Розточчя», «Медобори», «Михайлівська цілина»; степовій – Луганський, Український степовий, Дніпровсько-Орільський, «Єланецький степ», Опукський; у Криму – Казантипський, Карадазький, Кримський, Ялтинський гірсько-лісовий, «Мис Мартьян»; в Українських Карпатах – «Горгани».

Національні природні парки – природоохоронні, науково-дослідні та культурно-просвітні установи, покликані зберігати цінні природні, а також історико-культурні комплекси та об'єкти. На їхній території за умов дотримання заповідного режиму дозволено організований туризм і певні форми відпочинку. 56 національних природних парків розташовані в усіх природних зонах України. *Регіональні ландшафтні парки* – природоохоронні заклади місцевого або регіонального значення, покликані виконувати ті самі завдання, що й національні природні парки.

Заказники – природні території, створені з метою збереження і відтворення певних природних комплексів або окремих видів організмів. Наукова і деякі види господарської та культурно-просвітницької діяльності дозволені на їхній території з дотриманням вимог охорони навколишнього природного середовища. *Пам'ятки природи* – окремі уні-

кальні природні утворення, які мають природоохоронне, наукове, естетичне або пізнавальне значення.

Особливе місце у здійсненні природоохоронних заходів посідають ботанічні сади та зоологічні парки, які створюють з метою вивчення, збереження, акліматизації та ефективного господарського використання рідкісних й інших видів місцевої та світової фауни і флори. Вони здійснюють і просвітницьку діяльність.

Екологічна мережа. 2004 р. було ухвалено Закон України «Про екологічну мережу». Згідно з ним було заплановано збільшити частку природних екосистем у земельному фонді України до рівня, достатнього для забезпечення можливостей міграцій і поширення видів рослин, тварин і грибів. Екологічна мережа України є складовою Всеєвропейської екологічної мережі як єдиної просторової системи територій країн Європи з природним або частково зміненим станом ландшафту.

Національна екологічна мережа України – єдина територіальна система природних ландшафтів, що підлягають охороні, об'єктів природно-заповідного фонду та об'єктів інших типів, визначених законодавством України. Її мета – збереження ландшафтного та біологічного різноманіття, створення умов для міграцій тварин через систему територій (їх називають *екокоридорами*), які підлягають особливій охороні відповідно до законів України та її міжнародних зобов'язань (мал. 58.3).



Мал. 58.3. Основні екологічні коридори, що входять до складу національної екологічної мережі України: вони забезпечують міграції тварин та обмін генетичним матеріалом (*пригадайте*, чому важливо підтримувати генетичне різноманіття популяцій)



З'ясуйте, які об'єкти природно-заповідного фонду України розташовані у вашій місцевості. З допомогою вчительки / вчителя підготуйте доповіді / презентації про видовий склад рослин, тварин і грибів, що мешкають на їхній території.

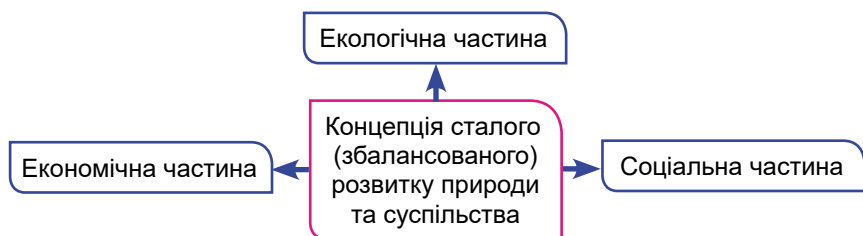
Концепція сталого розвитку. Ви вже знаєте, що подальший розвиток суспільства неможливий без екологізації всіх галузей діяльності людини: наукових досліджень, економіки, освіти, суспільного життя. З другої половини XX ст. постало питання створення всеосяжної концепції, яка ураховувала б як погіршення стану навколишнього природного середовища, так і проблеми економічного та соціального розвитку суспільства.

Сталий розвиток (англ. *sustainable development*) – це такий процес економічних і соціальних змін людського суспільства, за якого встановлюється баланс між використанням природних ресурсів, науково-технічним прогресом, які є необхідними для задоволення сучасних потреб людського суспільства, та врахуванням інтересів майбутніх поколінь, включно з їхнім правом на безпечне та здорове суспільство. Іншими словами, сучасне суспільство відповідає за те, в якому стані залишить після себе довкілля і природні ресурси наступним поколінням.



Мал. 58.4. А. Ґру Гарлем Брунтланн (народ. 1939 р.)

Концепцію сталого розвитку розробила Міжнародна комісія ООН з навколишнього середовища та розвитку. Її очолила відома норвезька громадська діячка та політикиня Г. Г. Брунтланн. Саме пані Г. Г. Брунтланн (мал. 58.4) сформулювала поняття «сталий розвиток». 1987 р. комісія видала доповідь «Наше спільне майбутнє» (її також називають «Доповіддю Брунтланн»), присвячену пошуку оптимального шляху сталого розвитку. Того самого року цю доповідь було схвалено Генеральною Асамблеєю ООН. Очолювана Г. Х. Брунтланн комісія визнала, що екологічні проблеми сьогодення мають не локальний, а глобальний характер.



Мал. 58.5. Складові частини Концепції сталого розвитку природи і суспільства

Сучасний рівень соціально-економічного розвитку потребує взаємоузгодженості світового співробітництва у дотриманні стандартів якості довкілля. Тому Концепція сталого розвитку орієнтує всі країни на реалізацію екологічно спрямованих заходів щодо структурної перебудови національної економіки (енергетики, транспорту, промислового виробництва, сільського господарства) і міжнародних економічних відносин, на екологізації всіх видів життєдіяльності суспільства. У Концепції є три основні складові частини (мал. 58.5).

2016 р. офіційно набули чинності 17 цілей у галузі стійкого розвитку на період до 2030 р. Їх ухвалили лідери держав світу на саміті ООН (2015 р.) (див. форзац II).

Ресурси біосфери як глобальної екосистеми, навіть відновні, обмежені, а населення нашої планети та його матеріальні потреби зростають досить високими темпами. Тому сталий розвиток людства можливий лише за умови гармонізації відносин людського суспільства та природи, тобто такого стану біосфери, який В. І. Вернадський називав ноосферою.

Узагальнення

Однією з важливих проблем сьогодення є збереження біорізноманіття нашої планети. Одним з напрямів її розв'язання є створення Червоних книг та Червоних списків як окремих держав, так і міжнародних. В Україні створена Червона книга України, а також вперше у світі – Зелена книга України, до якої заносять рідкісні й типові для певної місцевості рослинні угруповання. Інший важливий напрямок збереження біорізноманіття – це створення об'єктів природно-заповідного фонду. До природно-заповідного фонду України входять: біосферні та природні заповідники, національні природні та регіональні ландшафтні парки, заказники, пам'ятки природи, заповідні урочища тощо. Міжнародною комісією ООН з навколишнього середовища та розвитку розроблена концепція сталого розвитку.

Поміркуйте

1. Представників яких груп тварин найбільше включено до Червоної книги України?
2. Чому заходи із збереження біорізноманіття мають здійснювати як на міжнародному рівні, так і на рівні окремих держав?
3. Розв'язання яких проблем щодо сталого розвитку найактуальніше для України на сьогодні?

Підб'ємо підсумки з теми

I. Досліджую природу

1. Під час підготовки до проведення дослідження «Виявлення рівня антропогенного впливу в екосистемах своєї місцевості» учні та учениці визначали змінні. Учень визначив незалежною змінною кількість автомобілів, які проїжджають за одиницю часу. Учениця додала, що контрольованими змінними є постійні ділянки, на яких підраховували автомобілі, та години, в які здійснювали підрахунки. Хто з них має рацію?

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| А учень | В обидва мають рацію |
| Б учениця | Г обидва помиляються |

2. Плануючи «Дослідження особливостей структури місцевих екосистем та впливу на них урбоекосистем», учні та учениці визначали методи, які доцільно застосовувати. Учень запропонував метод спостереження та математично-статистичний. Учениця додала, що доцільно використати метод моніторингу. Хто з них має рацію?

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| А учень | В обидва мають рацію |
| Б учениця | Г обидва помиляються |

II. Опрацьовую та використовую інформацію

1. Певна громадська організація у 2022–2023 роках проводила дослідження 47 мікрорайонів Києва щодо забруднення. Показники забруднення виставляли від 0 (найгірше) до 10 (найкраще) балів. Проаналізуйте вибірку та виберіть відповідь «Так» чи «ні» (СЕВ «Спектрометр Енергій Бета-випромінювання» визначає вміст радіонуклідів у аерозолях) (ЦГО – показники забруднення повітря щодо різних забруднювальних речовин).

Мікрорайон	Відходи	Ґрунти	Водойми	Озеле- нення	Повітря СЕВ	Повітря ЦГО
Мінський та Пріорка	9	9	3	5	3	4
Троещина	9	6	8	4	0	
Борщагівка	9	8	4	4	5	3
Поділ	7	9		3	6	10
Святошин та Академмістечко	9	8		5	6	
Липки та Арсенал	7	8		4	9	

Показники загального забруднення у районах Мінський та Пріорка кращі, ніж у мікрорайонах Липки та Арсенал	Так	Ні
На Троєщині показники забруднення ґрунтів та СЕВ найнижчі	Так	Ні
Найчистіше повітря щодо різних забруднювальних речовин (ЦГО) – у мікрорайоні Борщагівка	Так	Ні
Показники району Борщагівка кращі щодо відходів та гірші щодо забруднення водойм та озеленення	Так	Ні
У районах Святошин та Академмістечко показник відходів становить 6	Так	Ні
Найнижчий показник озеленення у районі Поділ	Так	Ні

2. Розгляньте графік відхилення температурних показників на планеті. Виконайте завдання, проаналізувавши твердження.

- I. Перший стрибок відхилень температури вище від 0 було зафіксовано 1940 року.
- II. Починаючи з 1980 року, температура на планеті зростає орієнтовно на 1 градус.



- A** правильне I твердження
B правильне II твердження

- B** обидва твердження правильні
Г обидва твердження неправильні

III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Проаналізуйте твердження та виберіть правильне.

I. Для того щоб зберегти біорізноманіття на планеті, людині потрібно вирубувати ліси й висаджувати інші рослини.

II. Для збереження біорізноманіття діяльність людини має бути спрямована на збереження біосфери загалом.

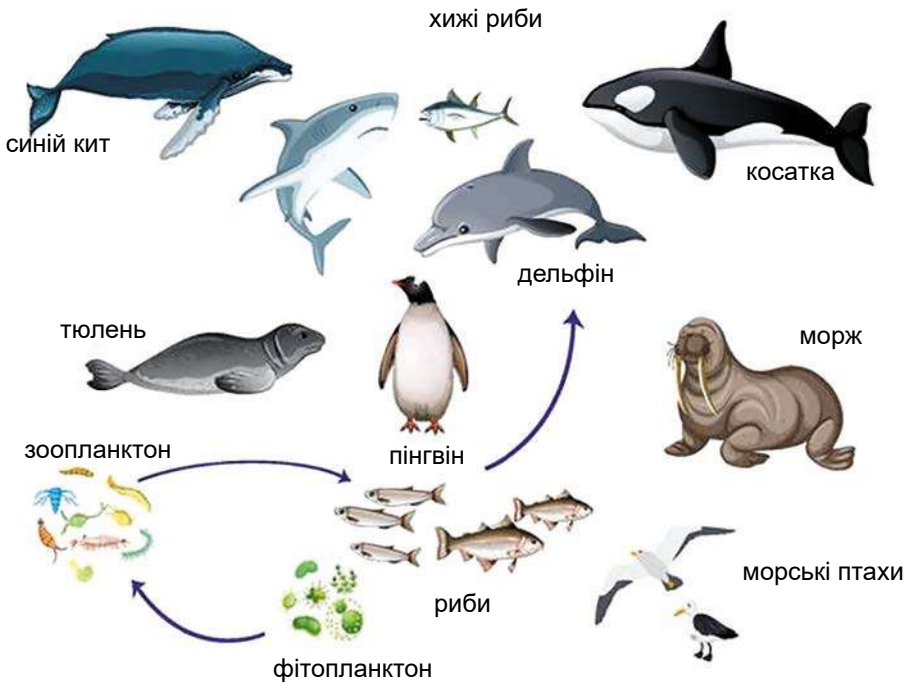
A правильне лише I твердження

B обидва твердження правильні

Б правильне лише II твердження

Г немає правильних тверджень

2. Виберіть з переліку три ознаки, що відповідають малюнку.



1 зображено екосистему водойми

2 зображена екосистема не здатна до саморегуляції

3 птахи живляться рачками та рибою, вони є консументами

4 водорості живляться гетеротрофно і є продуцентами

5 рачки і риби є продуцентами, вони здійснюють фотосинтез

6 сонячну енергію поглинає фітопланктон (водорості) у процесі фотосинтезу

3. Розподіліть ознаки щодо дотримання принципів сталого розвитку.

1 із метою заощадження водних ресурсів родина встановила лічильники для вимірювання обсягу спожитої холодної та гарячої води

2 людина завжди викидає сміття в сміттєзбиральний бак

3 виходячи з приміщення, людина не завжди вимикає світло

4 під час користування душем людина регулює подачу води залежно від потреби

5 з метою заощадження електроенергії родина встановила енергозберігальні лампи

6 людина у стосунках з іншими людьми – нестримана та конфліктна

7 людина дає друге життя старим речам, перетворюючи їх на корисні

Ознаки недотримання принципів сталого розвитку	Ознаки дотримання принципів сталого розвитку

Компетентнісно орієнтоване завдання

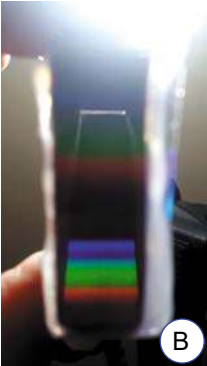
Освітлення й домашня екологія. Дев'ятикласниця Зоряна наприкінці листопада, в період активного використання штучного освітлення в домі, вирішила провести енергоаудит будинку. Вона хоче зменшити витрати на електрику і при цьому врахувати особливості світла як екологічного фактора.

Перша проблема виникла, коли Зоряна запропонувала замінити всі лампи на енергоощадні. Мама стверджувала, що їй не подобається світло енергоощадних ламп: «Воно якесь неприродне порівняно із сонячним; навіть у ламп розжарювання краще». Тато запропонував це перевірити. Після обіду він усамітнися і доволі швидко зробив із сірникової коробки і старого компакт-диска прилад, за допомогою якого можна перевірити склад світла різних ламп – *спектроскоп*.

Зоряна з татом дослідили різні типи ламп, що є в їхньому домі. Це матована лампа розжарювання у ванній кімнаті (А), флуоресцентна лампа в коморі (гардеробній) (Б), сучасна світлодіодна лампа в кухні (В), декоративна «лампа Едісона» з нічника у спальні (Г).



Ось результати цього дослідження:



1. Які з тверджень, зроблених за результатами дослідження спектрального складу світла, є правильними (виберіть «Так» або «Ні»)?

Лампа розжарювання має неперервний спектр, як сонячне світло ¹	Так	Ні
Тому лампу розжарювання досі використовують у ванній кімнаті	Так	Ні
Флуоресцентна лампа, як і казала мама, дає неприродне світло	Так	Ні
У світлодіодної лампи, як і флуоресцентної, переривчастий спектр	Так	Ні
Спектр «лампи Едісона» найбільш схожий на лампу розжарювання	Так	Ні

2. У кімнаті старшої сестри Зоряни, Наталії, увесь вечір, до 22-ї години, горить велика світлодіодна лампа з таким саме спектральним складом, як у лампи В. Яку властивість світла як екологічного фактора використовує Наталія – і з якою метою?

А інтенсивність освітлення – щоб краще бачити під час роботи за комп'ютером

Б спектральний склад – щоб не втомлювалися очі від переривчастого спектра інших ламп

В періодичність (зміна довжини світлового дня протягом року) – щоб уникнути осінньої «хандри»



3. Зоряна продовжила міркувати щодо освітлення в домі й сформулювала такі висновки:

I. «Лампа Едісона» в нічнику в спальні, яка дає неяскраве тепле жовте світло, допомагає налаштуватися на перехід до засинання.

II. У лампі з датчиком руху в коридорі між спальнями й туалетом, яка вмикатиметься вночі, варто встановити світлодіодну лампу зеленого кольору² як заспокійливого для зору.

Оцініть, який з її висновків правильний.

А лише I

Б лише II

В I та II

Г ні I, ні II

Якщо в якомусь із висновків є помилки, виправте їх.

4. Для водоростей світло – як за інтенсивністю, так і за кольором, спектральним складом¹ – є фактором, що обмежує їхнє виживання (лімітувальним фактором). Чи є для людини світло фактором, що обмежує виживання? Наведіть міркування.

¹ Див. графік у стимулі КОЗ до теми 8. П. Г. Балан та ін. Біологія, 8 клас, с. 253–255.

² Див. П. Г. Балан та ін. Біологія, 7 клас, КОЗ до теми 3, с. 59–60.



Тема 7.

Еволюція органічного світу



Чи справді Світовий океан є колыскою життя? Чи можливо спостерігати видоутворення в реальному часі?

Інформаційно-пошуковий проєкт:

«Ж.-Б. Ламарк – автор першої еволюційної гіпотези»; «Сучасні погляди на процеси антропогенезу»; «Гіпотези виникнення життя на Землі»; «Ч. Дарвін – життя і наукова діяльність».

Науково-дослідницький проєкт:

«Дослідження зміни динаміки чисельності людських спільнот на прикладі України та іншої країни світу на вибір учителя / учительки (народжуваність, смертність, густота тощо)».

Творчий проєкт:

«Дивергенція, конвергенція та паралелізм на прикладі сучасних видів рослин і тварин України (Європи, світу)»; написання есе (твору, розповіді): «Можливі напрями еволюції виду *Homo sapiens* у майбутньому»; «Гіпотеза світу РНК та інші сучасні гіпотези походження життя на Землі: так чи ні»; створення лепбука «Еволюційна гіпотеза Ж.-Б. Ламарка»; «Еволюційна теорія Ч. Дарвіна».

Ігровий проєкт:

рольова гра «Еволюція».

§ 59. Процес еволюції як універсальна властивість біологічних систем



Чому риби не живуть на деревах?

У процесі як індивідуального розвитку окремих особин (онтогенезу), так й історичного розвитку видів і систематичних одиниць вищого рангу (філогенезу) виникають нові ознаки, частину яких можуть успадковувати нащадки. Такий процес розвитку живої матерії називають *еволюцією*. Наслідком еволюційних змін є формування *адаптації* – пристосованості організмів до умов навколишнього середовища.

• **Еволюція** (від лат. *еволюціо* – розгортання) – процес незворотних змін будови та функцій біологічних систем протягом їхнього історичного розвитку.

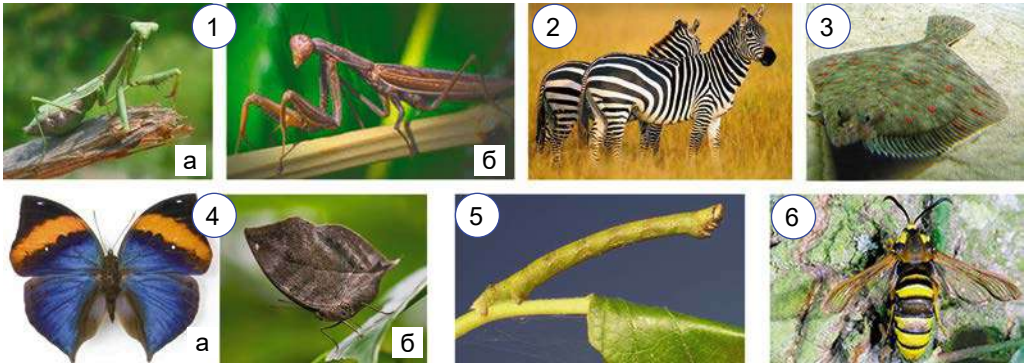
Еволюція як процес формування адаптацій. Вжити за умов періодичних або неперіодичних змін умов існування можуть лише ті організми, які до них пристосувалися. Здатність формувати адаптації – загальна властивість живого. Адаптації організмів можуть бути пов'язані зі змінами будови чи забарвлення, процесів життєдіяльності та поведінки, їхнього біохімічного складу тощо.

На малюнку 59.1 наведено приклади деяких адаптацій організмів до середовища існування. Так, зелене забарвлення комахи богомола звичайного робить цю комаху непомітною для ворогів і здобичі на тлі зеленої рослинності (*поміркуйте*, чому восени переважають особини з коричневим забарвленням). Смугасте забарвлення зебри ніби робить її добре помітною для ворогів на відкритій місцевості, але серед рослин-

ності завдяки смугастому забарвленню вона стає малопомітною. Таке забарвлення називають *розчленувальним*.

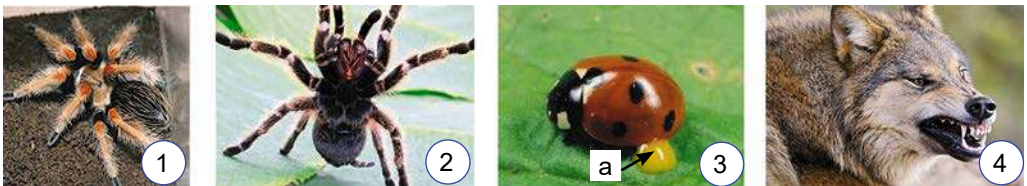
Є тварини, які здатні змінювати своє забарвлення відповідно до умов середовища (наприклад, камбала, каракатиці, деякі креветки, хамелеони та ін.; мал. 59.1, 3). Ховаючись від ворогів, тварини можуть набувати форми живих і неживих об'єктів, що їх оточують (мал. 59.1, 4, 5). Наприклад, тропічний метелик каліма зі складеними крилами нагадує листок рослини, на якому можна помітити навіть окремі жилки. Гусінь метеликів п'ядунів у разі небезпеки може завмирати й набувати вигляду сухої гілки. Метелик велика тополева скляниця (мал. 59.1, 6) нагадує один з видів отруйних ос.

Явище, коли одні види тварин формою тіла та забарвленням нагадують інших, що мають певні засоби захисту, називають *мімікрією*.



Мал. 59.1. Захисні варіанти забарвлення та будови тварин як приклади адаптацій до середовища існування: 1 – богомол звичайний: а – весняна форма; б – осіння форма; 2 – зебра; 3 – камбала; 4 – метелик каліма з розправленими (а) та складеними (б) крилами; 5 – гусінь метелика п'ядуна; 6 – метелик велика тополева скляниця

На відміну від незахищених видів види, що мають певні засоби захисту (отруйні залози, потужні щелепи тощо), часто чітко контрастують своїм забарвленням або поведінкою з навколишнім середовищем (мал. 59.2). Тим самим вони показують, що їх краще оминати, оскільки вони здатні себе захистити. Це явище називають *демонстрацією*.



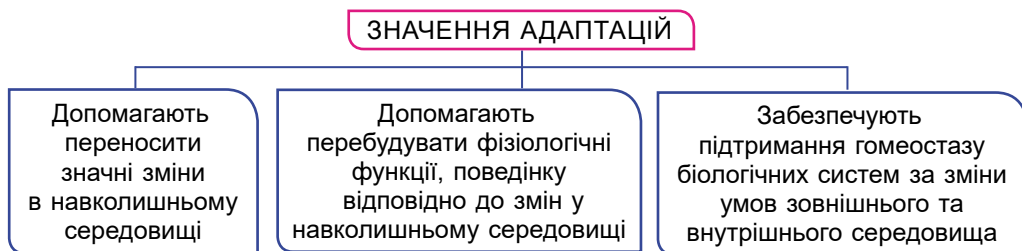
Мал. 59.2. Явище демонстрації: погрозливе забарвлення (1) та поведінка (2) павука-птахоїда; 3 – жук сонечко у разі небезпеки виділяє отруйну гемолімфу (а); 4 – погрозлива поведінка вовка

Прикладами адаптацій організмів до переживання несприятливих умов є утворення цист одноклітинними еукаріотами, зимова сплячка тварин, листопад рослин тощо.

✓ **Дізнайтеся більше** про формування нових адаптацій за QR-кодом.



Значення адаптацій для нормального існування та функціонування біологічних систем наведено на малюнку 59.3.



Мал. 59.3. Значення адаптацій для нормального існування та функціонування біологічних систем

Основні напрями еволюційного процесу. Поступовий розвиток живої матерії від простіших форм до складніших зумовив появу різних рівнів організації живого на нашій планеті та їхній взаємозв'язок (див. мал. 2.1).

Якщо елементарною одиницею еволюції вважають популяцію організмів, то середовищем еволюційних змін – екосистеми, у яких усі популяції взаємопов'язані різними зв'язками. Еволюційні процеси, які відбуваються в популяціях, можуть змінювати їхній генофонд, що створює передумови для виникнення нових видів (процеси видоутворення). Зі свого боку, видоутворення зазвичай відбувається за допомогою дивергенції – походження нащадків від спільного предка. Завдяки цьому вчені встановлюють систематичні групи організмів, які мають включати усіх нащадків спільного предка (разом з вимерлими в процесі еволюції). Такі групи називають **монофілетичними** (від грец. *монос* – один та *філон* – рід, плем'я) (мал. 59.4). У 20-х роках XX ст. було розроблено вчення про біологічний прогрес і регрес як основні напрями еволюції.



Мал. 59.4. Тип Членистоногі – приклад монофілетичної групи тварин

✓ **Дізнайтеся більше** про біологічний прогрес і регрес за QR-кодом.



Біологічний прогрес є наслідком формування досконалих адаптацій організмів до умов існування. Наприклад, у стані біологічного прогресу нині перебувають такі види: ворона сіра, тарган рудий, заєць сірий, сосна звичайна, пирій повзучий; серед таксонів високого рангу – покритонасінні рослини, комахи, червононогі молюски, птахи, ссавці тощо.

На відміну від біологічного прогресу, **біологічний регрес** є наслідком неспроможності певної групи досконало пристосуватися до змін довкілля.

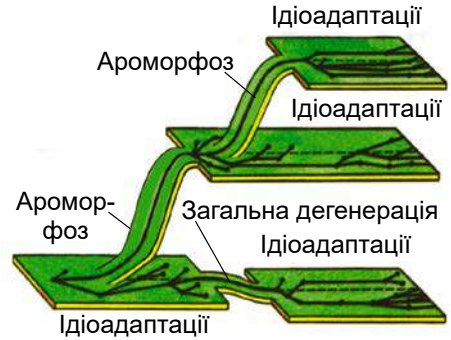
Біологічний прогрес може бути досягнутий різними шляхами: ускладненням організації (ароморфоз), змінами без підвищення чи зниження загального рівня організації (ідіоадаптації) та спрощенням організації (загальна дегенерація) (мал. 59.5).

Ароморфоз (від грец. *airo* – піднімаю та *морфо* – форма) – еволюційне перетворення, яке підвищує рівень організації організмів загалом і відкриває можливості для засвоєння нових середовищ існування. Наприклад, поява чотирикамерного серця у птахів і ссавців сприяла повному розподілу крові на венозну та артеріальну й зумовила виникнення теплокровності.

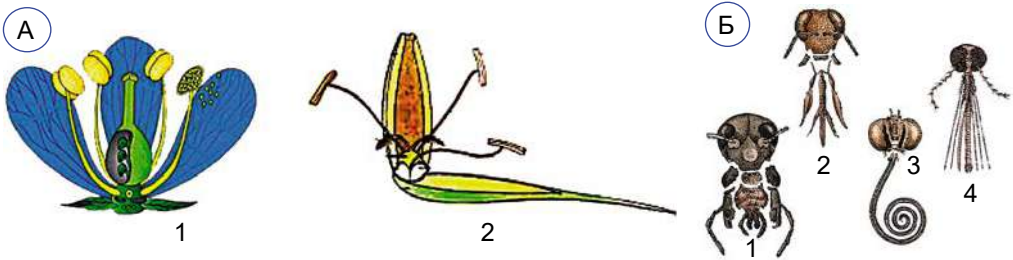
Утворення квітки в покритонасінних сприяло урізноманітненню способів запилення, формуванню оплодня (що захищає насінини й забезпечує різні способи його поширення), процесу подвійного запліднення тощо.

Ідіоадаптація (від грец. *idios* – своєрідний, особливий та лат. *adaptatio* – пристосування) – зміни в будові організмів, що мають характер пристосування до конкретних умов та не змінюють рівня їхньої організації.

Приклади ідіоадаптацій: різноманітна будова квіток покритонасінних, пристосованих до різних способів запилення (комахами, вітром тощо); різноманітні ротові органи комах, пристосовані до споживання різної їжі тощо (мал. 59.6).



Мал. 59.5. Шляхи досягнення біологічного прогресу. Ідіоадаптації



Мал. 59.6. Приклади ідіоадаптацій. А. Будова квітки комахозапильних (1) та вітрозапильних (2) рослин. Б. Ротові органи комах: гризучого типу (1); гризучо-лижучого типу (2); сисного типу (3); колючо-сисного типу (4)

Загальна дегенерація – явище спрощення організації організмів у процесі еволюції. Воно зазвичай характерне для паразитів і малорухливих організмів (*пригадаймо*: втрата у процесі еволюції травної системи у стьожкових червів, голови – у двостулкових молюсків тощо).

Узагальнення

Еволюція – це процес незворотних змін будови, функцій і властивостей біологічних систем упродовж їхнього історичного розвитку. Наслідком еволюції є виникнення адаптацій – пристосувань організмів до умов існування. Адаптації можуть бути пов’язані зі змінами будови або забарвлення, особливостями процесів життєдіяльності, поведінки чи біохімічного складу. Для адаптацій характерні непостійність і відносність. У ході еволюції в груп організмів виникають різні типи змін: ароморфози (підвищення рівня організації), ідіоадаптації (не пов’язані зі зміною рівня організації) та загальна дегенерація (спрощення організації).

Поміркуйте

1. Чому процес еволюції незворотний?
2. Які приклади демонструють непостійність адаптацій?
3. Чи можуть у процесі еволюції в організмів різних видів, що проживають в одному середовищі, сформуватись різні адаптації?



Практична робота «Адаптованість організмів до середовища існування як наслідок еволюції».



§ 60. Розвиток еволюційних поглядів

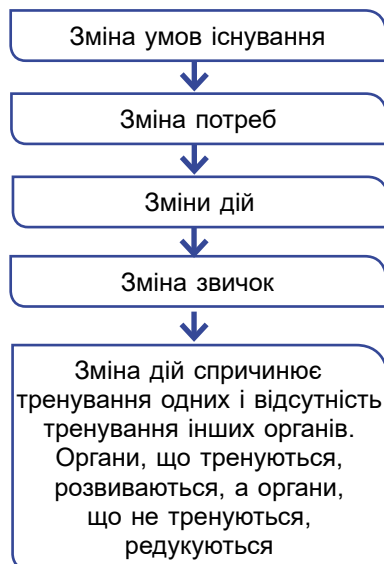


Чи можна вважати дарвінізм наслідком ламаркізму?

Історія розвитку еволюційного вчення. Питання історичного розвитку живого вивчає розділ біології – **еволюційне вчення, або теорія еволюції**. Це наука про фактори, механізми, загальні закономірності та наслідки еволюції. Окремі ідеї про історичний розвиток живих істот висловлювали ще давньогрецькі філософи, такі як Геракліт Ефеський (540–480 рр. до н. е.), Демокріт Абдерський (460–370 рр. до н. е.) та інші. Але першу еволюційну гіпотезу сформулював на початку XIX ст. видатний французький учений Ж.-Б. Ламарк (див. мал. 1.1, В).

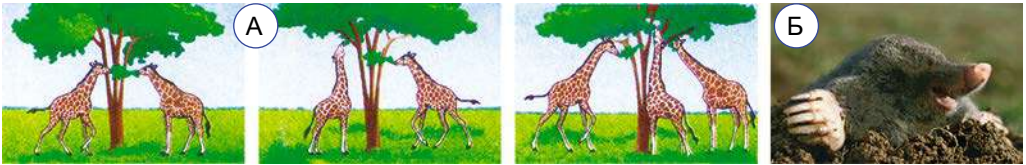
Еволюційна гіпотеза Ж.-Б. Ламарка базується на уявленні про те, що всі організми під впливом умов довкілля набувають корисних пристосувань шляхом змін своєї будови, функцій тощо. За Ж.-Б. Ламарком, процес еволюції відбувається за схемою, наведеною на малюнку 60.1.

Ж.-Б. Ламарк розглядав еволюцію як процес безперервних змін, що полягають лише в ускладненні будови організмів і



Мал. 60.1. Схема еволюційних перетворень, за Ж.-Б. Ламарком

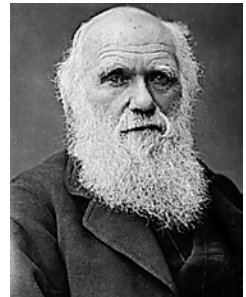
переходах від нижчого рівня організації до вищого (мал. 60.2). Прогресивним у еволюційній гіпотезі Ж.-Б. Ламарка було те, що він визнав роль умов середовища існування як факторів еволюції. Проте йому не вдалося виявити реальні механізми еволюційного процесу. На думку вченого, будь-які набуті ознаки передаються у спадок нащадкам (*пригадайте* сучасні погляди на це питання). Ж.-Б. Ламарк не зміг виявити механізми, які збільшують різноманітність організмів у процесі еволюції. Тому вважав, що нові види з'являються внаслідок самозародження.



Мал. 60.2. А. Приклади, що ілюструють еволюційну гіпотезу Ж.-Б. Ламарка: виникнення довгої шиї у жирафа – наслідок намагання дотягнутись до їжі – гілок з листками. Б. Розширені передні кінцівки у кротів – наслідок прокладання ходів у ґрунті

Еволюційні погляди Чарльза Дарвіна. Важливим етапом у розвитку еволюційної теорії стали дослідження Ч. Дарвіна (мал. 60.3). До створення своєї теорії еволюції цей видатний учений тривалий час ретельно збирав та аналізував значний обсяг матеріалу, залучаючи праці різних фахівців. Під час цієї копіткої роботи дедалі чіткіше викристалізовувався головний висновок: *види організмів змінюються у процесі еволюції*.

Мал. 60.3. Чарльз Роберт Дарвін (1809–1882) – видатний англійський учений, праці якого вплинули на подальший розвиток біології



Ч. Дарвін сформулював **теорію природного добору**. В її основі – погляди на природний добір як на процес, унаслідок якого виживають і залишають після себе плідних нащадків найбільш пристосовані до умов існування особин певного виду. Підґрунтям еволюційної теорії Ч. Дарвіна стали уявлення про здатність організмів змінюватись унаслідок змін середовища існування. Він вважав, що адаптації розвиваються в організмів поступово, у процесі їхньої еволюції.

За Ч. Дарвіном, еволюція відбувається на підставі спадкової мінливості під дією боротьби за існування, наслідком якої є природний добір. Саме їх він вважав рушійними факторами еволюції.

На відміну від Ж.-Б. Ламарка, Ч. Дарвін припускав, що мінливість може бути як неспадковою, так і спадковою. Модифікаційні зміни (модифікації) проявляються в усіх особин виду однаково під дією певного чинника і можуть зникати, коли ця дія припиняється. Модифікаційні зміни відбуваються у межах норми реакції, яка визначається спадково. Такі зміни нащадкам не передаються. Спадкова мінливість (*пригадаймо*: вона може бути мутаційною та комбінативною) – це зміни, які виникають у кожного організму індивідуально і можуть передаватися нащадкам.

Під **боротьбою за існування** Ч. Дарвін розумів різноманітні зв'язки, що виникають як між організмами, так і між організмами та середовищем їхнього існування. Він виокремлював три форми боротьби за існування: внутрішньовидову, міжвидову та боротьбу з несприятливими умовами навколишнього середовища.

Внутрішньовидова боротьба за існування відбувається між особинами одного виду, оскільки їм притаманні подібні вимоги до середовища існування: джерел їжі, типів схованок тощо. За Ч. Дарвіном, найбільш пристосовані особини мають кращі шанси вижити і здатні передавати свої ознаки, що забезпечують виживання, нащадкам. Це загалом сприяє вдосконаленню виду в процесі еволюції. Прикладом внутрішньовидової боротьби за існування слугує внутрішньовидова конкуренція.

Міжвидова боротьба за існування – це різні варіанти взаємодій між особинами різних видів, зокрема міжвидова конкуренція. Вона стає гострішою, що ближчі вимоги особин цих видів до умов проживання. Більш конкурентоспроможний вид може витіснити зі спільного місцезнаходження менш конкурентоспроможний. Наприклад, сірий пацюк витіскає чорного, рудий тарган – чорного. Ч. Дарвін вважав, що міжвидова боротьба за існування посилює внутрішньовидову, що сприяє прогресивній еволюції видів.



Поміркуйте, за що саме можуть змагатися особини різних видів та одного виду. Наведіть приклад міжвидової та внутрішньовидової боротьби за існування.

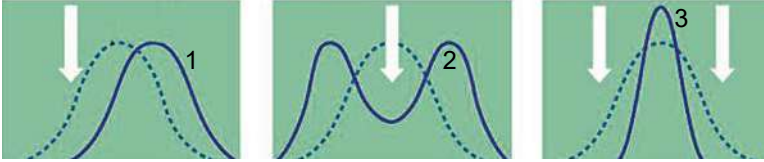
Боротьбу з несприятливими умовами навколишнього середовища спостерігають скрізь, де особини певного виду опиняються за умов дії несприятливих температур, недостатньої або надлишкової вологості, недостатнього або надлишкового освітлення й інших чинників. Існування в несприятливих умовах доквілля, як вважав Ч. Дарвін, посилює внутрішньовидову боротьбу і, як наслідок, сприяє кращій пристосованості виду в цілому.

На основі боротьби за існування діє **природний добір**, якому притаманний творчий характер. Зі значної кількості неспрямованих спадкових змін, які постійно виникають в організмів певного виду, завдяки природному добору залишаються тільки ті, які найбільше відповідають умовам існування. Отже, такі зміни дають змогу організмам краще пристосуватися до середовища існування. Накопичуючись і посилюючись із покоління в покоління, ці зміни сприяють удосконаленню виду та появі нових систематичних одиниць: підвидів, видів, родів тощо.

Послідовники поглядів Ч. Дарвіна згодом обґрунтували, що природний добір має певну спрямованість і може бути рушійним, стабілізуючим і розриваючим (мал. 60.4). **Рушійний добір** відбувається за повільних змін умов доквілля у певному напрямі або під час пристосувань організмів до нових умов у разі розширення ареалу (мал. 60.4, 1). Він зберігає спадкові зміни, що відповідають напрямку змін, які відбуваються у доквіллі. Отже, завдяки дії рушійного добору в певний бік зсувається і норма реакції.

Прикладом дії рушійного добору є спостереження у ХІХ ст. англійського біолога Волтера Велдона (1860–1906) за популяцією крабів бух-

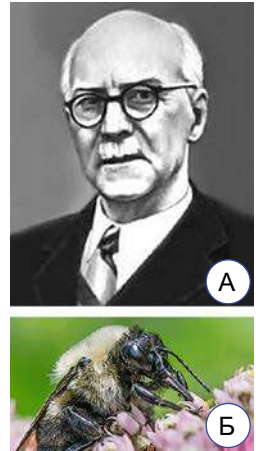
ти міста Плімута. Він дослідив, що за п'ять років після побудови молу ширина панцира крабів змінилася: якщо до побудови молу переважали особини із широким панциром, то після його побудови – з вузьким. Він пояснив це тим, що в особин з вузьким панциром вужчий отвір, який веде до зябрової порожнини. Це краще захищає зябра від забруднення мулом, який почав накопичуватись на дні після спорудження молу.



Мал. 60.4. Форми природного добору: 1 – рушійний; 2 – розриваючий; 3 – стабілізуючий (пунктиром показано вихідну норму реакції)

Стабілізуючий добір зазвичай проявляється в постійних умовах довкілля. Він підтримує сталість певного фенотипу, що найбільше відповідає навколишньому середовищу, і відкидає будь-які зміни як менш адаптивні (мал. 60.4, 3). Наслідком дії стабілізуючого добору є досконала пристосованість до певних умов існування, тобто спеціалізація видів. Прикладом дії стабілізуючого добору є підтримання сталої будови квітки в рослин, які запилюються лише певними видами комах (наприклад, конюшину запилюють переважно джмелі та бджоли) (мал. 60.5, Б). Теорію стабілізуючого добору розробив український учений І. І. Шмальгаузен (мал. 60.5, А).

Мал. 60.5. А. Іван Іванович Шмальгаузен (1884–1963): видатний учений у галузі порівняльної анатомії, еволюційної морфології та ембріології тварин. Працював у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка (у 1907–1912 та 1921–1941 рр.), у 1930–1941 рр. очолював Інститут зоології НАН України, який тепер носить його ім'я. Б. Приклад дії стабілізуючого добору: форма квітки має відповідати особливостям ротового апарату комах, які її запилюють



Розриваючий добір (його ще називають *дизруптивним*) одночасно діє у двох, рідше – кількох напрямках, однак не сприяє збереженню середніх варіантів ознак (мал. 60.4, 2). Наприклад, у жука двокрапкового сонечка є різні форми забарвлення. Одна з них має червоні надкрила з двома чорними крапками – така форма краще пристосована до дії високих температур. Інша, навпаки, має чорне забарвлення із червоними крапками: вона краще виживає під час дії низьких температур (мал. 60.6). Розриваючий добір сприяє виникненню кількох різних варіантів фенотипів в одній популя-



Мал. 60.6. Результат дії розриваючого добору

ції, отже, пристосуванню популяцій до існування в нестабільних умовах довкілля. Це явище забезпечує виживання особин виду у різних умовах.

Як особливу форму добору Ч. Дарвін розглядав **статевий добір** – пошук найбільш вигідного щодо якості майбутнього потомства статевого партнера. Він підтримує ознаки, які можуть зумовити успіх в осіб протилежної статі (наприклад, хвости павичів, великі роги самців оленів і навіть альтанки австралійських птахів-наметників).

Еволюційну теорію Ч. Дарвіна доповнили й розширили його послідовники. Вона дістала назву **дарвінізм** і сприяла інтенсифікації досліджень у різних галузях біології.

✓ **Дізнайтеся більше** про розвиток еволюційних поглядів за QR-кодом.



Основні положення синтетичної теорії еволюції. Як головне джерело **спадкової мінливості** синтетична теорія еволюції розглядає мутації (мутаційну мінливість): мутантні алелі можуть поєднуватись у різних комбінаціях, забезпечуючи комбінативну мінливість. **Головним рушійним фактором еволюції є природний добір.**

Еволюційні процеси, що відбуваються в популяціях, дістали назву **мікроеволюція** (від грец. *мікрос* – маленький та лат. *еволюціо*). Їхнім наслідком можуть бути зміни генофонду популяції. Такі зміни можуть сприяти утворенню нових видів – видоутворенню. Еволюційні процеси, внаслідок яких утворюються систематичні одиниці вищого рангу – нових родів, родин, рядів (порядків) тощо, називають **макроеволюцією** (від грец. *макрос* – великий та лат. *еволюціо*).

✓ **Дізнайтеся більше** про роль різних наук в обґрунтуванні еволюційного процесу за QR-кодом.



Узагальнення

Еволюційне вчення – розділ біології, що вивчає історичний розвиток живої природи. Перша еволюційна гіпотеза належить Ж.-Б. Ламарку. Він визнавав умови середовища існування як чинники еволюційного процесу та вважав головним його напрямом ускладнення організації організмів. Ч. Дарвін сформулював основні положення власної еволюційної теорії, в якій визнавав рушійними чинниками еволюції боротьбу за існування, природний добір і спадкову мінливість. На основі дарвінізму та даних генетики у XX столітті сформувалася синтетична теорія еволюції.

Поміркуйте

1. Що спільного та відмінного в еволюційних поглядах Ж.-Б. Ламарка та Ч. Дарвіна?
2. Яку роль відіграє спадкова та неспадкова мінливість у еволюційному процесі?
3. Чому за основу синтетичної теорії еволюції вчені взяли теорію Ч. Дарвіна?

§ 61. Популяція організмів як елементарна одиниця еволюції. Видоутворення

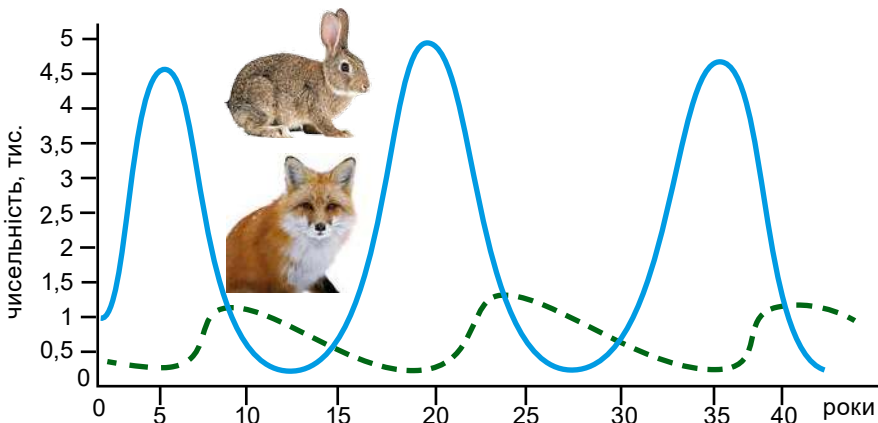


Чому не всі популяції можуть давати початок новим підвидам і видам?

Популяція як елементарна одиниця еволюції. Пригадаймо: вид – це сукупність організмів, які подібні між собою за будовою, процесами життєдіяльності та екологічними вимогами, населяють певну частину біосфери (ареал), вільно схрещуються між собою (якщо їм притаманне перехресне запліднення) і дають плодючих нащадків. Види реально існують у природі у вигляді системи популяцій (зрідка – як одна популяція), які зазвичай взаємодіють між собою. Обмін спадковим матеріалом відбувається як усередині популяцій, так можливий і між різними популяціями (шляхом міграцій особин у тварин, перенесення спор чи насіння вітром, водою, комахами у рослин тощо). У певних випадках обмін спадковим матеріалом між популяціями може бути ускладнений або взагалі унеможливлений.

Різні популяції одного виду можуть відрізнитись як за набором алельних генів, так і за частотою зустрічальності окремих алельних генів та їхніх поєднань у генотипах організмів (а отже, й частотою зустрічальності різних варіантів фенотипів). На генофонд популяції можуть впливати інтенсивні міграції особин з популяції в популяцію та мутаційний процес, що зумовлює появу нових алелів певних генів.

Однією з причин зміни генофонду є **популяційні хвилі** – періодичні або неперіодичні коливання чисельності особин у популяції (мал. 61.1). Наприклад, у разі зниження чисельності популяції можуть вимирати переважно особини з певними алелями або певними поєднаннями алельних генів. Натомість частота зустрічальності інших алелів та їхніх поєднань може різко зростати.



Мал. 61.1. Популяційні хвилі, зумовлені взаємодією між популяціями хижака (лисиці) та здобичі (зайця)



Поміркуйте, чому після зростання чисельності популяції здобичі зростає й чисельність популяції хижака, й навпаки, після зменшення чисельності популяції здобичі зменшується й чисельність популяції хижака.

За умов вільного обміну спадковою інформацією між різними популяціями певного виду їхній генофонд буде більш або менш подібний. Натомість унеможливлення обміну спадковою інформацією між окремими популяціями – **ізоляція** – зумовлює те, що генофонд таких популяцій з плином часу буде дедалі більше відрізнятися. Це створює передумови для виникнення нових підвидів і видів.

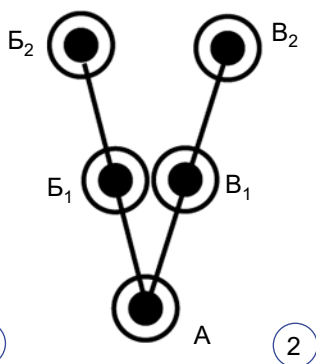
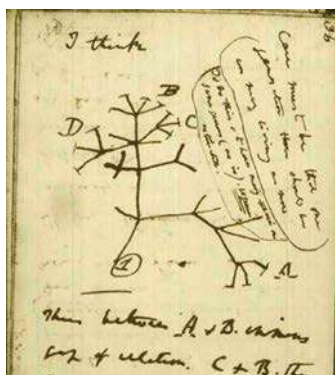
Підвид – це сукупність подібних між собою популяцій, які відрізняються від інших популяцій того самого виду одним або небагатьма варіантами ознак.

Саме тому, що в популяції перебігають елементарні еволюційні процеси (спадкова мінливість, популяційні хвилі, ізоляція тощо), її вважають **елементарною одиницею еволюції**. Вони можуть змінити генофонд популяції настільки, що внаслідок цього утворюються нові види (процес видоутворення).

✓ **Дізнайтеся більше** про вид та його критерії за QR-кодом.



Механізми видоутворення. Одним з видів еволюційного процесу є **видоутворення** – зміни видів у часі, які можуть зумовити виникнення нових видів. *Пригадаймо:* передумовою видоутворення є зміни



Мал. 61.2. Дивергенція. 1. Малюнок зі щоденників Ч. Дарвіна. 2. Схема, що ілюструє процес дивергенції: А – предковий вид; B_1 , B_2 , V_1 , V_2 – види-нащадки. 3. Види вимерлого роду Мамут (мамонт) (а) та індійський слон (сучасний вид; б) виникли від спільного предка шляхом дивергенції

в генофонді окремих популяцій або груп популяцій, що забезпечує їхню репродуктивну ізоляцію. Тривала ізоляція одних популяцій виду від інших приводить до того, що окремі популяції можуть еволюціонувати незалежно.

Видоутворення можливе різними шляхами, найчастіше внаслідок дивергенції, коли від вихідної батьківської форми виникають два або більше нових видів-нащадків. Поняття *дивергенція* (від лат. *диверген-тіо* – розходження) запропонував Ч. Дарвін. Під цим він розумів явище розходження ознак у нащадків спільного предка внаслідок їхніх пристосувань до різних умов довкілля (мал. 61.2).

Процес дивергенції пояснює не тільки появу нових видів у процесі еволюції, а й поступове збільшення їхньої кількості, адже один предковий вид може дати початок певній кількості дочірніх.

Відповідно до типу ізоляції розрізняють географічне та екологічне видоутворення. **Географічне видоутворення** відбувається внаслідок просторової ізоляції популяцій предкового виду (мал. 61.3).



Мал. 61.3. А. Механізм географічного видоутворення

Ще один приклад. На території Євразії та Північної Америки мешкають два близьких види бобрів: бобер європейський (бобер річковий) поширений на території Євразії, тоді як бобер канадський – Північної та Центральної Америки (мал. 61.4). Вважають, що поява цих видів пов'язана з тим, що порівняно недавно (кілька сотень тисяч років тому) Азія та Північна Америка були з'єднані суходільним містком, і на їхньому спільному терені мешкав один вид бобрів. Після

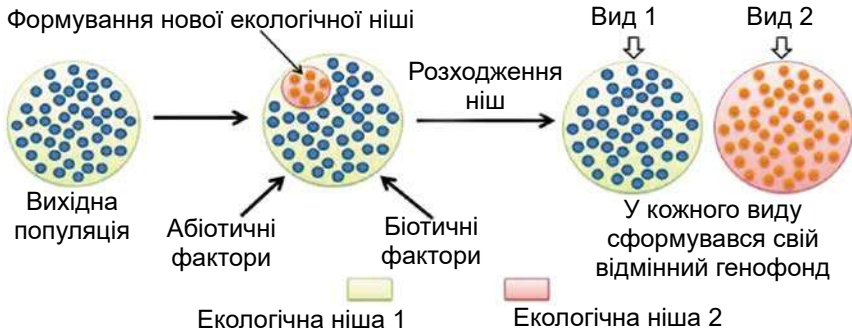


Мал. 61.4. Бобри європейський (1) та канадський (2)

утворення Берингової протоки внаслідок географічної ізоляції цей вид дав початок двом самостійним видам.

Екологічне видоутворення відбувається у результаті появи різних форм екологічної ізоляції у межах батьківського ареалу:

- виникнення нових видів у результаті кратного збільшення числа хромосомних наборів (поліплоїдизації);
- виникнення репродуктивної ізоляції особин унаслідок хромосомних перебудов;
- гібридизації;
- виникнення нових видів через розділення екологічних ніш (мал. 61.5).



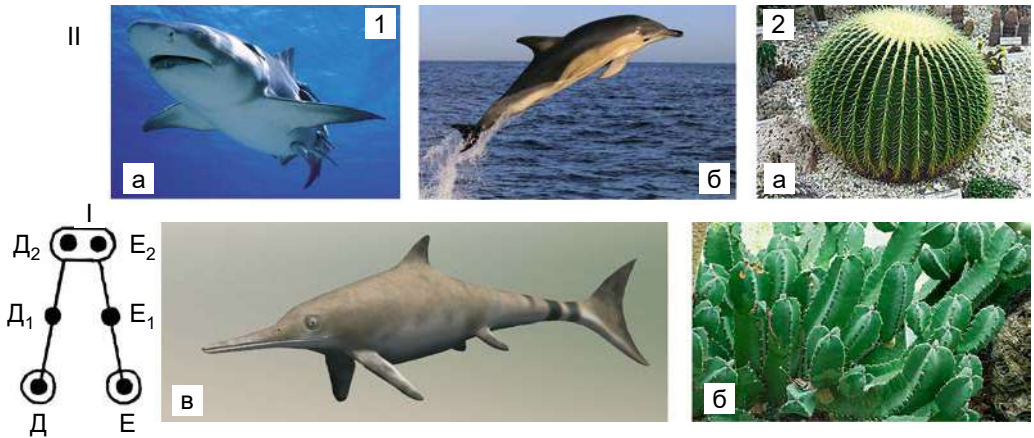
Мал. 61.5. Екологічна ізоляція внаслідок розходження екологічних ніш

Наведемо приклади екологічного видоутворення. Відомо кілька близьких видів синиць, які добувають подібну або різну їжу на різних горизонтах крон дерев або на землі. Тим самим кожен з них займає свою екологічну нішу. Жаба їстівна виникла внаслідок гібридизації ставкової та озерної жаб близько 5 тис. років тому.

Напрями еволюційного процесу. Крім дивергенції, іншими напрямками еволюційного процесу є конвергенція та паралелізм. **Конвергенцію** (від лат. *кон* – разом та *верgere* – спрямованість) спостерігають, коли неспоріднені організми опиняються в подібних умовах існування. Тому в них незалежно один від одного можуть формуватися подібні адаптації (мал. 61.6, I). Так, у зубатих китів (клас Ссавці) унаслідок пристосувань до активного полювання виникла подібна до акул (клас Хрящові риби) форма тіла, а їхні передні кінцівки зовні нагадують плавці. Подібний вигляд мали й викопні морські хижі плазуни – іхтіозаври (мал. 61.6, II, 1). До стеблових сукулентів зараховують як кактуси (родина Кактусові, порядок Гвоздикоцвіті, поширені в Америці), так і деякі молочаї (родина Молочайні, порядок Мальпігієцвіті, поширені в Африці) (мал. 61.6, II, 2).

Хоча більшість видів утворилися шляхом дивергенції, в подальшому такі дочірні види могли опинитися в подібному за умовами проживання середовищі та незалежно один від одного пристосовуватися до нього. Отже, й адаптації до такого середовища в них можуть формуватися незалежно один від одного – паралельно (мал. 61.7, I).

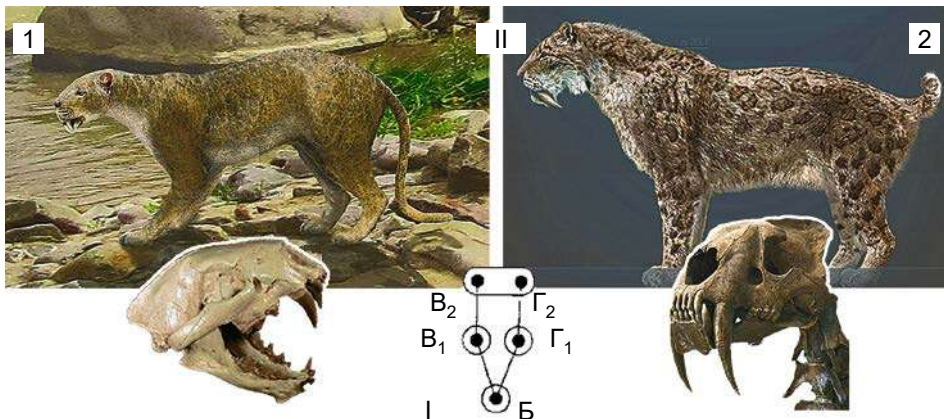
Наведемо такий приклад. Серед викопних представників ряду Хижі відомі так звані шаблезубі види (мал. 61.7, II). Ці хижі тварини



Мал. 61.6. I. Схема, що ілюструє процес конвергенції (Д та Е – предкові види; Д₁, Д₂ та Е₁, Е₂ – види-нащадки). II. Приклади конвергенції: 1 – активні хижаки – мешканці водойм: а – біла акула; б – дельфін-білобочка; в – іхтіозавр; 2 – стеблові сукуленти: а – ехінокактус; б – молочай палеотропіс

мешкали на території Північної Америки, за розмірами нагадували сучасну рись, мали довгий хвіст. Потужні ікла давали змогу цим хижакам полювати на велику здобич. Отже, у представників двох вимерлих родів з різних родин ряду Хижі, які походять від спільного предка, сформувалися подібні ознаки – потужні ікла.

Напрямок еволюційного процесу, коли у різних видів, що мають спільну генетичну основу (оскільки мають спільного предка) й мешкають у подібних умовах, формуються подібні ознаки, називають **паралелізм**.



Мал. 61.7. I. Схема, що ілюструє паралелізм: від предкового виду Б шляхом дивергенції виникають дочірні види В₁ та Г₁, які можуть опинятися в подібних умовах існування та розвиватися незалежно один від одного. II. Приклад паралелізму. 1. Диніктис – представник вимерлого роду вимерлої родини Німравіди (так званих несправжніх шаблезубих тигрів). 2. Смілодон – представник вимерлого роду шаблезубих котів (родина Котячі)

Явище паралельної еволюції слід відрізняти від конвергенції. Паралелізм завжди починається з процесу дивергенції. У разі паралельної еволюції подібні ознаки формуються незалежно у близькоспоріднених груп організмів, тобто таких, які мають багато спільних груп генів. Тому в генофондах споріднених видів можуть з'являтися подібні мутації, на ґрунті яких формуються подібні ознаки. Натомість, у разі конвергенції ми маємо справу з неспорідненими організмами, які набувають лише зовнішньої подібності внаслідок формування незалежних адаптацій до подібних умов існування (мал. 61.6).

Узагальнення

Популяція – елементарна одиниця еволюційного процесу. Саме в популяціях відбуваються зміни генофонду під дією таких еволюційних факторів, як спадкова мінливість, ізоляція та популяційні хвилі тощо. Зміни генофонду різних популяцій одного виду можуть завершитись видоутворенням – виникненням нових видів. Основними формами ізоляції, що спричиняє зміни генофонду популяцій, є географічна (супроводжується просторовим розділенням популяцій) та екологічна (без виникнення просторової ізоляції). Основними напрямками еволюційного процесу є дивергенція, конвергенція та паралелізм.



Поміркуйте

1. Чому існування видів у вигляді системи популяцій є необхідною передумовою виникнення нових видів?
2. У якому випадку дочірні види, що походять від спільного предка, будуть більше схожі між собою – у разі географічного або в разі екологічного видоутворення?
3. Чи можуть існувати в межах однієї систематичної групи приклади і конвергентної, і дивергентної еволюції?

§ 62. Наукові погляди на походження та історичний розвиток життя



Чому жодна з гіпотез походження життя не стала теорією або біологічним законом?

Проблема виникнення життя на нашій планеті й натеper залишається однією із центральних у сучасній науці. Досі не існує єдиної теорії, яка однозначно дала б відповідь на це питання й до того ж навела беззаперечні докази. Є низка гіпотез, кожна з яких намагається пояснити появу життя на планеті Земля зі своїх позицій.

Згідно з **креаціонізмом** (від лат. *creaціo*nis – творіння) неорганічний світ і всі живі істоти, включно з людиною, створені Богом. Сучасний креаціонізм має різні напрями, частина яких не визнає процесу еволюції; інші ж вважають, що еволюція є засобом здійснення Богом його мети.

Гіпотези абіогенезу (гіпотези біохімічної еволюції), що ґрунтуються на ідеї спонтанного зародження життя з неорганічної матерії, відомі ще з античних часів. Їх висували вчені стародавніх цивілізацій

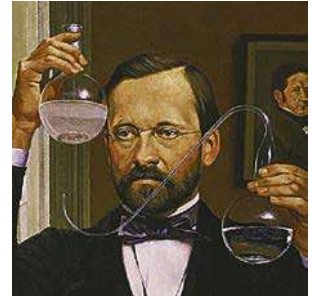
Китаю, Греції, Єгипту тощо ще тисячі років тому. Зокрема, давньогрецький філософ Аристотель (див. мал. 1.1, А) вважав, що живі істоти постійно виникають з мулу, гною тощо, частинки яких містять «активний зародок», що за відповідних умов може дати початок організму.

Тривалий час існували погляди щодо можливості самозародження життя на нашій планеті. Так, голландський дослідник Ян Бабтиста ван Гельмонт (1577–1644) описав дослід з виникнення («мимовільного зародження») мишей з пропотілої сорочки в темній шафі зі жменю пшениці. Багато вчених дослідним шляхом намагалися довести неможливість самозародження життя, але їхні експерименти вважали непереконливими.

Лише в 1860–1862 рр. видатний французький біолог Л. Пастер експериментально довів неможливість самозародження життя на нашій планеті в сучасних умовах. Він сконструював оригінальний прилад, що мав вигляд колби, до гирла якої була приєднана S-подібна трубка (знайдіть її на мал. 62.1). У колбу наливали прокип'ячений поживний бульйон.

На відміну від посудин звичайної форми, де невдовзі після розміщення бульйону на його поверхні спостерігали «самозародження життя» – з'являлася бактеріальна плівка, у пастерівській колбі бульйон тривалий час залишався стерильним. Це пояснювалося тим, що незважаючи на те, що повітря вільно доходило до поверхні бульйону, спори та цисти бактерій осідали в S-подібній трубці й затримувалися там. Але варто було обмити бульйоном цю трубку, як на його поверхні розвивалася бактеріальна плівка. Отже, Л. Пастер остаточно довів неможливість самозародження життя на нашій планеті, за що йому 1862 р. було присуджено премію Французької академії наук.

Цікаво знати. Луї Пастер відкрив мікробіологічну суть процесів бродіння і багатьох хвороб людини, став одним з основоположників таких наук, як мікробіологія та імунологія. Його ім'я широко відоме завдяки створеній ним і названій пізніше на його честь технології пастеризації. Став першим директором Інституту мікробіології, заснованого в Парижі 1888 р. (згодом названий на його честь Інститутом Пастера). Після смерті Л. Пастера заступником директора інституту з 1905 р. працював наш видатний співвітчизник І. І. Мечников.



Мал. 62.1. Луї Пастер (1822–1895) – видатний французький мікробіолог

Найбільш відомою з абіогенних гіпотез походження життя на нашій планеті є **біохімічна гіпотеза**, сформульована у 20-х роках ХХ ст. Вона стверджує, що біологічній еволюції передувала хімічна еволюція органічних речовин, яка тривала кілька сотень мільйонів років аж до часу виникнення перших живих істот.

Як свідчать геологічні дані, первинна атмосфера Землі складалася з вуглекислого газу, метану, амоніаку, оксидів Сульфуру, сірководню та водяної пари. Вільний атмосферний кисень та озоновий екран були відсутні, і на поверхню суходолу та Світового океану падав активний

потік космічного випромінювання, включно з ультрафіолетовими променями. Унаслідок високої вулканічної активності до океану та атмосфери з надр Землі постійно надходили різноманітні хімічні сполуки. В атмосфері Землі були часті грози, електричні розряди (блискавки) сягали поверхні первісного Світового океану. Все це створювало умови для перебігу хімічних реакцій між різними неорганічними сполуками, під час яких могли утворитися органічні речовини.

Органічні речовини, утворені в первісному океані, збирались у скупчення, відокремлені водною оболонкою, – *коацерватні краплини*. Вони поводитись як відкриті біологічні системи: виявляли здатність поглинати ззовні різні сполуки. Унаслідок цього розміри коацерватних краплин збільшувались, що нагадувало ріст клітин. У концентрованому розчині органічних речовин усередині коацерватних краплин могли відбуватись різні біохімічні процеси, що теоретично могло спричинити появу молекул, здатних до самовідтворення (таких як молекули нуклеїнових кислот).

Біохімічна гіпотеза стверджує, що коацерватні краплини якимось перетворились на гіпотетичні «доклітинні» біологічні системи, здатні до самоорганізації, – *протобіонти*. Від таких упорядкованих скупчень органічних сполук, у тому числі й біополімерів, могли виникнути первісні клітини – *протоклітини*.

Новий етап уявлень про самозародження та еволюцію життя на нашій планеті пов'язаний з ідеями так званого *світу молекул РНК*. Уперше їх висловив американський мікробіолог Карл Річард Воуз (1928–2012) і згодом розвинули британський хімік Леслі Ілізер Орджел (1927–2007) та американський фізик Волтер Гілберт (нар. 1932 р.). Їхні уявлення базуються на тому, що молекули РНК можуть не тільки зберігати спадкову інформацію, а й виконувати функції ферментів.

На ранніх етапах зародження життя на Землі молекули РНК могли існувати автономно завдяки здатності до самоподвоєння та каталітичним властивостям. Виникнення нових мутацій могло спричинити появу молекул РНК, здатних каталізувати біосинтез певних білкових молекул. Після появи молекул ДНК вони почали виконувати функції спеціалізованих «зберігачів» спадкової інформації. Натомість за молекулами РНК залишилися функції посередників між ДНК та процесами синтезу молекул білків. Цікаво, що в деяких РНК-умісних вірусів, наприклад ВІЛ, молекули РНК слугують матрицею для синтезу молекул ДНК (чого не спостерігають ані в еукаріотів, ані у прокаріотів).

Гіпотези біогенезу базуються на поглядах, що живі істоти можуть походити лише від живих істот. Прихильники цих гіпотез розглядають життя як особливу форму існування матерії, що існує стільки само часу, як і Всесвіт, тому їх ще називають *гіпотезами вічності життя*. Ці гіпотези не намагаються пояснити, як виникло життя взагалі, а стверджують лише про його позаземне походження на нашій планеті.

Сучасні біогенні погляди мають назву *гіпотези панспермії* (від грец. *пан* – усе та *сперматос* – насіння). Уперше висловив думку про можливість занесення життя з космосу ще давньогрецький філософ Анаксагор у V ст. до н. е. Саму гіпотезу панспермії сформулював шведський фізик Сванте Август Арреніус (1859–1927) на початку XX ст., а

розвинув український учений В. І. Вернадський. До її прихильників належить й один із відкривачів просторової структури молекули ДНК – біохімік Френсіс Крік, а також багато інших.

Гіпотеза панспермії припускає, що спори прокаріотів можуть, не втрачаючи життєздатності, витримувати умови космічного простору: перебування у вакуумі за температур, близьких до абсолютного нуля ($-273,15^{\circ}\text{C}$), жорстке радіаційне та ультрафіолетове опромінення. Вони легко потрапляють у верхні шари атмосфери планет і завдяки мізерній власній масі можуть звідти потрапляти у відкритий космос.

Отже, у космосі присутні спори прокаріотів, які неначе дощем безперервно могли потрапляти на планети за умови відсутності щільної атмосфери. За сприятливих умов з них виходили активні форми прокаріотів різних видів, які утворювали первинні екосистеми нашої планети. У подальшому еволюція таких «первинних» видів відбувалася в різних напрямках відповідно до змін умов довкілля.

Цікаво знати. Нещодавно були отримані дані, які можуть слугувати підтвердженням позаземного походження життя. 11.09.1999 р. фахівці обсерваторії Сокорро (штат Нью-Мексико, США) відкрили астероїд, названий 101955 Бенну (англ. 101955 Bennu), на честь міфічного птаха Бенну, якого вважали душею бога Сонця Ра. Цей птах був символом вічного життя та воскресіння з мертвих. Американська міжпланетна станція OSIRIS-Rex (Осіріс у давньоєгипетській міфології – бог потойбічного світу, відродження, суддя душ померлих) 20.10.2020 р. збрала зразки ґрунту з поверхні цього астероїда. Капсула із зразками ґрунту повернулася на Землю 24.09.2023 р. У січні 2025 р. дослідники повідомили, що в цих зразках виявлено органічні сполуки, багаті на Карбон та Нітроген. Зокрема, виявлено 14 з 20 стандартних амінокислот і всі 5 нуклеотидних основ (аденін, тимін, урацил, гуанін, цитозин). Дослідники також припускають наявність води в складі астероїда 101955 Бенну.



Мал. 62.2. Фреска із зображенням птаха Бенну (Дейр ель-Медіна, Єгипет)

Узагальнення

Існує кілька гіпотез, які намагаються пояснити походження живого на Землі. Гіпотеза креаціонізму стверджує, що життя виникло внаслідок Божественного творіння. Крім того, існують гіпотези абіогенезу (появи живого від неживого) та біогенезу (появи живого від живого, зокрема гіпотеза панспермії – занесення життя з космосу).

Поміркуйте

1. Прихильником якої гіпотези походження життя на нашій планеті ви себе вважаєте?

2. Як спростувати твердження, що личинки мух можуть самозароджуватись у шматку м'яса?
3. Знайдіть спільне й відмінне у гіпотезах біогенезу та абіогенезу.

§ 63. Етапи еволюції людини

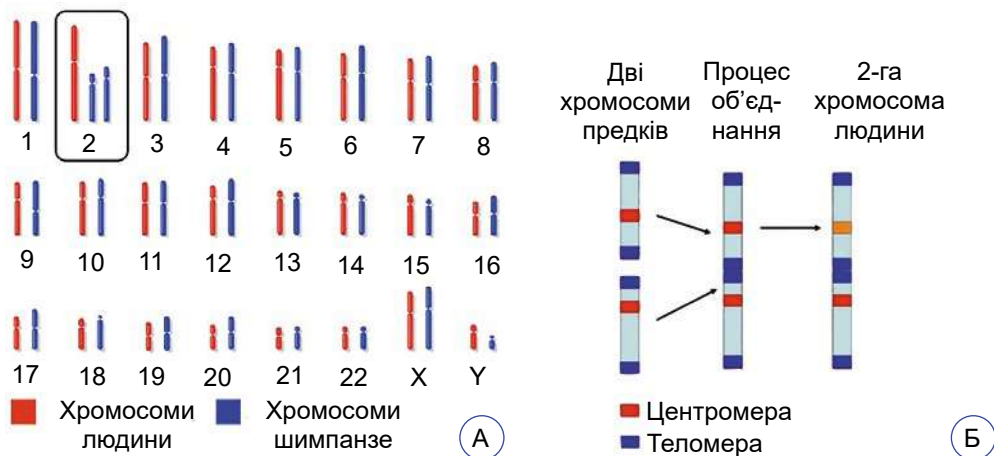


Чому сучасних людиноподібних мавп не можна вважати предками людини?

Походження людини. Одне з найзагадковіших питань, які цікавлять не тільки науковців, а й пересічних людей, – це походження виду Людина розумна (*Homo sapiens*). З погляду різних релігій, людина створена Богом і залишається незмінною із часів акту творіння. Проте ще з давніх часів учені помічали подібні риси організації сучасної людини та людиноподібних мавп. Так, К. Лінней, створюючи свою систему тваринного світу, на підставі подібності будови помістив людину в ряд Примати. Але оскільки він вважав, що людина, як й інші види живих істот, створена Богом, то зазначив при цьому: «Пам'ятай про свого Творця».

Інших поглядів дотримувався Ж.-Б. Ламарк. Він вважав людину, яка перебуває на вищому щаблі еволюції, прямим нащадком мавпоподібних істот. Натомість Ч. Дарвін наголошував, що людина та людиноподібні мавпи виникли у колишні геологічні епохи від спільного предка. Про походження людини від спільних з людиноподібними мавпами предків свідчать дані і молекулярно-генетичних досліджень. Так, геноми людини та шимпанзе збігаються майже на 98,9 %. Досить близькі й каріотипи людини та шимпанзе: людина в диплоїдному наборі має 46 хромосом, тоді як шимпанзе – 48 (так само як і горила) (мал. 63.1).

Процес походження та еволюції людини має назву **антропогенез** (від грец. *антропос* – людина та *генезис* – походження).



Мал. 63.1. Порівняння хромосомних наборів людини та шимпанзе (номерами позначені хромосоми людини) (А); припускають, що у процесі еволюції дві хромосоми предкових форм людини (на малюнку А вони розташовані всередині рамки) могли об'єднатись в одну (Б) у процесі історичного розвитку людини

На відміну від еволюції інших видів приматів, еволюція Людини розумної має свої особливості: вона пов'язана з переходом до прямоходіння, здатністю до трудової діяльності, членороздільної мови та абстрактного мислення. Це позначилося на особливостях будови людини, зокрема її скелета. Наприклад, збільшився об'єм мозкового відділу черепа, що пов'язано з прогресивним розвитком головного мозку.

У сучасної людини менш потужні щелепи, зменшилися розміри надбрівних дуг та утворився підборідний виступ, пов'язаний зі здатністю до членороздільної мови. Потиличний отвір у людини перемістився ближче до центру основи черепа, що дає змогу краще зберігати рівновагу у вертикальному положенні. Маса головного мозку людиноподібних мавп становить у середньому: у шимпанзе – до 500 г, горили – 600 г. У дорослої людини середня маса головного мозку близько 1300–1400 г.

Цікаво знати. Маса головного мозку в різних людей може варіювати в досить широких межах: наприклад, у відомого французького письменника Анатолія Франса вона становила 1017 г, а в англійського поета Джорджа Байрона – 2238 г.

✓ **Дізнайтеся більше** про зміни у скелеті людини у зв'язку з прямоходінням за QR-кодом.



Еволюція людини спочатку базувалася на тих самих біологічних закономірностях, що й еволюція інших мешканців нашої планети. Але рушійними силами антропогенезу були не тільки біологічні чинники, а й **соціальні**. Предки сучасної людини вели суспільний спосіб життя. Вони жили групами, колективно полювали, спільно захищалися від ворогів, виховували нащадків. Трудова діяльність згуртовувала членів первісного соціуму. У процесі виготовлення знарядь праці члени соціуму більше спілкувалися між собою, а старші члени соціуму передавали свої знання молодшим: учили їх ефективно полювати, уникати зустрічі з хижаками, виготовляти знаряддя праці, добувати й підтримувати вогонь та інших життєво необхідних умінь і навичок.

У процесі антропогенезу біологічні чинники поступово втрачали своє значення, натомість помітно зростала роль чинників соціальних, які й зумовили формування виду Людина розумна як **біосоціальної істоти**.

Потреба у спілкуванні між собою сприяла появі членороздільної мови. Так на певних етапах еволюції людини, крім першої сигнальної системи, з'явилась і друга. Здатність до членороздільної мови вплинула й на подальший прогресивний розвиток головного мозку людини, здатність до абстрактного мислення (*пригадайте*, що це таке).

Основні етапи еволюції людини. Досі тривають дискусії щодо можливого безпосереднього предка виду Людина розумна, оскільки не виявлено форми, які можна було б вважати перехідними між вимерлими видами роду Люди і видом Людина розумна. Тому можна лише розглянути основні етапи еволюції сучасної людини.

Найбільш близькими до роду Люди вчені вважають **австралопітеків** (від лат. *аустралис* – південний та грец. *пітекос* – мавпа) (мал. 63.2). Рештки цих істот уперше знайдено 1924 р. на території Півден-



Мал. 63.2.
Австралопітек



Мал. 63.3.
Людина вміла



Мал. 63.4. Людина
працююча

ної Африки (пустеля Калахарі). Вони мешкали близько 4,2–1,9 млн років тому. У будові черепа австралопітеків є риси, притаманні й сучасній людині: відносно слабкий розвиток щелеп, відсутність масивних ікл, об'єм головного мозку становив до 530 см^3 (у середньому – 460 см^3). Цим істотам було притаманне прямоходіння. Зріст здебільшого становив 120–140 см. Пізні австралопітеки могли самостійно виготовляти примітивні знаряддя праці: заточені камені, палиці тощо. Багато дослідників розглядають австралопітеків як сліпу гілку еволюції, хоча й близьку до роду Люди.

Найдавнішим видом роду Люди вважають **Людину вмілу**. Цей вид з'явився близько 2,4 млн років тому, а вимер приблизно 1,65 млн років тому. Уперше рештки представників виду Людина вміла знайшли на території Танзанії (Східна Африка), а згодом – і в інших регіонах Східної та Південної Африки. Ці істоти були низькорослими (100–150 см заввишки), з масою тіла близько 30–50 кг (мал. 63.3). Середній об'єм головного мозку становив від 500 до 900 см^3 .

Людина вміла відрізнялася від австралопітеків прогресивнішою будовою тазового поясу, рук і ніг, зокрема великий палець ніг був розташований паралельно щодо інших (*поміркуйте*, яке це має значення для прямоходіння). Прогресивна будова кисті розширювала функціональність руки, зокрема давала змогу виготовляти різні знаряддя праці та полювати. Здатність до трудової діяльності позитивно вплинула на розвиток розумових здібностей.

Людина працююча¹ мешкала приблизно 1,7–1,5 (за деякими даними проіснувала до 0,6) млн років тому в Африці. Ріст цих істот становив 130–170 см, маса тіла – до 65 кг (мал. 63.4). У будові черепа, порівняно з Людиною вмілою, було більше ознак, притаманних сучасній людині: кістки черепа були тоншими, зуби дрібнішими. Об'єм головного мозку в середньому становив 900 см^3 (варіював у межах $750\text{--}1250 \text{ см}^3$). Людина працююча виготовляла досконаліші знаряддя праці, наприклад двосічне рубало, що й зумовило

назву цього виду. Вважають, що істоти цього виду могли використовувати вогонь.

Людина прямоходяча з'явилася приблизно 1,9 млн років тому на території Східної Африки. Об'єм головного мозку цього виду варіював у межах $800\text{--}1200 \text{ см}^3$ (мал. 63.5). Ріст становив 148–167 см, маса

¹ Деякі дослідники розглядають Людину працюючу не як окремий вид, а як підвид виду Людина прямоходяча.

тіла – близько 50 кг. Людина прямоходяча виготовляла досить складні знаряддя праці з каменів, загострені дерев'яні палиці. Вона мешкала в печерах, виготовляла одяг зі шкур тварин, можливо, використовувала вогонь для приготування їжі. Цей вид приблизно 1,8 млн років тому через Близький Схід поширився по Євразії, утворивши низку таких підвидів, як пітекантроп (з території Індонезії), синантроп (Китай), людина грузинська (з території сучасної Грузії).



Мал. 63.5.
Людина
прямоходяча

Людина неандертальська, або неандерталець (мал. 63.6). Назва цього виду походить від назви долини Неандерталь (Німеччина), де 1856 р. уперше виявили рештки цих людей (череп і залишки скелета). Неандертальці мали досить широкий ареал: Європа, Середня Азія, Близький та Середній Схід тощо. Середній зріст становив від 152 до 168 см, маса тіла – 65–80 кг. Ці люди мали дуже потужну статуру: їхня м'язова маса була на 30–40 % більшою, ніж у сучасної людини. Руки та ноги неандертальців були потужні. Вони мали великий і масивний череп з потужними щелепами та маленьким підборіддям, лоб був скошений назад, а надбрівні дуги – масивні. Об'єм головного мозку зазвичай становив до 1600 см^3 (у чоловіків) та до 1300 см^3 (у жінок). Неандертальці існували у період з 230 тис. до 40 тис. років (є відомості, що неандертальці існували ще 27 тис. років тому).



Мал. 63.6. Людина
неандертальська

Цікаво знати. Максимальний об'єм головного мозку неандертальців становив 1736 см^3 .

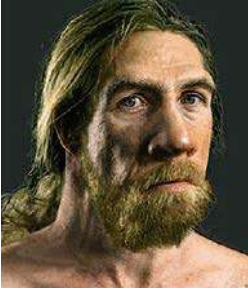
Науковці припускають, що неандертальцям було притаманне складне мовлення. Ці люди виготовляли досить досконалі знаряддя праці та зброю, широко застосовували в побуті вогонь. Цей вид тривалий час співіснував із Людиною розумною.

Цікаво знати. Новітні дослідження ДНК з викопних решток неандертальців і денісівців (денісівську людину вважають вимерлим видом або підвидом роду Людина; ареал охоплював Східну та Південно-Східну Азію аж до Нової Гвінеї) показали сліди їхніх генів у геномі сучасної людини. Неандертальський «спадок» становить від 1 % до 4 % у різних популяціях (найбільше – в генах жителів Європи і Пакистану і відсутній – у корінних жителів Африки). Частка спільних генів із денісівською людиною ще менша, але в деяких народів південно-тихоокеанського регіону може сягати до 5 % ядерних генів (народність аета магбукон на о. Лусон на Філіппінах).

Людина розумна – єдиний існуючий на сьогодні вид роду Люди. Від людини неандертальської його представники відрізняються низкою ознак будови: високий лоб, редуковані надбрівні дуги, відсутній потиличний виступ, наявний підборідний виступ, який свідчить про здатність до членороздільної мови, сплюснена грудна клітка.

Перші представники виду Людина розумна з'явилися приблизно 200 тис. років тому; їх об'єднують в окремий вимерлий підвид – **Люди-**

на розумна найстаріша. Вперше рештки цього підвиду були виявлені в Африці (на території сучасної Ефіопії), їхній вік оцінюють у 154–160 тис. років.



Мал. 63.7.
Людина розумна
розумна

Сучасний підвид – **Людина розумна розумна**¹ відрізняється від вимерлого підвиду прогресивними рисами будови черепа та менш масивним скелетом (мал. 63.7). Дослідники вважають, що близько 74 тис. років тому, імовірно після потужного вулканічного виверження, представники цього підвиду мігрували з території сучасної Індонезії до Африканського континенту, де стали предками сучасних людей. Приблизно 60–40 тис. років тому ці люди потрапили до Азії, а звідти розселилися на інші континенти: до Європи (близько 40 тис. років тому), Америки та Австралії (35–15 тис. років тому).

Для Людини розумної розумної характерні: прогресивний розвиток центральної нервової системи, досконала вища нервова діяльність, здатність до абстрактного мислення, високі інтелектуальні здібності. У процесі своєї еволюції Людина розумна розумна перейшла від збирання рослин та полювання на тварин до ведення сільського господарства: вирощування культурних рослин і розведення свійських тварин. Вважають, що цей важливий етап розвитку сучасної людини відбувся близько 10 тис. років тому. На сьогодні Людина розумна розумна заселила всі існуючі континенти. Цей вид перебуває у стані біологічного прогресу, оскільки його чисельність стрімко зростає.

Раніше у межах виду Людина розумна виокремлювали три основні раси – групи людей, що відрізняються спільними комплексами фізичних і соціальних ознак: європеїдну, монголоїдну та негроїдну. Згідно із сучасними науковими поглядами, виділити окремі раси людини у чистому вигляді неможливо, оскільки між різними людськими спільнотами, які перебувають у стані постійних змін, існують плавні переходи.

Незважаючи на певні відмінності в зовнішньому вигляді, представники всіх рас належать до одного виду – Людина розумна.



Що спільного й відмінного в еволюції Людини розумної та людиноподібних мавп?



Узагальнення

Антропогенез – процес походження та еволюції людини. Особливості еволюції людини пов'язані з переходом до прямоходіння, розвитком трудової діяльності, формуванням членороздільної мови та здатністю до абстрактного мислення. Рушійними силами антропогенезу були не лише біологічні, а й соціальні чинники: суспільний спосіб життя, виготовлення знарядь праці, навчання, передавання досвіду. Тому людина розумна є біосоціальною істотою.

¹ Цей підвид ще називають «кроманьйонцем», оскільки перші рештки цих людей виявили в печері Кроманьйон на території Франції.

Поміркуйте

1. Чи може шимпанзе за певний час еволюціонувати до людини?
2. Наскільки реалістичним може бути факт гібридизації людини неандертальської та кроманьйонця?
3. Що спільного й відмінного в еволюції Людини розумної та людиноподібних мавп?

Підб'ємо підсумки з теми

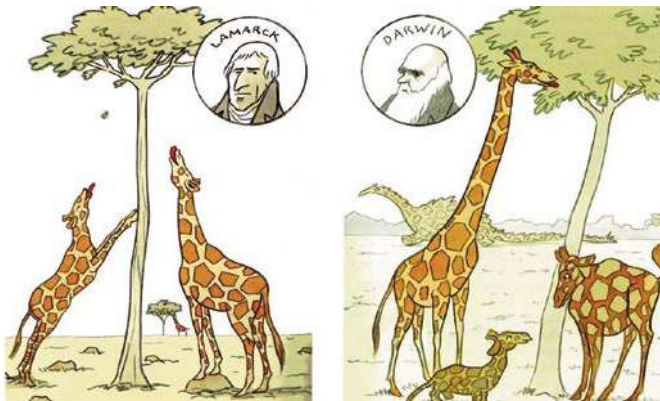
I. Досліджую природу

1. Учні готувались до виконання науково-дослідницького проекту «Дослідження зміни динаміки чисельності людських популяцій на прикладі України та іншої країни світу на вибір учителя / учительки (народжуваність, смертність, густина тощо)». Учитель дав завдання сформулювати тему таким чином, щоб у ній були зазначені змінні. Учень запропонував: «Дослідження залежності зміни чисельності людських популяцій на прикладі України залежно від зовнішньої політики». Учениця запропонувала: «Дослідження залежності зміни чисельності людських популяцій на прикладі України залежно від інтенсивності бойових дій упродовж 2014–2025 років». Хто з них має рацію?

А учень **Б** учениця **В** обидва мають рацію **Г** обидва помиляються

II. Опрацювую та використовую інформацію

1. Розгляньте малюнок і прочитайте інформацію про те, як Ж.-Б. Ламарк та Ч. Дарвін пояснювали «еволюцію» шиї в жирафів. Виберіть твердження «Так» чи «Ні».



За теорією Ж.-Б. Ламарка, довга шия та кінцівки у жирафи утворилися внаслідок спадкового набуття ознак через постійне «вправляння» та використання органа. Він вважав, що предки жирафів мали коротші шиї, але намагалися дотягнутися до листків на верхівках дерев. Це зумовило поступове витягування шиї та кінцівок, які потім успадковувалися нащадками. Ці набуті ознаки видовженої шиї передавались у спадок нащадкам.

За теорією Дарвіна, довга шия та кінцівки у жирафи – це результат поступової еволюції, де випадкові генетичні мутації, які надавали перевагу у виживанні, закріплювалися в популяції. Жирафи з довшими шиями та кінцівками могли діставати листки з високих дерев, що давало їм більше їжі, і це підвищувало їхні шанси на виживання та розмноження. Такі особини давали потомство з довшими шиями. Жирафи з короткими шиями гинули і потомства не залишали.

І Ж.-Б. Ламарк, і Ч. Дарвін вважали, що між жирафами в популяції виникала конкуренція за їжу	Так	Ні
Ж.-Б. Ламарк вважав, що шию і ноги потрібно тренувати, або «вправлятися», від цього орган стає довшим	Так	Ні
Ч. Дарвін вважав, що їжа не мала значення для виживання жирафи	Так	Ні
Виживання найбільш пристосованих жирафів до умов існування можна вважати природним добром	Так	Ні
За Ж.-Б. Ламарком, мутації не мають жодного значення в еволюційному процесі	Так	Ні
За теорією Ч. Дарвіна, у низьких жирафів, які не діставали листків верхніх гілок, могли одразу народитись нащадки з довгими шиями	Так	Ні

III. Усвідомлюю закономірності природи

1. Одним із чинників еволюції Ч. Дарвін визначив боротьбу за існування, яка є у трьох формах: внутрішньовидова, міжвидова та боротьба з умовами існування. Проаналізуйте твердження та зображення організмів на світлинах.



I. На всіх світлинах зображено форми боротьби за існування.

II. На світлині 1 зображено міжвидову, а на світлині 3 – боротьбу з умовами існування.

Яке твердження правильне?

A правильне I твердження

Б правильне II твердження

В обидва твердження правильні

Г обидва твердження неправильні

2. Утворіть пари між еволюційним процесом (1–4) та прикладом, який його ілюструє (А–Д).

1 ароморфоз

2 конвергенція

3 ідіоадаптація

4 загальна дегенерація

A агава та молодило – рослини різних родин, які використовують потовщені листки для накопичення вологи

Б поява квітки як органа розмноження дало можливість квітковим рослинам адаптуватись до умов існування

В різні форми віночка, розмір і колір квіток є вузьким пристосуванням до запилення квіткових рослин

Г добір на селекційній станції насіння квасолі певного розміру для висаджування

Д відсутність зелених листків і здатності до фотосинтезу в рослині-паразита повитиці

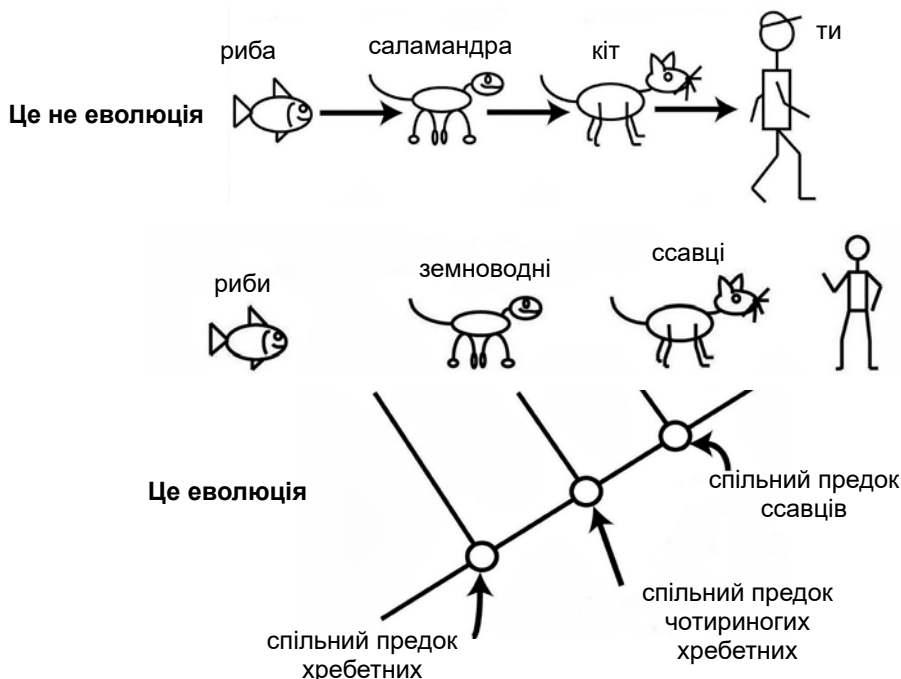
3. Виберіть характеристики, що відповідають еволюційному процесу, зображеному на малюнку.



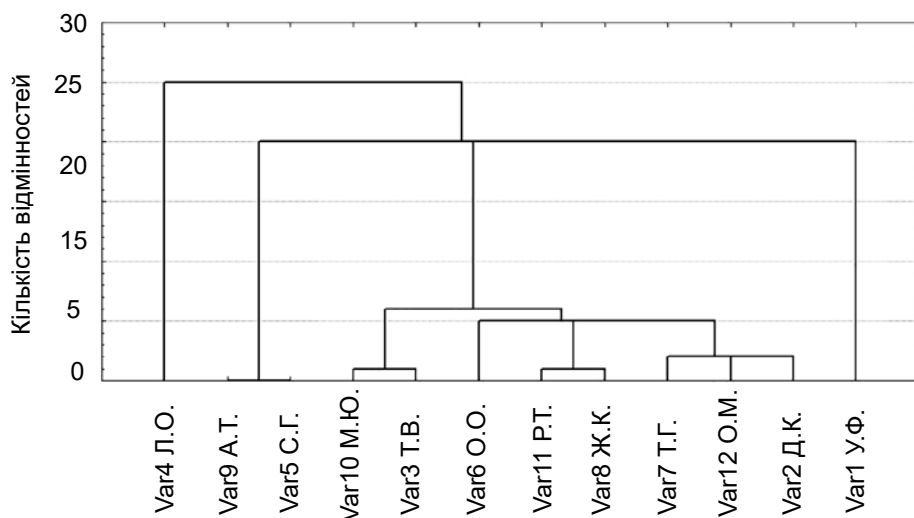
Організми, що еволюціонують	Шлях еволюції	Результат процесу
1 птахи	1 дивергенція (розходження ознак)	1 поява різних класів хребетних організмів
2 плазуни	2 конвергенція (сходження ознак)	2 формування рядів (життєвих форм) ссавців
3 ссавці	3 ароморфоз (ускладнення будови)	3 пристосування ссавців до життя в однакових умовах

Компетентнісно орієнтоване завдання

Еволюційні дерева людей... і супів. «Сьогодні поговоримо про те, – розпочав урок Лев Олександрович, – чи є слухним старий мем про еволюцію і як будують еволюційні дерева. І взагалі, як використовувати такий зручний інструмент класифікації».



«Ми вже бачили еволюційні дерева – у 7 класі була робота про форамініфер», – зауважив Артем.



«Так, – відповів учитель, – але в тому випадку було багато палеонтологічних даних, за якими дерево й побудували. Але як бути, якщо даних недостатньо? Пам'ятаєте, позаминулого уроку ви писали тестову роботу, коли мене заміняла пані Вікторія, вчителька технологій? Мені стало цікаво: як роботи відрізняються одна від одної. Для побудови дерева порівняння за наявними ознаками (назвемо його *кладограмою* – щоб відрізнити від форамініфер) складають матрицю «Організми» / «Ознаки». Тут «Організми» – учні й учениці, а «Ознаки» – правильні й неправильні відповіді на окремі завдання тесту (1 – якщо правильні та 0 – якщо ні). Таку таблицю, з одиничками й нулями, видає онлайновий сервіс, у якому відбувалося тестування, а опрацювала її статистична програма, яка й побудувала кладограму, що демонструє кількість відмінностей між «Організмами» за відповідями на окремі завдання».

«То на ній – хто від кого походить?» – запитав Сергій.

«Та ні, хто в кого списував, – виправила його Аліна. – Бо за кладограмою твоя робота не відрізняється від роботи Андрія!»

«Я не стверджую, що це саме дерево списування, – втрутився вчитель, – могли бути й інші причини».

1. Якими причинами можна пояснити подібності та/або відмінності між роботами, виявлені під час побудови кладограм?

«Повернімося до біології. Якщо застосувати цей принцип до порівняння відмінностей у нуклеотидних послідовностях ділянок ДНК того самого гена різних організмів, отримаємо молекулярний годинник еволюції (див. § 40). За схожим алгоритмом було побудовано дерево мітохондріальної Єви¹. Тож спробуємо дізнатися, як це робиться. Візьмемо...»

«А пам'ятаєте, – втрутився Андрій, – у підручнику 7 класу був приклад порівняння послідовності «літер» гена, який виконував ту саму функцію в неандертальця, виконує в сучасної людини, шимпанзе, горили та орангутана. Візьмімо саме її!» (*коротке покликання* <https://cutt.ly/DwKB6gux>)

«Ну ок, – погодився вчитель. – Тільки автоматизуємо перший крок і замість того, щоб власноруч позначати відмінності, запропонуємо штучному інтелекту порівняти ці



¹ Див. КОЗ 4. «Мітохондріальна Єва на кубиках».

п'ять нуклеотидних «текстів». Таку задачу мовна модель має здужати без галюцинацій!». Доволі швидко ШІ видав таблицю відмінностей між запропонованими послідовностями.

	Неандерталець	Сучасна людина	Шимпанзе	Горила	Орангутан
Неандерталець	0	3	4	11	16
Сучасна людина	3	0	5	12	17
Шимпанзе	4	5	0	11	14
Горила	11	12	11	0	14
Орангутан	16	17	14	14	0

2. Андрій і Аліна висловили такі припущення щодо спорідненості організмів на основі аналізу попарних відмінностей у послідовностях нуклеотидів. Оцініть їх правильність.

Андрій: «Пари організмів, у яких кількість відмінностей тотожна (горила – орангутан, шимпанзе – орангутан), будуть на однаковій відстані в гілках дерева».

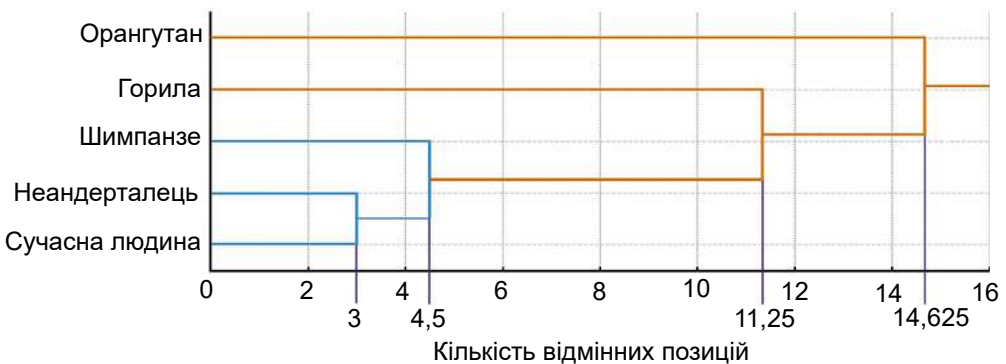
Аліна: «Менше відмінностей – більша спорідненість, більше відмінностей – менша спорідненість».

Хто з них має рацію?

А Андрій **Б** Аліна **В** і Андрій, і Аліна **Г** обидва помиляються

«А тепер, за таблицею, легко побудувати кладограму», – сказав учитель.

✓ **Дізнайтеся більше** про те, як за кількістю відмінностей між організмами побудувати дерево.



3. Для гена, ділянки якого опрацьовуємо, відома швидкість точкових замін у часі: одна заміна на 240 тис. років. Таким чином, можна розрахувати, коли розійшлися еволюційні шляхи

А сучасної людини й неандертальця: _____ млн р.;

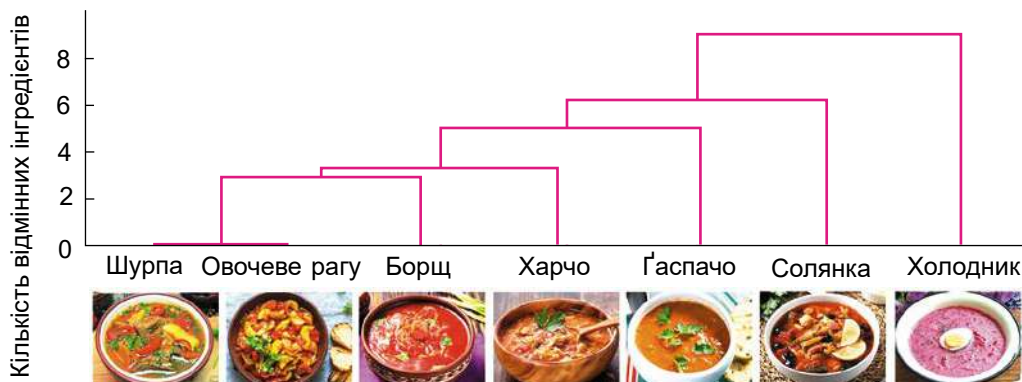
Б спільного предка сучасної людини й неандертальця – та шимпанзе: _____ млн р.;

В спільного предка сучасної людини, неандертальця й шимпанзе – та горили: _____ млн р.;

Розділ 4

Г спільного предка сучасної людини, неандертальця, шимпанзе й горили – та орангутана: _____ млн р.

4. «Ми з пані Вікторією свого часу вчилися готувати супи різних народів. То й для супів можна побудувати кладограму?» – запитала Аліна.



«Можна. Склади матрицю «Організми» / «Ознаки». «Організмами» будуть супи, а «Ознаками» – інгредієнти, що входять до їхнього складу треба позначити наявність / відсутність інгредієнтів як 1/0. Цю таблицю запропонуємо ШІ, він побудує матрицю відмінностей між рецептами і на її основі – кладограму, що демонструє рівень відмінностей між «організмами».

Поки Аліна зі штучним інтелектом будували кладограму, учні й учениці, спираючись на власний досвід і уявлення про склад інгредієнтів, висловили кілька гіпотез щодо можливого «дерева» супів. Яким з них знайдено підтвердження на кладограмі?

А Борщ – унікальна страва, він сильно відрізнятиметься від усіх інших супів.

Б Шурпа – це те саме, що й овочева рагу, тільки в ньому більше юшки.

В Борщ і холодник найбільш споріднені, бо в них є буряки, яких немає в інших супах.

Г Гаспачо більше подібне до харчо, ніж до солянки.

«Ви кажете, що кладограма – не еволюційне дерево», – сказала Аліна.

«Так. Кладограма показує структуру подібності, відповідає на запитання: «Хто з ким має більше спільних ознак?», а філогенетичне дерево – на запитання: «Коли і наскільки сильно розійшлися ці лінії?».

«А якщо будувати справжнє еволюційне дерево супів – що для цього треба зробити?»

5. Однокласники й однокласниці запропонували декілька напрямів досліджень. Проранжуйте їх важливість для відтворення «еволюційного дерева» супів.

	Дуже важливо	Менш важливо	Неваж- ливо
А Вивчити ареали поширення страв: чи є серед них «ендеміки»			
Б Дізнатися історію народів, яким ці страви при- таманні: чи вони осілі, чи кочові			

	Дуже важливо	Менш важливо	Неваж- ливо
В Дослідити історію рецептів: які інгредієнти коли додавали до складу			
Г Проаналізувати поширеність алергій на окремі продукти: арахіс, глютен, сою, непереносимість молочного цукру			
Д Дізнатися, які культури в який час потрапляли в той чи інший регіон із центрів походження			
Е Дослідити, чи належали ці страви до їжі, яку колонізатори принесли й примусово поширили серед поневолених народів у межах імперій			

6. Аргументуйте свої вибори по одному з прикладів у двох **різних** стовпчиках:

Стовпчик «__», варіант «__»: __

Стовпчик «__», варіант «__»: __

Узагальнення



✓ Джерела ілюстрацій, запозичених для використання у навчальному процесі.



Дорогі дев'ятикласниці та дев'ятикласники!	3
--	---

Розділ 4. Біологія: від молекули до біосфери

Вступ	4
§ 1. Біологія як комплексна наука. Місце біології серед інших наук	4
§ 2. Рівні організації живої матерії	6
§ 3. Основні методи біологічних досліджень	9
Тема 1. Хімічний склад клітини	11
§ 4. Хімічний склад біологічних систем	11
§ 5. Вода та інші неорганічні сполуки у складі організмів	15
§ 6. Органічні речовини: ліпіди та вуглеводи.....	17
§ 7. Білки: рівні структурної організації, основні властивості	22
§ 8. Білки: функції в біологічних системах. Ферменти, їхня роль у клітині	28
§ 9. Нуклеїнові кислоти: ДНК	31
§ 10. Нуклеїнові кислоти: РНК. АТФ	35
§ 11. Біологічно активні речовини: вітаміни, гормони, нейрогормони, фітогормони та антибіотики.....	39
§ 12. Біологічні системи, що перебувають на молекулярному рівні організації живого: віруси	42
§ 13. Роль вірусів у природі та житті людини. Біологічні системи, що перебувають на молекулярному рівні організації живого: віроїди, пріони.....	47
Тема 2. Клітина – структурно-функціональна одиниця організмів	55
§ 14. Методи дослідження клітин. Типи мікроскопії	55
§ 15. Структура еукаріотичної клітини: клітинна мембрана. Надмембранні комплекси клітини.....	59
§ 16. Будова еукаріотичної клітини: цитоплазма, рибосоми, органели руху, клітинний центр	64
§ 17. Будова еукаріотичної клітини: ендоплазматична сітка, комплекс Гольджі, лізосоми, вакуолі.....	68
§ 18. Будова еукаріотичної клітини: мітохондрії і пластиди.....	72
§ 19. Будова еукаріотичної клітини: ядро.....	75
§ 20. Будова прокаріотичної клітини	80
§ 21. Обмін речовин та енергії в клітині.....	84
§ 22. Етапи енергетичного обміну.....	87
§ 23. Особливості процесів пластичного обміну. Фотосинтез.....	91
§ 24. Фотосинтез: темнова фаза. Хемосинтез	95
§ 25. Клітинний цикл. Мітоз	99
§ 26. Мейоз. Клітинна теорія	103
Тема 3. Закономірності спадковості та мінливості організмів	113
§ 27. Особливості організації генів. Поняття про алельні гени.....	113

§ 28. Особливості організації геномів прокаріотичних та еукаріотичних організмів	115
§ 29. Генетичний код та його властивості	119
§ 30. Реалізація спадкової інформації в клітині: біосинтез білкових молекул	124
§ 31. Генетика – наука про закономірності спадковості і мінливості організмів.....	128
§ 32. Методи генетичних досліджень	131
§ 33. Закономірності спадковості, встановлені Г. Менделем (I та II закони)	137
§ 34. Закономірності спадковості, встановлені Г. Менделем (закон незалежного комбінування ознак). Варіанти взаємодії алельних генів	141
§ 35. Явище зчепленого успадкування. Хромосомна теорія спадковості	144
§ 36. Генетика статі. Успадкування, зчеплене зі статтю.....	148
§ 37. Геном як цілісна інтегрована система	151
§ 38. Регуляція активності генів	155
§ 39. Мінливість спадкова та неспадкова. Форми спадкової мінливості .	159
§ 40. Причини виникнення мутацій. Властивості мутацій.....	164
§ 41. Модифікаційна мінливість – наслідок взаємодії генотипу та умов довкілля	168
§ 42. Генетика людини	172
§ 43. Медична генетика. Медико-генетичне консультування	176
Тема 4. Розмноження та індивідуальний розвиток організмів.....	187
§ 44. Здатність до репродукції – універсальна властивість організмів. Будова статевих клітин	187
§ 45. Основні форми нестатевого розмноження організмів. Поліембріонія	191
§ 46. Етапи індивідуального розвитку організмів. Ембріональний період розвитку	195
§ 47. Післязародковий розвиток і ріст організмів.....	201
Тема 5. Біологія як основа селекції, біотехнології та медицини	209
§ 48. Завдання сучасної селекції. Основні методи селекції: штучний добір, гібридизація	209
§ 49. Особливості селекції рослин, тварин і мікроорганізмів	215
§ 50. Біотехнологія	219
§ 51. Генетична інженерія. Генетично модифіковані організми. Клітинна інженерія	222
Тема 6. Людина і біосфера	235
§ 52. Структура та функціонування екосистем. Зв'язки, що виникають між організмами в екосистемах	235
§ 53. Потoki енергії та колообіг речовин в екосистемах.....	240
§ 54. Екологічні фактори. Стабільність екосистем і причини порушення.....	244
§ 55. Біосфера як цілісна глобальна екологічна система. Учення В. І. Вернадського про біосферу та ноосферу	248
§ 56. Сучасні екологічні проблеми у світі та в Україні.....	251
§ 57. Види забруднення, їхні наслідки для біосфери. Якість довкілля...	256
§ 58. Екологічна політика в Україні. Сучасні напрями охорони природи та захисту навколишнього середовища в Україні та світі	262

Тема 7. Еволюція органічного світу	272
§ 59. Процес еволюції як універсальна властивість біологічних систем	272
§ 60. Розвиток еволюційних поглядів	276
§ 61. Популяція організмів як елементарна одиниця еволюції. Видоутворення	281
§ 62. Наукові погляди на походження та історичний розвиток життя ...	286
§ 63. Етапи еволюції людини	290

Навчальне видання

БАЛАН Павло Георгійович
КОЗЛЕНКО Олександр Григорович
КУЛІНІЧ Ольга Миколаївна
ЮРЧЕНКО Людмила Петрівна
ОСТАПЧЕНКО Людмила Іванівна

БІОЛОГІЯ

**Підручник для 9 класу
закладів загальної середньої освіти**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

**Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено**

Підручник відповідає Державним санітарним нормам і правилам
«Гігієнічні вимоги до друкованої продукції для дітей»

Редактор *Людмила Мялківська*
Художній редактор *Олена Мамаєва*
Комп'ютерна верстка *Людмили Ємець*
Коректор *Ірина Хмельовська*

У підручнику використано малюнки та фото з відкритих джерел інтернету: vecteezy.com,
depositphotos.com як ілюстрації у виданні навчального характеру відповідно до законодавства
України про авторське право і суміжні права

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 24,70. Обл.-вид. арк. 22,19.
Тираж 285 164 пр. Вид. № 0120. Зам. 26-04-0703.

ТОВ «Генеза»,
вул. Генерала Алмазова, 18/7 (літ. В), офіс 404, м. Київ, 01133, Україна.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 7692 від 24.10.2022.

Віддруковано у ТОВ «ПЕТ»,
вул. Максиміліанівська, 17, м. Харків, 61024, Україна.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 6847 від 19.07.2019.

Цілі сталого розвитку



Повсюдна ліквідація бідності в усіх її формах.



Ліквідація голоду, забезпечення продовольчої безпеки, поліпшення харчування та сприяння стійкому розвитку сільського господарства.



Забезпечення здорового способу життя і сприяння благополуччю для всіх у будь-якому віці.



Забезпечення всеохопної та якісної освіти, заохочення освіти всіх протягом усього життя.



Забезпечення гендерної рівності та розширення прав і можливостей усіх жінок і дівчат.



Забезпечення доступу всіх до належних санітарних умов, водних ресурсів та їхнього раціонального використання.



Забезпечення для всіх доступу до недорогих, надійних, стабільних та сучасних джерел енергії.



Сприяння поступальному, всеохопному та стійкому економічному росту, повній зайнятості та достойній роботі для всіх.



Створення стійкої інфраструктури, сприяння всеохопній та стабільній індустріалізації та інноваціям.



Скорочення нерівності всередині країн та між країнами.



Забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості та екологічної стабільності міст та інших населених пунктів.



Забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва.



Застосування негайних заходів щодо боротьби зі змінами клімату та його наслідками.



Збереження та раціональне використання океанів, морів і морських ресурсів в інтересах стійкого розвитку.



Захист і відновлення екосистем суходолу та сприяння їх раціональному використанню, раціональному лісокористуванню, боротьба з опустелюванням та деградацією земель, припинення процесу втрати біорізноманіття.



Сприяння побудові миротлюбного та відкритого суспільства в інтересах стійкого розвитку, забезпечення доступу до правосуддя для всіх і створення ефективних, підзвітних і заснованих на широкій участі установ на всіх рівнях.



Зміцнення засобів здійснення та активізації роботи в рамках Глобального партнерства в інтересах стійкого розвитку.

Окремі гілки еволюційного дерева людини

