ISBN 978-617-8744-12-0

БІОЛОГІЯ 9 2026

БІОЛОГІЯ

9

Амінокислоти

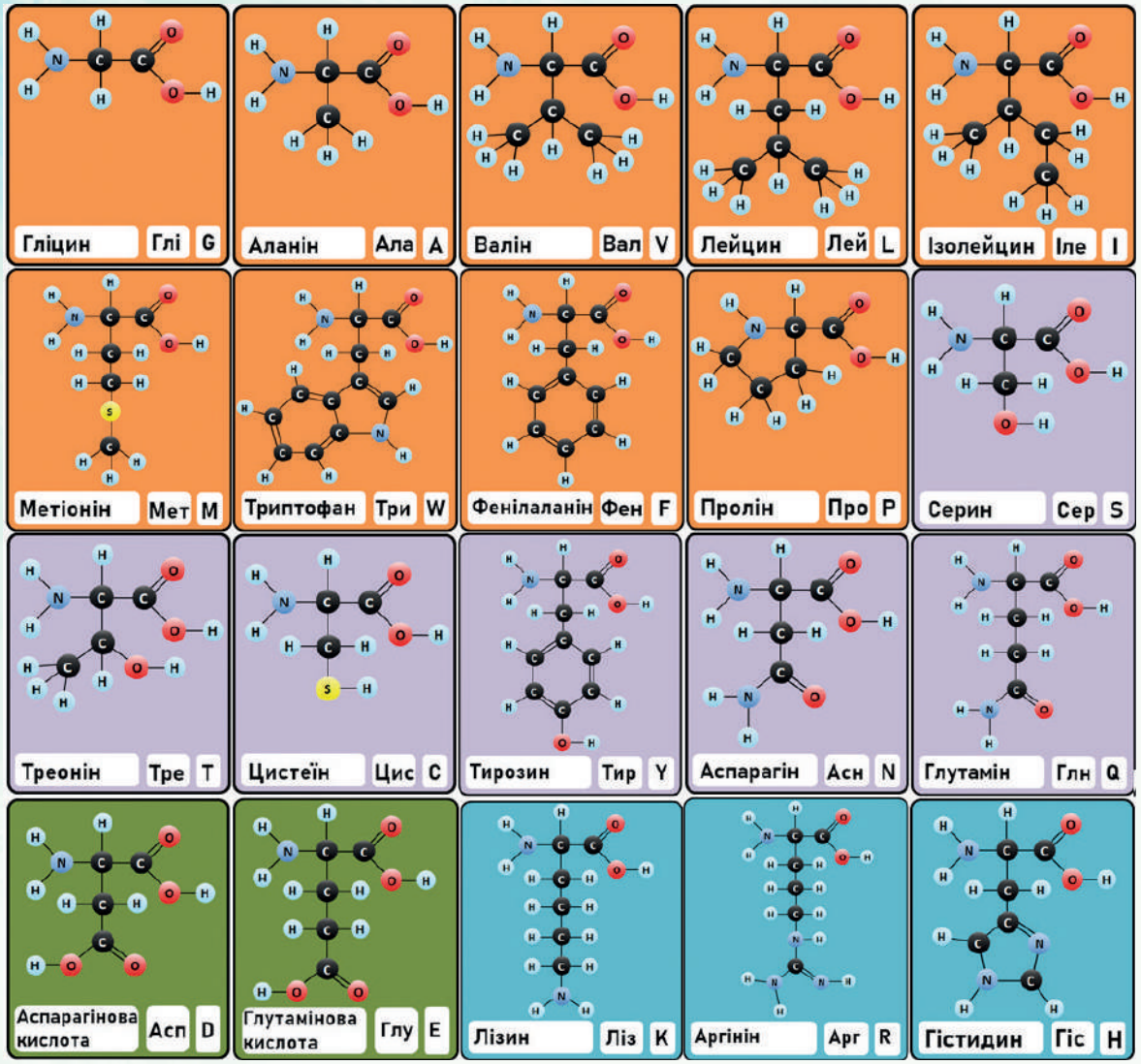
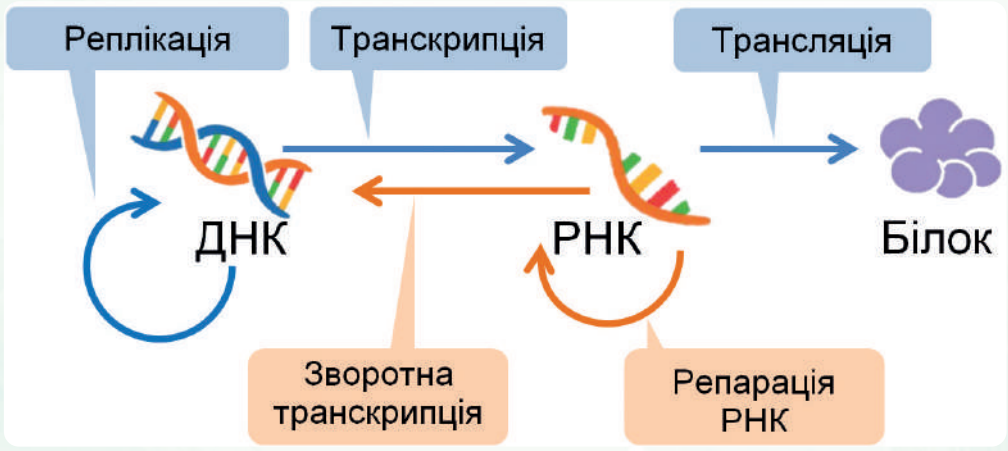


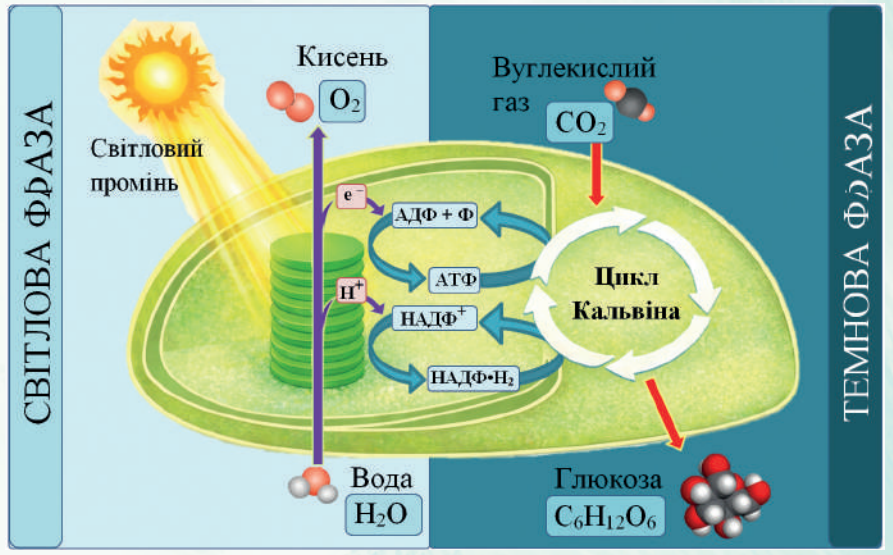
Схема передачі інформації згідно центральної догми молекулярної біології

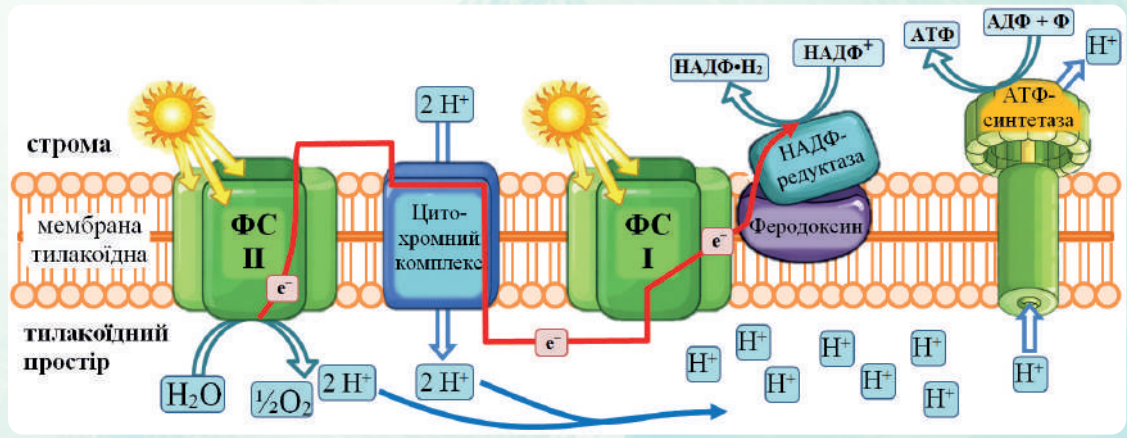


Таблиця кодонів РНК

1-й	2-й: У	2-й: Ц	2-й: А	2-й: Г	3-й
У	УУУ Фен	УЦУ Сер	УАУ Тир	УГУ Цис	У
	УУЦ Фен	УЦЦ Сер	УАЦ Тир	УГЦ Цис	Ц
	УУА Лей	УЦА Сер	УАА Стоп	УГА Стоп	А
	УУГ Лей	УЦГ Сер	УАГ Стоп	УГГ Триптофан	Г
Ц	ЦУУ Лей	ЦЦУ Про	ЦАУ Гіс	ЦГУ Арг	У
	ЦУЦ Лей	ЦЦЦ Про	ЦАЦ Гіс	ЦГЦ Арг	Ц
	ЦУА Лей	ЦЦА Про	ЦАА Глн	ЦГА Арг	А
	ЦУГ Лей	ЦЦГ Про	ЦАГ Глн	ЦГГ Арг	Г
А	АУУ Іле	АЦУ Тре	ААУ Асн	АГУ Сер	У
	АУЦ Іле	АЦЦ Тре	ААЦ Асн	АГЦ Сер	Ц
	АУА Іле	АЦА Тре	ААА Ліз	АГА Арг	А
	АУГ Метіонін	АЦГ Тре	ААГ Ліз	АГГ Арг	Г
Г	ГУУ Вал	ГЦУ Ала	ГАУ Асп	ГГУ Глі	У
	ГУЦ Вал	ГЦЦ Ала	ГАЦ Асп	ГГЦ Глі	Ц
	ГУА Вал	ГЦА Ала	ГАА Глу	ГГА Глі	А
	ГУГ Вал	ГЦГ Ала	ГАГ Глу	ГГГ Глі	Г

Процеси фотосинтезу





БІОЛОГІЯ

Підручник для 9 класу
закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Тернопіль
Астон
2026

УДК 57(075.2)
Г70

Авторський колектив:
Горобець Леонід, Кравець Іван, Лойош Галина,
Абрат Олександра, Мердух Іван

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

Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено

У підручнику подано навчальний матеріал за модельною навчальною програмою «Біологія. 7–9 класи»
(автори Балан П. Г., Кулініч О. М., Юрченко Л. П.)

Інтерактивний електронний додаток можна переглянути за QR-кодом або за покликанням
https://cutt.ly/orFrsdHK

Умовні позначення

Запам’ятайте!

Запитання та завдання для самоперевірки

Пригадайте інформацію; поміркуйте над запитанням

Виконайте вдома

Виконуємо експеримент

Навчальний проєкт

Горобець Л. В. та ін.
Г70 Біологія : підручник для 9 класу закладів загальної середньої освіти. / Л. В. Горобець, І. В. Кравець, Г. П. Лойош, О. Б. Абрат, І. І. Мердух. — Тернопіль : Астон, 2026. — 304 с.
ISBN 978-617-8744-12-0

Змістове наповнення підручника відповідає віковим особливостям учнівства та спрямоване на формування ключових компетентностей. У підручнику зосереджено особливу увагу на вивченні та дослідженні будови, функцій організму людини. Навчальний матеріал спрямований на формування уявлень про біорізноманіття та усвідомлення необхідності його збереження, сприятиме гармонійному розвитку особистості, досягненню очікуваних результатів навчання, представлених модельною програмою.

УДК [501:37.016](075.2)

ISBN 978-617-8744-12-0

© Горобець Л., Кравець І., Лойош Г.,
Абрат О., Мердух І., 2026
© ТзОВ «Видавництво Астон», 2026

Юні друзі та подруги!

Мене звати Чарнія! Повне ім'я — Чарнія Мейсона, дане на честь місцевості Чарнвуд та Роджера Мейсона — юнака, завдяки якому про мене дізнався весь світ. Ми — чарнії, жили в часи едіакарського періоду, 550 мільйонів років тому. Це дуже давно, для порівняння — тобі ще не виповнилося 550 мільйонів секунд. У ті часи ніхто не мав скелета і рідко зберігався у вигляді палеонтологічних решток. У вчених навіть склалося враження, що в едіакарському періоді не існувало тварин, що породжувало чимало запитань. Чарльз Дарвін називав цю проблему однією із найбільших перешкод теорії еволюції. Питання вдалося вирішити в 1957 році. 16-річний Роджер Мейсон віднайшов у Чарнвуді мене — скам'янілість, з якої розпочалося дослідження едіакарської фауни. Вчені дізналися, що в минулому на планеті жили тварини, зокрема предки сучасних істот. Було встановлено зв'язок, що поєднав мої часи із вашими.

Цьогоріч ви на уроках біології також будете встановлювати зв'язки. В попередніх класах дізналися про будову та різноманіття рослин, вірусів, грибів, бактерій, тварин, поглиблено вивчили будову людини. Наступний крок — побачити зв'язки між молекулами й організмом, всередині популяцій, в екосистемах та, звісно, зв'язки між мешканцями минулих епох і сьогоденням.

Зверніть увагу, що матеріал, який ви вивчатимете, поділено на розділи, а розділи — на параграфи. Кожен параграф починається із загальної інформації щодо теми уроку. Рубрика «Пригадайте!» допоможе відтворити вивчений матеріал, адже дещо ви вже знаєте із попередніх занять. У рубриці «Запам'ятайте» наведено особливо важливу інформацію. У рубриці «А чи знаєте ви...» знайдете додаткові відомості.

Вивчення теоретичного матеріалу супроводжуватиметься різноманітними завданнями. Їх можна виконувати з друзями (рубрики «Робота в парі», «Робота в групах») та самостійно. Це практичні та лабораторні роботи, проєкти та презентації результатів власних досліджень.

Свої знання ви можете перевірити, відповідаючи на запитання та виконуючи завдання, що є наприкінці кожного параграфа. Деякі із них призначені для самоконтролю — їх знайдете, перейшовши за QR-кодом. Інші варто обговорити в класі.

Ці запитання трьох рівнів складності, їх позначено різними кольорами. На білому тлі запитання, для яких достатньо короткої відповіді. Світо-сірим кольором виділено запитання, що потребують розгорнутої відповіді. Темно-сіре тло для запитань, на які немає прямої відповіді в параграфі. Для відповіді на ці запитання доведеться поміркувати, застосовуючи інформацію не тільки з параграфа, а також із інших предметів.

Першою людиною, яку я побачила, був хлопчина приблизно вашого віку. Завдяки допитливості, готовності сумніватися та пізнавати нове він зробив одне із найбільших палеонтологічних відкриттів XX століття. Будьте такими, у світі чимало непізнаного, ви також можете стати першовідкривачами!

ВСТУП

1 ВЛАСТИВОСТІ ЖИВОЇ МАТЕРІЇ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про основні ознаки, властиві живим організмам;
- чому найнижчим рівнем організації є молекулярний;
- про особливості розвитку живих організмів.

Ми продовжуємо вивчати біологію — науку про живу речовину. Кожен спроможний розпізнати у рослині чи тварині живе створіння, значно складніше сказати, що саме вирізняє живу природу від неживої. Не існує однієї особливості, відмінності помітні за набором ознак.

Основні ознаки живої матерії

Особливий хімічний склад. Характерною особливістю живих організмів є високий вміст органічних речовин — хімічних сполук, побудованих на основі карбонового ланцюга. Неорганічні сполуки в живій природі представлені невеликим різноманіттям: це переважно вода та солі деяких кислот.

Обмін речовини та енергії відбувається як у живій, так і в неживій природі. Але більшість неживих об'єктів спроможні існувати за пониженого обміну, для живих істот обмін речовиною та енергією певної інтенсивності є неодмінною умовою, без якої неможливі інші ознаки.

Ріст. Живі об'єкти на певному етапі існування збільшуються. Неживі, в більшості випадків, або не змінюються в розмірах, або зменшуються. Навіть якщо неживий об'єкт збільшує розміри (як сталактит у печері), то робить це за рахунок зовнішніх нашарувань. Тоді як живі об'єкти ростуть із середини.

Розмноження. Живі організми можуть і прагнуть збільшувати свою кількість. Інколи спостерігаємо збільшення кількості неживих об'єктів (наприклад, камінь розколюється на декілька каменів), але при цьому не зростає маса. Живі істоти завдяки обміну речовиною та енергією ростуть, тому розмноження призводить до збільшення маси живої матерії.

Запрограмований розвиток. Живі організми змінюються згідно із певною програмою, яка не має зворотного напрямку. Неживі об'єкти мають безліч варіантів трансформації, при цьому можуть повернутись у вихідний стан.

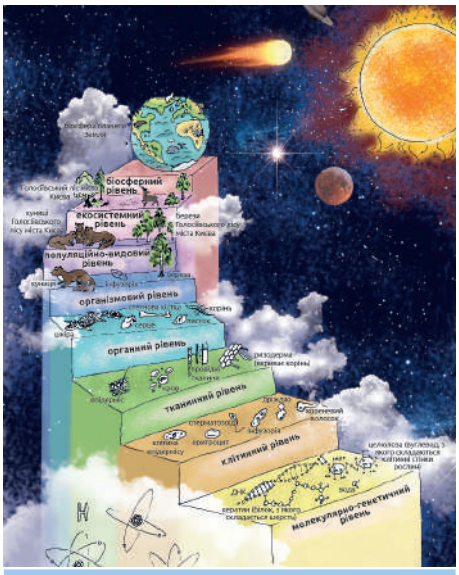
Еволюційні зміни. Попри те, що всі організми реалізують програму розвитку, успадковану від предків, кожне наступне покоління трохи відрізняється від попереднього. Поступове накопичення змін призводить до формування нового виду.

Взаємодія перелічених властивостей призводить до появи ще однієї ознаки, що вирізняє живу матерію, — поділ на рівні організації.

Рівні організації живої матерії

Живу речовину поділяють на декілька рівнів організації, які вишикувані у певному порядку, що не може бути змінений (мал. 1.1). При

переході з одного рівня на інший з'являються нові властивості, які є більше, ніж просто сума властивостей попередніх рівнів.



Мал. 1.1. Рівні організації в живій природі

Найнижчим рівнем організації є *молекулярно-генетичний*, нижче якого лише атомарний рівень. Але на атомарному рівні немає межі між живою й неживою природою. Інколи цей рівень організації називають молекулярним, інколи молекулярно-генетичним, підкреслюючи особливе значення генів.

Молекули об'єднуються в клітини, тому наступним щаблем ієрархії живої природи є *клітинний рівень організації*. Це найнижчий рівень, на якому проявляються ознаки живої природи — ріст, розмноження, реакція на подразники. Деякі організми ведуть повноцінне життя, хоч і складаються лише з однієї клітини.

Якщо ж організм багатоклітинний, то клітини декількох типів для виконання певної функції об'єднуються в тканини. Отже, наступний рівень організації — *тканинний*.

Шляхом поєднання декількох типів тканин формуються органи. Наступний рівень — *органний*. Органи об'єднуються в системи органів: травну, дихальну, кровоносну та інші, проте, як ви пам'ятаєте з курсу біології людини, межа між ними відносна.

Усі органи злагоджено взаємодіють між собою, забезпечуючи існування організму. *Організмовий* рівень є найменшим щаблем, який здатний до самостійного існування. Тканини та органи самі не є живими об'єктами. В одноклітинних істот клітинний та організмовий рівні — тотожні поняття, ці створіння можна розглядати на обох рівнях.

Кожен організм належить до певного виду істот. Сукупність організмів одного виду, які живуть на спільній території, утворюють популяцію. Важлива особливість популяції — здатність підтримувати власне існування впродовж тривалого часу. У популяції відбувається розмноження, і втрати особин надолужують появою нових особин. Популяції утворюють *популяційно-видовий* рівень організації.

Популяції різних видів, які мешкають на одній території або акваторії, взаємодіють між собою і неживою природою. Разом цю єдність популяцій та неживої природи називають екосистемою. Наступний рівень — *екосистемний*. Екосистеми дуже відрізняються, проте пов'язані одна з одною. Часом цілком екосистеми виникають у маленькій калюжі, яка є частиною більшої екосистеми лісу. Екосистема тропічного лісу Амазонки займає великі обшири.

Найбільша екосистема — це біосфера, тобто сукупність усіх живих організмів на планеті. У біосфері постійно відбувається потік речовини та енергії, який об'єднує всі складові живої природи в одне ціле. *Біосферний* рівень — найвищий рівень організації живої речовини. Це єдиний рівень, що не потребує різноманіття. Відома лише одна біосфера — біосфера планети Земля.

Часом віруси вважають неживими об'єктами, оскільки вони не мають власних клітин. Чи належать віруси до живої природи?

1. Назвіть особливості живої матерії.
2. Назвіть рівні організації живої матерії в послідовності від найнижчого до найвищого.
3. Які рівні організації живої матерії можуть бути тотожними?
4. Як взаємопов'язані такі ознаки живої матерії, як обмін речовини та енергії, ріст, розмноження?
5. Наведіть приклади прояву таких ознак, як обмін речовини та енергії, ріст, розмноження, запрограмований розвиток та еволюційні зміни на популяційно-видовому рівні організації живої матерії.
6. Еволюція відбувається завдяки мутаціям, тобто змінам на молекулярно-генетичному рівні. Поясніть, чи впливають ці зміни на наступні рівні організації живої матерії.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/TtJE0m3F і виконайте вправи.

2 БІОЛОГІЯ ЯК КОМПЛЕКСНА НАУКА. МІСЦЕ БІОЛОГІЇ СЕРЕД ІНШИХ НАУК

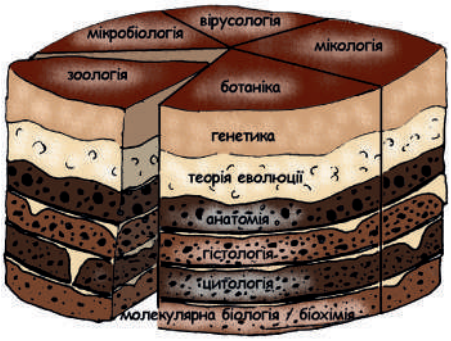
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про різноманіття напрямків біологічних досліджень;
- про науки, пов'язані із біологією;
- чому для наукового розвитку необхідна демократія.

Взаємозв'язки між напрямками біології

На всіх рівнях організації жива природа проявляє надзвичайне різноманіття. Тому біологія складається із великої кількості допоміжних наук. Кожна із них має свій напрямок розвитку, проте все ж таки вони співпрацюють. Зобразити взаємодію біологічних наук можна у вигляді тортика (мал. 2.1). Коржики в основі тортика — це біологічні науки, що вивчають живу природу на доорганізмовому рівні. Розташуємо їх у вірній послідовності. Найнижчий рівень — молекулярний, тому в основу покладемо науку, що вивчає цей рівень, — *молекулярну біологію* або *біохімію*. Біохімія виникла приблизно на початку XX ст., а молекуляр-

на біологія відділилася від біохімії в середині XX ст. Певний час вони розвивались окремо, проте на сьогодні переплелись, і навіть фахівці не завжди розрізняють молекулярні дослідження від біохімічних.



Мал. 2.1. «Біологічний торт», що показує зв'язок між науками

Наступний рівень — клітинний. Його вивчає наука цитологія, вона є наступним коржиком нашого біологічного тортика. Далі йде тканинний рівень — його вивчає *гістологія*. Її покладемо третім коржиком.

Органний рівень вивчає наука *анатомія*. Це дуже давня наука, оскільки для її розвитку не потрібно було чекати винаходу мікроскопа, як у випадку з цитологією та гістологією. Коржик, що символізує анатомію, є найвищим серед біологічних наук доорганізмового рівня. Проте слід згадати ще одну величну науку — *фізіологію*. Цю важливу дисципліну зобразимо як крем між коржиками торта. Подібно тому, як крем просочується крізь різні коржі, поєднуючи між собою, так і фізіологія об'єднує знання із молекулярної біології, цитології, гістології та анатомії і дає можливість осягнути функціонування всього організму в цілому.

Поверх торта із наук доорганізмового рівня покладемо ще два особливих шари крему: науки *генетику* та *еволюційну біологію*. Вони вивчають організм не просто як об'єкт, а як об'єкт, що існує в часі, мав попередників та матиме нащадків. Прошарок еволюційної біології в біологічному тортику недарма опинився між анатомією та генетикою. Коли вивчатимете цю частину біології, помітите, що для її опанування особливо необхідні знання генетики та анатомії.

Здається, тортик готовий. Але ж ніхто не їсть торт, поглинаючи його цілком, не розрізавши на шматки. Розділимо його за кількістю основних груп живих організмів, що вивчають на курсі біології: тварини, рослини, гриби, бактерії та віруси.

Кожну із цих груп досліджує певна наука. Тварин вивчає зоологія, рослин — ботаніка, гриби — мікологія, бактерії — мікробіологія, віруси — вірусологія. Тож уявимо, що кожний шматок торта це одна із п'яти біологічних наук.

Тепер зрозуміла їх взаємодія з іншими біологічними дисциплінами. Наприклад, зоологія складається із генетики тварин, еволюції тварин, анатомії тварин, гістології тварин, цитології тварин, молекулярної біології тварин та фізіології тварин. Ботаніка складається із генетики рослин, еволюції рослин і т. д.

Міждисциплінарні науки

Диву гідно, але біологічних напрямків більше, ніж їх може вмісти-

ти сама біологія! Існують дисципліни, що поєднані з іншими науками. Перш за все, це *екологія* — наука про взаємодію живої природи організмового і вищого рівнів (популяційного, екосистемного, біосферного) з навколишнім середовищем. Назва «екологія» походить від грецького слова «ойкос» — «дім», адже, заглиблюючись у цю науку, людина більше дізнається про нашу спільну домівку — планету Земля. Тому для опанування екології необхідні науки, що вивчають як живу, так і неживу природу: біологія, хімія, фізика, географія, геологія тощо.

Виходить за межі біології *палеонтологія* — наука про живу природу минулого. Основним матеріалом для досліджень у палеонтології є викопні рештки, які знаходять у товщах порід. Тому вона надзвичайно тісно пов'язана із наукою про склад планети — геологією.

Прикладні біологічні науки

Людина є складовою живої природи. Тому знання про живу природу — це також знання про людину, про її внутрішній і навколишній світ. Чимало біологічних відкриттів використовуємо в людській діяльності. Сформувалися так звані *прикладні науки*. Їхнім завданням є не відкриття чогось принципово нового, а пошук та застосування здобутків інших наук для покращення результатів людської діяльності.

Серед прикладних біологічних наук найбільшого розквіту досягла *медицина*. Подальший прогрес у медицині неможливий без залучення біологічних знань. Сучасній медицині є чим пишатися, та все ж таки ще існує чимало захворювань, лікування яких тільки розробляється. Перш за все це онкологічні та генетичні хвороби.

Ще одна прикладна біологічна наука — *біотехнологія* — досліджує застосування живих об'єктів та біологічних процесів у різних напрямках виробництва — від використання дріжджів при випіканні хліба до клітинної інженерії. Більш детально із медициною та біотехнологією ви познайомитесь при вивченні теми 5.

Цікавим напрямком прикладних наук є *біоніка*, яка шукає застосування винаходів живої природи у людській діяльності. Завдяки біоніці з'являються матеріали з унікальними властивостями. Відомим досягненням є речовина, що імітує властивості шкіри акул. Костюми із неї так підвищують результативність плавця, що заборонені під час спортивних змагань. Найбільш розповсюдженим винаходом біоніки є застібка «липучка». Її ідею швейцарський інженер Жорж де Местраль запозичив у гачків реп'яха, що причепився до шерсті його собаки.

В архітектурі часто використовують конструкції, винайдені природою. Особливим прихильником біоніки був відомий барселонський архітектор Антоніо Гауді. Також біоніка допомагає при розробці засобів пересування — для польоту, плавання, переміщення по кризі, в землі тощо. Дослідження органів чуття допомагає створити надчутливі відеокамери, локатори та газові аналізатори.

Видатні українські біологи та біологині

Повноцінний науковий розвиток можливий у вільному, демократичному суспільстві. Показовий приклад Німеччини: до приходу до влади нацистів її громадяни отримали третину всіх Нобелівських премій, згодом тоталітарний режим негативно вплинув на науку. Україна тривалий час перебувала під владою імперій, що гальмувало розвиток, багато хто реалізував свій потенціал в еміграції. Із семидесятилітньої історії радянської окупації України, половина (з 1929 по 1964 рр.) припадає на так звану «лисенківщину» — поширення ідеологізованого псевдонаукового вчення, яким намагались підмінити генетику, спричинивши загальний занепад біології в СРСР. Але навіть попри несприятливі політичні обставини, Україна була батьківщиною багатьох талановитих науковців та науковиць.

Нобелівськими лауреатами із фізіології та медицини були Ілля Мечников (1845 – 1916), що родом із Харківщини, та єврей Зельман Ваксман (1888 – 1973), малою батьківщиною якого була Вінниччина. Мечников заснував в Одесі бактеріологічну станцію. У 1903 р. здобув Нобелівську премію за відкриття клітинного імунітету. На той час Мечников багато років працював у Франції, в Російській імперії його роботі перешкоджали перш за все через неросійське походження (в його роду були молдавани, євреї, українці). Ваксман у пошуку освіти емігрував до США, де став фахівцем із екології ґрунтових мікроорганізмів. У 1952 році він отримав Нобелівську премію за відкриття стрептоміцину — першого антибіотика, ефективного в лікуванні туберкульозу.

Рішення про еміграцію із СРСР прийняв Феодосій Добржанський (1900 – 1975) (народився на Вінниччині) — генетик, один із найбільш впливових біологів XX століття, співзасновник синтетичної теорії еволюції. Киянин Борис Балінський (1905 – 1997) проявив себе як талановитий учений ще в студентські роки. Пізніше він був вимушений виїхати і став відомим, перебуваючи в еміграції. По підручнику цитології Балінського навчалися вчені багатьох країн.

Декому вдавалося працювати всупереч авторитарним або тоталітарним режимам. У Російській імперії жінкам було заборонено вступ до університету. Тож Марія Павлова (1854 – 1938) із м. Козелець на Чернігівщині виїхала здобувати освіту до університету Сорбонна (Париж). Вона повернулась відомою палеонтологинею, ставши однією з небагатьох жінок зі званням професора. Син селян із Вінниччини Данило Заболотний (1866 – 1929) зробив чимало для розвитку мікробіології, його зусиллями вдалось ефективно протистояти холері та чумі.

Та все ж деспотичні режими більше перешкоджали розвитку талантів. Показова біографія Олександра Богомольця (1881 – 1946), що народився у в'язниці Києва, де його мати перебувала через незгоду із політикою Російської імперії. Богомолець зумів здобути освіту і заснував наукову школу фізіології — в минулому один із провідних наукових

центрів Східної Європи. Незабаром після його смерті радянська влада почала переслідувати учнів Богомольця, перервавши наукову традицію.

Досвід XIX–XX століть сумний і водночас показовий. Україна має потенціал до наукового прогресу, але його реалізація можлива лише у вільній країні. Розбудова демократичного суспільства сприятиме розвитку науки в нашій Батьківщині.

1. Які біологічні науки вивчають тварин?
2. Які прикладні науки пов'язані із біологією?
3. Назвіть імена Нобелівських лауреатів з фізіології та медицини, що народилися в Україні.
4. Чому фізіологія вивчає декілька рівнів організації живої матерії?
5. Поясніть значення біологічних знань для промисловості.
6. Палеонтологія з'явилась як допоміжна дисципліна геології. В подальшому вона стала важливою для біології, перш за все для еволюційної біології. Поясніть зв'язок між палеонтологією та еволюційною біологією.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/vtJE9FPg і виконайте вправу.

3 МЕТОДИ БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- різницю між науковими і не науковими спостереженнями;
- різновиди експериментів;
- де відбуваються «польові» дослідження.

Основні методи біологічних досліджень

Як ви пересвідчились на попередньому уроці, біологія має багато напрямків, до того ж перетинається з іншими науками. Попри велике різноманіття біологічних досліджень, всі вони базуються на трьох основних підходах:

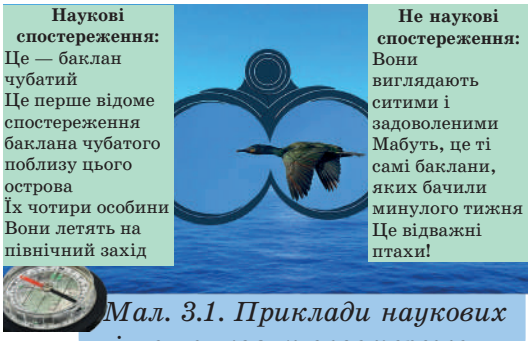
1) спостереження; 2) експеримент; 3) моделювання.

Спостереження передбачає відсутність втручання вченого в досліджувані процеси. Лише за виняткових обставин втручання може бути мінімальним (наприклад, мічення тварин). У науці визнаються лише ті дані спостережень, які отримані методами, доступними іншим людям (мал. 3.1). Тому результати спостережень повинні бути придатними до вимірювання. Недостатньо використання органів чуття, наявних у більшості людей (зору, слуху, нюху, тепла, холоду тощо), адже сприйняття суб'єктивне. Дві людини можуть сказати про одне і те ж спостереження: «Лютий був холодний, але саламандри прокинулися після сплячки

доволі рано» або «Лютий був теплий, але саламандри прокинулися після сплячки пізно». Науковим спостереженням буде: «Середньомісячна температура лютого становила −3,5°С, що на 2,3°С нижче середнього показника для багаторічних спостережень, саламандри після сплячки вперше помічені 14 березня, що на 7 днів пізніше середнього показника для багаторічних спостережень».

Жива природа швидко змінюється, і для відстеження перебігу змін необхідний **моніторинг** — регулярні спостереження, що повторюють упродовж тривалого проміжку часу.

В **експерименті** дослідники втручаються в природні процеси, штучно змінюючи, підсилюючи або послаблюючи деякі з них. Експерименти бувають польові або лабораторні. В **польових експериментах** втручання відбувається безпосередньо в екосистемі. Слово «поле» в даному випадку — загальноприйнята умовність, це може бути будь-яка екосистема — від верхів'я гір до океанічних глибин. Втручання в природу можливе лише за тих обставин, коли результати допоможуть з'ясувати великі наукові питання і не можуть бути отримані іншими методами.



Мал. 3.1. Приклади наукових і не наукових спостережень

У **лабораторних експериментах** основні чинники навколишнього середовища штучно створюються в умовах, ізольованих від природних екосистем. Це дозволяє уникнути шкоди довкіллю, проте не відміняє біоетичних питань (необхідність приспати тварину, відчуття болю тваринами тощо).

Третій підхід — **моделювання**, що передбачає створеннямоделі — спрощеного відображення об'єкта досліджень. Моделі бувають двох типів — реальні та ідеальні. Реальні моделі відтворюються в тій же формі, що й об'єкт дослідження. Наприклад, акваріум — реальна модель озера. Ідеальні моделі відтворюють за допомогою цифр, літер алфавіту та логічних (здебільшого математичних) дій. Це найбільш дешевий і водночас ефективний метод дослідження. Але для створення ідеальних моделей обов'язково необхідні дані, отримані за допомогою спостережень, експериментів або з реальних моделей.

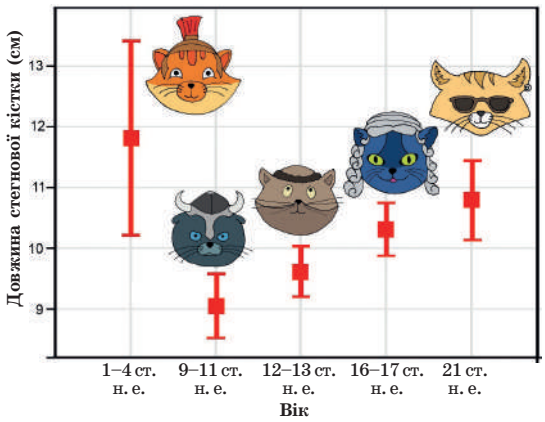
Допоміжні методи біологічних досліджень

Поділ досліджень на спостереження, експеримент та моделювання є узагальненням. Існують методи, які можуть бути використані в кожному з них. Наприклад, порівняльно-описовий метод доречний не лише у спостереженнях, але й експериментах та моделюванні на реальних моделях. Методи мікроскопії дають можливість побачити об'єкти, які занадто дрібні, щоб їх помітити неозброєним оком. В біології є місце

хімічним дослідженням (наприклад, аналіз хімічного складу води, активності ферментів тощо) та фізичним (вимірювання температури, аеродинаміки польоту тварини та інше).

Що таке систематика? На що вказує об'єднання різних видів в одну систематичну групу?

Всі біологічні дослідження використовують дані систематики. Значну частину сучасних досліджень здійснюють на невеликому різноманітті видів: лабораторних пацюках, мушках дрозофілах, акваріумних рибках даніо, рослині гусимка і, звісно, людині. Систематика потрібна і в цьому випадку — для чіткої ідентифікації видової приналежності (це може виявитися не так просто, як спершу здається), а головне — розуміння ступеня спорідненості об'єкта дослідження з іншими видами.



Мал. 3.2. Приклад використання статистичної обробки даних. На графіку червоними відрізками показано результати проміру довжини стегнових кісток котів, знайдених в археологічних пам'ятках Данії. Відрізок вказує діапазон довжини кісток, квадрат на відрізку — середнє значення. Обговоріть результати дослідження в класі.

У біологічних дослідженнях, які і багатьох інших галузях науки важливі методи статистичної обробки інформації — обчислення середнього статистичного, коефіцієнту варіації, індексу різноманіття, похибки, частоти та інших показників (мал. 3.2).

1. Що таке моделювання?
2. Які спостереження є науковими?
3. В яких випадках (спостереження, експеримент чи моделювання) можуть бути задіяні методи мікроскопії?
4. Чим реальна модель відрізняється від ідеальної?
5. Які є різновиди експериментів?
6. Упродовж 18–19 століть біологічні дослідження були порівняльно-описовими, без статистики. Науковці ретельно записували, скільки пелюсток властиво квітам певного виду рослин, дату прильоту птахів із зимівлі та інші дані. У 20–21 століттях майже в усіх біологічних дослідженнях використовують обробку методами математичної статистики. Поясніть, чим обумовлена необхідність використовувати статистику.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ltJE3cBx і виконайте завдання.

ТЕМА 1

ХІМІЧНИЙ СКЛАД КЛІТИНИ

4 КЛАСИФІКАЦІЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ЇХНІМ ВМІСТОМ В ОРГАНІЗМІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які існують групи хімічних елементів;
- які функції вони виконують;
- як надлишок або нестача хімічних елементів впливають на здоров'я.

Із теми «Вступ» вам уже відомо, що все живе на нашій планеті організоване за принципом рівнів: від молекулярно-генетичного аж до екосистемного. І перший, базовий рівень — молекулярний. Саме там, у невидимих молекулах, починається життя. На цьому рівні ми говоримо про органічні та неорганічні речовини. Органічні — ті, що побудовані на ланцюгах Карбону, наприклад: білки, вуглеводи, ліпіди, нуклеїнові кислоти. Неорганічні — вода, мінеральні солі, кислоти, кисень, вуглекислий газ. Усі ці речовини, своєю чергою, складаються з атомів певних хімічних елементів. Саме про них ви детальніше дізнаєтеся з цього параграфа.

Класифікація хімічних елементів

Живі істоти створені з обмеженої кількості хімічних елементів, які зустрічаються і в неживій природі. Ця хімічна спільність свідчить про єдність усього живого з навколишнім середовищем. Деякі елементи входять до складу кожної клітини й трапляються у значних кількостях. Інші ж настільки малі, що їхню масу важко виміряти. Однак навіть вони мають вирішальне значення: допомагають ферментам працювати, захищають ДНК від пошкоджень, керують сигнальними процесами тощо. Тому біологи прийняли рішення їх певним чином класифікувати.

Зверніть увагу: поділ хімічних елементів за вмістом в організмі чи клітині є досить умовним, адже ми говоримо про різні групи живих організмів. Відштовхуючись від цього, маємо розуміти, що вміст одного й того самого елемента в них може суттєво відрізнятися. Наприклад, середня масова частка Нітрогену в тваринних організмах у десять разів більша, ніж у рослин. Це пов'язано з тим, що тварини мають більше білків, а, отже, і більше нітрогенвмісних груп. Ще одним яскравим прикладом може бути Кальцій. У тварин (особливо хребетних) він входить до складу кісток і зубів, тому його вміст в організмі сягає до 2%, тоді як у рослин — близько 0,3%. При цьому для життєдіяльності рослин Кальцій не менш важливий, ніж для тварин.

Залежно від кількості вмісту у клітинах та їхнього біологічного значення, всі елементи умовно поділяють на чотири основні групи: органогенні, макроелементи, мікроелементи та ультрамікроелементи. Детальнішу характеристику кожної групи наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Класифікація хімічних елементів за їх вмістом у клітині

Група елементів	Вміст у клітині*	Характеристика
Органогенні	~ 98%	Основні елементи органічних сполук: C, H, O, N
Макроелементи	~ 0,01%–2% (понад 10^{-3})	Необхідні у відносно великих кількостях: Ca, P, K, S, Na, Cl, Mg
Мікроелементи	~ 0,000001%–0,001% (10^{-6}–10^{-3})	Потрібні у малих кількостях, але мають важливу функцію: Fe, Zn, Cu, Mn, I, Co, Se, Mo, B, Si, Ni, F
Ультрамікроелементи	<0,000001% (менше 10^{-6})	Трапляються у слідових концентраціях: Au, Hg, Li, Ra, Cr та ін.

**Цей поділ є орієнтовним і враховує середні показники для більшості організмів*

Органогенні елементи також належать до макроелементів, оскільки трапляються в організмах у великій кількості. Проте через свою особливу роль у побудові всіх органічних речовин їх часто виділяють в окрему групу.

Чому ж біологічні молекули й самі живі істоти побудовані переважно з чотирьох хімічних елементів — Карбону (C), Оксигену (O), Гідрогену (H) й Нітрогену (N)? Що робить саме їх, а не, скажімо, золото чи мідь, основою життя?

На перший погляд, це може здатися випадковістю, але насправді такий вибір елементів обумовлений унікальними властивостями їхніх атомів. Наприклад, атом Карбону здатен утворювати міцні ковалентні зв'язки з багатьма іншими атомами та формувати довгі ланцюги, кільця й розгалужені структури — саме це лежить в основі різноманіття органічних сполук. Оксиген та Гідроген — ключові елементи води, без якої неможливе існування життя. Нітроген входить до складу амінокислот, білків, нуклеїнових кислот. Усі ці елементи досить поширені в природі, хімічно активні й утворюють стабільні, але реакційноздатні молекули — ідеальні умови для біохімічних процесів. Чи не так?

Хімічні елементи, які трапляються в клітині, можуть бути складовими органічних і неорганічних сполук або перебувати у формі йонів. У таблиці 4.2 узагальнено інформацію про їхнє біологічне значення.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/VtTzGFCV або за QR-кодом, щоб прочитати інформацію про біологічне значення функції хімічних елементів (табл. 4.2).

Надлишок або нестача хімічних елементів може призвести до порушень здоров'я, так званих елементозів. Наприклад, дефіцит заліза може сприяти розвитку анемії, а надлишок фтору призводить до розвитку флюорозу. Деякі елементози розвиваються непомітно, інші викликають серйозні наслідки вже в дитячому віці. Саме тому важливо знати не лише функції хімічних елементів, а й те, як підтримувати їх баланс у своєму організмі.

Проєктна діяльність. Об'єднайтесь у пари або малі групи та оберіть одне з двох завдань:

Варіант 1. «Мова елементів». Створіть інфографіку або постер, у якому розгорнуто покажете роль органогенних елементів (C, H, O, N), а також Фосфору (P) і Сульфуру (S) у клітині. *Підказка*: скористайтесь інформацією з таблиці 4.2 та тексту параграфа.

Варіант 2. «На варті здоров'я». Розробіть пам'ятку для однолітків про елементози — порушення, викликані нестачею або надлишком хімічних елементів. *Підказка*: зосередьтесь на мікроелементах, таких як Йод, Залізо, Фтор тощо. Наведіть способи профілактики порушень, викликаних дефіцитом або надлишком цих хімічних елементів.

1. Які основні групи хімічних елементів виділяють за їхнім вмістом?
2. Які елементи належать до органогенних?
3. Чому поділ хімічних елементів за вмістом у клітині вважають умовним?
4. Чим небезпечна недостатність певного елемента в організмі людини?
5. Чому Оксиген є ключовим елементом для процесів окиснення в клітині?
6. Поміркуйте, чому для нормальної роботи клітин важливе підтримання певної концентрації хімічних елементів?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/1tJE8by4 і виконайте вправи.

5 НЕОРГАНІЧНІ СПОЛУКИ: ВОДА, МІНЕРАЛЬНІ СОЛІ ТА КИСЛОТИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які неорганічні сполуки входять до складу живих організмів;
- які властивості води роблять її незамінною для життя;
- які функції виконують мінеральні солі та кислоти.

У попередньому параграфі ви дізналися, що речовини, з яких побудовані клітини, поділяють на органічні та неорганічні. Сьогодні зосередимося саме на тих, які здаються найпростішими, але без них життя було б неможливим, — на неорганічних сполуках.

Які неорганічні речовини, що містяться в людському організмі, ви вже знаєте? Які функції вони виконують?

Напевно, серед відповідей будуть вода, кисень, мінеральні солі чи кислоти. І це не дивно, адже ці речовини мають універсальне значення. Вони важливі не лише для людського організму, а й для багатьох інших живих істот. **Неорганічні речовини** створюють внутрішнє середовище клітини та беруть участь у важливих фізико-хімічних процесах: беруть участь у перенесенні речовин, підтриманні температури, захисті клітин від змін pH, роботі ферментів тощо. Вони не мають складної молекулярної будови, як білки чи ДНК, але забезпечують умови для функціонування всіх органічних молекул.

Тож давайте розглянемо цих «помічників» детальніше і з'ясуємо, чому без них неможливе життя.

Вода: фізико-хімічні властивості та функції в живих організмах

Серед неорганічних речовин воді належить особлива роль. Це не просто рідина — це середовище, в якому відбуваються всі біохімічні процеси, і головна складова тіла майже кожної живої істоти. У хребетних тварин, наприклад, вода становить близько 60–70% маси тіла, а в медузи — понад 95%. Також вміст води може відрізнятися в різних тканинах в межах одного організму. Так, у нашому тілі вміст води у мозку сягає 75%, у м'язах і печінці — близько 70%, у шкірі — 58%, а от у кістках — 28%. Здавалося б, як таке можливо, адже кістки тверді!

Справа в тому, що вода в організмі може перебувати у двох формах:

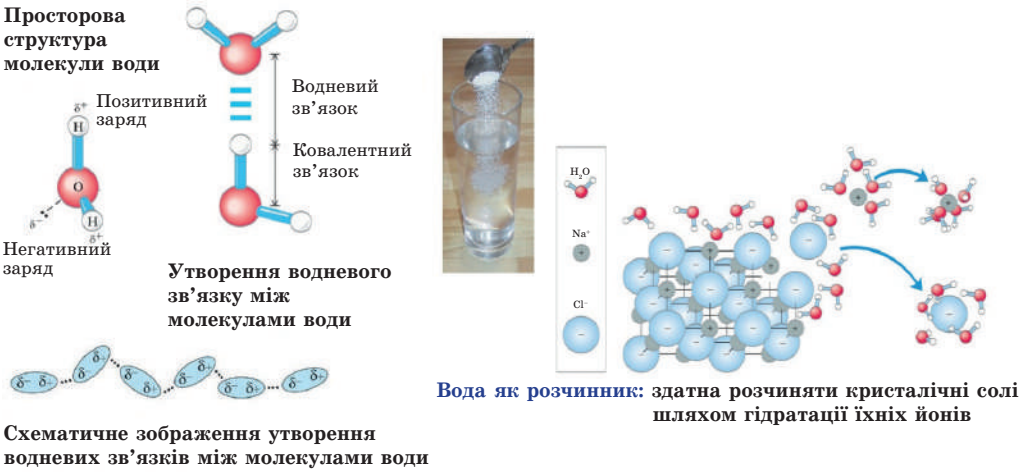
- **вільна вода** — та, що заповнює міжклітинний простір, входить до складу рідин (крові, лімфи, цитоплазми) і може легко переміщуватися;
- **зв'язана вода (структурована)** — утримується на поверхні молекул білків, мембран або всередині молекулярних структур, зберігає стабільність і не випаровується легко.

Давайте розглянемо основні *фізико-хімічні властивості води*:

1. Полярність молекули і дія як розчинника. Молекула води має асиметричне просторове розміщення зарядів: біля атома Оксигену утворюється частково негативний заряд (δ–), а біля атомів Гідрогену — частково позитивний (δ+). Така полярна будова дозволяє воді бути ефективним розчинником багатьох полярних сполук (мал. 5.1).

А чи знаєте ви...

Залежно від здатності взаємодіяти з полярними молекулами води, усі речовини поділяють на **гідрофільні** (ті, що добре розчиняються у воді) та **гідрофобні** (ті, що уникають контакту з водою і не розчиняються в ній). Гідрофільні речовини — це, наприклад, деякі солі, цукри, деякі амінокислоти, тобто речовини з полярними групами. Натомість гідрофобними є неполярні сполуки, як-от жири, які не взаємодіють із водою і здебільшого утворюють окремі шари або амінокислоти з гідрофобними бічними групами, наприклад валін, лейцин і фенілаланін.



Мал. 5.1. Властивості молекули води: полярність, утворення водневого зв'язку, здатність розчиняти солі

2. Здатність до утворення водневих зв'язків. Полярність молекул забезпечує також можливість утворення водневих зв'язків як між молекулами води (мал. 5.1), так і з іншими полярними речовинами. Притягання молекул води одна до одної завдяки водневим зв'язкам зумовлює високий поверхневий натяг (молекули води на поверхні «тримаються» разом, наче утворюють еластичну плівку). Саме тому водомірки можуть «ходити» по поверхні води, не занурюючись. А от прилипання молекул води між собою та до інших речовин дозволяє воді рухатися вгору тонкими трубочками, внаслідок так званих капілярних сил. Наприклад, піднімання води вгору стеблом соняшника.

Ще однією особливістю формування водневих зв'язків є те, що молекули води при таких взаємодіях слабо стискаються і це дозволяє їм підтримувати форму, об'єм і тиск у клітині.

3. Висока теплоємність. Вода здатна поглинати велику кількість тепла, нагріваючись повільно. Завдяки цьому вона стабілізує внутрішнє середовище організму, запобігаючи різким температурним коливанням. Така стабільність є критично важливою для роботи ферментів, оскільки більшість біохімічних реакцій відбувається в суворо визначеному температурному діапазоні. Також вода пом'якшує коливання температур у природних водоймах.

4. Висока теплота випаровування. При переході в газоподібний стан вода поглинає досить багато тепла. Наприклад, у спеку організм людини охолоджується завдяки випаровуванню поту з поверхні шкіри.

5. Висока теплопровідність. Вода швидко передає тепло від однієї ділянки до іншої, що дуже важливо для підтримання рівномірної температури в тканинах організму.

6. Здатність до дисоціації. Частина молекул води (хоч і дуже незначна) розщеплюється на йони H^+ і OH^-, забезпечуючи кислотно-лужну

рівновагу всередині клітин.

Функції води

Усі перелічені вище властивості води мають не лише фізичне, а й глибоке біологічне значення. Саме завдяки ним вона виконує життєво важливі функції в клітинах і тканинах як-от: є середовищем для реакцій, забезпечує транспорт речовин, терморегуляцію, механічний захист, структурну підтримку й бере участь у хімічних перетвореннях.

Робота в групах

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/PtJVbs3v і виконайте вправу, що дозволить закріпити знання про функції води.

Мінеральні солі та кислоти в живих організмах

Мінеральні кислоти та солі є ключовими компонентами хімічного складу клітин. У водному середовищі вони розпадаються на йони (позитивно заряджені катіони та негативно заряджені аніони). Серед катіонів особливе значення мають калій (K^+), натрій (Na^+), кальцій (Ca^{2+}) та магній (Mg^{2+}), а серед аніонів — фосфат (PO_4^{3-}), гідрокарбонат (HCO_3^-), сульфат (SO_4^{2-}) та хлорид (Cl^-).

Значення катіонів.

Калій (K^+) і натрій (Na^+) створюють мембранний потенціал (різницю зарядів по обидва боки клітинної мембрани), що необхідний для передавання нервових імпульсів і роботи м'язів.

Кальцій (Ca^{2+}) бере участь у згортанні крові, допомагає скороченню м'язів, активації ферментів, разом з фосфором формує кісткову тканину.

Магній (Mg^{2+}) важливий для роботи ферментів та синтезу ДНК.

Кальцій карбонат ($CaCO_3$) входить до складу черепашок молюсків, а кремнезем (SiO_2) — до скелетів діатомових водоростей.

Значення аніонів.

Фосфати (PO_4^{3-}) є важливою складовою ДНК, РНК та АТФ; формують буферну систему, допомагаючи підтримувати сталий рівень pH.

Гідрокарбонати (HCO_3^-) також працюють як буфери, стабілізуючи pH крові та тканин, а також беруть участь у транспортуванні CO_2 в організмі.

Сульфати (SO_4^{2-}) задіяні у детоксикації організму; потрібні для синтезу амінокислот, що містять сірку (метіонін, цистеїн), необхідних для роботи ферментів і побудови білків.

Хлориди (Cl^-) підтримують осмотичний баланс, тобто регулюють розподіл води між клітинами та середовищем. Вони також входять до складу хлоридної кислоти (HCl), яка створює кисле середовище в шлунку, необхідне для денатурації білків та активації ферменту пепсину.

0,9% розчин хлориду натрію (NaCl) називають фізіологічним, оскільки він зберігає осмотичну рівновагу клітин організму. Такий розчин є ізотонічним (має такий самий тиск, як і вміст клітини), що запобігає руйнуванню еритроцитів.

Значення мінеральних кислот.

Ортофосфатна кислота (H_3PO_4) необхідна для синтезу енергії (АТФ) та входить до складу фосфоліпідів, що формують клітинні мембрани.

Хлоридна кислота (HCl), як уже згадувалося вище, забезпечує травлення білків у шлунку.

Таким чином, мінеральні кислоти та солі є ключовими компонентами клітин та організму, забезпечуючи їхню стабільність і регулювання життєво важливих біологічних процесів.

1. Які властивості притаманні воді?
2. Які основні катіони та аніони входять до складу клітин?
3. Як водневі зв'язки між молекулами води забезпечують її фізико-хімічні властивості?
4. Чому мінеральні солі необхідні для роботи ферментів?
5. Яким чином йони Na^+ і K^+ забезпечують мембранний потенціал клітини? Для чого він потрібен?
6. Чому організму потрібен йонний стан хімічних елементів, а не їхні нейтральні атоми?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/WtJVbNNI і виконайте вправи.

6 ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ, ЇХ ФУНКЦІЇ В ЖИВИХ ОРГАНІЗМАХ. ПОНЯТТЯ ПРО БІОЛОГІЧНІ МАКРОМОЛЕКУЛИ — БІОПОЛІМЕРИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чим органічні речовини відрізняються від неорганічних;
- які функції виконують малі органічні молекули в клітині;
- що таке біологічні макромолекули (біополімери).

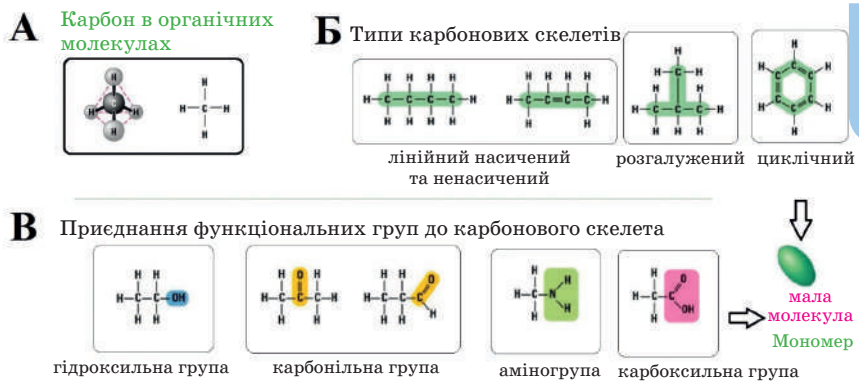
У попередньому параграфі ви дізналися, що неорганічні сполуки (вода, мінеральні солі та кислоти) відіграють ключову роль у підтриманні стабільного внутрішнього середовища клітини, транспортуванні речовин і регуляції життєво важливих процесів. Проте життя було б неможливим і без речовин іншої природи — органічних. Саме вони є основою структури клітини, забезпечують її ріст, розвиток, передачу спадкової інформації та енергетичний обмін. У цьому параграфі ми

з'ясуємо, які органічні речовини входять до складу живих організмів, чим вони відрізняються від неорганічних і як саме «працюють». Ви також познайомитеся з біополімерами — велетенськими молекулами, які виконують у клітині найскладніші та найвідповідальніші функції.

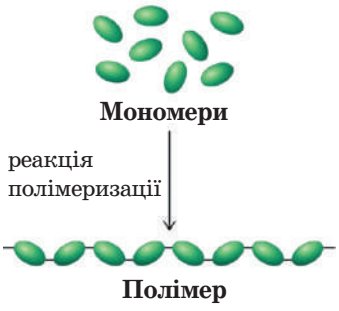
На відміну від неорганічних, органічні речовини мають у своїй основі атоми Карбону (C) у стані валентності IV. У такій формі Карбон здатен утворювати чотири ковалентні зв'язки.

Найпростішою органічною сполукою є молекула метану (CH_4), в якій один атом Карбону сполучений із чотирма атомами Гідрогену (мал. 6.1.а). Але Карбон може з'єднуватися не лише з Гідрогеном, а й з іншими атомами Карбону. Так виникають карбонові ланцюги, які можуть бути прямими, розгалуженими або замикатися в кільця (мал. 6.1.б). Така структура отримала назву карбоновий скелет — саме він є основою всіх органічних молекул.

До карбонового скелета можуть приєднуватися функціональні групи — характерні угруповання атомів, що визначають властивості та хімічну поведінку молекули (мал. 6.1.в).



Мал. 6.1. Будова органічних молекул



Мал. 6.2. Схема утворення полімерів

Комбінуючи карбоновий скелет із різними функціональними групами, природа створює велике різноманіття органічних речовин з невеликою молекулярною масою — так званих «малих молекул». Кожна з них може виконувати окрему функцію або об'єднуватися з іншими, утворюючи великі структури — полімери. У такому разі малу молекулу як складову полімеру називають мономерною ланкою або мономером (мал. 6.2).

Хоча **малі органічні молекули** мають невелику масу, їхнє значення для клітини важко переоцінити. Кожна така молекула виконує чітко визначену функцію: енергетичну (глюкоза, жирні кислоти), структурну (ліпіди в мембра-

нах), регуляторну (гормони амінокислотної природи, як-от тироксин, або стероїдної — кортизол), сигнальну (нейромедіатори: γ-аміномасляна кислота, ацетилхолін), захисну (гістамін як медіатор запалення).

Проте більшість цих молекул є складовими більших структур — полімерів. Якщо полімери утворюються в клітині природним шляхом, їх називають **біополімерами**. Найважливішими серед них є:

- білки, мономерами яких є амінокислоти;
- нуклеїнові кислоти (ДНК і РНК), що складаються з нуклеотидів;
- полісахариди, утворені з моносахаридів, наприклад глюкози.

На відміну від синтетичних полімерів (як-от пластики), біополімери мають строго впорядковану структуру, визначену послідовність мономерів і виконують життєво важливі функції — структурні, ферментативні, захисні, інформаційні та енергетичні. Більше про них ви дізнаєтеся в наступних параграфах.

1. Який хімічний елемент лежить в основі органічних речовин?
2. Які речовини є мономерами для білків, полісахаридів і нуклеїнових кислот?
3. Поясніть, чому малі органічні молекули мають велике значення для клітини.
4. Чим біополімери відрізняються від синтетичних полімерів?
5. Чому саме атом Карбону, а не будь-який інший елемент, став «основою» органічних речовин?
6. Як ви гадаєте, чому в природі утворилося так багато типів біополімерів, а не один універсальний полімер для всіх функцій?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/itJVnYrv і виконайте вправи.

7 ВУГЛЕВОДИ ТА ЛІПІДИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

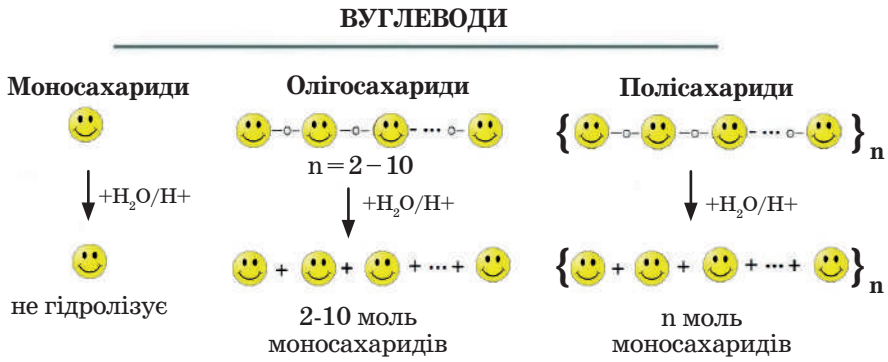
- що таке вуглеводи та ліпіди;
- яку роль вони відіграють у живих організмах;
- які властивості та функції мають ці молекули.

Вуглеводи

Вуглеводи — це речовини, які забезпечують організм енергією і не тільки… Ви вже зустрічали їх у темах про фотосинтез, здорове харчування та будову клітини. Які саме вуглеводи вам знайомі та яку роль вони виконують?

Вуглеводи — це велика група речовин, які широко поширені в природі. Їхні молекули складаються з Карбону (C), Гідрогену (H) та Оксигену (O), найчастіше у співвідношенні, подібному до «гідратованого вуглецю» (тобто вуглець + вода). Звідси й походить їхня назва. Умовно вуглеводи записують за формулою: $Cn(H_2O)n$. Наприклад, глюкоза має молекулярну формулу $C_6H_{12}O_6$, яку іноді подають як $C_6(H_2O)_6$.

За здатністю до гідролізу вуглеводи поділяють на моно-, оліго та полісахариди (мал. 7.1).



Мал. 7.1. Схематичне зображення класифікації вуглеводів за їх здатністю до гідролізу

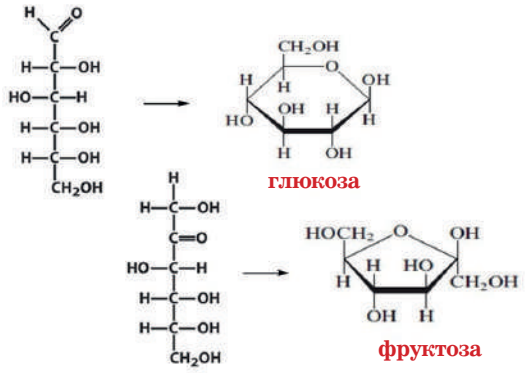
Моносахариди — найпростіші вуглеводи, які не здатні до гідролізу. Вони добре розчинні у воді та здебільшого мають солодкий смак. Приклади: глюкоза, фруктоза, галактоза.

За типом функціональної групи моносахариди поділяють на альдози (з альдегідною групою -CHO, наприклад глюкоза, рибоза) та кетози (з кетонною групою >C=O, наприклад фруктоза). За числом атомів Карбону їх класифікують на тріози (C3), тетрози (C4), пентози (C5), гексози (C6) тощо, аж до декоз (C10). Таблиця 7.1 містить основні характеристики поширених моносахаридів.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/etTzD4eA або за QR-кодом, щоб прочитати інформацію про основні характеристики поширених моносахаридів (табл. 7.1).

А чи знаєте ви...

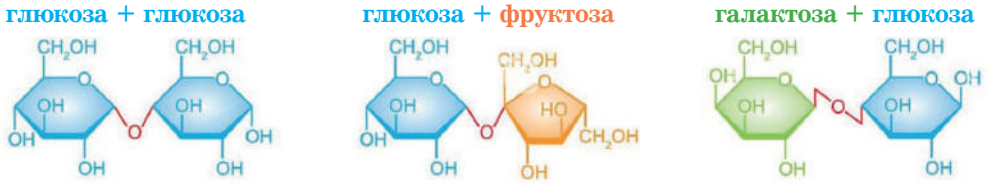
Фруктоза, що міститься в яблуках, грушах та меді, сприймається рецепторами язика приблизно у 2,5 рази солодшою за глюкозу та в 1,7 раза — за сахарозу. Це пояснюється її специфічною структурою, яка взаємодіє з білковими рецепторами смаку. Проте її метаболізм відрізняється від глюкози, тому надлишок може негативно вплинути на обмін речовин.



Мал. 7.2. Лінійні та циклічні форми моносахаридів

Ще однією особливістю моносахаридів є те, що вони можуть існувати у двох формах: ациклічній (відкритій) та циклічній (замкненій) (мал. 7.2). Циклічна форма моносахаридів менш реакційно активна, оскільки в ній відсутня вільна альдегідна чи кетонна група. Саме такі форми слугують будівельними блоками полісахаридів, забезпечуючи їхню міцність і нерозчинність.

Олігосахариди — це вуглеводи, що містять від 2 до 10 залишків моносахаридів, з'єднаних глікозидними зв'язками. Залежно від кількості мономерних одиниць, їх класифікують на дисахариди, **трисахариди** — включно до декасахаридів. Серед них найбільш поширені дисахариди, які відіграють ключову роль у харчуванні та метаболізмі (напр., мальтоза, сахароза (або цукроза), лактоза) (мал. 7.3). Однак, інші олігосахариди теж мають важливі функції. Сполуки з 3-9 залишками манози можуть утворювати глікопротеїни, що входять до складу слини та кишкового слизу. Вони виконують захисну роль, запобігаючи прикріпленню патогенних мікроорганізмів до клітин.



Мал. 7.3. Графічне зображення молекул дисахаридів

А чи знаєте ви...

Лактоза — звичний нам молочний цукор — під час гідролізу розщеплюється на глюкозу та галактозу. Ці прості цукри надають безлактозному молоку солодшого смаку, ніж звичайному, хоча вміст цукру в ньому фактично не змінюється.

Полісахариди — це полімерні молекули, що складаються із сотень або навіть тисяч залишків моносахаридів, з'єднаних між собою глікозидними зв'язками. Вони погано розчинні або зовсім нерозчинні у воді, проте можуть розщеплюватися до оліго- та моносахаридів.

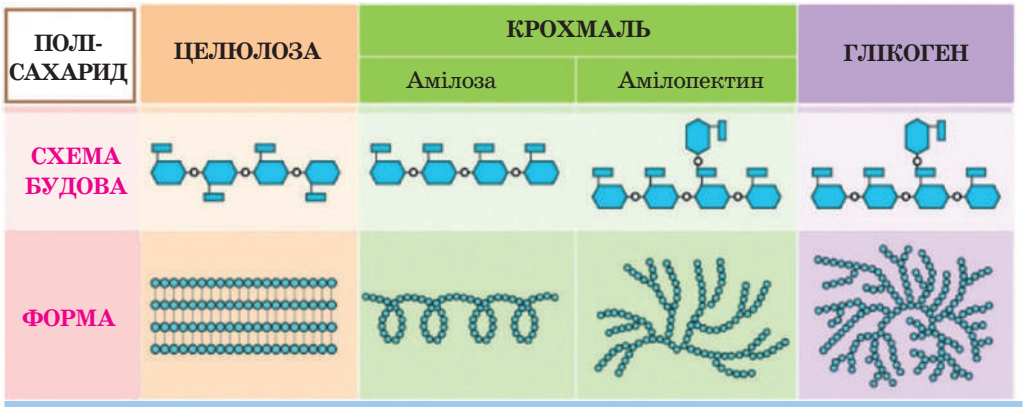
У живих організмах полісахариди поділяють на структурні та резервні. До перших належать целюлоза (клітинні стінки рослин), муреїн (стінки бактерій), хітин (екзоскелети членистоногих). Резервними є

крохмаль та інулін у зелених рослин, ламінарин у водоростей, глікоген у тварин.

А чи знаєте ви...

Деякі полісахариди у тварин і рослин виконують захисні функції. У тварин гепарин запобігає утворенню тромбів, зберігаючи нормальну циркуляцію крові. А камеді у рослин утворюють бар'єр на місці ушкоджень, запобігаючи втраті вологи та проникненню збудників хвороб — немов природний захисний пластир.

Якщо полісахариди складаються з однакових мономерів, то їх називають гомополімерами. Наприклад, інулін є полімером фруктози. А крохмаль, глікоген і целюлоза — полімери глюкози. Хоча всі три утворені з одного типу мономерів, вони мають різну просторову будову (мал. 7.4).



Мал. 7.4. Відмінності в будові різних полісахаридів

Целюлоза — структурний компонент клітинних стінок рослин — має лінійну будову. Через специфічні зв'язки ця молекула не розщеплюється ферментами людини при споживанні рослинної їжі, хоча й виконує важливу механічну та травну функцію.

Глікоген — основний запасний вуглевод у багатьох тварин та грибів, зокрема людини — має високорозгалужену структуру. Він накопичується в печінці та м'язах як резервне джерело енергії і, за потреби, дуже швидко розщеплюється.

Крохмаль — запасний полісахарид у рослин — складається з двох фракцій — амілози та амілопектину, що різняться структурою. Амілоза — це лінійна структура, що скручується у спіраль і повільніше перетравлюється. Амілопектин має розгалужену будову, подібно до глікогену, і швидше розщеплюється. Ці фракції мають різне співвідношення у різних продуктах рослинного походження.

А чи знаєте ви...

Чим вищий вміст амілопектину в продукті, тим швидше підвищується рівень глюкози в крові. Наприклад, картопля, багата на амілопектин,

засвоюється швидше, ніж сорти рису, в яких переважає амілоза. Крохмаль з високим вмістом амілози навіть називають резистентним до травлення. Схожі до амілози властивості має й інулін — резервний вуглевод деяких рослин (цикорій, топінамбур, часник, цибуля), який також погано перетравлюється в організмі людини.

Проєктна діяльність: «Функції вуглеводів». Дослідіть ширше біологічні функції вуглеводів: енергетичну, структурну, запасаючу та захисну. Створіть постер, презентацію чи лепбук зі схемами та поясненнями їхньої ролі в живих організмах.

Ліпіди

Ліпіди — це речовини, які є важливою складовою клітинних мембран, але не лише… Ви вже зустрічали їх у темах про сполучну тканину, гормональну систему, здорове харчування, клітинну будову та обмін речовин. Ліпіди виконують багато важливих функцій: беруть участь у травленні, запасають енергію, захищають внутрішні органи, забезпечують тепло- та електроізоляцію, беруть участь у сигнальній системі та задіяні в побудові біологічно активних речовин.

Які ліпіди вам відомі? У яких продуктах вони містяться? Чому надлишок або нестача ліпідів може бути шкідливим для здоров'я?

Ліпіди — це переважно гідрофобні біомолекули, тобто ті, що не розчиняються у воді, але добре розчиняються в неполярних органічних розчинниках (наприклад, у бензині чи ацетоні). Вони мають різноманітну хімічну будову, але всі походять із живих організмів і відіграють важливу роль у будові клітин та обміні речовин.

За хімічною будовою ліпіди поділяють на **прості** та **складні**.

Прості ліпіди — це естери вищих жирних кислот та спиртів. Вони не містять додаткових хімічних груп і мають загальну формулу R–COO–R', де R — залишок органічної кислоти (у нашому випадку жирної кислоти), а R' — залишок спирту. До простих ліпідів належать нейтральні жири (тригліцериди), воски та стериди.

У **нейтральних жирів** спиртовою складовою є гліцерол, до якого приєднуються три залишки жирних кислот (мал. 7.5). До них належить вершкове масло, сало, олія.

Мал. 7.5. Схематичне зображення тригліцериду: хімічна формула ліворуч, просторове представлення молекули праворуч

Якщо жир містить переважно насичені жирні кислоти (без подвійних зв'язків), його молекули щільно пакуються й утворюють тверду консистенцію (наприклад, вершкове масло). Якщо в складі переважають ненасичені жирні кислоти, молекули мають вигини (завдяки подвійним зв'язкам), що зменшує щільність паковання і робить жир рідким (наприклад, оливкова олія).

А чи знаєте ви...

Хоча більшість тваринних жирів тверді, а олії рідкі, є цікаві винятки! Риб'ячий жир — рідкий, бо містить багато ненасичених жирних кислот з подвійними зв'язками, що не дозволяють молекулам щільно упаковуватися. Пальмова та кокосова олія, попри рослинне походження, тверді, адже містять високий рівень насичених жирних кислот. Жири на основі ненасичених жирних кислот мають важливе значення для здоров'я. Вони сприяють зниженню рівня холестерину, підтримують еластичність судин, а також покращують роботу мозку та імунної системи.

Воски утворені з вищих спиртів і жирних кислот, тверді за кімнатної температури. Наприклад: бджолиний віск; захисний восковий шар на листках рослин; ланолін, що вкриває шкіру, шерсть, пір'я.

Стериди — це особливий клас ліпідів, які мають складну кільцеву структуру. Більшість стеридів не містять жирних кислот. Всі вони виконують важливі регуляторні та структурні функції в організмі. До прикладу, холестерин, що входить до складу клітинних мембран, є попередником стероїдних гормонів (тестостерону, естрогену, кортизолу), бере участь у синтезі вітаміну D. Жовчні кислоти — це похідні стеридів, які допомагають емульгувати жири під час травлення.

Складні ліпіди є також естерами вищих жирних кислот та спиртів, але, на відміну від простих ліпідів, можуть мати додаткові складові. У цьому параграфі ми зупинимося тільки на одній із груп складних ліпідів — фосфоліпідах.

Фосфоліпіди — це естери, що містять гідрофільну «головку», до складу якої входить залишок гліцеролу, фосфатна група та додатковий функціональний залишок «X» (наприклад, холін), а також два гідрофобні «хвости» (складаються із залишків жирних кислот) (мал. 7.6).

Мал. 7.6. Схематичне зображення фосфоліпіду: хімічна формула ліворуч, просторове представлення молекули праворуч

Вони є основними компонентами біологічних мембран, забезпечуючи їхню гнучкість, проникність та здатність до самовідновлення.

Проєктна діяльність: «Функції ліпідів». Дослідіть основні біологічні функції ліпідів. Доберіть зображення, схеми та пояснення, що ілюструють різні функції ліпідів у клітинах і організмах. Представте свою роботу у форматі постера, презентації або паперового лепбука. Обговоріть значення ліпідів у життєдіяльності організмів.

1. На які три основні групи поділяють вуглеводи за здатністю до гідролізу?
2. Які речовини належать до простих ліпідів?
3. Як структура крохмалю впливає на його засвоєння організмом?
4. Чому ліпіди не розчиняються у воді, але можуть утворювати структури, здатні до взаємодії з водним середовищем (наприклад, мембрани)?
5. Чому рослини запасають крохмаль, а не глікоген, як тварини?
6. Як ви думаєте, чи можна використовувати воски для створення біоматеріалів? Чому?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/0tJVn6Au і виконайте вправи.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/prYU5xXF або за QR-кодом і виконайте лабораторний практикум «Властивості вуглеводів та ліпідів».

8 АМІНОКИСЛОТИ. БІЛКИ: РІВНІ ЇХНЬОЇ СТРУКТУРНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ (КОНФОРМАЦІЇ)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

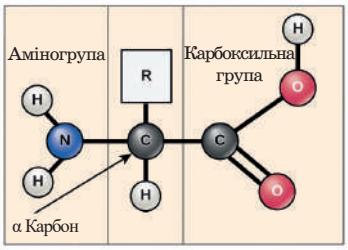
- що таке амінокислоти та білки;
- яку роль вони відіграють у живих організмах;
- що таке рівні структурної організації білків.

У попередніх параграфах ви дізналися, що вуглеводи та ліпіди — це не лише джерело енергії для організму, а й важливі будівельні матеріали. Але клітина — це не просто «заправка» та «будівля». Вона постійно працює: синтезує нові речовини, розщеплює інші, захищається, передає сигнали, рухається. Ці життєві процеси забезпечують білки — особливі біомолекули, які можна назвати «робітниками клітини». Вони мають різну структуру і виконують десятки функцій — від підтримки форми до регуляції хімічних реакцій. Білки — це найпоширеніші біомолекули: вони є не лише в кожній клітині, а й у більшості її складових частин. Попри всю різноманітність, ці молекули побудовані з однакових маленьких «цеглинок» — амінокислот.

Амінокислоти

Амінокислоти, які утворюють білки, називають протеїногенними (від англійського protein — «основний», «перший»). Їх усього 20, і, поєднуючись як частинки конструктора, вони формують мільйони різних білків. Наприклад, в організмі людини амінокислоти забезпечують створення близько 5 мільйонів білкових молекул.

У природі існує близько 500 амінокислот, але вони відрізняються за будовою й не всі входять до складу білків. Протеїногенні або основні амінокислоти мають одну важливу спільну рису: вони всі є альфа-амінокислотами — тобто їхня аміногрупа і карбоксильна група приєднані до одного атома Карбону, так званого α-Карбону (мал. 8.1).



Мал. 8.1. Молекулярна модель амінокислоти

Така будова дозволяє їм легко з'єднуватися в довгі ланцюжки-біополімери. Кожна амінокислота має власний бічний ланцюг — радикал (R-групу) (мал. 8.1), який визначає її заряд, хімічні властивості та розчинність. Саме ці 20 амінокислот закодовані в ДНК, яка «інструктує» клітину, як їх комбінувати.

Бічний ланцюг (R-група) амінокислот робить їх унікальними, визначаючи, чи буде ця молекула нейтральною, зарядженою чи полярною. Ці різні за структурою частинки амінокислот можуть притягуватися або відштовхуватися одна від одної, «ховатися» всередині молекули або виступати назовні, утворювати водневі, йонні або гідрофобні взаємодії. А це, в свою чергу, визначає форму і функції білкової молекули, яку вони формують.

За можливістю синтезу в організмі амінокислоти поділяють на замінні та незамінні. **Замінні амінокислоти** організм може синтезувати самостійно, тому вони не є обов'язковими в раціоні. Приклади: аланін, серин, глутамат, аспартат. **Незамінні амінокислоти** не синтезуються в організмі або утворюються в недостатній кількості, тому їх потрібно отримувати з їжею. Приклади: лізин, валін, фенілаланін, триптофан. **Умовно незамінні** — організм здатний їх синтезувати, але за певних умов (наприклад, під час хвороби чи інтенсивного росту їх вироблення може бути недостатнім). Приклад: аргінін, гістидин.

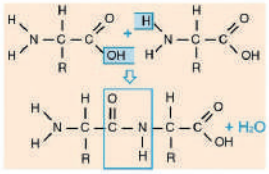
А чи знаєте ви...

Деякі амінокислоти отримали загальноприйняті або тривіальні назви, які часто пов'язані з джерелами, з яких вони були вперше виділені. Наприклад, аспарагін названо так, оскільки його вперше виявили у спаржі (asparagus), глутамат — у пшеничній клітковині (gluten), а тирозин отримав назву від грецького слова «tyros», що означає сир, оскільки був виділений саме з нього.

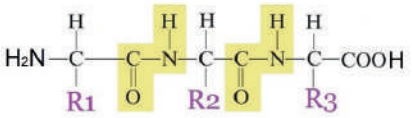
Амінокислоти виконують різноманітні функції, необхідні для життєдіяльності організму. Вони входять до складу ферментів, беруть участь у синтезі гормонів, нейромедіаторів та інших сигнальних молекул. У разі нестачі вуглеводів і жирів можуть використовуватися як джерело енергії. Деякі амінокислоти виконують також захисну функцію: наприклад, глутамат сприяє детоксикації аміаку в організмі. Проте їхня ключова роль — будівельна. Як ми згадували на початку параграфа, амінокислоти є основними «цеглинками», з яких утворюються всі пептиди та білки.

Пептиди та білки

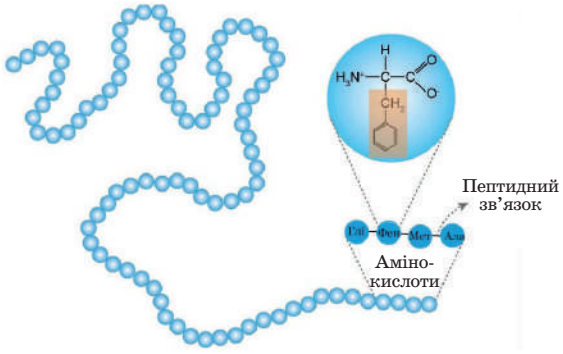
Пептиди та білки — це біомолекули, що складаються з амінокислот, з'єднаних пептидними зв'язками (мал. 8.2). **Пептиди** — це короткі ланцюжки амінокислот (до 50 залишків). **Білки** — це довгі, складно структуровані ланцюжки амінокислот (понад 50 залишків), які утворюють тривимірні структури. Головна різниця між пептидами та білками — довжина ланцюга і складність просторової організації.



Хімізм утворення пептидного зв'язку



Трипептид



Первинна структура білкової молекули

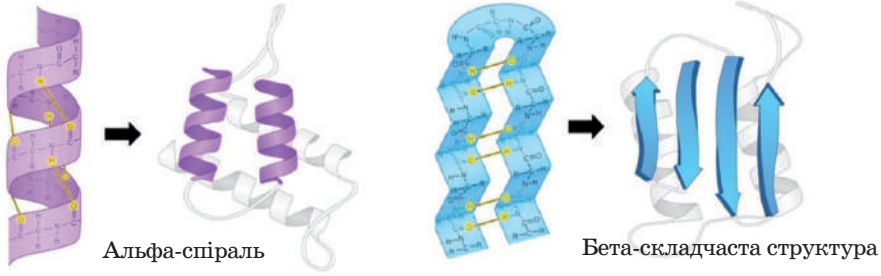
Мал. 8.2. Пептидний зв'язок: механізм утворення та роль у формуванні біомолекул

В основі утворення пептидів та білків лежить пептидний зв'язок. Він утворюється шляхом взаємодії карбоксильної групи однієї амінокислоти з аміногрупою іншої. У процесі утворення відщеплюється молекула води і між двома амінокислотами формується міцний ковалентний зв'язок (мал. 8.2).

Давайте поміркуємо чому це важливо для білків? Білки — не просто довгі ланцюжки залишків амінокислот. Щоб виконувати свої функції, білкова молекула має мати чітку форму. Ця форма формується поступово, на різних рівнях організації. Пептидні зв'язки лежать в основі первинної структури білкової молекули.

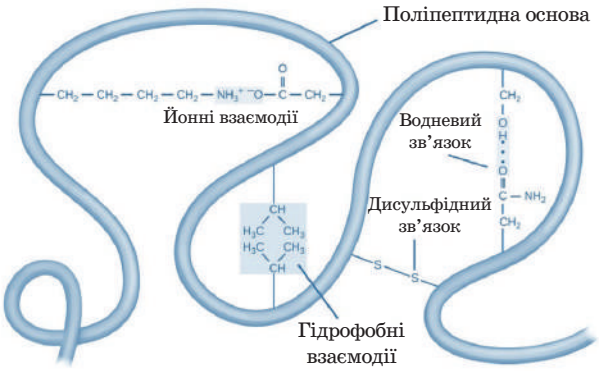
Первинна структура — це послідовність амінокислот у ланцюжку. Вона визначає, як саме білок згорнеться далі (мал. 8.2).

Вторинна структура формується за рахунок водневих зв'язків між амінокислотами. Вона має два варіанти побудови: • α-спіраль —компактна, закручена структура (наприклад, у кератині волосся, гемоглобіні); • β-складчаста структура (шар) — утворюється за рахунок паралельних чи антипаралельних поліпептидних ланцюгів (наприклад, у фібронектині, антитілах) (мал. 8.3).



Мал. 8.3. Вторинна структура білків: альфа-спіраль та бета-складчаста структура, стабілізовані водневими зв'язками

Третинна структура — просторове згортання поліпептидного ланцюга, що визначає функціональність білка. Вона формується завдяки взаємодіям між радикалами амінокислот. У цій структурі важливими є гідрофобні взаємодії (амінокислоти з неполярними радикалами тяжіють до внутрішньої частини молекули), дисульфідні зв'язки (утворюються між залишками цистеїну і забезпечують стабільність), йонні взаємодії та водневі зв'язки (мал. 8.4).



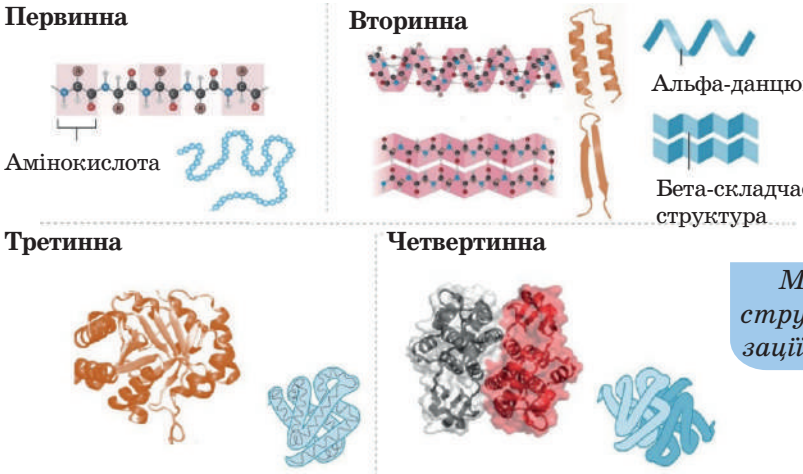
Мал. 8.4. Третинна структура білка: взаємодії, що забезпечують просторову організацію молекули

Залежно від згортання третинної структури, білки поділяють на фібрилярні та глобулярні. Перші мають більш витягнуту форму, як-от молекули колагену, фібрину, кератину. Глобулярні мають компактну кулясту форму, як-от міоглобін та більшість ферментів.

Четвертинна структура характерна для складних білкових комплексів, де кілька поліпептидних ланцюгів об'єднуються в єдину функціо-

нальну молекулу (мал. 8.5). Яскравими прикладами білків з четвертинною структурою організації є лактаза (має у своєму складі два домени) та гемоглобін (складається із чотирьох гемвмісних доменів).

На мал. 8.5 наведено схематичні зображення всіх чотирьох рівнів організації білків.



Мал. 8.5. Рівні структурної організації молекул білків

Напишіть есе, твір або розповідь на тему: «Білки в моєму організмі». Використовуйте власні знання, логіку та приклади, щоб пояснити, яку роль можуть відігравати білки в життєдіяльності людини.

1. Які молекули входять до складу білків?
2. Що таке пептидний зв'язок і як він утворюється?
3. Як амінокислоти впливають на просторову структуру білків?
4. Чому в білків може бути кілька рівнів структурної організації?
5. Чому глобулярні білки здатні виконувати широкий спектр функцій, а фібрилярні — переважно структурну роль?
6. Як ви думаєте, чи можливі білки з ще більшою складністю організації, ніж четвертинна структура?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/qtJVmmsT і виконайте вправи.

9 ФУНКЦІЇ ТА ВЛАСТИВОСТІ БІЛКІВ. ФЕРМЕНТИ (ЕНЗИМИ), ЇХНЯ РОЛЬ У ПРОЦЕСАХ МЕТАБОЛІЗМУ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які функції виконують білки;
- які властивості мають ці молекули;
- що таке ферменти (ензими) та як вони працюють.

Функції білків

У попередньому параграфі ви дізналися з чого побудовані білки та як формується їхня структура. Тепер настав час з'ясувати, що саме роблять ці молекули в організмі. Білки — не лише будівельний матеріал, а й виконавці майже всіх важливих процесів у клітині. Вони транспортують речовини, захищають від мікроорганізмів, передають сигнали та каталізують хімічні реакції.

Функція білка залежить від його структури й складу. Деякі білки складаються тільки з амінокислот (їх називають простими білками), інші — мають додаткову небілкову частину, наприклад, метал або вуглевод (складні білки). Саме ця різноманітність дозволяє білкам виконувати такі різні ролі.

У таблиці 9.1 наведено основні функції, які виконують ці біомолекули.

Таблиця 9.1

Функції білків

Функція	Опис	Приклади
Будівельна (структурна)	Білки утворюють структурні компоненти клітин і тканин, забезпечуючи їхню міцність та еластичність.	Колаген (шкіра, кістки), кератин (волосся, нігті), еластин (судини, хрящі), остеїн (кістки).
Каталітична	Ферменти, які прискорюють біохімічні реакції в організмі.	Амілаза (розщеплення крохмалю), ДНК-полімераза (реплікація ДНК), пепсин, трипсин (перетравлення білків).
Транспортна	Перенесення молекул та йонів у крові і через мембрани.	Гемоглобін (транспорт кисню), трансферин (перенесення йонів заліза), аквапорини (перенесення води).
Захисна	Захист організму від інфекцій та пошкоджень.	Антитіла (імунітет), фібрин, фібриноген (згортання крові), інтерферони (противірусний захист).
Регуляторна	Участь у передачі сигналів та регуляції процесів.	Інсулін, глюкагон (регуляція рівня глюкози), гормон росту (стимуляція росту), рецепторні білки (сприйняття сигналів).
Енергетична	Використання білків як джерела енергії в разі нестачі інших нутрієнтів.	Окислення амінокислот у циклі Кребса для отримання АТФ.
Скоротлива	Забезпечення руху клітин та організму.	Актин і міозин (м'язові скорочення), тубулін (рух органел у клітині).

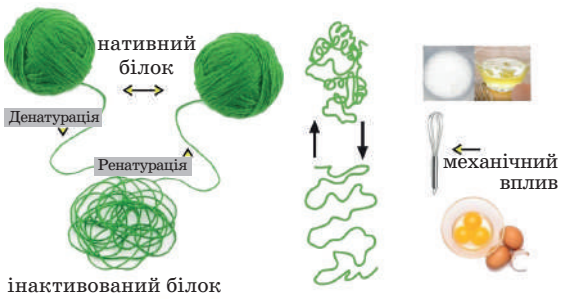
Робота в групах

Після написання есе «Білки в моєму організмі» перегляньте таблицю з основними функціями білків. Це допоможе перевірити, чи всі важливі ролі білків ви згадали у своїй роботі.

Для закріплення матеріалу перейдіть на сайт за QR-кодом або покликанням https://cutt.ly/XtJVm8XO і виконайте вправу «Білок-функція».

Властивості білків

Ви вже дізналися про структуру і функції білків. А тепер зверніть увагу на те, що ці два поняття можуть бути дуже сильно взаємопов'язані. Адже функції білків безпосередньо залежать від просторової будови. Структура білка — це не просто форма. Вона визначає функціональність молекули. Найменша зміна у просторовій організації білка може призвести до втрати його активності, зокрема, якщо йдеться про каталітичні функції білків-ферментів. Останні, наприклад, можуть працювати тільки за умов, коли збережена їхня третинна або четвертинна структура.



Мал. 9.1. Візуалізація властивостей білків

Розгляньмо головні властивості, пов'язані з нестабільністю просторової форми.

Уявіть, що білок — це клубочок ниток, складений у точному порядку (мал. 9.1). Така «складена» форма — нативний білок, саме вона дає білку можливість виконувати свої функції в організмі. Але під впливом високої температури, змін pH або механічного струшування ця структура може розплутатися — нитка втрачає форму. Це і є денатурація. У такому стані білок вже не працює правильно (так званий інактивований білок).

Денатурація — це порушення природної структури білка (четвертинної, третинної, вторинної) без руйнування пептидних зв'язків.

У деяких випадках, якщо чинник перестає діяти, білок може відновити свою форму. Цей процес називають ренатурацією. Наприклад, коли ми збиваємо яєчний білок, відбувається механічна денатурація: білкова структура змінюється і білок набуває пінистої форми. Але якщо зупинити збивання на початковому його етапі та залишити білок у спокої, пінка осідає, а молекули поступово повертаються до рідкої, одно-

рідної форми (мал. 9.1).

Отже, **ренатурація** — відновлення просторової структури після усунення впливу чинників, що спричинили денатурацію.

Зверніть увагу: не всі білки здатні до ренатурації. Деякі після денатурації вже не можуть повернути початкову форму, навіть якщо чинник зник.

Деструкція — повне руйнування білкової молекули до окремих амінокислот. Процес є незворотним і супроводжується втратою всіх структурних рівнів біомолекули. Наприклад, коли яйце потрапляє на гарячу пательню, відбувається спершу денатурація білків, а згодом і деструкція: білкові ланцюги руйнуються повністю. Змінюється не тільки структура, а й колір, запах та консистенція.

Ферменти (ензими)

У кожній клітині відбуваються тисячі хімічних реакцій — одні речовини синтезуються, інші — розщеплюються. Ці перетворення загалом називають метаболізмом. Але як клітина встигає керувати таким складним «виробництвом»? Це можливо завдяки ферментам — особливим білкам, які прискорюють хімічні реакції в мільйони разів!

Ферменти (або ензими) — це переважно речовини білкової природи, які прискорюють (каталізують) хімічні реакції в організмі.

Існують і небілкові каталізатори, наприклад рибозими — молекули РНК, що також можуть виконувати ферментативну функцію. Але вони трапляються значно рідше.

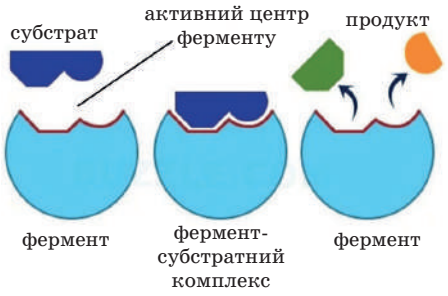
А чи знаєте ви...

Слово «ензим» походить від грецького «enzymē», що буквально означає «у заквасці». У стародавні часи люди помічали, що в заквашеному тісті або фруктовому соку починають відбуватися зміни: все булькає, піниться, стає кислуватим. Ці зміни викликають особливі речовини, які зараз ми називаємо ензимами. Тобто ще тоді люди мали справу з ферментами, хоч і не знали їхньої природи. Зараз термін «ензими» — це міжнародна наукова назва ферментів. Відповідно до неї, назвам ферментів додають суфікс — аза —, як-от протеїназа, ДНКаза, ліпаза.

Структура ферментів

Як і всі білки, ферменти складаються з амінокислот. Але їхня форма дуже специфічна — вона дозволяє їм точно взаємодіяти лише з певною речовиною, яку вони мають перетворити. Цю речовину називають субстратом. На поверхні ферменту є активний центр — ділянка, яка зв'язується із субстратом (мал. 9.2). Цей зв'язок працює за принципом «ключа і замка»: форма активного центру точно підходить до форми субстрату, як ключ до замка. Саме тому кожен фермент діє лише на певну речовину. Наприклад, лактаза — фермент, який розщеплює тільки молочний

цукор (лактозу), а не будь-який інший цукор. При цьому в одній молекулі ферменту може бути декілька активних центрів.



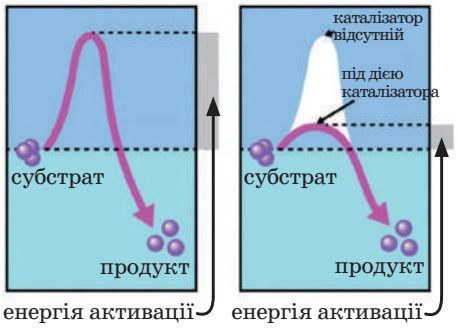
Мал. 9.2. Механізм дії ферментів

Після того як субстрат приєднується до активного центру, фермент утворює з ним тимчасову сполуку — фермент-субстратний комплекс. У його межах відбувається хімічна реакція, у результаті якої субстрат перетворюється на іншу речовину — продукт. Після завершення реакції продукт від'єднується, а фермент залишається незмінним. Це означає, що фермент не витрачається під час реакції, він готовий знову взаємодіяти з новою молекулою субстрату (мал. 9.2).

Чи може хімічна реакція відбуватися без участі ферментів?

Ферменти знижують так звану **енергію активації** — тобто ту енергію, яку потрібно витратити, щоб розірвати зв'язки в молекулах одних речовин і дати їм можливість почати перетворення чи взаємодію з іншими. Уявіть, що це як підняти м'яч на гірку, щоб він міг скотитися вниз. Без цієї початкової «підштовхувальної» енергії реакція просто не відбудеться. Розгляньте графіки на малюнку 9.3.

На лівій частині графіка видно реакцію без ферменту: щоб субстрат перетворився на продукт, потрібно затратити багато енергії, а це складно й повільно. Праворуч — та сама реакція, але вже з ферментом. Він знижує енергію активації. Це ніби ви прорізали тунель у гірці: тепер м'яч може легко скотитися, не піднімаючись високо.



Мал. 9.3. Зниження енергії активації в присутності ферменту (каталізатора)

Фермент не змінює суть реакції і не витрачається — він лише зменшує енергію, необхідну для її запуску.

Ферменти, як і білки загалом, бувають:

прості — складаються лише з амінокислот (наприклад, трипсин);

складні — мають не лише білкову частину, але й небілкову (наприклад, йон металу або органічну молекулу). Ця небілкова частина може бути необхідна для роботи ферменту. Наприклад, фермент каталаза містить гем (залізовмісну групу).

Небілкову частина ферменту називають **кофактором**. Якщо кофактором є органічна молекула, яка слабо зв'язана із білковою частиною, то її називають **коферментом**. Багато коферментів є похідними вітамінів. Кофактори допомагають ферменту правильно приєднувати речовини (субстрати) та пришвидшувати перебіг реакцій.

А чи знаєте ви...

Ферменти не просто «плавають» у клітині безладно. Кожен з них знаходиться саме там, де має діяти. Наприклад, ферменти, що забезпечують дихання клітини, розташовані в мітохондріях, а ті, що допомагають копіювати ДНК, — у ядрі. Вони можуть бути вільними і зв'язаними із мембранами клітини чи її органелами. Організм регулює вироблення (біосинтез) ферментів залежно від потреб клітини. Якщо певна речовина з'являється в клітині, ферменти для її перетворення починають синтезуватися. А якщо вона зникає, то і синтез може зупинитися. Наприклад, після того як ми вип'ємо молоко, в кишечнику активується синтез лактази — ферменту, що розщеплює лактозу. Але якщо молока немає довго, лактази теж виробляється менше.

Ферменти працюють лише за певних умов: при оптимальній температурі, рівні pH і в присутності потрібних речовин. Зміни цих умов можуть призвести до денатурації ферменту, і він втратить активність.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/9rYU4f70 або за QR-кодом і виконайте лабораторне дослідження «Вивчення властивостей ферментів».

Оберіть одну сферу, де використовують ферменти (побут, медицина, харчова промисловість, біотехнології тощо) і підготуйте міні-проєкт (презентацію, постер, інфографіку або усний виступ), у якому назвіть, які саме ферменти застосовують; поясніть, що вони роблять і чому це важливо; наведіть приклад або цікавий факт із цієї сфери.

1. Що таке денатурація та ренатурація білків?
2. Чим відрізняються прості та складні білки?
3. Чому форма білка впливає на його функцію?
4. Як зміни температури або pH впливають на активність ферментів?
5. Чим небезпечна недостатність певного ферменту в організмі людини?
6. Поміркуйте: чи можуть існувати неорганічні каталітичні системи, подібні до ферментів?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/stJVQgsE і виконайте вправи.

10 НУКЛЕЇНОВІ КИСЛОТИ І ЇХ РОЛЬ ЯК НОСІЯ СПАДКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ. ДНК: БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке нуклеїнові кислоти;
- як влаштована молекула ДНК і які рівні її просторової організації;
- які основні властивості має ДНК і як вони забезпечують її функції в клітині.

Нуклеїнові кислоти

У попередніх параграфах ви розглядали білки — складні молекули, що виконують безліч життєво важливих функцій у клітині. Пригадайте, що білки складаються з 20 різних амінокислот, які, подібно до частинок конструктора, з'єднуються в певній послідовності, утворюючи численні унікальні молекули.

Але звідки клітина «знає», які саме амінокислоти потрібно поєднати і в якому порядку? Чи існує певна інструкція, що керує цим процесом?

Так! Відповідь захована в особливому класі молекул — нуклеїнових кислотах.

Нуклеїнові кислоти — це високомолекулярні біополімери, мономерними ланками яких є нуклеотиди. Як і білкам, їм притаманна складна структурна організація. Існують два основні типи нуклеїнових кислот: **дезоксирибонуклеїнова кислота (ДНК) та рибонуклеїнова кислота (РНК)**. Вони відрізняються за будовою та функціями.

ДНК — це своєрідна молекулярна інструкція. У послідовності її нуклеотидів закладена інформація, за якою клітина «збирає» білки. Нуклеотиди можна уявити як «букви» особливої біологічної мови, що об'єднуються в «слова» — триплети (мал. 10.1). Кожні три нуклеотиди утворюють **кодон** — послідовність, яку впізнає спеціальний фермент. Кожен кодон кодує певну амінокислоту. Саме цю інструкцію клітина «зчитує» під час синтезу білка, щоб зібрати його в правильній послідовності.

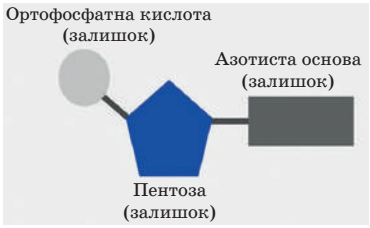
Мал. 10.1. Схема зчитування генетичної інформації з ДНК для синтезу білка

РНК реалізують цю інструкцію. Одні молекули РНК переносять потрібні частинки інформації з ДНК, а інші допомагають зібрати білок у точній відповідності до «вказівок». Разом вони забезпечують втілення спадкової інформації у життя.

А чи знаєте ви...

Вся передача спадкової інформації в клітині відбувається за єдиною схемою: **ДНК → РНК → білок**. Цю схему називають **центральною догмою молекулярної біології**.

Нуклеотид — це мономерна ланка нуклеїнових кислот. Він складається з трьох компонент: азотистої основи (однієї з чотирьох можливих для ДНК чи РНК), залишку пентози (рибози чи дезоксирибози) та ортофосфатної кислоти.



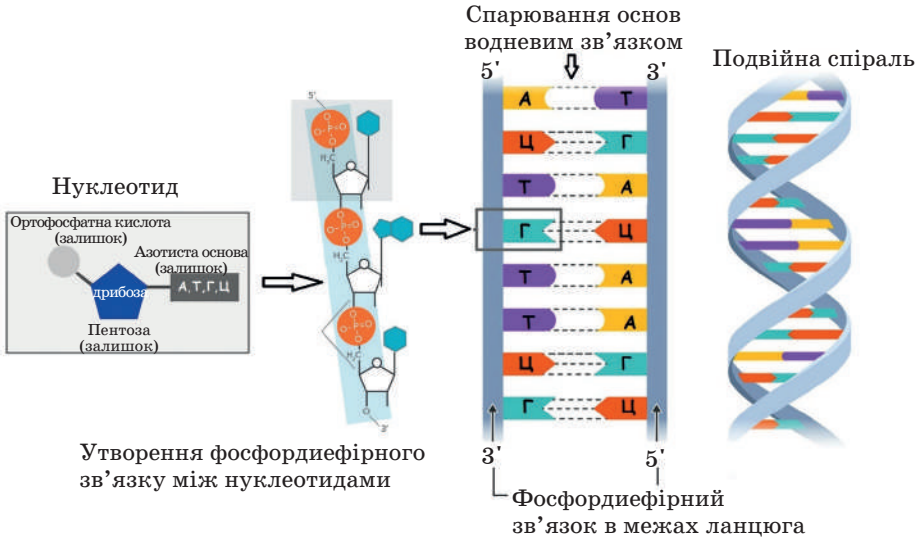
Мал. 10.2. Схематичне зображення нуклеотиду

Ці частини поетапно з'єднуються між собою в одну сполуку. Саме через те, що кожна з них втрачає фрагмент у процесі об'єднання, їх називають залишками (мал. 10.2).

Нуклеотиди — це не лише мономери нуклеїнових кислот, але й малі органічні молекули, що самостійно виконують низку важливих функцій у клітині. Деякі з них беруть участь у збереженні й передачі енергії, інші задіяні у клітинній сигналізації або регуляції обмінних процесів.

Будова та властивості ДНК

ДНК складається із *дезоксирибонуклеотидів*. Основою кожного нуклеотиду є дезоксирибоза, до якої приєднані азотиста основа та залишок ортофосфатної кислоти. Серед азотистих основ трапляються аденін (позначається літерою А), гуанін (Г), цитозин (Ц) і тимін (Т) (мал. 10.3). Окремі нуклеотиди сполучаються між собою за допомогою фосфодиефірних зв'язків. Ці зв'язки утворюються між гідроксильною групою дезоксирибози одного нуклеотиду та фосфатною групою сусіднього. У результаті виникає міцний ланцюг, який формує скелет молекули (мал. 10.3). Ця **лінійна послідовність** нуклеотидів і є **первинною структурою ДНК**.



Мал. 10.3. Формування первинної та вторинної структури ДНК

А чи знаєте ви...

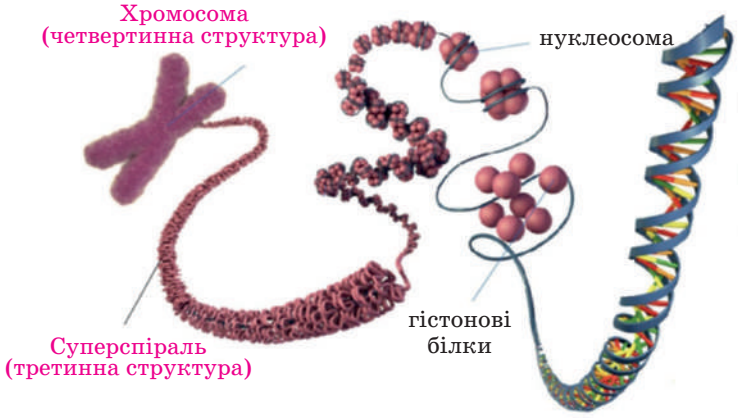
У 1950-х роках американський біохімік Ервін Чаргафф встановив закономірності у складі ДНК, які згодом назвали його іменем (так звані правила Чаргаффа): кількість аденіну (А) завжди дорівнює кількості тиміну (Т); кількість гуаніну (Г) завжди дорівнює кількості цитозину (Ц); сума пуринових основ (А + Г) дорівнює сумі піримідинових (Т + Ц). Ці спостереження стали важливим ключем до розшифрування просторової структури ДНК.

Вторинна структура ДНК — це два полінуклеотидні ланцюги, з'єднані між собою водневими зв'язками між азотистими основами. Аденін (А) завжди спарюється з тиміном (Т) і між ними утворюються два водневі зв'язки. Гуанін (Г) з'єднується з цитозином (Ц), і між ними виникає три водневі зв'язки (мал. 10.3). Таку точну відповідність у спарюванні основ називають **комплементарністю.** Вона є основою для точного копіювання ДНК під час поділу клітин.

Два ланцюги в молекулі ДНК розташовані антипаралельно: один має напрямок від 5′ до 3′, інший — навпаки, від 3′ до 5′. У просторі вони скручуються, утворюючи **подвійну спіраль** (див. мал. 10.3).

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/MtTzFWqf або за QR-кодом, щоб дізнатись більше про історію відкриття подвійної спіралі ДНК.

Після формування подвійної спіралі молекула ДНК далі ущільнюється за допомогою спеціальних білків-гістонів, які мають позитивний заряд. ДНК обгортається навколо комплексу з восьми гістонових білків двічі, утворюючи структуру, що називають нуклеосомою. Нуклеосома закріплюється ще одним білком, який допомагає підтримувати її стабільність. Надалі нуклеосоми закручуються у спіралі вищого рівня — так звані суперспіралі, що є третинною структурою ДНК (мал. 10.4).



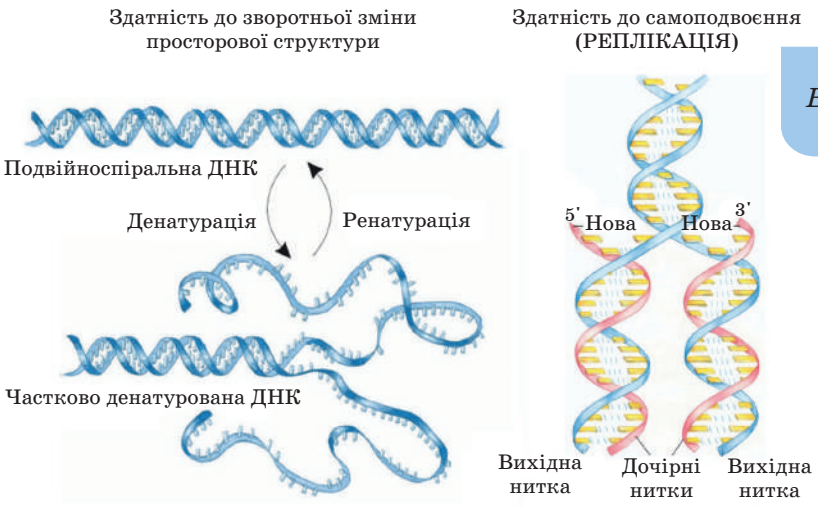
Мал. 10.4. Формування третинної та четвертинної структури ДНК

На ще вищому рівні організації суперспіралі ДНК додатково ущільнюються й формують структури, які в період поділу клітини набувають

форми **хромосоми — четвертинна структура**. Саме така форма дозволяє двометровій ДНК зберігатися компактно в ядрі еукаріотів, не втрачаючи при цьому доступності для зчитування потрібної інформації.

Властивості ДНК. Однією з важливих хімічних властивостей ДНК є її стабільність, завдяки якій молекула може зберігати чотири рівні структурної організації за нормальних (фізіологічних) умов. Це пов'язано зі **здатністю ДНК до зворотної зміни просторової структури**, тобто можливості розкручуватися і знову відновлювати початкову форму. За зміни умов середовища, наприклад при підвищенні температури або зміні рівня pH, дволанцюгова структура ДНК розплітається. Цей процес називають **денатурацією**. Якщо умови знову стають сприятливими, ДНК здатна відновити свою структуру — це явище називають **ренатурацією** (мал. 10.5).

Ще одна важлива властивість ДНК — **здатність до самоподвоєння**, або реплікації. Завдяки цій властивості клітина може точно копіювати генетичну інформацію перед поділом. В основі процесу реплікації лежить *принцип комплементарності*: кожна з двох ланок ДНК слугує матрицею (зразком) для утворення нової ланки, яка їй точно відповідає. У результаті, з однієї молекули ДНК утворюються дві ідентичні, кожна з яких містить один старий (вихідний) і один новий ланцюг («нитка»). Такий спосіб подвоєння називають напівконсервативним (мал. 10.5).



Мал. 10.5. Властивості ДНК

У разі ушкодження послідовності нуклеотидів (наприклад, через дію мутагенів або помилки під час реплікації), спеціальні ферменти здатні розпізнати дефект, вилучити ушкоджену ділянку та відновити її за принципом комплементарності. Це так звана **здатність до репарації** або самовідновлення. Завдяки цій властивості ДНК зберігає точність і сталість генетичної інформації, що критично важливо для нормального функціонування клітин і всього організму.

Створіть лепбук на тему: «Функції ДНК», у якому за допомогою схем, малюнків, коротких пояснень і цікавих деталей покажіть, як саме ДНК зберігає, передає та реалізує спадкову інформацію, а також чому її структура дозволяє зберігати стабільність і допускати зміни (мутації). Лепбук можна оформити як у паперовому, так і в електронному вигляді.

1. Які компоненти входять до складу нуклеотиду?
2. Що таке комплементарність?
3. Чому ДНК називають «молекулярною інструкцією» для синтезу білка?
4. Чому реплікацію ДНК називають напівконсервативною?
5. Порівняйте процес денатурації ДНК з денатурацією білків.
6. Поміркуйте: чому в клітині ДНК має бути компактно ущільнена, але водночас «доступна» для зчитування інформації?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/mtJVWqPX і виконайте вправи.

11 РНК: БУДОВА, ОСНОВНІ ТИПИ ТА ЇХНІ ФУНКЦІЇ. АТФ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке РНК і чим вона відрізняється від ДНК;
- які типи РНК існують та яку будову вони мають;
- яку роль виконує АТФ у клітині.

Будова та типи РНК

Ми вже зустрічалися з РНК в попередньому параграфі. Настав час розібратися глибше.

Пригадайте, з яких мономерів вона побудована і до яких сполук належить. Які складові входять до нуклеотидів?

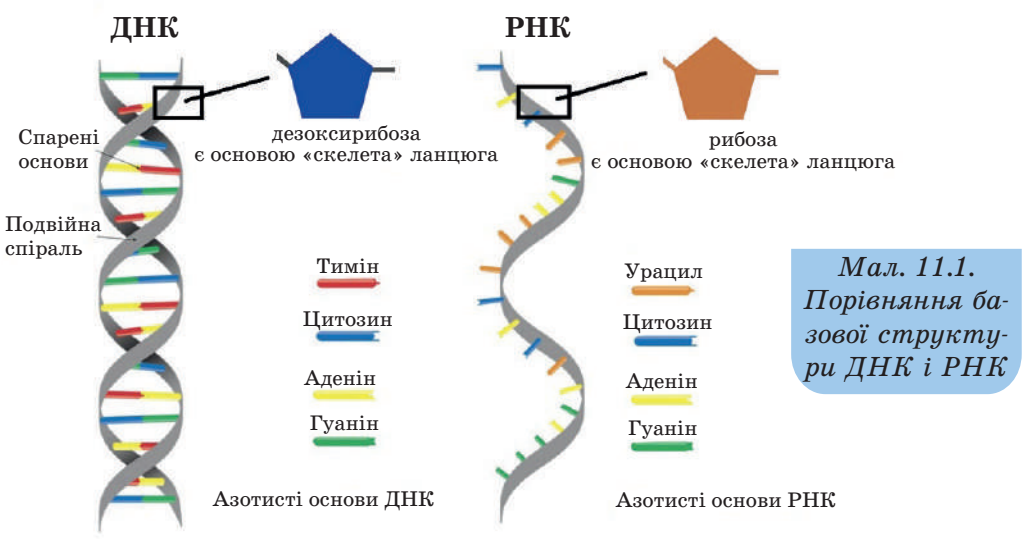
Тепер звернімо увагу на те, чим РНК відрізняється від своєї «сестри» ДНК. Розгляньте малюнок 11.1, де наглядно видно різницю між цими двома біополімерами.

РНК — одноланцюгова молекула. Її вуглеводною складовою є рибоза, а серед азотистих основ відсутній Тимін (Т), бо його місце займає Урацил (У).

Більше спільного і відмінного між ДНК і РНК ви знайдете в таблиці 11.1.

У клітинах існує три основні типи РНК, які відрізняються за розмірами, будовою, локалізацією та функціями. До них належать:

- матрична або інформаційна РНК (мРНК або іРНК),
- транспортна РНК (тРНК),
- рибосомна РНК (рРНК).



Мал. 11.1. Порівняння базової структури ДНК і РНК

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/ZtTzFVnF або за QR-кодом, щоб переглянути порівняльну характеристику ДНК і РНК (табл.11.1).

Матрична РНК (мРНК) — це тип рибонуклеїнової кислоти, що переносить генетичну інформацію від ДНК до рибосом, де синтезуються білки.

Молекула мРНК має вигляд лінійного ланцюга нуклеотидів. Вона утворюється в ядрі на основі певної ділянки одного з ланцюгів ДНК. Синтез мРНК відбувається *за принципом комплементарності*: до кожного нуклеотиду ДНК добирається відповідний нуклеотид РНК. При цьому, на відміну від ДНК, замість тиміну до мРНК приєднується урацил (мал. 11.2).

Ланцюг ДНК: ЦЦА-ЦТА-ГГА-ААА
Ланцюг мРНК: ГГУ- ГАУ-ЦЦУ-УУУ

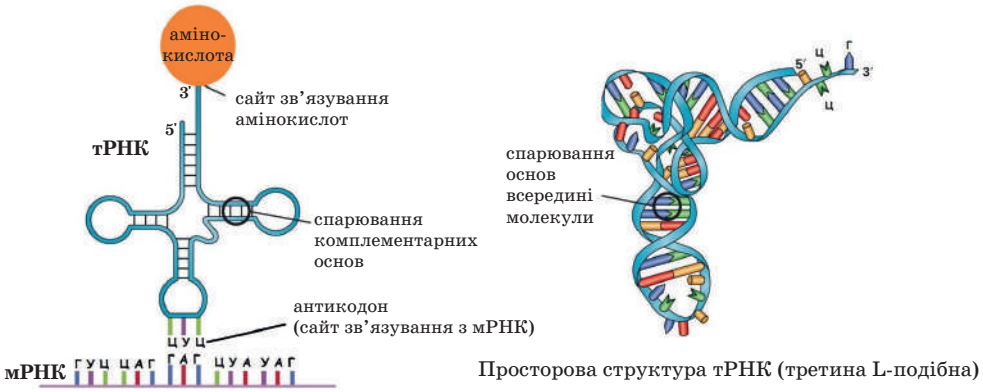
Мал. 11.2. Синтез іРНК на матриці ДНК за принципом комплементарності

На частку мРНК припадає приблизно 5% усієї РНК у клітині. Після утворення мРНК виходить з ядра в цитоплазму і приєднується до рибосоми. Рибосома «зчитує» її послідовність по три нуклеотиди (триплети, або кодони). Кожен кодон містить інформацію про одну амінокислоту.

Таким чином, інформаційна РНК визначає послідовність амінокислот у білку.

Транспортна РНК (тРНК) — це тип рибонуклеїнової кислоти, яка транспортує амінокислоти до рибосом під час синтезу білка. На її частку припадає близько 10% усієї РНК у клітині.

Молекула тРНК є коротким ланцюгом, що налічує приблизно 70–90 нуклеотидів. Завдяки **внутрішньомолекулярним взаємодіям** між комплементарними ділянками, тРНК згортається у **вторинну структуру**, схожу на листок конюшини (див. мал. 11.3).



Просторова структура тРНК (третина L-подібна)

Мал. 11.3. Схематичне зображення роботи тРНК та її просторова структура

В її будові виокремлюють кілька петель. Одна з них містить **антикодон** — послідовність із трьох нуклеотидів, яка є комплементарною до кодону мРНК. На іншому кінці молекули є ще одна важлива ділянка — акцепторний кінець, до якого приєднується відповідна амінокислота.

Крім вторинної, тРНК також має **третинну структуру**. Вона є ще більш компактною і має характерну L-подібну форму (мал. 11.3).

Рибосомна РНК (рРНК) входить до складу рибосом — органел, що забезпечують синтез білків. У клітині саме рРНК становить понад 80% усієї РНК.

Рибосома складається з двох субодиниць (малої та великої). Обидві містять рРНК разом із білками.

Молекули рРНК мають складну вторинну і третинну структури, які дозволяють їй утворювати каркас рибосоми.

Головні функції рРНК:

- забезпечує структурну основу рибосоми;
- бере участь у розпізнаванні мРНК і правильному розташуванні тРНК;
- виконує каталітичну функцію — саме рРНК у великій субодиниці рибосоми утворює пептидний зв'язок між амінокислотами під час синтезу білка (це називають пептидилтрансферазною активністю).

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/krYU56JW або за QR-кодом і виконайте практичну роботу «Розв'язання елементарних вправ зі структури нуклеїнових кислот».

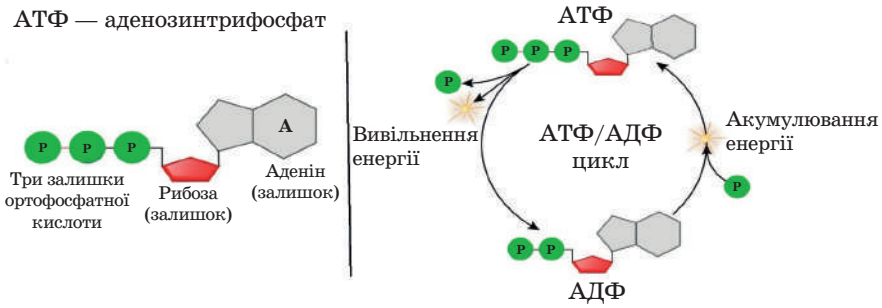
Аденозинтрифосфат (АТФ)

АТФ — це органічна сполука, що належить до вільних нуклеотидів типу РНК. Вона виконує ключову роль в обміні речовин і є універсальним хімічним акумулятором енергії в усіх живих організмів: від бактерій до людини. АТФ забезпечує енергією майже всі клітинні процеси: рух, транспорт речовин, синтез білків тощо.

Цю молекулу можна порівняти з банкоматом клітини, який тимчасово зберігає «енергетичну валюту» в зручній для використання формі. Залежно від потреб організму, ця енергія «знімається» й витрачається на різні процеси, подібно до того, як ми використовуємо гроші в потрібній ситуації.

Будова АТФ. Молекула АТФ складається з трьох компонентів: азотистої основи аденіну, вуглеводу рибози та трьох залишків ортофосфатної кислоти, з'єднаних послідовно (мал. 11.4). Два останні фосфатні зв'язки мають високу енергетичну цінність, і їх називають *макроергічними*. Використання енергії, акумульваної в макроергічних зв'язках, залежить від потреб клітини.

Гідроліз АТФ. Під час гідролізу від АТФ відщеплюється кінцева фосфатна група. У результаті аденозинтрифосфат (АТФ) перетворюється на аденозиндифосфат (АДФ), а вивільнена енергія використовується клітиною (мал. 11.4). За стандартних умов під час гідролізу 1 моль АТФ до АДФ вивільняється близько 30,5 кДж енергії.



Мал. 11.4. Схематичне зображення АТФ та цикл перетворення АТФ/АДФ

Синтез АТФ. У зворотному процесі — синтезі АТФ з АДФ і фосфату — ця енергія накопичується знову (мал. 11.4). Слід зазначити, що АТФ синтезується як в анаеробних умовах (без кисню), так і в аеробних умовах (за наявності кисню). Цикл розщеплення й ресинтезу АТФ повторюється тисячі разів упродовж доби, адже кожна клітина постійно оновлює запас цієї молекули.

Створіть лепбук на тему: «Функції РНК». Лепбук можна оформити як у паперовому, так і в електронному вигляді.

1. Які компоненти входять до складу нуклеотиду РНК?
2. Скільки фосфатних залишків має молекула АТФ?
3. Чим відрізняється будова і функції мРНК і тРНК?
4. Чому фосфатні зв'язки в АТФ називають макроергічними?
5. Поясніть, як тРНК «розуміє», яку амінокислоту потрібно приєднати до білка.
6. Чому в клітині відбувається постійне оновлення молекул АТФ?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/3tJVE8aZ і виконайте вправи.

12 БІОЛОГІЧНО АКТИВНІ РЕЧОВИНИ (БАР)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке біологічно активні речовини та як вони регулюють життєві процеси;
- які основні групи БАР існують і чим вони відрізняються;
- чому вітаміни, гормони й антибіотики важливі для організму.

Життя будь-якого організму неможливе без обміну речовин, росту, розвитку та адаптації до змін навколишнього середовища. У попередніх параграфах ви вже дізналися про будову та функції основних біомолекул: білків, ліпідів, вуглеводів і нуклеїнових кислот, які беруть участь у цих процесах. Проте навіть такі універсальні молекули не можуть самостійно забезпечити чітке регулювання всіх подій, що відбуваються у клітині. Щоб реакції в організмі відбувалися вчасно та з потрібною інтенсивнітю, клітина використовує особливі сполуки — біологічно активні речовини (БАР). Навіть у дуже малих кількостях вони можуть істотно впливати на перебіг біохімічних процесів, координувати роботу органів і систем, а також захищати організм від шкідливих впливів.

Біологічно активні речовини (БАР) — це сполуки, які в дуже малих кількостях впливають на життєві процеси в клітині, організмі або між організмами. Вони не є джерелом енергії чи будівельним матеріалом, але регулюють обмін речовин, ріст, розвиток, захисні реакції тощо.

За хімічною природою БАР можуть бути органічними (наприклад, похідними амінокислот, білками, ліпідами, нуклеотидами, молекулами РНК) або неорганічними (наприклад, йонами металів). Їх об'єднує

не спільна структура, а здатність координувати біологічні процеси.

У таблиці 12.1 наведено основні групи БАР та їхні функції. Далі детальніше зупинимося на декількох із них.

Таблиця 12.1

Основні групи біологічно активних речовин

Група	Визначення	Приклади
Вітаміни	Низькомолекулярні речовини, що надходять з їжею у невеликих кількостях і забезпечують нормальний перебіг обміну речовин, ріст, розвиток та захист організму	Вітаміни A, D, C, B_{12}
Гормони	Речовини, що виробляються ендокринними залозами або залозами змішаної секреції, виділяються в кров і регулюють функції клітин-мішеней у віддалених органах	Інсулін, тироксин, адреналін (як гормон)
Нейрогормони	Речовини, що синтезуються нервовими клітинами, але виділяються у кров і діють дистантно на органи та тканини всього організму.	Окситоцин, вазопресин
Нейромедіатори	Речовини, що виділяються нервовими клітинами в місці їхнього контакту (синапсі) для швидкої локальної передачі сигналу до сусідньої клітини.	Ацетилхолін, серотонін, норадреналін (як медіатор)
Фітогормони	Сполуки, що виробляються клітинами рослин і керують ростом, розвитком, дозріванням і адаптацією до умов довкілля	Ауксини, гібериліни, цитокініни
Ферменти (ензими)	Білки або РНК, що прискорюють хімічні реакції в клітині	Амілаза, ДНК-полімераза, пепсин, рибозими
Алкалоїди	Природні азотовмісні речовини рослинного (рідше грибного) походження із вираженою фізіологічною дією на організм людини і тварин	Нікотин, морфін, кофеїн, кокаїн, мускарин
Антибіотики	Сполуки мікробного або синтетичного походження, що пригнічують ріст або вбивають інші мікроорганізми, переважно бактерії	Пеніцилін, стрептоміцин, еритроміцин

Вітаміни

Вітаміни — це органічні сполуки з невеликою масою, які потрібні для нормального перебігу обміну речовин і життєдіяльності. Вони надходять до організму в дуже малих кількостях, але виконують критично важливі функції. Як правило, вітаміни не синтезуються в організмі або синтезуються в недостатній кількості. Наприклад, вітамін D може частково утворюватися в шкірі під дією ультрафіолету.

А чи знаєте ви...

Не всі вітаміни, необхідні для людини, є такими й для інших організмів. Наприклад, вітамін C потрібен людині, мавпам і морським свинкам, але коти, собаки й миші можуть синтезувати його самостійно. Тому для них це не вітамін.

Нестача вітамінів в організмі призводить до **гіповітамінозів** — станів із поступовим розвитком порушень, часто зі стертою або малопомітною симптоматикою. За повної відсутності певного вітаміну розвивається **авітаміноз**, який має яскраві, типові клінічні прояви. Надлишок вітамінів в організмі, в основному жиророзчинних, може спричиняти **гіпервітамінози**, що також негативно впливають на здоров'я.

Пригадайте з курсу біології за 8 клас, що за фізико-хімічними властивостями вітаміни поділяють на: водорозчинні (наприклад, вітаміни групи В, вітамін С) та жиророзчинні (А, D, Е, К). В яких продуктах харчування вони містяться? В яких кількостях потрібні? Ким вони синтезуються?

Водорозчинні вітаміни миттєво залучаються до біохімічних процесів клітини, але не накопичуються в організмі. Тому їх потрібно отримувати з їжею щодня. Багато з них діють як коферменти — допомагають ферментам каталізувати складні реакції обміну речовин. Наприклад, вітаміни групи В беруть участь у метаболізмі білків, жирів, вуглеводів та нуклеїнових кислот, а вітаміни B_9 і B_{12} задіяні у кровотворенні. Вітамін С виконує антиоксидантну функцію, захищаючи клітини від ушкоджень, спричинених активними формами кисню.

Водорозчинні вітаміни не мають провітамінів (тобто надходять у біологічно активній формі); не беруть прямої участі в синтезі білків чи регулюванні роботи ДНК; зазвичай не накопичуються і легко виводяться з організму, а тому рідко спричиняють гіпервітамінози.

Жиророзчинні вітаміни, навпаки, можуть накопичуватися в жировій тканині та печінці, тому їх надлишок іноді призводить до гіпервітамінозів. Вони не є коферментами (виняток — вітамін А), зате деякі з них мають провітамінні форми, що активуються в організмі (наприклад, бета-каротин перетворюється на вітамін А). Жиророзчинні вітаміни, зокрема А і D, впливають на експресію генів, синтез білків і формування клітинних структур, що робить їх важливими регуляторами розвитку й підтримки функцій організму.

За сучасною тривіальною номенклатурою назви вітамінів складаються з трьох компонентів: буквеного символу (наприклад, вітамін B_1); хімічної назви (тіамін); біологічної назви (антиневритний вітамін). Біологічна назва часто містить префікс «анти-», що вказує на захворювання, яке може розвинутися за умов повної відсутності цього нутрієнта.

Робота в групах

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/7rUOX5UW або за QR-кодом та пригадайте функції вітамінів. Оберіть три вітаміни, про які вам найменше відомо. Обговоріть у парі, які функції виконує кожен з них і що може статися при його нестачі. На бажання, знайдіть приклади продуктів, у яких вони містяться.

Гормони та нейрогормони

Гормони — це біологічно активні речовини, які виробляються ендокринними залозами (наприклад, гіпофізом, щитоподібною залозою, надниркovими) чи органами зі змішаними функціями (статевими залозами, підшлунковою залозою, тимусом). Вони виділяються в кров, з якою потрапляють до клітин-мішеней в інших частинах тіла. Гормони регулюють ріст, обмін речовин, репродуктивні функції та інші процеси. Вони мають кілька загальних ознак: діють на відстані від місця утворення (дистантно), надзвичайно активні в малих концентраціях та специфічні за дією (один гормон не можна замінити іншим за ефектом). Класичний приклад — інсулін, що виробляється підшлунковою залозою і знижує рівень глюкози в крові.

Нейрогормони — це гормони, які синтезуються нервовими клітинами (нейронами), переважно в гіпоталамусі. Вони можуть виділятися безпосередньо в кров або через нейрогіпофіз. Наприклад, окситоцин синтезується в гіпоталамусі, але транспортується в задню частину гіпофіза, звідки виділяється в кров і діє на молочні залози або м'язи матки.

Поруч із нейрогормонами існують нейромедіатори. Головна відмінність між ними полягає в механізмі дії: нейромедіатори забезпечують локальну передачу сигналу в місцях міжклітинного контакту (синапсах) і не транспортуються кров'ю по організму (наприклад, ацетилхолін).

Гормоноподібні речовини — це біологічно активні сполуки, які не виробляються ендокринними залозами, але мають подібну до гормонів регуляторну дію. Вони можуть синтезуватися спеціалізованими клітинами печінки, нирок, серця, слизової шлунково-кишкового тракту, імунної системи або нейронами. На відміну від гормонів, гормоноподібні речовини дуже рідко надходять у кров, а діють здебільшого локально — у межах тієї ж тканини (паракринно) або навіть на клітину, яка їх продукує (автокринно).

Цікаво, що одна й та сама речовина може виконувати різні функції, залежно від місця дії. Наприклад, окситоцин у крові — це гормон, а в нейронах мозку він може виконувати функцію нейромедіатора або гормоноподібної сполуки.

За хімічною природою гормони поділяють на білково-пептидні (інсулін, глюкагон, вазопресин, соматотропін), похідні амінокислот (адреналін, тиреоїдні гормони) та ліпідні (кортикостероїди, андрогени й естрогени).

Фітогормони

Фітогормони — це біологічно активні речовини, які виробляються клітинами рослин і регулюють ріст, розвиток, дозрівання та адаптацію до умов довкілля. Їхня особливість у тому, що навіть у незначних кількостях вони можуть суттєво впливати на клітини. Фітогормони часто синтезуються в одній частині рослини, наприклад, у верхівці пагона, а діють на іншу — корені, листки чи плоди.

До основних *груп фітогормонів* належать:

- *ауксини* — стимулюють подовження клітин, ріст пагонів і формування коренів;
- *гібереліни* — активують ріст стебел, цвітіння, проростання насіння;
- *цитокініни* — сприяють поділу клітин, сповільнюють старіння листків;
- *абсцизова кислота* — пригнічує ріст, викликає опадання листя і забезпечує перехід рослини в стан спокою;
- *етилен* — газоподібний фітогормон, що стимулює дозрівання плодів і листопад.

Фітогормони часто взаємодіють між собою: дія одного може посилювати або пригнічувати дію іншого. У сільському господарстві знання про фітогормони використовують для регулювання росту, підвищення врожайності, прискорення дозрівання плодів або сповільнення проростання насіння під час зберігання.

Антибіотики

Антибіотики — це біологічно активні речовини, які виробляються мікроорганізмами (бактеріями, грибами) або синтезуються штучно й здатні пригнічувати ріст (бактеріостатична дія) або знищувати (бактерицидна дія) інші мікроорганізми, переважно бактерії. У природі вони виконують захисну функцію: дають змогу одним мікроорганізмам виживати в умовах конкуренції з іншими. У медицині антибіотики застосовують для боротьби з бактеріальними інфекціями. Так, пеніцилін — перший відкритий антибіотик, який виділяється пліснявим грибом *Penicillium* — ефективно пригнічує ріст багатьох бактерій.

За хімічною природою антибіотики є органічними сполуками — найчастіше похідними амінокислот, пептидів або азотовмісних гетероциклів. Їхня структура може бути дуже різноманітною, що зумовлює різні механізми дії. Одні антибіотики руйнують клітинну стінку бактерій (наприклад, пеніцилін, цефалоспорини), інші блокують синтез білків (стрептоміцин, еритроміцин) або ДНК (метронідазол). Однак надмірне чи безконтрольне застосування антибіотиків сприяє появі стійких штамів бактерій, тому їх слід використовувати лише за призначенням лікаря.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/urYU5idI або за QR-кодом і виконайте вдома мінідослідження на тему: «Вплив біостимуляторів на проростання насіння рослин».

1. Що таке біологічно активні речовини (БАР)?
2. Назвіть дві основні групи вітамінів за їх розчинністю.
3. Чому водорозчинні вітаміни не викликають гіпервітамінозів, а жиророзчинні — можуть?
4. Як фітогормони впливають на ріст і розвиток рослин? Наведіть приклади.

5. Чому одна й та сама речовина, наприклад, окситоцин, може виконувати різні функції в організмі? Які ще речовини вам відомі, що мають подібний механізм дії?
6. Як знання про фітогормони використовують у сільському господарстві? Поясніть на прикладі.

Перевір себе

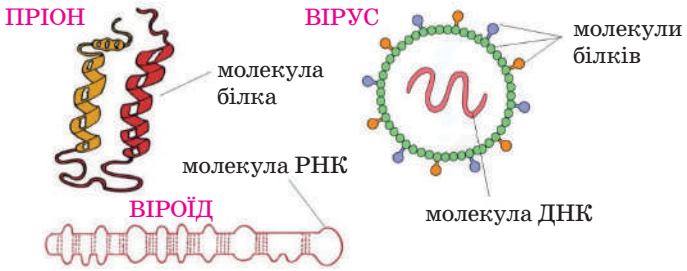
Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/htJVRcu1 і виконайте вправи.

13 НЕКЛІТИННІ ФОРМИ ЖИТТЯ: ОСОБЛИВОСТІ ЇХНЬОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- хто належить до неклітинних форм життя;
- які особливості молекулярної будови віроїдів, пріонів та вірусів;
- які особливості функціонування віроїдів та пріонів і які захворювання вони спричиняють.

У процесах обміну речовин, росту й розвитку ключову роль відіграють біомолекули, з якими ви вже ознайомилися в попередніх параграфах. Зазвичай ці молекули є частиною клітини — найменшої одиниці живого. Проте існують особливі біологічні об'єкти, що не мають клітинної будови, але все ж за певних умов виявляють деякі ознаки живого. Це — віроїди, пріони та віруси (мал. 13.1).



Мал. 13.1. Схематична структура віроїдів, пріонів та віріонів (позаклітинних форм) вірусів

Ці неклітинні форми **перебувають на молекулярному рівні організації живої матерії** та складаються лише з однієї або кількох біомолекул (білок, ДНК, РНК). Вони не є повноцінними живими організмами, але й не просто «неживі молекули». Без клітини-хазяїна ці структури не мають обміну речовин, не можуть самостійно розмножуватися чи реагувати на подразнення. Проте, потрапивши до клітини, вони здатні активно розмножуватися, змінювати функції клітини-хазяїна і навіть викликати захворювання. Вивчаючи неклітинні форми життя, учені намагаються з'ясувати, де проходить межа між живим і неживим та як функціонують найпростіші біологічні системи на молекулярному рівні. Далі розглянемо деякі особливості їхньої організації і функціонування.

Віроїди

Віроїди є одними з найменших відомих патогенів. Це інфекційні частинки, що складаються з короткої кільцевої молекули РНК. Вони не мають білкової оболонки і не містять генів для синтезу власних білків. Їхня РНК складається всього з 250–400 нуклеотидів, що робить її значно меншою за РНК вірусів. Завдяки внутрішньому спарюванню основ, РНК віроїдів може згортатися у вторинні форми. Одна з таких форм має паличкоподібний вигляд (мал. 13.1). Це згортання робить молекулу більш стабільною, дозволяючи їй виконувати свої функції та виживати в клітині.

На сьогодні відомо, що віроїди викликають хвороби лише в рослин. Серед найвідоміших: веретеноподібність бульб картоплі, карликовість хризантем, сонячний опік авокадо, хвороба жовтих плям рису, а також каданг-каданг кокосової пальми. Саме рослинні клітини є єдиними клітинами-хазяїнами для віроїдів.

Походження віроїдів остаточно не з'ясоване. Проте більшість учених припускають, що ці структури могли виникнути з некодуючих ділянок молекул мРНК (так званих інтронів) або мобільних генетичних елементів (наприклад, транспозонів). Ці елементи, ймовірно, втратили здатність кодувати білки, але зберегли здатність до відтворення.

Передача віроїдів відбувається різними шляхами: під час вегетативного розмноження рослин, через механічні пошкодження тканин (наприклад, при обрізці або обробці інструментами), або за допомогою комах-переносників.

Потрапляючи в клітину-хазяїна, віроїди розмножуються за допомогою її ферментів. За певних умов вони можуть впливати на експресію генів і процеси реплікації ДНК цієї клітини.

І хоча віроїди не кодують жодного білка, вони здатні порушувати роботу генів рослини. Ймовірно, це відбувається через взаємодію віроїдної РНК з власними молекулами РНК рослини. Точний механізм цього впливу досі є предметом активних досліджень.

А чи знаєте ви...

Окрім віроїдів, існують ще й вірусоїди. Вірусоїди також є невеликими молекулами РНК, що вражають рослини. Подібно до віроїдів, вони не мають власної білкової оболонки і не кодують жодних білків. Для своєї реплікації вірусоїди обов'язково потребують одночасного інфікування клітини певним «допоміжним» вірусом. Саме цей допоміжний вірус надає необхідні ферменти, що задіяні в розмноженні вірусоїдів.

Пріони

Пріони — це особливий клас інфекційних агентів, які складаються виключно з аномально згорнутих білків і не містять нуклеїнових кислот (ДНК чи РНК). Вони значно менші за віруси та віроїди, а їхня уні-

кальність полягає в тому, що вони єдині відомі патогени, що не містять генетичного матеріалу.

Основу пріонів становить пріонний білок, який є патологічною формою нормального клітинного білка PrP. Нормальний білок PrP знаходиться на поверхні багатьох клітин, особливо в мозку. Відмінність між ним і патогенним полягає не в амінокислотній послідовності, а в просторовій структурі (конформації). Патологічний PrP має неправильну, більш стійку та схильну до агрегації структуру, в якій переважають бета-складчасті шари, тоді як нормальний PrP згортається переважно в альфа-спіраль.

Потрапляючи в організм, аномальний пріонний білок взаємодіє з нормальними молекулами PrP і «змушує» їх змінювати свою конформацію на патологічну. Цей процес схожий на ланцюгову реакцію, де все більше нормальних білків перетворюються на пріони. Накопичення цих неправильно згорнутих білків призводить до утворення нерозчинних агрегатів і бляшок у нервових тканинах, що викликає загибель нейронів.

Пріонні хвороби.

Пріони є збудниками групи невиліковних, смертельних нейродегенеративних захворювань, відомих як трансмісивні губчасті енцефалопатії (ТГЕ). Ці хвороби вражають як тварин, так і людину, викликаючи дегенерацію мозкової тканини, яка набуває вигляду губки через численні порожнини.

У тварин до таких захворювань відносять: скрепі (в овець і кіз); коров'ячий сказ (або губчаста енцефалопатія великої рогатої худоби, ГЕВРХ); хронічну виснажуючу хворобу (в оленів, лосів). У людини: хвороба Крейтцфельдта-Якоба (ХКЯ), Куру, синдром Герстманна-Штраусслера-Шейнкера, фатальне сімейне безсоння.

Хоча точне походження пріонних захворювань ще досліджується, вважається, що вони могли виникнути через спонтанні мутації в гені, що кодує PrP, або через випадкові спонтанні зміни конформації білка.

Передача пріонів може відбуватися різними шляхами: спадково (через успадкування мутованого гена, що кодує PrP); спорадично (виникає спонтанно без явної причини); набуто (через споживання заражених тканин, особливо нервових, трансплантацію органів або тканин, наприклад, рогівки, використання забруднених хірургічних інструментів).

А чи знаєте ви...

Пріони надзвичайно стійкі до традиційних методів стерилізації (кип'ятіння, звичайні дезінфікуючі засоби, УФ-випромінювання, іонізація). Для їх інактивації потрібні агресивніші методи, такі як автоклавування при високих температурах і тиску, або обробка сильними хімічними реагентами (наприклад, натрію гідроксид).

Віруси

Головною особливістю вірусів є те, що вони можуть розмножуватися

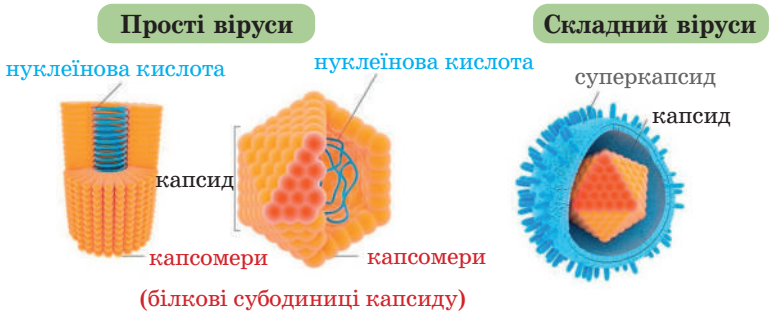
лише всередині живих клітин інших організмів. Поза клітиною-хазяїном віруси не виявляють ознак життя і існують у вигляді неактивних частинок — віріонів. На відміну від пріонів та віроїдів, віруси містять і білок, і власний генетичний матеріал.

Генетичний матеріал вірусів може бути представлений як ДНК (аденовірус, герпесвірус, папіломавірус), так і РНК (грип, коронавірус, кір, сказ). Ці молекули можуть бути одноланцюговими або дволанцюговими, лінійними або кільцевими. Він несе інформацію, необхідну для синтезу вірусних білків і реплікації вірусу.

Білкову оболонку, яка оточує і захищає генетичний матеріал вірусу, називають **капсидом**.

Капсид складається з багатьох однакових білкових субодиниць, які називають капсомерами (мал. 13.2). Функції капсиду включають: захист вірусного геному від фізичних і хімічних пошкоджень; розпізнавання специфічних клітин-хазяїв; участь у проникненні вірусу в клітину (мал. 13.2).

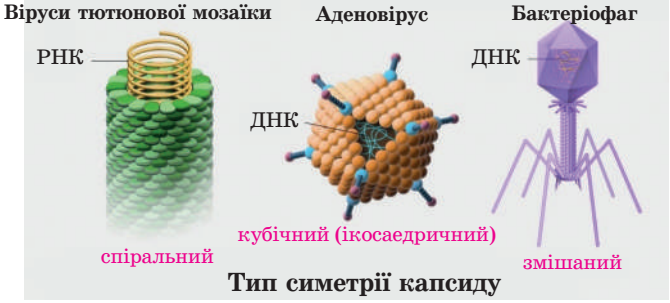
Залежно від наявності додаткових оболонок та складності будови, віруси поділяють на прості та складні. **Прості віруси** складаються лише з генетичного матеріалу та білкового капсиду (мал. 13.2). Наприклад, вірус тютюнової мозаїки, аденовірус або поліомієліту є простими вірусами. **Складні віруси** мають додаткову зовнішню оболонку, яку називають суперкапсидом (мал. 13.2). Ця оболонка утворюється з фрагментів клітинної мембрани хазяїна під час виходу вірусу з клітини. Суперкапсид містить як білки та ліпіди клітини-хазяїна, так і власні вірусні білки, часто у вигляді глікопротеїнових шипів (наприклад, гемаглютинін і нейрамінідаза у вірусу грипу). Суперкапсид допомагає вірусу розпізнавати і проникати в нові клітини, а також може допомагати йому «ховатися» від імунної системи хазяїна. Прикладами складних вірусів є віруси грипу, герпесу, ВІЛ (вірус імунодефіциту людини).



Мал. 13.2. Схематичне зображення будови віріонів простих та складних вірусів

Форма капсиду є однією з ключових характеристик, що визначають морфологію вірусу. Існує кілька основних типів симетрії вірусних капсидів (мал. 13.3):

спіральний тип: білки обгортають геном по спіралі, утворюючи трубчасту форму. Приклади: вірус тютюнової мозаїки, вірус грипу, кору, сказу;



Мал. 13.3. Типи симетрії капсиду у віріонів різних вірусів

кубічний (ікосаедричний) тип: капсид має форму ікосаедра (20 трикутників, 12 вершин), що дозволяє ефективно упаковувати геном. Приклади: аденовіруси, віруси герпесу;

комплексний (змішаний) тип: може складатися з декількох частин або мати додаткові елементи. Прикладом є бактеріофаги (віруси, що інфікують бактерії). Вони часто мають голову ікосаедричної форми, хвіст спірального типу та хвостові нитки для прикріплення.

Про особливості функціонування вірусів та їх роль у природі і житті людини ви дізнаєтеся в наступному параграфі.

1. Які неклітинні форми життя вам відомі?
2. Який генетичний матеріал містять віруси?
3. Що таке віроїди? Як вони впливають на функціонування клітини-хазяїна?
4. Як пріони впливають на нормальні білки в організмі?
5. Як знання про неклітинні форми життя допомагає вивчати межу між живим і неживим?
6. Чому пріони вважають унікальними серед патогенів?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/8tJVR3y7 і виконайте вправи.

14 ВЗАЄМОДІЯ ВІРУСІВ ІЗ КЛІТИНОЮ-ХАЗЯЇНОМ. РОЛЬ ВІРУСІВ У ЖИТТІ ЛЮДИНИ ТА В ПРИРОДІ

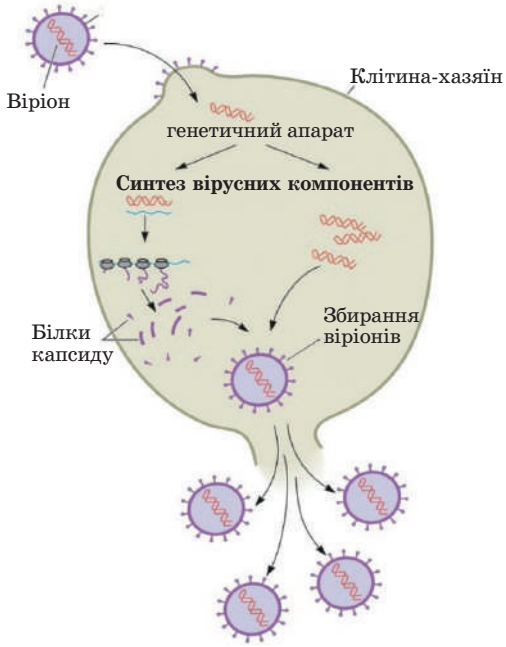
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які етапи життєвого циклу вірусів;
- які види взаємодії вірусів із клітиною-хазяїном;
- яке значення вірусів у природі та житті людини.

Вам уже відомо про будову вірусних частинок — віріонів — і про те, що віруси є облігатними внутрішньоклітинними паразитами. Це означає, що вони не можуть розмножуватися поза живою клітиною-хазяїном. Віріони різних вірусів відрізняються за своєю стійкістю до зовнішнього середовища та здатністю зберігати інфекційну активність.

Наприклад, вірус поліомієліту може залишатися активним впродовж кількох діб, вірус віспи — місяців, а вірус гепатиту В здатен витримати навіть кип'ятіння.

Взаємодія вірусів з клітиною-хазяїном



Мал. 14.1. Життєвий цикл вірусів

Потрапивши в організм, вірус починає свою взаємодію з клітиною-хазяїном. Цей процес, що призводить до розмноження вірусу, називають його життєвим циклом.

Життєвий цикл більшості вірусів включає наступні етапи (мал. 14.1):

✓ **прикріплення** (адсорбцію): Вірусна частинка (віріон) приєднується до поверхні клітини-хазяїна. Це відбувається завдяки специфічній взаємодії між білками вірусу (наприклад, на капсиді або суперкапсиді) та особливими молекулами-рецепторами на поверхні клітини-хазяїна. Саме ця специфічність пояснює, чому окремі віруси вражають лише певні типи клітин або організмів. Наприклад, вірус грипу переважно інфікує клітини дихальних шляхів;

✓ п**роникнення** (пенетрацію): після прикріплення вірус або його генетичний матеріал потрапляє всередину клітини. Способи проникнення можуть відрізнятися. Серед них виділяють:

- *ендоцитоз*. Клітина «заковтує» вірус у везикулу, утворюючи міхур, який переміщується всередину цитоплазми;
- *злиття вірусної оболонки з мембраною клітини*. Якщо вірус має суперкапсид, його оболонка може злитися з клітинною мембраною, вивільняючи нуклеокапсид всередину клітини;
- *пряме впорскування генетичного матеріалу*. Деякі віруси, наприклад, бактеріофаги, залишають свою білкову оболонку ззовні, а всередину клітини проникає лише їхній генетичний матеріал;

✓ **роздягання** (депротеїнізацію): Після проникнення вірусний капсид руйнується, вивільняючи генетичний матеріал вірусу (ДНК або РНК) у цитоплазму або ядро клітини-хазяїна. На цьому етапі вірусна частинка перестає існувати як цілісний віріон.

✓ **синтез вірусних компонентів** (реплікацію геному та синтез біл-

ків): Це найскладніший етап, під час якого вірус перепрограмовує клітину-хазяїна для виробництва своїх власних компонентів. Вірусна ДНК або РНК копіюється, утворюючи численні нові копії вірусного генетичного матеріалу. Для цього використовуються ферменти як вірусу (якщо він їх кодує), так і клітини-хазяїна. Паралельно із синтезом генетичного матеріалу за допомогою рибосом клітини-хазяїна вірусна РНК (або РНК, синтезована з вірусної ДНК) слугує матрицею для синтезу вірусних білків — як структурних (для побудови нового капсиду), так і ферментативних (необхідних для вірусної реплікації);

- **збирання** (складання) віріонів: Новосинтезовані вірусні білки та копії генетичного матеріалу збираються в нові повноцінні віріони. Цей процес відбувається автоматично або за допомогою певних клітинних білків на ендоплазматичному ретикулумі;
- **вихід віріонів з клітини.** Новоутворені віріони залишають клітину-хазяїна, щоб інфікувати інші клітини. Це може відбуватися різними способами:
- **лізис** (руйнування) клітини: Віруси накопичуються всередині клітини, спричиняючи її розрив і загибель (наприклад, віруси грипу, поліомієліту);
- **брунькування** (відбрунькування): Вірусні частинки «відбруньковуються» від клітинної мембрани, забираючи із собою її фрагмент для формування суперкапсиду. При цьому клітина може залишатися живою впродовж певного часу і продукувати нові віріони (наприклад, ВІЛ, віруси грипу, герпесу).

Після виходу віріони готові інфікувати нові клітини, продовжуючи життєвий цикл.

Вплив вірусів на функціонування клітини

Після проникнення та розмноження в клітині, віруси неминуче впливають на її нормальне функціонування. Цей вплив може бути різним — від непомітних змін до повного руйнування.

Основні види взаємодії вірусів з клітиною:

- **продуктивна (літична) взаємодія**. Це найпоширеніший тип взаємодії, що призводить до загибелі клітини. Після завершення свого життєвого циклу, віруси активно виходять з клітини, часто спричиняючи її лізис (руйнування). Клітина-хазяїн перестає виконувати свої нормальні функції, її метаболізм переключається на виробництво вірусних компонентів, що врешті-решт призводить до її загибелі та вивільнення великої кількості нових віріонів. Саме такий тип взаємодії є причиною гострих вірусних захворювань, як-от грип, кір, поліомієліт;
- **персистентна (хронічна) взаємодія**. У цьому випадку вірус залишається в клітині протягом тривалого часу, іноді все життя клітини або організму, не викликаючи її швидкої загибелі. Клітина продовжує функціонувати, але постійно продукує нові вірусні частинки, хоча й у

меншій кількості, ніж при літичній взаємодії. Приклад: вірус гепатиту С, який може викликати хронічні інфекції печінки;

✓ **латентна (прихована) взаємодія**. Вірусний генетичний матеріал залишається в клітині, але не відбувається активного розмноження вірусу та утворення нових віріонів. Вірус ніби «дрімає» всередині клітини, іноді інтегруючись у її геном. За певних умов (наприклад, ослаблення імунітету, стрес) вірус може «пробудитися» і перейти до продуктивної взаємодії, викликаючи симптоми хвороби. Типовий приклад — віруси герпесу, які можуть роками перебувати в нервових клітинах, а потім викликати «цвітіння на губах» або оперізуючий лишай;

✓ **трансформаційна (онкогенна) взаємодія**. Деякі віруси можуть інфікувати клітину і змінювати її генетичний матеріал таким чином, що клітина втрачає контроль над своїм поділом і починає безконтрольно розмножуватися, перетворюючись на ракову клітину. Такі віруси називають онкогенними. Приклад: вірус папіломи людини (може спричиняти рак шийки матки).

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/BtTzDnvL або за QR-кодом, щоб переглянути інформаційну довідку про походження вірусів .

Значення вірусів у природі та житті людини

Віруси, попри свою мікроскопічну природу, відіграють значну роль як у природних екосистемах, так і в житті людини. Ця роль не завжди є негативною; іноді віруси можуть бути корисними або навіть незамінними.

Негативне значення вірусів.

Збудники інфекційних захворювань. Це найвідоміша і найнебезпечніша роль вірусів. Вони є причиною величезної кількості хвороб у людини (грип, кір, ВІЛ/СНІД, герпес, віспа, поліомієліт, COVID-19), тварин (сказ, чума свиней, пташиний грип) та рослин (мозаїчні хвороби, некрози). Ці захворювання можуть мати різні наслідки — від легких нездужань до тяжких станів, епідемій та пандемій, що призводять до значних економічних збитків та людських жертв.

Шкода сільському господарству. Вірусні інфекції рослин і тварин можуть призводити до значних втрат урожаю та загибелі худоби, що негативно впливає на продовольчу безпеку та економіку.

Позитивне значення вірусів.

Регуляція чисельності популяцій. У природних екосистемах віруси відіграють роль природних регуляторів чисельності популяцій бактерій, рослин і тварин. Наприклад, бактеріофаги (віруси, що вражають бактерії) допомагають підтримувати баланс мікроорганізмів у ґрунті, воді та кишечнику живих організмів.

Участь в еволюції. Віруси можуть переносити генетичний матеріал

між різними організмами, сприяючи горизонтальному переносу генів. Це може призводити до появи нових ознак і властивостей у хазяїв, тим самим впливаючи на еволюційні процеси. Значна частина геному людини складається з послідовностей, що походять від давніх вірусів.

Використання в генній інженерії та біотехнології. Віруси є надзвичайно ефективними «інструментами» для доставки генетичного матеріалу в клітини. Ця властивість активно використовується в генній терапії та створенні вакцин. Наприклад, віруси-вектори (спеціально модифіковані віруси) використовують для доставки функціональних генів у клітини пацієнтів для лікування спадкових захворювань, таких як муковісцидоз або деякі форми імунодефіциту. З іншого боку, багато вакцин розробляють на основі інактивованих або ослаблених вірусів, або ж використовують вірусні компоненти для стимуляції імунної відповіді.

Дослідження. Віруси є важливими модельними об'єктами для вивчення фундаментальних біологічних процесів, таких як реплікація ДНК, синтез білків, взаємодія «паразит-хазяїн».

Боротьба зі шкідниками. Деякі віруси використовують як біологічні пестициди для боротьби з комахами-шкідниками сільськогосподарських культур.

Таким чином, віруси — це не просто патогени, а складні біологічні об'єкти, які відіграють багатогранну роль у природі та мають значний потенціал для використання в сучасній науці і медицині.

Підготуйте короткий інформаційно-пошуковий проєкт на тему: «Розвиток вірусології в Україні».

1. Що таке клітина-хазяїн?
2. Які етапи включає життєвий цикл вірусів?
3. Чим відрізняється літична взаємодія вірусу з клітиною від латентної?
4. Як віруси впливають на еволюцію організмів?
5. Як тип взаємодії вірусу з клітиною впливає на перебіг захворювання та заходи профілактики?
6. Чому деякі віруси (наприклад, герпесу чи ВІЛ) можуть «переховуватися» в організмі роками, а інші одразу спричиняють гостру хворобу?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/StJVTOAl і виконайте вправи.

Самоконтроль знань з теми 1

«Хімічний склад клітини»

1. Чому вміст одного й того самого хімічного елемента може суттєво відрізнятися в різних групах живих організмів?
   а) через різний розмір клітин у цих організмах
   б) через умовність класифікації елементів та особливості будови організмів
   в) через вплив навколишнього середовища на кожен окремий організм
   г) через те, що деякі елементи трапляються лише в рослин, а інші — лише у тварин
2. Яка з наведених властивостей води є ключовою для її здатності бути універсальним розчинником для багатьох біологічно важливих речовин?
   а) висока теплоємність *б)* висока теплота випаровування
   в) полярність молекули *г)* здатність до дисоціації
3. Які йони відіграють ключову роль у створенні мембранного потенціалу, необхідного для передавання нервових імпульсів та роботи м'язів?
   а) кальцій (Ca^{2+}) та магній (Mg^{2+}) *б)* фосфат (PO_4^{3-}) та сульфат (SO_4^{2-})
   в) калій (K^+) та натрій (Na^+) *г)* хлорид (Cl^-) та гідрокарбонат (HCO_3^-)
4. Які з перелічених малих органічних молекул є мономерами для білків?
   а) моносахариди *б)* нуклеотиди *в)* амінокислоти *г)* жирні кислоти
5. Яка основна роль ферментів у біохімічних реакціях?
   а) здатні забезпечувати необхідну енергію для протікання реакції
   б) здатні повністю витрачатися під час реакції
   в) здатні значно знижувати енергію активації, необхідну для протікання реакції
   г) здатні безпосередньо змінювати хімічну природу реагентів
6. Увідповідніть кожну характеристику з класом біомолекул:

а) ці полімери відповідають за зберігання та передачу спадкової інформації у клітинах	*1)* білки
б) до цієї групи належать речовини, що є основним джерелом енергії, а також формують клітинні стінки в рослин	*2)* вуглеводи
в) ці органічні сполуки відіграють ключову роль у каталізі біохімічних реакцій і є основними компонентами м'язів, волосся та нігтів	*3)* ліпіди
г) характеризуються неполярністю та нерозчинністю у воді, утворюють біліпідний шар мембран	*4)* нуклеїнові кислоти

7. Увідповідніть кожне твердження з класом неклітинних форм життя або їхньою ключовою складовою

а) складаються виключно з аномально згорнутих білків і не містять нуклеїнових кислот	*1)* віруси
б) являють собою некодуючу білка одноланцюгову кільцеву молекулу РНК і вражають лише рослинні клітини	*2)* віроїди
в) містять білок та власний генетичний матеріал (ДНК або РНК) і можуть розмножуватися лише всередині живих клітин	*3)* пріони
г) зовнішня додаткова оболонка деяких вірусів, що утворюється з фрагментів клітинної мембрани хазяїна	*4)* суперкапсид

ТЕМА 2

КЛІТИНА — СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА ОДИНИЦЯ ОРГАНІЗМІВ

15 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КЛІТИН. ТИПИ МІКРОСКОПІЇ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які методи використовують для вивчення клітин;
- які бувають типи мікроскопів і що з їх допомогою можна побачити;
- як сучасні технології допомагають досліджувати будову клітин.

Які частини клітини ви вже знаєте? Які методи досліджень допомогли вченим відкрити органели клітини?

Основні методи дослідження клітин

Клітина — основна одиниця будови та функціонування живих організмів. Щоб дізнатись, як вона влаштована, наука використовує спеціальні методи дослідження. Один з найдавніших методів дослідження клітин — мікроскопія. Саме завдяки цьому методу Роберт Гук уперше побачив оболонки мертвих клітин корка (покривної тканини рослин) ще в XVII столітті.

Сучасна біологія застосовує різноманітні методи вивчення клітин: **світлову та електронну мікроскопію, центрифугування, метод клітинних (тканинних) культур, метод мічених атомів, молекулярно-генетичні дослідження.**

Наприклад, центрифугуванням можна відокремити органели клітин відповідно до їх щільності; метод мічених атомів дозволяє простежити за рухом ізотопів хімічних елементів (міток), які спеціально вводять у клітину, і встановити послідовність біохімічних перетворень; метод культур клітин дозволяє вирощувати і вивчати клітини поза організмом (in vitro); молекулярні методи дозволяють дослідити ДНК, РНК та інші молекули у клітині.

До розвитку методів мікроскопії та застосування їх для біологічних та медичних досліджень доклалися й українські вчені.

Мал. 15.1. Володимир Бец

Бец Володимир Олексійович (1834 – 1894) — один із найвидатніших українських анатомів і гістологів, чий внесок у розвиток мікроскопії є фундаментальним, особливо в галузі нейронаук (мал. 15.1). Він став одним із перших учених у світі, хто детально описав мікроскопічну будову кори головного мозку людини. У 1874 році Володимир Бец відкрив і описав гігантські пірамідальні нейрони, які згодом отримали назву «*клітини Беца*». Ці клітини відіграють ключову роль у забезпеченні довільної моторики. Працював учений у Київському

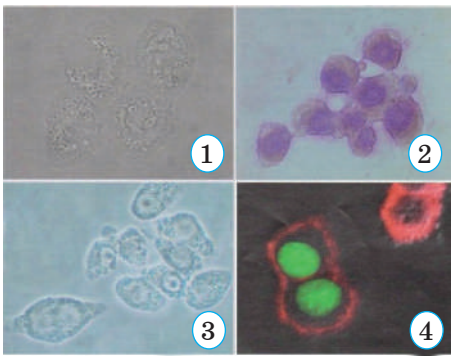
Мал. 15.2. Платон Костюк

університеті Святого Володимира, а його препарати зберігаються і до сьогодні в Анатомічному музеї Національного медичного університету імені О. О. Богомольця.

Костюк Платон Григорович (1924 – 2010) — видатний український нейрофізіолог, чий внесок у розвиток мікроскопічних методів дослідження нервової системи людини є визначним і визнаним у світовій науці (мал. 15.2). Він один з перших у світі застосував поєднання електронної мікроскопії та методів внутрішньоклітинної реєстрації для вивчення структури й функцій нейронів. Його дослідження поглибили розуміння процесів передачі нервового імпульсу. Працював академік в Інституті фізіології імені О. О. Богомольця НАН України, який очолював упродовж багатьох років. Під його керівництвом в інституті сформувалася наукова школа нейрофізіологів, а сам учений став символом української нейронауки на міжнародному рівні.

Типи мікроскопії

Найпоширенішим методом дослідження клітин є **світлова мікроскопія.** Світловий мікроскоп дає змогу розглянути загальну будову клітини — ядро, цитоплазму, поверхневий апарат. Але його збільшення обмежене (~1000 разів), тому дрібні структури не видно (мал. 15.3).



Мал. 15.3. Клітини епітелію людини: 1) світлова мікроскопія, нефарбований препарат; 2) світлова мікроскопія, фарбований препарат; 3) фазово-контрастна мікроскопія; 4) флуоресцентна мікроскопія

Для детальнішого вивчення використовують **електронну мікроскопію** — метод, що застосовує пучок електронів замість світла. Такий мікроскоп дозволяє збільшити зображення в сотні тисяч разів і побачити структури мембран, рибосоми, навіть віруси. Існують два основні види: **трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ)** — для вивчення внутрішньої будови клітини, і **сканувальна електронна мікроскопія (СЕМ)** — для дослідження поверхні клітини.

Фазово-контрастна мікроскопія — це метод світлової мікроскопії, що дозволяє досліджувати прозорі та живі біологічні об'єкти (наприклад, клітини, органели) без попереднього фарбування. Фазово-контрастний мікроскоп здатний перетворювати невидимі у звичайний світловий мікроскоп фазові зміщення світлової хвилі у видимі зміни контрасту,

створюючи чітке зображення структури.

Окрім цього, використовують також **флуоресцентну мікроскопію**, коли структури клітини «підсвічують» спеціальними барвниками. Це дозволяє спостерігати, як працюють органели у живій клітині в реальному часі.

Виконайте **навчальний проєкт** на тему: «Наскільки важливим для розвитку біології стало відкриття клітини?»

Таблиця 15.1

Типи мікроскопії

Тип мікроскопії	Особливості	Що дозволяє побачити?
Світлова	Збільшення до ~1000 разів, використання світла	Ядро, цитоплазму, великі органели
Фазово-контрастна	Створює контраст у прозорих зразках клітин	Живі клітини без фарбування
Флуоресцентна	Застосування флуоресцентних барвників	Білки, ДНК, рух органел у реальному часі
Трансмісійна електронна (ТЕМ)	Пропускання електронів крізь зразок клітин	Детальну внутрішню структуру клітини
Сканувальна електронна (СЕМ)	Сканування поверхні зразка клітин електронним променем	3D-зображення поверхні клітин, вірусів тощо

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/Vtq6qD0b або за QR-кодом і виконайте лабораторне дослідження «Вивчення структурно-функціональної різноманітності клітин».

1. Які методи дослідження клітини ви знаєте?
2. У чому полягає відмінність між світловою та електронною мікроскопією?
3. Який тип мікроскопії використовують для вивчення живих клітин без їх фарбування?
4. Чому саме електронна мікроскопія дозволила відкрити будову мембран?
5. Науковець досліджує поверхневий апарат клітини бактерії. Яким методом мікроскопії йому слід скористатися і чому?
6. Який метод мікроскопії найбільше підійде для вивчення руху органел у цитоплазмах живих клітин?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/9tJVBiCy і виконайте вправи.

16 СТРУКТУРА ЕВКАРІОТИЧНОЇ КЛІТИНИ. ЯДРО

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

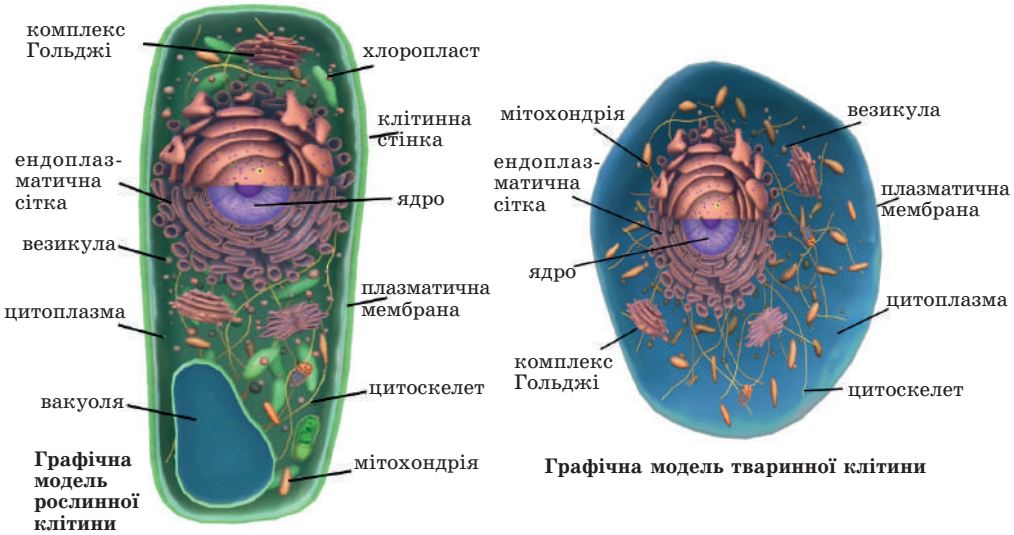
- як побудована евкаріотична клітина;
- які функції виконують клітинна мембрана, цитоплазма, органели та ядро;
- як виглядають органели евкаріотичної клітини у графічних моделях та під електронним мікроскопом.

Які органели евкаріотичних клітин ви вже знаєте? Чим клітина еукаріотів відрізняється від клітини прокаріотів?

Структура евкаріотичної клітини

Клітини евкаріотів складаються з **клітинної оболонки, цитоплазми, органел** та **ядра**. *Клітинна оболонка* складається з *плазматичної мембрани* та *надмембранного комплексу*, що відрізняється за будовою: у рослин — це *клітинна стінка*, утворена переважно з *целюлози*; у грибів — *клітинна стінка з хітину*; у тваринних клітин клітинної стінки немає, але над мембраною знаходиться *глікокалікс* — складний білково-ліпідно-вуглеводний комплекс, який виконує захисну, сигнальну та рецепторну функції.

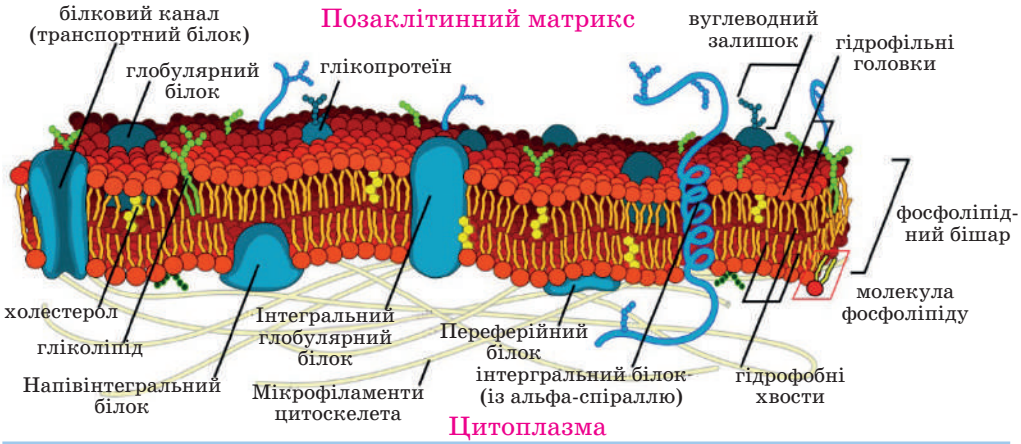
Виконайте **навчальний проєкт** на тему: «Встановіть ознаки подібності та відмінності рослинної і тваринної клітин, скориставшись графічними моделями (мал. 16.1)».



Мал. 16.1. Графічні моделі рослинної і тваринної клітини

Клітинна (плазматична) мембрана — це напівпроникна плівка (мал. 16.2), яка оточує цитоплазму клітини й відокремлює її від зо-

внішнього середовища. Вона забезпечує вибірковий транспорт речовин у клітину і з клітини, взаємодію з іншими клітинами та сприйняття сигналів із навколишнього середовища. Основу мембрани становлять **фосфоліпіди**, які орієнтовані гідрофільними (полярними) головками назовні, а гідрофобні (неполярні) хвости ховають всередину. Так у водному середовищі утворюється **фосфобіліпідна** основа мембрани. Також у мембрану «вмонтовані» **інтегральні білки**, що пронизують її наскрізь і можуть брати участь у транспорті речовин; **напівінтегральні білки**, прикріплені до зовнішньої або внутрішньої поверхні мембрани, виконують каталітичну або рецепторну функцію; **холестерин**, що регулює текучість мембрани; вуглеводні ланцюги, що приєднані до білків або ліпідів на поверхні мембрани і входять до складу глікокаліксу у клітинах тварин і людини.



Мал. 16.2. Будова мембрани

Клітинна мембрана виконує **функції**:

- *бар'єрну* — відмежовує внутрішнє середовище клітини від зовнішнього;
- *транспортну* — регулює рух речовин у клітину та із клітини;
- *рецепторну* — містить білки-рецептори, які сприймають сигнали від гормонів, нейромедіаторів;
- *ферментативну* — деякі білки на поверхні мембрани діють як ферменти, прискорюючи реакції;
- *контактну* — забезпечує міжклітинні контакти та взаємодію з іншими клітинами.

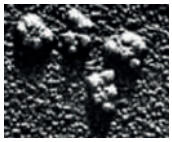
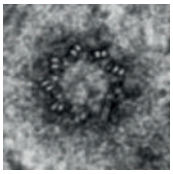
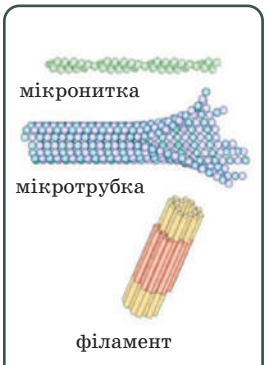
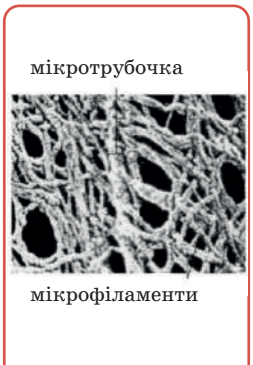
Клітинна мембрана **динамічна**, вона постійно змінює свою структуру, але при цьому зберігає функціональну цілісність. Для пояснення функцій і властивостей мембран евкаріотів біологи *Сеймор Джонатан Сінгер* та *Ґарт Лорд Ніколсон* у 1972 році запропонували **рідинно-мозаїчну модель** будови клітинної мембрани, яка актуальна і сьогодні. Ця модель пояснює, як ліпіди та білки організовані в мембрані та як забезпечується її гнучкість, проникність і функціональна динаміка.

Цитоплазма евкаріотичної клітини — це напіврідке внутрішнє середовище, розміщене між плазматичною мембраною та ядром. У цитоплазмі відбувається більшість біохімічних реакцій, синтезуються і зберігаються необхідні клітині речовини. Цитоплазма складається з **гіалоплазми** — напіврідкого компонента та **органел**.

Органели евкаріотичної клітини поділяють на: **немембранні**, що не мають власних мембран (рибосоми, клітинний центр, цитоскелет); **одномембранні** — відмежовані від цитоплазми клітини однією власною мембраною (ендоплазматична сітка (ЕПС), комплекс Гольджі, лізосоми, пероксисоми, вакуолі) та **двомембранні** — оточені двома мембранами: зовнішньою та внутрішньою (мітохондрії та пластиди) (схема. 16.1).

Схема 16.1

Органели еукаріотичних клітин

Назва	Особливості будови у зв'язку із функціями	Графічна модель	Мікроскопічне зображення
Немембранні органели			
Рибосоми	Дві субодиниці: мала (≈20 нм) і велика (≈30 нм), складаються з рРНК і білків; утворюються в ядрі на ядерцях; беруть участь у синтезі білків		
Клітинний центр (центросома)	Дві центріолі (≈0,2 мкм у діаметрі та ≈0,4 мкм у довжину), розміщені під прямим кутом одна до одної; центріолі реплікуються (самоподвоюються) під час поділу клітини; утворюють цитоскелет клітини, формують веретено поділу		
Цитоскелет	Система мікроніток (діаметр ≈7нм), мікротрубок (діаметр ≈25 нм), проміжних філаментів (діаметр ≈8–10 нм); білкові мономери синтезуються на рибосомах, полімеризуються у філаменти з участю клітинного центру; підтримує форму клітини, забезпечує транспорт речовин, рух органел; цитоскелет динамічний, полімери здатні швидко збиратися і розбиратися з білкових мономерів, що дозволяє клітині реагувати на зміни (рух, контакти, поділ)		

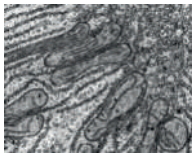
Одномембранні органели

ЕПС агранулярна

Мембранні цистерни (≈20–50 нм) та канальці без рибосом; утворюються як випини зовнішньої мембрани, які далі розгалужуться; синтезує ліпіди, вуглеводи, знешкоджує токсини

ЕПС гранулярна

Мембранні цистерни (≈20-50 нм) та канальці з рибосомами на поверхні; синтезує білки

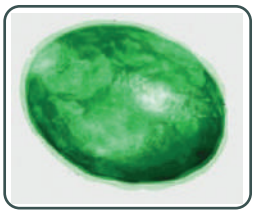


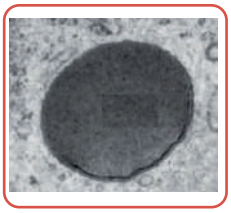
Комплекс Гольджі

Система з 4–8 приплюснутих мембранних мішечків (≈1–3 мкм), краї яких утворюють мембранні вихідні міхурці (везикули); мішечки комплексу Гольджі утворюються внаслідок злиття вхідних міхурців (везикул), що приносять від ЕПС білки та ліпіди; полярна органела: з одного боку приймає міхурці з речовинами, утвореними в ЕПС; з іншого боку утворює міхурці з сумішшю речовин для транспортування

Лізосоми

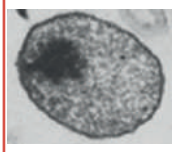
Округлі мембранні тільця (≈0,1–0,5 мкм), утворюються в комплексі Гольджі, містять гідролітичні ферменти; забезпечують внутрішньоклітинне травлення, руйнування органел, клітин (автоліз)





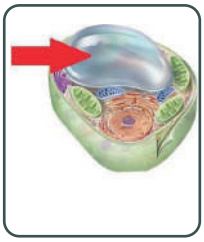
Пероксисоми

Міхурці (≈0,1–1,5 мкм) з ферментами: оксидази, каталаза; утворюються в ЕПС або самозбираються — білки надходять з цитоплазми і нові пероксисоми утворюються внаслідок поділу наявних; необхідні для окиснення жирних кислот, розщеплення клітинної отрути — гідроген пероксиду $2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$



Вакуолі

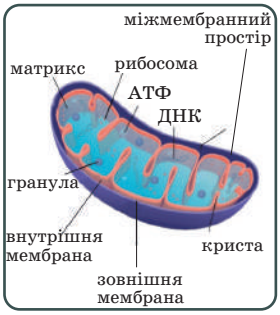
Міхурці або великі порожнини (≈10–100 мкм), заповнені вакуолярним соком; у клітинах рослин можуть займати до 90% об'єму; зазвичай вакуолі формуються із везикул, що відшнуровуються від комплексу Гольджі; запасають речовини у вакуолярному соці, регулюють внутрішньоклітинний тиск

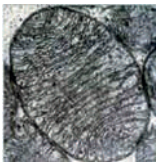


Двомембранні органели

Мітохондрії

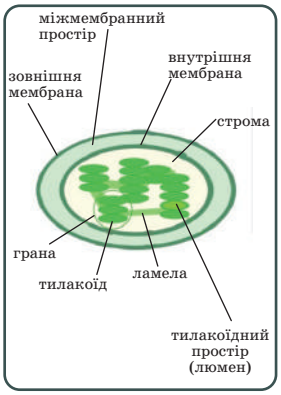
Двомембранні органели переважно паличкоподібної форми (≈довжина 1–10 мкм; діаметр 0,5–1 мкм): зовнішня мембрана гладенька; внутрішня — утворює впинання (кристи); всередині міститься напіврідкий мітохондріальний матрикс; мітохондрії містять власну ДНК, РНК, рибосоми (напівавтономні органели); здатні до поділу; кількість мітохондрій у клітині може бути різна і залежить від її енергетичних потреб, наприклад, у клітинах рослин може бути близько 100 мітохондрій, а в яйцеклітині людини — близько 100000; здійснюють синтез АТФ, забезпечують клітинне дихання, «енергетичні станції клітин»





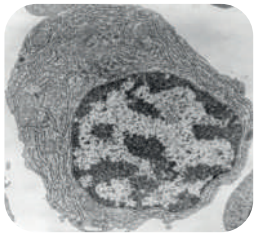
Пластиди

Двомембранні органели, характерні для рослинних клітин, здійснюють фотосинтез (зелені хлоропласти), забезпечують забарвлення органів рослин (жовті, помаранчеві або червоні хромопласти), зберігають речовини про запас (безбарвні лейкопласти); хлоропласти переважно паличкоподібної форми (≈довжина 4–6 мкм; діаметр 2–3 мкм): зовнішня мембрана гладенька; внутрішня — утворює впинання (тилакоїди, грани і ламели); всередині у стромі хлоропласти містять власну ДНК, РНК, рибосоми (напівавтономні органели); здатні до поділу; містяться в усіх зелених частинах рослин, найбільше їх у стовпчастій паренхімі листків — 40–50



Також залежно від свого функціонального стану клітина може містити **цитоплазматичні включення** — непостійні утвори, що не мають власних мембран. Наприклад, скупчення глікогену у клітинах печінки людини; крохмальні зерна у клітинах бульб картоплі чи зернівок злаків; краплини жиру у клітинах жирової підшкірної клітковини тварин, сім'янках соняшника чи плодах оливок; пігмент меланін у меланоцитах шкіри людини, гемоглобін в еритроцитах; кристали кальцію оксалату в клітинах щавлю кислого та інші.

Ядро — основна частина всіх евкаріотичних клітин, відповідає за збереження, реалізацію та передачу спадкової інформації (мал. 16.3). *Поверхневий апарат ядра* утворений двома мембранами (зовнішньою і внутрішньою), які сполучаються в певних місцях навколо особливих отворів — *ядерних пор*. До внутрішньої мембрани зсередини прилягає білкова *ядерна пластинка*, що служить для прикріплення хромосом та є опорним елементом ядра. Внутрішня частина ядра заповнена *каріоплазмою*, що містить РНК, білки, нуклеотиди, *хроматин* та *ядерця*, на яких утворюються субодиниці рибосом.



Мал. 16.3. Будова ядра, ТЕМ

Ядерні пори регулюють транспорт макромолекул у ядро та з ядра, таких як білки та РНК, але дозволяють вільно проходити воді, йонам, АТФ та іншим малим молекулам. Таким чином, двомембранна пориста структура ядерної оболонки здійснює певний контроль над потоком речовин та інформації у клітині. Ядерних пор у середньому буває 3–4 тис. в одному ядрі зрілої евкаріотичної клітини; загальний діаметр однієї пори ≈100–130 нм, центральний канал для пасивного переносу речовин становить близько 9 нм.

Всередині ядра в каріоплазмі знаходиться *хроматин*, що означає «забарвлена речовина», оскільки він легко зафарбовується барвниками у практиці цитологічних досліджень. Хроматин складається з ДНК, пов'язаної з білками — *гістонами*, утворює довгі нитки, що називаються *хромосомами*. Ядерна ДНК контролює більшість процесів, які відбувають в цитоплазмі клітини, інформація з неї може транскрибуватися (переписуватися) на мРНК та передаватися далі на інші процеси клітинного синтезу, а інформація з цитоплазми може забезпечувати зворотний зв'язок з ядром.

Ядерце або *ядерця* — це центральна частина ядра клітини, що складається з рРНК, білків та ДНК. Ядерця відповідають за синтез субодиниць рибосом і містять ці субодиниці на різних етапах синтезу.

1. Які немембранні, одномембранні та двомембранні органели еукаріотичних клітин ви знаєте?
2. У чому полягає біологічне значення ядра у клітинах еукаріотів?
3. Який зв'язок між будовою і функціями клітинної мембрани?
4. Чому саме мітохондрії і пластиди мають двомембранну структуру?
5. Дослідники зафіксували порушення транспортування синтезованих у клітині білків до місця їх призначення. Які структури клітини можуть бути пошкоджені? Як це вплине на функціонування клітини в цілому?
6. Чому білки і ліпіди в цитоплазмі клітини транспортуються у везикулах, а вуглеводи — ні?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/5tJVB10T і виконайте вправи.

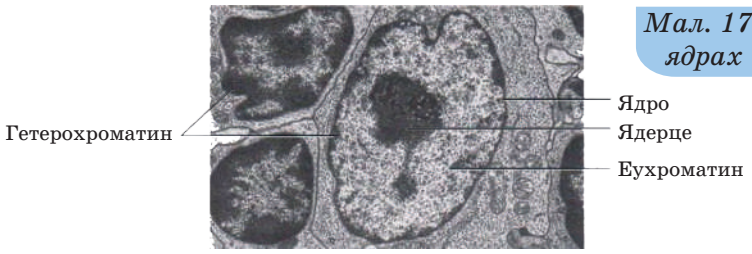
17 ХРОМОСОМИ. ПОНЯТТЯ ПРО КАРІОТИП

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- з чого складаються хромосоми та як вони побудовані;
- що таке каріотип і як його вивчають;
- яке біологічне значення гаплоїдного, диплоїдного та поліплоїдного наборів хромосом.

Яка структура клітини зберігає спадкову інформацію? Що ви знаєте про будову ядра та хроматину?

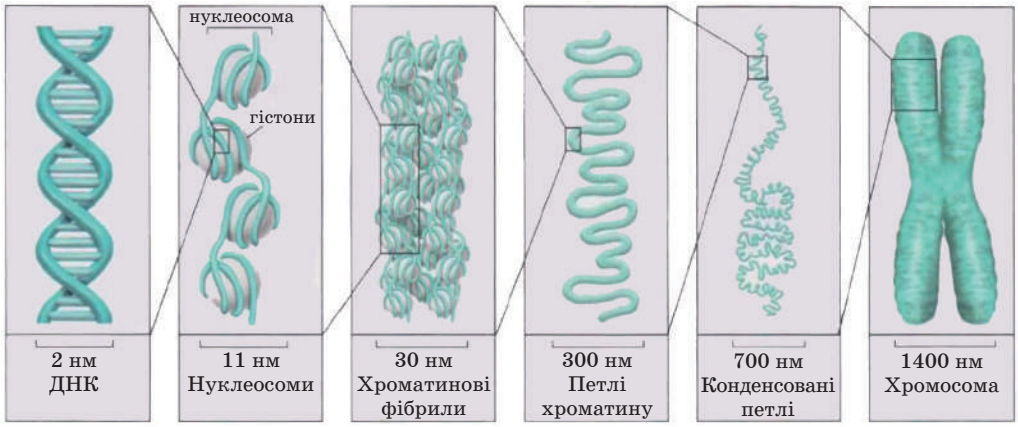
Хроматин ядра еукаріотичної клітини є комплексом ядерної ДНК, гістонових і негістонових білків та РНК, співвідношення яких становить **1 : 1,3 : 0,2**. Хроматин може бути в активному (деконденсованому) стані — еухроматин, або в неактивному (конденсованому) стані — *гетерохроматин* (мал. 17.1).



Мал. 17.1. Хроматин у ядрах клітин, ТЕМ

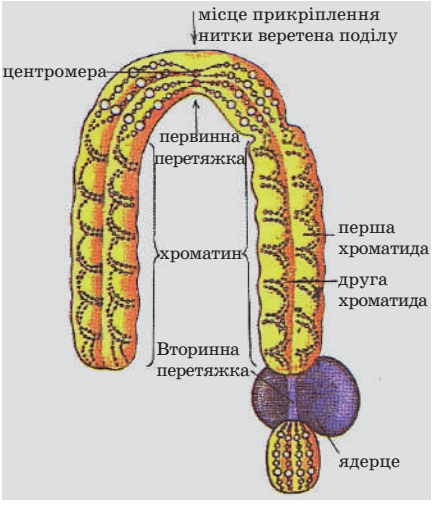
Стан хроматину визначається *ступенем упакування ДНК* (мал. 17.2). Так, сумарна довжина всіх молекул ДНК однієї клітини людини становить близько 170 см. Молекула ДНК в ядрі клітини спі-

рально намотується на 8 молекул білків гістонів і утворює *нуклеосому* діаметром 10–11 нм. Такі нуклеосоми з'єднуються між собою короткими ділянками вільної ДНК. При подальшому пакуванні нуклеосомні нитки конденсуються у *хроматинові нитки* діаметром 25–30 нм. Далі хроматинові нитки утворюють *петлі* (*соленоїди*, або *домени*) діаметром 300 нм. Під час поділу клітини (мітоз або мейоз) ці петельні домени зазнають щільного упакування, хроматин остаточно конденсується і формує *хромосому*.



Мал. 17.2. Етапи скручування ДНК, ущільнення хроматину й утворення хромосоми

Хромосоми — це компактні структури в ядрі евкаріотичної клітини, що містять спадкову інформацію. Одна хромосома — це молекула ДНК у вигляді хроматинової нитки, що перед поділом клітини *самоподвоюється (редуплікує)*, під час поділу клітини складається з двох конденсованих сестринських *хроматид* (мал. 17.3).



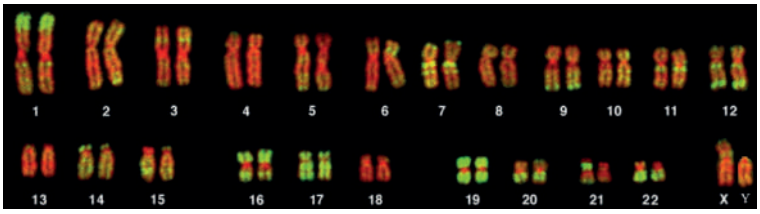
Мал. 17.3. Будова метафазної хромосоми

Будова хромосоми:

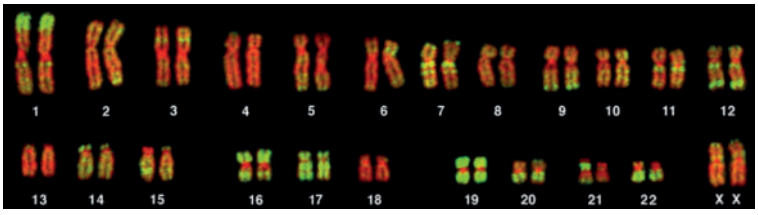
- *хроматиди* — дві поздовжні функціональні одиниці хромосоми (сестринські нитки ДНК);
- *первинна перетяжка* — поділяє хромосому на два плеча (коротке і довге);
- *центромера* — пластинчастий утвір у вигляді диска, до якого приєднуються нитки веретена поділу під час поділу клітини;
- *вторинна перетяжка* — ділянка, де розташовані гени, що відповідають за утворення ядерець; наприклад, у клітинах організму людини ма-

ють вторинну перетяжку і можуть утворювати ядерця тільки 13, 14, 15, 21 та 22 пари хромосом.

Каріотип — це набір хромосом, характерний для певного біологічного виду або для клітини конкретного організму цього виду. Це видоспецифічна ознака, яка включає кількість, форму і розміри хромосом. Візуальне представлення каріотипу називають каріограмою (мал. 17.4, 17.5). Оскільки хромосоми впродовж активного функціонування клітини знаходяться в її ядрі, деконденсовані та важкодоступні для спостереження, вивчення каріотипів клітин проводять під час їх поділу, у метафазі, коли хромосоми знаходяться в цитоплазмі, конденсовані та добре помітні у світловий мікроскоп після зафарбовування. Хромосоми в каріограмі розміщають гомологічними парами, від найбільших до найменших, останню пару становлять статеві хромосоми. Наприклад, у каріотипі здорової людини є 46 хромосом (23 пари), однак каріотипи чоловіків і жінок відрізняються статевими хромосомами: у чоловіків статеві хромосоми XY; у жінок — XX.



Мал. 17.4. Каріограма здорового чоловіка



Мал. 17.5. Каріограма здорової жінки

Виконайте **навчальний проєкт** на тему: «Каріотип організму людини».

Хромосомні набори у клітинах організмів відрізняються (табл. 17.1). Так, **соматичні клітини** — всі клітини організму, окрім статевих, мають **диплоїдний набір хромосом (2n).** Диплоїдність дозволяє клітинам мати по дві копії кожного гена, якщо один ген з якоїсь причини не працює, то інший може його замінити; наявність пари генів дозволяє клітині мати складніші процеси росту, розвитку та диференціації.

Гаплоїдний набір хромосом (n) мають статеві клітини — **гамети, спори рослин.** Біологічне значення гаплоїдності визначається статевим процесом, за якого після запліднення (злиття чоловічої і жіночої гамет з утворенням зиготи) дочірній організм отримує приблизно половину генетичного матеріалу від материнського організму (яйцеклітина) та іншу половину —від батьківського організму (сперматозоїд або спермій).

Поліплоїдний набір хромосом (3n і більше) найчастіше зустрічаєть-

ся *в рослин* і призводить до збільшення розмірів окремих органів (плодів, насіння), швидкого росту, підвищення стійкості до хвороб, засухи, низьких температур. *У тварин* життєздатні особини-поліплоїди зустрічаються лише в окремих видів риб та деяких жаб. *У людини* триплоїдія (3n = 69 хромосом) або тетраплоїдія (4n = 92 хромосоми) — це патологічні стани, несумісні з життям або спричиняють вади розвитку.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/ltUta6YV або за QR-кодом, щоб розглянути приклади хромосомних наборів організмів (табл. 17.1).

1. Чим відрізняються еухроматин і гетерохроматин?
2. Назвіть основні частини метафазної хромосоми та поясніть їхнє значення.
3. Чому каріотип вивчають саме в метафазі поділу клітини?
4. У чому полягає біологічне значення гаплоїдного та диплоїдного наборів хромосом? Чому поліплоїдія часто зустрічається в рослин, але рідко у тварин?
5. Користуючись таблицею 17.1 порівняйте поліплоїдні набори хромосом у рослин і тварин. Які переваги поліплоїдії?
6. Користуючись малюнками 17.3 і 17.4, поясніть, за якими ознаками ви розрізняєте каріограми здорового чоловіка і здорової жінки. Які відхилення можна виявити цим методом?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/1tJVNTTj і виконайте вправи.

18 НАДМЕМБРАННІ ТА ПІДМЕМБРАННІ КОМПЛЕКСИ ЕВКАРІОТИЧНОЇ КЛІТИНИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які структури утворюють надмембранний і підмембранний комплекси евкаріотичних клітин;
- які функції виконують ці структури у клітинах різних організмів;
- як будова надмембранних і підмембранних комплексів евкаріотичних клітин пов'язана з їхніми функціями.

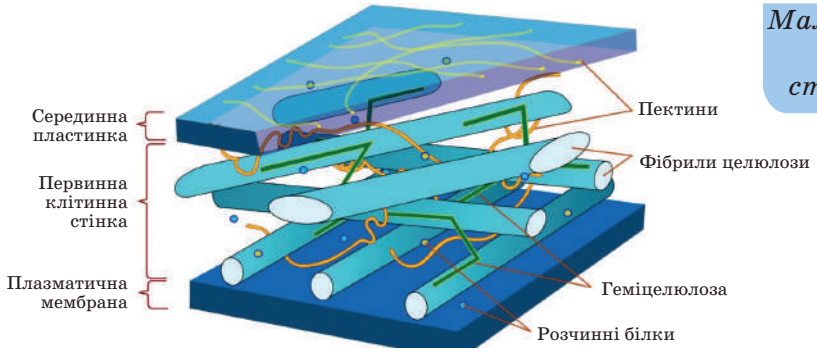
Які функції виконує клітинна мембрана? Чим відрізняються клітини рослин, тварин і грибів?

Надмембранні комплекси евкаріотичних клітин є структурними компонентами, що розміщені над плазматичною мембраною та

мають переважно вуглеводну природу. Вони виконують захисну, структурну та рецепторну функції.

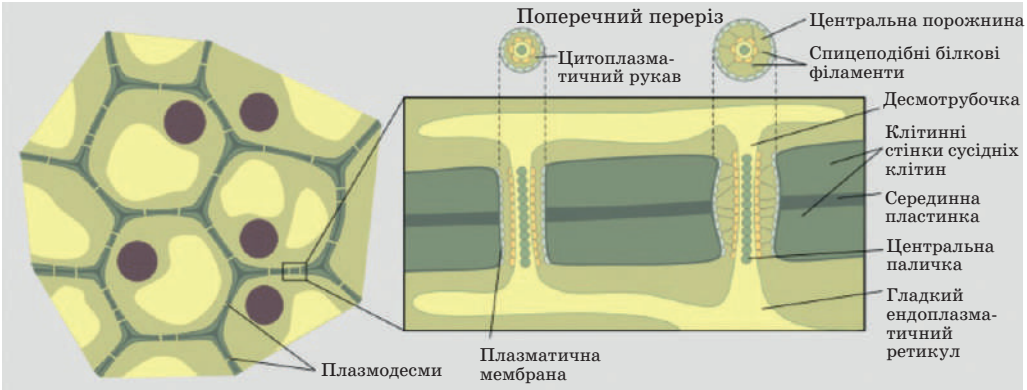
Клітинна стінка

У **рослин** *первинна клітинна стінка* (товщина ≈0,1–3 мкм) складається переважно з нерозчинних у воді волокон целюлози, зібраних у пучки, які утворюють *каркас*; *геміцелюлози*, яка з'єднує волокна целюлози та пектину, що утворює *матрикс*, у який занурені волокна. Над первинною клітинною стінкою у зрілих клітинах рослин утворюються *серединні пластинки*, що слугують для з'єднання клітин між собою (мал. 18.1).



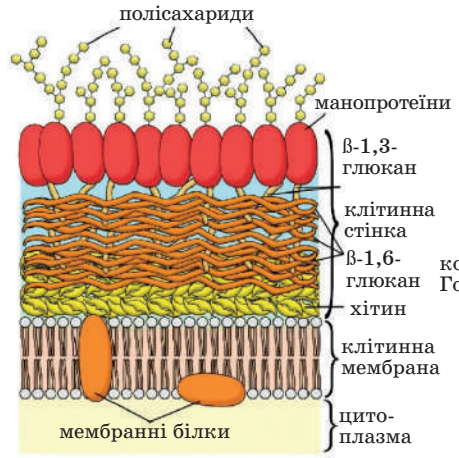
Мал. 18.1. Будова клітинної стінки рослин

У деяких клітинах рослин (особливо механічної, провідної, деяких покривних тканин) може формуватися додатковий шар клітинної стінки — *вторинна клітинна стінка* (товщина до 10 мкм). Її формування часто призводить до загибелі цитоплазми такої рослинної клітини. Цікаво, що клітинні стінки рослинних клітин пронизані особливими отворами — *плазмодесмами*, що вистелені мембранами та з'єднують цитоплазми сусідніх клітин (мал. 18.2). Плазмодесми дозволяють рослинним клітинам обмінюватися речовинами і функціонувати як єдине ціле; через ці міжклітинні канали від клітини до клітини можуть проникати навіть віруси!

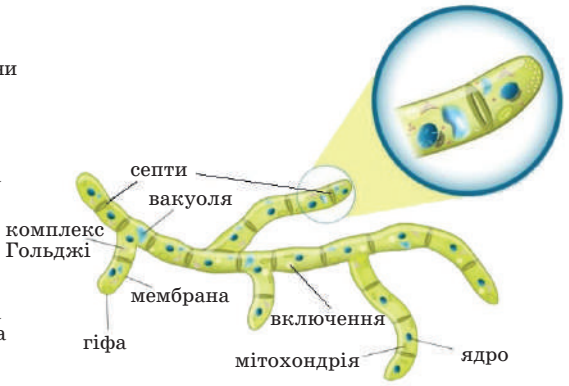


Мал. 18.2. Плазмодесми в рослинних клітинах

У переважної більшості **грибів** клітинна стінка має товщину від 0,1 до 1 мкм і на 80–90% складається з нітрогеновмісних полісахаридів, причому основним таким полісахаридом є *хітин*, та ненітрогеновмісних полісахаридів — β-*1,3-глюканів* та β-*1,6-глюканів*. Також до складу клітинної стінки грибів входять білки (*манопротеїни*), *ліпіди* і *фосфати* (мал. 18.3). У деяких клітин грибів (зооспори, вегетативні клітини примітивних грибів) клітинна стінка може бути відсутня. В *оомікотових грибів* клітинна стінка утворена переважно целюлозою, а не хітином. У клітинних стінках грибів плазмодесм немає. Міжклітинний зв'язок у них здійснюється через порові перегородки між видовженими гіфами — *септи* (мал. 18.4), через які можуть проходити речовини, органели і навіть ядра.



Мал. 18.3. Будова клітинної стінки грибів



Мал. 18.4. Септи між гіфами гриба

Клітинні стінки рослин і грибів виконують **функції**:

- *захисну* — оберігають від механічних пошкоджень та осмотичного тиску;
- *структурну* — підтримують форму клітин;
- *сигнальну* — беруть участь у взаємодії клітин з навколишнім середовищем та іншими клітинами;
- *бар'єрну* — регулюють проникнення речовин у клітини.

Глікокалікс — тонкий пружний шар, що вкриває ззовні плазматичні мембрани клітин тварин і людини. Він складається переважно з *глікопротеїнів*, *гліколіпідів* і *полісахаридів*, які з'єдуються ковалентними зв'язками з ліпідами і білками плазматичної мембрани (мал. 16.2). Товщина глікокаліксу в різних клітин від 5 нм до 0,5 мкм. Наприклад, у клітинах епітелію кишківника людини його товщина сягає 0,5 мкм, він містить травні ферменти і сприяє пристінковому травленню. На відміну від клітинної стінки, яка є твердою, глікокалікс гнучкий і пружний.

Його **функції** у клітинах тварин і людини:

- *захисна* — захищає клітину від механічних та хімічних ушкоджень;
- *рецепторна* — містить рецептори для сприйняття сигналів із зовнішнього середовища та від інших клітин чи рідин організмів;
- *клітинне розпізнавання* — важливий для імунної системи; розпізнавання «свій–чужий»;
- *адгезія* — забезпечує прикріплення клітин одна до одної і взаємодію з міжклітинною речовиною;
- *транспортна* — впливає на проникність речовин через плазматичну мембрану.

Пелікула — специфічний комплекс багатьох одноклітинних організмів, наприклад евглени зеленої та інфузорії туфельки. Вона утворена плазматичною мембраною та структурами ущільненого зовнішнього шару цитоплазми. В евглени зеленої пелікула сприяє ковзальному руху завдяки хвилеподібним змінам її поверхні. Вона надає форми клітинам одноклітинних організмів, захищає їх від зовнішніх впливів, регулює транспорт речовин. Зовнішня поверхня пелікули може бути гладенька, як у евгленових, або вкрита виростами чи війками, як у інфузорій.

Підмембранні комплекси евкаріотичних клітин — це структури, які розташовані під плазматичною мембраною. Основними компонентами підмембранних комплексів є елементи *цитоскелета*, які виконують опорну, рухову функції та визначають форму клітин.

Цитоскелет є основою підмембранних комплексів евкаріотичних клітин. Це каркас, що знаходиться у цитоплазмі живої клітини і постійно динамічно змінюється. Цитоскелет утворений системою мікроніток, мікротрубок та проміжних філаментів (таблиця 16.1). Він забезпечує: адаптацію форми клітини, відповідно до зовнішніх впливів; транспорт речовин у клітину та з клітини (*екзоцитоз* та *ендоцитоз*); рух *органел* та *везикул* у цитоплазмі клітини; утворення веретена поділу під час поділу клітини.

Виконайте **навчальний проєкт** на тему: «Особливості будови і функцій надмембранних і підмембранних комплексів клітин організмів різних груп».

Створіть лепбук «Евкаріотична клітина». Розділіть його на частини: надмембранний комплекс, мембрана, підмембранний комплекс, органели. Презентуйте лепбук у класі.

1. Які функції клітинної стінки у клітинах рослин, грибів; глікокаліксу в клітинах тварин і людини?
2. Які структури входять до складу підмембранного комплексу клітини?
3. Які відмінності у складі надмембранного комплексу в рослин і грибів?

4. Як глікокалікс допомагає клітинам тварин і людини взаємодіяти між собою?
5. Чому підмембранний комплекс важливий для руху клітини?
6. Який є взаємозв'язок між цитоскелетом та зміною форми клітин тварин і людини під впливом факторів навколишнього середовища?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ttJVM0iJ і виконайте вправи.

19 ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОКАРІОТИЧНОЇ КЛІТИНИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чим прокаріотична клітина відрізняється від евкаріотичної;
- які структури має клітина бактерій;
- який зв'язок між будовою і функціями компонентів прокаріотичної клітини.

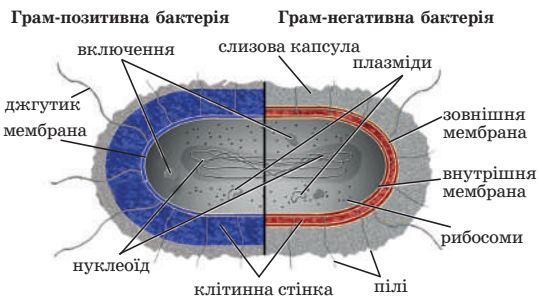
Які організми відносять до прокаріотів? Чим прокаріотичні клітини відрізняються від евкаріотичних.

Прокаріоти — це найдавніші організми на Землі, клітини яких **не мають оформленого ядра** та **мембранних органел**. До прокаріотів належать **бактерії** та **археї**. Їхня будова значно простіша, а розміри клітин менші, ніж у евкаріотів, однак вони здатні виконувати всі життєві функції: живлення, дихання, рух, розмноження, реагування на подразнення.

Бактерії — це мікроскопічні, у переважній більшості одноклітинні та колоніальні організми. Розміри бактерій коливаються від 0,1 мкм у *мікоплазм* — найменших бактерій до 0,75 мм у *тіомаргарити* — однієї з найбільших бактерій. Для бактерій характерна також тенденція до утворення багатоклітинних структур. Вони часто прикріплюються до поверхонь субстратів і формують *біоплівки*, які ще називають *мікробними плівками*. Ці біоплівки можуть мати товщину від декількох мікрометрів до 0,5 мм і часто містять декілька видів бактерій. У нитчастих *ціанобактерій* описані структури в клітинній стінці, що забезпечують контакт двох сусідніх клітин — *мікроплазмодесми*.

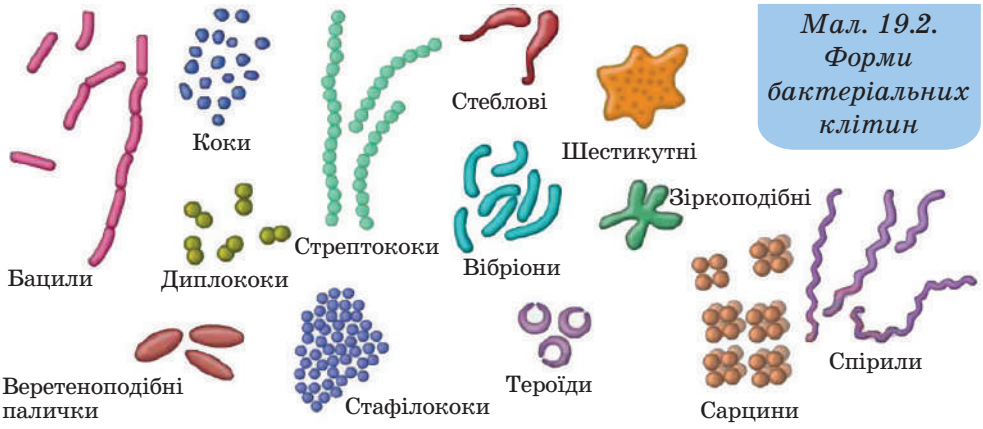
Розглянемо будову бактеріальної клітини на прикладі **кишкової палички** — симбіотичної бактерії, що живе в кишківнику тварин і людини. Клітина бактерії оточена плазматичною мембраною, що за будовою нагадує мембрану евкаріотичних клітин. Зовні вона вкрита клітинною стінкою, утвореною *муреїном* — особливим полімером, до

складу якого входять вуглеводні та амінокислотні ланцюги. Над клітинною стінкою у бактерій може бути додатковий шар слизу — капсула, що бере участь у забезпеченні ковзного руху бактерії та захищає її від поглинання більшими клітинами. У *цитоплазмі* бактеріальної клітини розміщений *нуклеоїд* — комплекс бактеріальної ДНК та білків у співвідношенні 3 : 2. Однак, гістони для організації нуклеоїду бактерій не характерні. У цитоплазмі бактерії можуть бути невеликі кільцеві молекули ДНК — *плазміди*, що несуть додаткову генетичну інформацію, наприклад про *резистентність* (стійкість до антибіотиків). Також у цитоплазмі обов'язково є *рибосоми* — відповідають за синтез білків та *включення* — речовини, що відкладаються про запас, наприклад глікоген, ліпіди. Мембранних органел у бактерій не виявлено, однак плазматична мембрана бактеріальної клітини може утворювати впинання у цитоплазму — мезосоми, на яких відбуваються важливі процеси фотосинтезу, фіксації атмосферного азоту, хемосинтезу та інші. Багато клітин бактерій здатні до активного руху за допомогою *джгутиків* — особливих структур з *білків-флагелінів*, не обтягнутих мембраною, що обертаються навколо власної осі. Окрім джгутиків, на поверхні бактеріальної клітини є особливі структури — *пілі* (або *фімбрії*) — білкові ниткоподібні вирости, що забезпечують взаємодію бактеріальних клітин між собою та сприяють їх живленню (мал. 19.1).



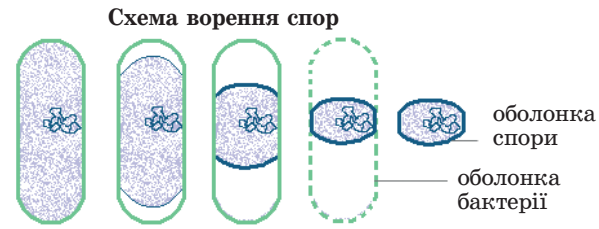
Мал. 19.1. Графічна модель будови бактеріальної клітини

За формою клітин бактерії поділяють на: кулясті (*монококи, диплококи, тетракоки, сарцини, стрептококи, стафілококи*); паличкоподібні (*бацили*); спірально закручені (*спірили*, *спірохети*); у формі коми (*вібріони*) та інші (мал. 19.2).



Мал. 19.2. Форми бактеріальних клітин

Розмножуються бактерії поділом, за сприятливих умов — кожні 20–30 хв. У несприятливих умовах (при нестачі поживних речовин, вологи, різких змінах температури) цитоплазма бактеріальної клітини стискається, відходить від оболонки, заокруглюється і утворює більш щільну оболонку. Таку нову бактеріальну клітину називають **спорою**. Спори деяких бактерій зберігаються дуже довго. Вони витримують висушування, спеку і низькі температури, не відразу гинуть навіть у киплячій воді (мал. 19.3). Спори бактерій легко розносяться вітром, водою, їх багато в повітрі та ґрунті.

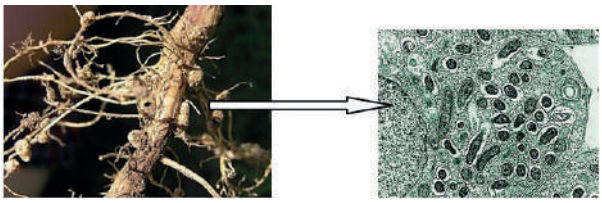


Мал. 19.3. Утворення спори

Живляться прокаріоти гетеротрофно (сапротрофне, або паразитичне живлення) або автотрофно (за рахунок органічних речовин, що утворюють самі в процесі фотосинтезу або хемосинтезу).

За відношенням до кисню бактерії поділяють на *анаеробні* та *аеробні*. Анаеробні прокаріоти не потребують кисню з повітря, вони отримують енергію завдяки процесам бродіння, або окиснюють не оксигеном, а іншими речовинами. Аеробні бактерії потребують вільного молекулярного кисню.

Деякі ґрунтові бактерії здатні поглинати азот з повітря і включати таким чином нітроген у колообіг речовин. Ці *азотфіксуючі бактерії* живуть самостійно або поселяються на коренях бобових рослин. Проникнувши в корені бобових, вони викликають розростання клітин коренів і утворення на них *бульбочок*. Такі бактерії називають бульбочковими (мал. 19.4).



Мал. 19.4. Бульбочки люпину білого з азотфіксуючими бактеріями

Генетичний апарат у бактерій представлений нуклеоїдом і не відмежований від цитоплазми власною мембраною. Окрім нуклеоїда, бактеріальні клітини містять **плазміди**, що здатні самоподвоюватися незалежно від нуклеоїда. Генетична інформація, яка міститься у плазмідах, не обов'язкова для життєдіяльності бактерій, проте наявність плазмід розширює пристосувальні можливості бактеріальних клітин (табл. 19.1). Плазміда має кільцеву форму і довжину від 20 до 400 тисяч пар нуклеотидів. У одній бактеріальній клітині може бути близько десяти таких плазмід. Бактерії здатні обмінюватися генетичним матеріалом.

Основними способами такого *горизонтального перенесення генів є кон'югація, трансформація* і *трансдукція*.

Кон'югація бактерій — передача генетичного матеріалу від однієї клітини до іншої шляхом безпосереднього контакту. Причому відбувається одностороннє перенесення генетичного матеріалу від бактерії-донора до бактерії-реципієнта. Необхідною умовою для кон'югації є наявність у бактерії-донора F-плазміди. У процесі кон'югації бактерій задіяні *пілі*. Клітини, які відіграють роль донора, позначають F^+, а реципієнта — F^-.

Трансформація — це процес поглинання бактеріальною клітиною ДНК з навколишнього середовища.

Трансдукція — обмін генетичною інформацією в бактерій з допомогою вірусів-бактеріофагів.

Таблиця 19.1

Основні типи бактеріальних плазмід та їх функції

Типи плазмід	Основні функції плазмід у бактеріальній клітині
F-плазміда (фертильності)	Участь у кон'югації, утворення статевих пілей та перенесення ДНК
R-плазміда (резистентності)	Несуть гени стійкості до антибіотиків, дезінфектантів, важких металів
Плазміди вірулентності	Кодують фактори патогенності: токсини, ферменти (наприклад, токсин холери)
Метаболічні (деградаційні)	Дають змогу розщеплювати нехарактерні для середовища існування речовини (наприклад, нафту, пестициди)
Коліцинові плазміди	Продукують білки *коліцини*, що здатні вбивати інші бактерії

Значення бактерій у біосфері Землі важко переоцінити. Вони беруть участь у розкладанні органічних решток та забезпечують колообіг речовин у екосистемах; здійснюють процеси молочнокислого та оцтовокислого бродіння; бактерії кишківника людини та тварин сприяють травленню та засвоєнню їжі, синтезують деякі вітаміни та незамінні амінокислоти; хвороботворні бактерії спричиняють бактеріози людини і тварин (табл. 19.2).

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/MtUtaWlm або за QR-кодом, щоб переглянути основні бактеріози людини (табл. 19.2).

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/krYU4YCS або за QR-кодом і виконайте практичну роботу «Порівняльна характеристика прокаріотичної та евкаріотичної клітин».

1. Чи можна вивчати клітини бактерій за допомого світлового мікроскопа?
2. Чи відрізняються за будовою клітинні стінки грам-позитивних і грам-негативних бактерій?
3. Як організований генетичний апарат прокаріотичних клітин? Чому, на вашу думку, у клітинах бактерій, окрім нуклеоїду, часто зустрічаються ще і плазміди?
4. Чому рибосоми обов'язково присутні у клітинах прокаріотів та евкаріотів?
5. Через свої малі розміри бактеріальна клітина має велике співвідношення площі поверхні до об'єму клітини. Яке значення може мати це явище для життєдіяльності бактерії?
6. Яке біологічне значення горизонтального перенесення генів у бактерій? Чому, на вашу думку, у процесі еволюції виникли різні його способи?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ztJV0hdE і виконайте вправи.

20 ТРАНСПОРТ РЕЧОВИН ЧЕРЕЗ ПЛАЗМАТИЧНУ МЕМБРАНУ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

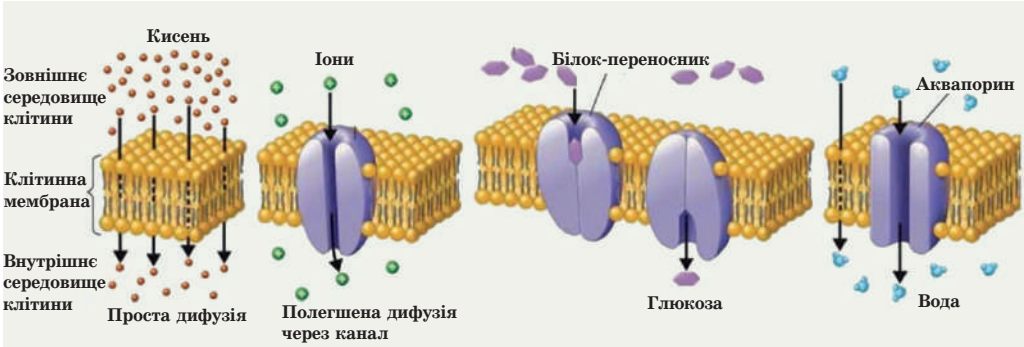
- які існують механізми транспорту речовин через плазматичну мембрану;
- у чому полягає відмінність між пасивним і активним транспортом;
- як клітини здійснюють ендоцитоз та екзоцитоз.

Які речовини надходять у клітину і виводяться з неї? Яку роль у цьому процесі відіграє клітинна мембрана?

Клітина — відкрита біологічна система. Між живою клітиною і навколишнім середовищем постійно відбувається обмін речовини, енергії та інформації. Рух речовин крізь плазматичну мембрану у клітину і з клітини називають *транспортом речовин*. Плазматична мембрана — *напівпроникна*. Вона відносно легко пропускає малі за розміром молекули та йони і затримує або пропускає із витратами енергії великі молекули, йони та гідрофобні (нерозчинні у воді) речовини.

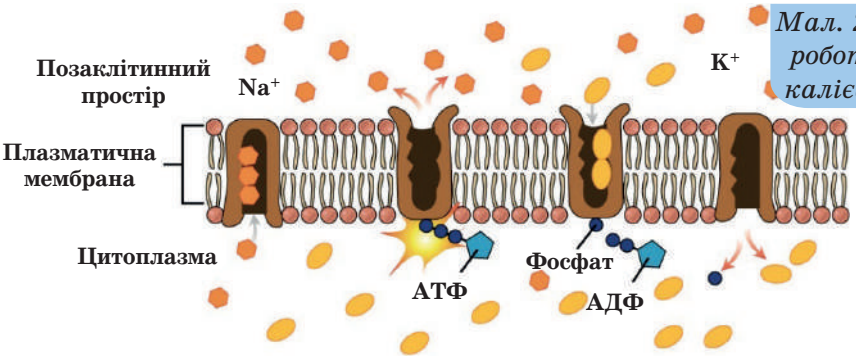
Пасивний транспорт речовин крізь плазматичну мембрану відбувається *без затрат енергії* відповідно до *градієнта концентрації* — різниці в концентраціях речовин з обох боків клітинної мембрани. До пасивного транспорту відносять: *дифузію*, *осмос* та *полегшену дифузія* (мал. 20.1). **Дифузія** — переміщення молекул крізь мембрану із зони з

високою концентрацією в зону з нижчою. Наприклад, кисень дифундує в клітину, де його менше, а вуглекислий газ — з клітини, де його більше. **Осмос** — особливий тип дифузії: переміщення води через напівпроникну мембрану в зону з більшою концентрацією розчинених речовин. **Полегшена дифузія** — речовини транспортуються через інтегральні білки, що пронизують мембрану наскрізь. Наприклад, глюкоза переноситься через мембрану за допомогою *специфічних білків-переносників*, які здатні змінювати свою форму, відповідно до молекул тих речовин, які вони переносять; йони переносяться з допомогою *неспецифічних білків переносників — каналів*; вода транспортується через *аквапорини*, канали яких відповідають за формою її молекулам.



Мал. 20.1. Пасивний транспорт крізь плазматичну мембрану

Активний транспорт — це перенесення розчинених речовин крізь клітинну мембрану проти градієнта концентрації *з використанням енергії АТФ*. Наприклад, *натрій-калієвий насос* — трансмембранний білок (мал. 20.2). За законами дифузії йони Na^+ постійно рухаються в клітину, а йони K^+ — з клітини. Порушення необхідної концентрації цих йонів може спричинити загибель клітини. Тому в зовнішній мембрані клітини є натрій-калієвий насос, який транспортує три йони Na^+ з клітини, а два йони K^+ — у клітину проти градієнта концентрації з використанням енергії АТФ.

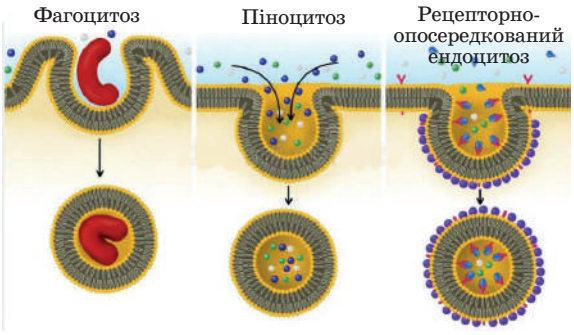


Мал. 20.2. Етапи роботи натрій-калієвого насоса

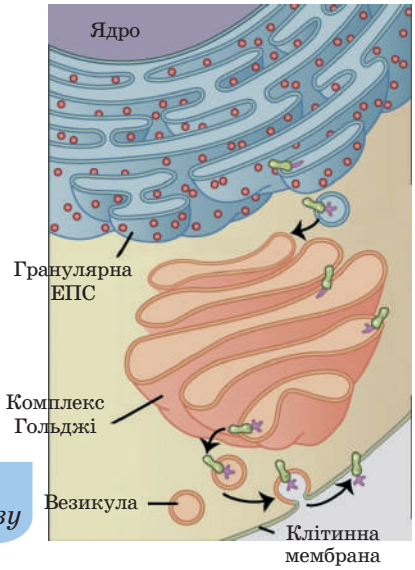
Біологічне значення натрій-калієвого насоса:

- *підтримка мембранного потенціалу:* внутнішній бік мембрани заряджений негативно, а зовнішній — позитивно; це необхідно для передачі нервового імпульсу, скорочення м'язів, роботи рецепторів;
- *осмотичний баланс:* виведення Na^+ за межі клітини запобігає надмірному надходженню води в клітину, захищає її від набухання та осмотичного розриву;
- *вторинний пасивний транспорт:* градієнт концентрації Na^+, створений натрій-калієвим насосом, використовується для транспорту в клітину глюкози, амінокислот, йонів через білки-переносники;
- *підтримка концентрації K^+:* у цитоплазмі клітини йони калію необхідні для ферментативної активності, синтезу білків;
- участь у терморегуляції: у теплокровних тварин і людини до 30% всієї енергії АТФ організмів витрачається на роботу натрій-калієвого насоса; це значна частина теплоутворення організмів.

Везикулярний транспорт. Великі молекули, щільні частки та краплини гідрофобних (нерозчинних у воді) речовин для транспортування крізь плазматичну мембрану «запаковуються» у мембранні міхурці — *везикули*. Таким *везикулярним транспортом* клітина може поглинати речовини з навколишнього середовища — *ендоцитоз* (мал. 20.3), або виводити речовини назовні, зливаючи мембрану везикули з плазматичною мембраною, — *екзоцитоз* (мал. 20.4).



Мал. 20.3. Типи ендоцитозу



Мал. 20.4. Схема екзоцитозу

Існують особливі типи ендоцитозу: поглинання клітиною твердих часток чи бактерій — *фагоцитоз* (наприклад, макрофаг — клітина імунної системи поглинає бактерію); поглинання клітиною краплин рідини — *піноцитоз* (наприклад, клітини епітелію поглинають краплини рідини разом з вірусними частками, тому такий шлях передачі вірусів називають краплинно-рідинним). Окрім того, для мембран деяких

клітин характерний *рецепторно-опосередкований ендоцитоз* — це специфічний тип ендоцитозу, за якого клітина поглинає лише ті речовини, які зв'язуються з певними рецепторами на поверхні плазматичної мембрани (наприклад, проникнення у клітину інсуліну, факторів росту, вітаміну B_{12}, ВІЛ).

А чи знаєте ви...

Везикулярний транспорт дозволяє клітині переміщати речовини і в цитоплазмі, наприклад від ендоплазматичної сітки до комплексу Гольджі, від комплексу Гольджі до плазматичної мембрани. Здійснюється такий рух везикул за допомогою особливих ферментів — *кінезинів*, що, використовуючи енергію АТФ, тягнуть везикули вздовж мікротрубок цитоскелета.

Виконайте навчальний проєкт на тему: «Білки кінезини чи динеїни: значення для життєдіяльності клітини».

1. Які види транспорту речовин через плазматичну мембрану ви знаєте? У чому їхня відмінність?
2. Поясніть різницю між дифузією, осмосом і полегшеною дифузією. Наведіть приклади для кожного виду транспорту речовин крізь плазматичну мембрану.
3. Чому клітини не можуть здійснювати активний транспорт речовин крізь мембрану без затрат енергії?
4. Порівняйте механізми ендоцитозу та екзоцитозу. Наведіть приклади кожного.
5. Чому в клітині для секреції речовин та внутрішньоклітинного транспорту необхідні везикули?
6. Яка роль цитоскелета та кінезинів (чи динеїнів) у здійсненні везикулярного транспорту?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ztJV2tFP і виконайте вправи.

21 ОБМІН РЕЧОВИН ТА ЕНЕРГІЇ У КЛІТИНІ. АВТОТРОФНИЙ І ГЕТЕРОТРОФНИЙ ТИПИ ЖИВЛЕННЯ. МІКСОТРОФНІ ОРГАНІЗМИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чому метаболізм є основою життєдіяльності живих організмів;
- як взаємопов'язані процеси анаболізму та катаболізму;
- які є типи живлення клітин та організмів;
- хто такі міксотрофи та як вони поєднують автотрофне і гетеротрофне живлення.

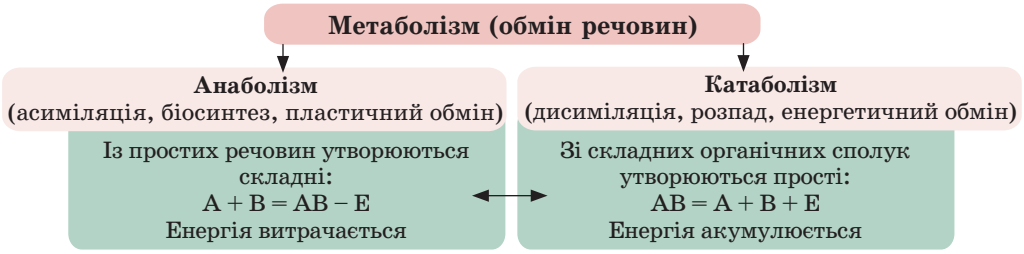
Які органели забезпечують енергетичні потреби евкаріотичної клітини? На яких структурах клітин прокаріотів відбуваються енергетичні процеси? Які молекули здатні акумулювати і переносити енергію в межах клітини?

Метаболізм — це основа існування клітини. Він включає два протилежні, але взаємозалежні процеси: *катаболізм* — розщеплення речовин з вивільненням енергії, що необхідна для життєдіяльності клітини, та *анаболізм* — синтез речовин, необхідних для росту і розвитку клітини. Баланс між цими процесами забезпечує ріст, розвиток, поділ і самовідновлення клітин.

Метаболізм, або **обмін речовин і енергії** — це сукупність усіх біохімічних перетворень, що відбуваються в клітині та забезпечують її життєдіяльність. Ці перетворення поділяють на два взаємопов'язані процеси: *катаболізм* і *анаболізм*.

Катаболізм, або **енергетичний обмін** — процес розщеплення складних органічних речовин на простіші, що супроводжується вивільненням енергії, наприклад, *бродіння* чи *гліколіз*, що відбувається в цитоплазмах клітин, та клітинне дихання, що відбувається в мітохондріях з участю кисню. Катаболізм супроводжується вивільненням енергії під час розривів хімічних зв'язків чи окиснення.

Анаболізм, або **пластичний обмін** — процес синтезу складних органічних речовин з простіших з використанням енергії, наприклад, фотосинтез у рослин, ціанобактерій чи синтез білків у всіх клітинних форм життя. Реакції анаболізму потребують затрат енергії. Внаслідок анаболітичних процесів клітини синтезують речовини, необхідні для їх росту, розвитку і поділу.



Мал. 21.1. Схема метаболізму у клітині

Катаболічні та анаболічні процеси пов'язані між собою енергетичним обміном (мал. 21.1): енергія, що вивільняється під час катаболізму, переважно акумулюється молекулами АТФ і використовується для анаболічних процесів. Частина цієї енергії розсіюється у вигляді тепла (так теплокровні тварини і люди підтримують постійну температуру тіла), використовується на рухову активність (робота м'язів) та роботу нервової системи та органів чуття (утворення і проведення нервових

імпульсів). Продукти реакцій катаболізму можуть бути вихідними речовинами для анаболізму і навпаки. Клітина здатна регулювати баланс катаболічних і анаболічних процесів. Наприклад, адреналін і глюкокортикоїди зміщують баланс у бік домінування катаболізму, а інсулін, соматотропін, тестостерон — у бік домінування анаболізму.

Типи живлення клітин. Залежно від джерел енергії та речовин клітини можуть живитись автотрофно, гетеротрофно або міксотрофно (табл. 21.1).

Таблиця 21.1

Типи живлення клітин

Тип живлення	Джерело карбону	Джерело енергії	Приклади організмів
Фотоавтотрофне	CO_2	Світло	Рослини, ціанобактерії
Хемоавтотрофне	CO_2	Окиснення феруму, нітрогену, сульфуру	Залізобактерії, нітрифікуючі бактерії, сіркобактерії
Фотогетеротрофне	Органічні речовини	Світло	Пурпурові бактерії, геліобактерії
Гетеротрофне	Органічні речовини	Окиснення органічних речовин	Людина, гриби, тварини, більшість бактерій
Міксотрофне	CO_2 + органічні речовини	Світло + окиснення органічних речовин	Евглена зелена, деякі інфузорії, діатомові водорості, комахоїдні рослини, омела біла, деякі бактерії

Автотрофи — організми, які самостійно синтезують органічні речовини з неорганічних. Енергію для цього вони отримують від світла (фотоавтотрофи — наприклад, рослини, ціанобактерії) або від хімічних реакцій неорганічних сполук (хемоавтотрофи — наприклад, залізобактерії, сіркобактерії, нітрифікуючі бактерії).

Гетеротрофи — організми, які не здатні до синтезу органічних речовин з неорганічних і використовують готові органічні речовини, утворені іншими організмами. Це більшість бактерій, гриби, тварини, людина.

Міксотрофи — організми, що поєднують автотрофне і гетеротрофне живлення. Наприклад, евглена зелена може здійснювати фотосинтез і поглинати органічні речовини із середовища існування. Таке поєднання автотрофного і гетеротрофного живлення відбувається завдяки гнучким метаболічним можливостям, які дозволяють їм змінювати спосіб живлення залежно від умов навколишнього середовища. Наявність хлоропластів дозволяє міксотрофам здійснювати автотрофне живлення за наявності інтенсивного освітлення або переходити до гетеротрофного живлення завдяки наявності механізмів фагоцитозу, піноцитозу та особ-

ливих ферментних систем.

Цікаво, що в біосфері нашої планети існують також **фотогетеротрофні організми**, наприклад *пурпурові бактерії*. Вони для процесів синтезу органічних речовин із неорганічних використовують енергію світла, а як джерело гідрогену і карбону — органічні сполуки, а не воду і вуглекислий газ.

Робота в групах

Рольова гра «Клітина-місто»: Уявіть, що клітина — це місто. Розподіліть ролі між учнями / ученицями вашого класу. Наприклад, ядро клітини — мерія міста; мітохондрії — електростанції; рибосоми — заводи; ЕПС — транспортні шляхи; комплекс Гольджі — пошта; лізосоми — утилізаційні служби; мембрана — митниця; вакуоля — склад. Відобразіть їх роль і значення за: *а)* автотрофного, *б)* гетеротрофного та *в)* міксотрофного живлення клітини-міста.

1. Що таке метаболізм і які його основні етапи?
2. У чому полягає відмінність між анаболізмом і катаболізмом?
3. Поясніть взаємозв'язок між катаболічними та анаболічними процесами.
4. Чому евглену зелену вважають міксотрофним організмом?
5. Як різні типи живлення допомагають організмам виживати в екстремальних умовах?
6. Чи можна лишайники вважати міксотрофними організмами?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ntJV9WSA і виконайте вправи.

22 ПРОЦЕСИ ФОТОСИНТЕЗУ ТА ХЕМОСИНТЕЗУ. ЗНАЧЕННЯ ФОТОСИНТЕЗУ ДЛЯ ІСНУВАННЯ БІОСФЕРИ

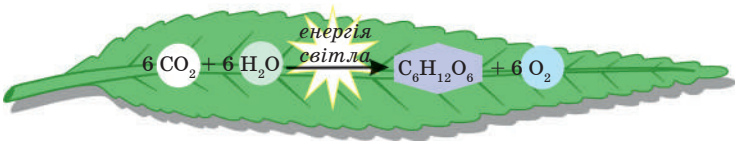
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- як відбувається фотосинтез у хлоропластах рослинних клітин;
- які організми здатні до хемосинтезу;
- чому фотосинтез має ключове значення для біосфери Землі.

Які органели евкаріотичних клітин здійснюють процес фотосинтезу? Які евкаріотичні клітини можуть фотосинтезувати, а які — ні? На яких структурах фотосинтезуючих бактерій відбувається фотосинтез?

Фотосинтез — це процес синтезу органічних речовин з неорганічних, який відбувається з використанням світлової енергії з участю зеленого пігменту — *хлорофілу*. Фотосинтезують зелені

частини рослин, клітини яких містять хлоропласти і хлорофіл (мал. 22.1). Це єдиний процес у біосфері Землі, під час якого поглинається вуглекислий газ і виділяється кисень.

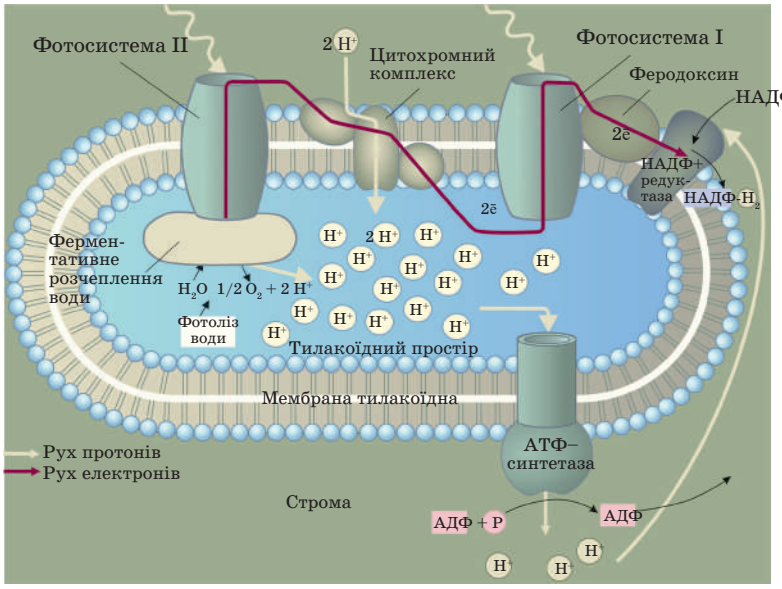


Мал. 22.1. Загальна схема кисневого фотосинтезу

Розглянемо **фази фотосинтезу** на прикладі кисневого фотосинтезу у вищих рослин: *світлову* і *темнову*.

Процеси **світлової фази фотосинтезу** можливі тільки за наявності світла (мал. 22.2). Відбуваються вони на мембранах *тилакоїдів* — особливих структур, які утворює внутрішня мембрана хлоропластів. На тилакоїдах розміщені спряжені між собою комплекси ферментів, які називають *фотосистемою I (ФС I)* та *фотосистемою II (ФС II)*. Фотосистема — це «мікрофабрика» на мембрані тилакоїда, яка складається з *молекул хлорофілу* — основного пігменту, який вловлює світло; *реакційного центру* — де електрони починають свій рух по ланцюжку білків-переносників; *ланцюга переносу електронів*, утвореного переважно білками *цитохромами*, що містять у своєму складі ферум.

Спочатку фотони світла потрапляють у хлоропласт і **збуджують молекули хлорофілу у ФС I і ФС II.**



Мал. 22.2. Схема процесів світлової фази фотосинтезу

У **ФС II** від атома магнію, що міститься в молекулах хлорофілу, відривається електрон і рухається ланцюжком білків-переносників. Для заповнення «дірки», що таким чином утворилася, відбувається *фотоліз води* — руйнування молекул води під впливом фотонів світла з утворен-

ням протонів гідрогену, електронів та вільного кисню: $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$. Виділений кисень виходить з клітини, а електрони рухаються по ланцюжку білків-переносників. Енергія електронів використовується для перенесення протонів (H^+) через мембрану і накопичення їх у порожнині тилакоїда. Це створює *протонний градієнт* — різницю в концентраціях протонів з різних боків мембрани тилакоїда. Коли концентрація протонів у тилакоїді досягає критичного рівня, вони проходять крізь мембрану назовні через особливий фермент — *АТФ-синтетазу*, що приводить до *фотофосфорилювання* — перетворення АДФ на АТФ з акумулюванням енергії в макроергічному зв'язку.

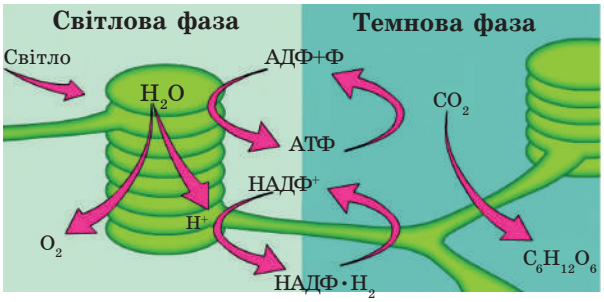
У **ФС I** молекула хлорофілу також збуджується під впливом фотона і втрачає електрон. Цей електрон білок *феродоксин* передає ферменту *НАДФ⁺-редуктазі*, який здійснює перетворення окисненої форми НАДФ⁺ до відновленої форми НАДФ·Н за схемою: $НАДФ^+ + e^- + H^+ \rightarrow НАДФ \cdot H$.

А чи знаєте ви...

НАДФ·Н є універсальним відновником і має довгу назву, яку не обов'язково запам'ятовувати — *нікотинамідаденіндинуклеотидфосфат*.

Темнова фаза фотосинтезу відбувається у внутрішньому середовищі хлоропласта — *матриксі*. Реакції темнової фази можуть проходити як на світлі, так і за його відсутності. У ряді біохімічних перетворень, який отримав назву *циклу Кальвіна*, вуглекислий газ відновлюється до глюкози, приєднуючи гідроген, що віддає відновлений у світловій фазі НАДФ·Н, та використовуючи енергію, що акумулювала АТФ у процесі фотофосфорилювання.

Речовиною, що зв'язує атмосферний CO_2 і включає в біохімічні перетворення темнової фази, є особливий п'ятикарбоновий вуглевод — *рибулозо-1,5-біфосфат*. Він реагує з CO_2 у першому етапі циклу Кальвіна. Реакцію проводить фермент **рубіско** — *рибулозо-1,5-біфосфаткарбоксилаза* **(RuBisCO)**, один із найважливіших ферментів у біосфері нашої планети. Так утворюється нестабільна сполука, до складу якої входить 6 атомів карбону, яка розпадається на дві молекули трикарбонових кислот. У подальших реакціях циклу Кальвіна з участю АТФ і НАДФ·Н ці молекули перетворюються на **глюкозу** або інші органічні речовини.



Мал. 22.3. Процеси світлової та темнової фаз фотосинтезу

Виконайте **навчальний проєкт** на тему: «Особливості процесів С3- та С4-фотосинтезу».

Значення фотосинтезу для існування біосфери нашої планети важко переоцінити. Саме фотосинтез *змінив газовий склад атмосфери* Землі, що дозволило утворити озоновий шар і відбити жорстке ультрафіолетове випромінювання Сонця. Так життя, приблизно 470–450 млн років тому, змогло вийти на суходіл. Фотосинтез *забезпечує автотрофне живлення* всіх екосистем, є *джерелом кисню для аеробів, утворює органічні речовини* для живлення гетеротрофів, *підтримує стабільність карбонового балансу* нашої планети і зменшує парниковий ефект. Енергія, що міститься у вугіллі, нафті, природному газі, була накопичена в процесі фотосинтезу давніх геологічних епох.

Отже, фотосинтез — це не тільки процес «харчування рослин», а головний процес, завдяки якому виникло, існує й розвивається життя на нашій планеті.

Хемосинтез — синтез органічних речовин з неорганічних з використанням енергії хімічних зв'язків, характерний для деяких бактерій. Наприклад, *нітрифікуючі бактерії* здатні окиснювати амоніак (NH_3) до нітратів (NO_3^-), *залізобактерії* окислюють ферум (Fe^{2+} до Fe^{3+}), *сіркобактерії* — сіркогідроген (H_2S) до сульфатів (SO_4^{2-}). Отже, хемосинтетики є автотрофами, оскільки здатні синтезувати органічні речовини з вуглекислого газу, але як джерело енергії вони використовують не світлову енергію, а енергію, що вивільняється внаслідок окиснення неорганічних субстратів.

А чи знаєте ви...

Хемосинтез відкрив у 1887 році **Сергій Миколайович Виноградський** (1856 – 1953) — видатний український мікробіолог, один із засновників екологічної мікробіології та біогеохімії. Його дослідження заклали основи вивчення хемосинтезу, колообігу речовин і ролі мікроорганізмів у природних процесах.

1. Що таке фотосинтез? Що є джерелом карбону для фотосинтезу? Що є джерелом енергії для фотосинтезу?
2. Що таке хемосинтез? Наведіть приклади організмів, що здатні до хемосинтезу.
3. Чому фотосинтез відбувається саме у хлоропластах евкаріотичних клітин? Які структури здійснюють процеси фотосинтезу в прокаріотів?
4. Чим фотосинтез відрізняється від хемосинтезу за джерелом енергії?
5. Для яких організмів характерний безкисневий фотосинтез? Який у них тип живлення? Які речовини є для них джерелом карбону?
6. Порівняйте процеси фотосинтезу і хемосинтезу за джерелами карбону та джерелами енергії. Чому деякі бактерії стали хемосинтетиками?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/JtJV8Kno і виконайте вправи.

23 РОЗЩЕПЛЕННЯ РЕЧОВИН В ОРГАНІЗМІ: БЕЗКИСНЕВЕ І КИСНЕВЕ. ЕТАПИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБМІНУ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які існують етапи енергетичного обміну в клітинах;
- чим відрізняється безкисневе і кисневе розщеплення глюкози;
- як вивільняється і перетворюється енергія в клітинах організмів.

Які органели евкаріотичних клітин відповідають за синтез АТФ? Які структури прокаріотичних клітин відповідають за енергетичний обмін?

Для задоволення своїх енергетичних потреб клітина розщеплює органічні речовини. В енергетичний обмін (катаболізм) включаються в першу чергу *вуглеводи* (переважно глюкоза) — основне і найшвидше джерело енергії. На другій позиції в черзі на розщеплення — *жири* (гліцерин і вищі жирні кислоти) — запасне джерело енергії. Нітрогеновмісні речовини — *ДНК*, *РНК* (нуклеозиди) та *білки* (амінокислоти) — розщеплюються в процесах катаболізму в останню чергу, коли в організмі виникає дефіцит вуглеводів і жирів. Основним джерелом хімічної енергії для переважної більшості клітинних форм життя є **глюкоза**.

Енергетичний обмін глюкози складається з трьох основних етапів:

- *підготовчого* — розщеплення складних речовин (полісахаридів, дисахаридів) на прості (моносахариди) без утворення АТФ, відбувається у процесі травлення;
- *безкисневого розщеплення (гліколізу)* — у цитоплазмі клітини з 1 молекули глюкози утворюється 2 молекули піровиноградної кислоти (піруват), або у м'язових клітинах 2 молекули молочної кислоти (лактат); енергія, яка при цьому вивільняється, акумулюється **2 молекулами АТФ**;
- *кисневого розщеплення* — у мітохондріях, за участю кисню, піруват чи лактат повністю окиснюється до вуглекислого газу і води; енергію, яка при цьому вивільняється, акумулюють **36 молекул АТФ**.

У результаті повного окиснення 1 молекули глюкози вивільняється енергія, якої достатньо, щоб **38 молекул АДФ** перетворити на 38 молекул АТФ.

Підготовчий етап енергетичного обміну відбувається поза клітиною в травній системі (або у травних вакуолях одноклітинних організмів), де складні органічні речовини розщеплюються на більш прості: *білки* — на *амінокислоти*; *полісахариди* — на *моносахариди*; *жири* — на *гліцерин* і *вищі жирні кислоти*; *нуклеїнові кислоти* — на *нуклеозиди*. АТФ на цьому етапі не утворюється, а енергія, що вивільняється, розсіюється у вигляді тепла. Прості речовини, що утворилися внаслідок травлення, всмоктуються у кров або лімфу і транспортуються до клітин багатоклітинних організмів, або включаються в обмін речовин у цитоплазмі одноклітинних організмів.

Безкисневий (анаеробний) етап енергетичного обміну відбувається в цитоплазмі клітини на її внутрішньоклітинних мембранах. Безкисневе розщеплення глюкози називають **гліколізом**, при якому з 1 молекули глюкози утворюються 2 молекули піровиноградної ($C_3H_4O_3$) кислоти та 2 молекули води, а енергія, що при цьому вивільняється, акумулюється **2 молекулами АТФ**. У клітинах м'язів та в цитоплазмах молочнокислих бактерій піровиноградна кислота перетворюється на молочну кислоту ($C_3H_6O_3$). Загальна схема гліколізу з утворенням молочної кислоти:

$$\underset{\text{глюкоза}}{C_6H_{12}O_6} + 2АДФ + \underset{\text{ортофосфатна кислота}}{2H_3PO_4} \rightarrow \underset{\text{молочна кислота}}{2C_3H_6O_3} + 2АТФ + 2H_2O$$

Частина енергії, що при цьому вивільняється, розсіюється в вигляді тепла.

Кисневий (аеробний) етап енергетичного обміну відбувається у мітохондріях евкаріотичних клітин з участю кисню в два етапи.

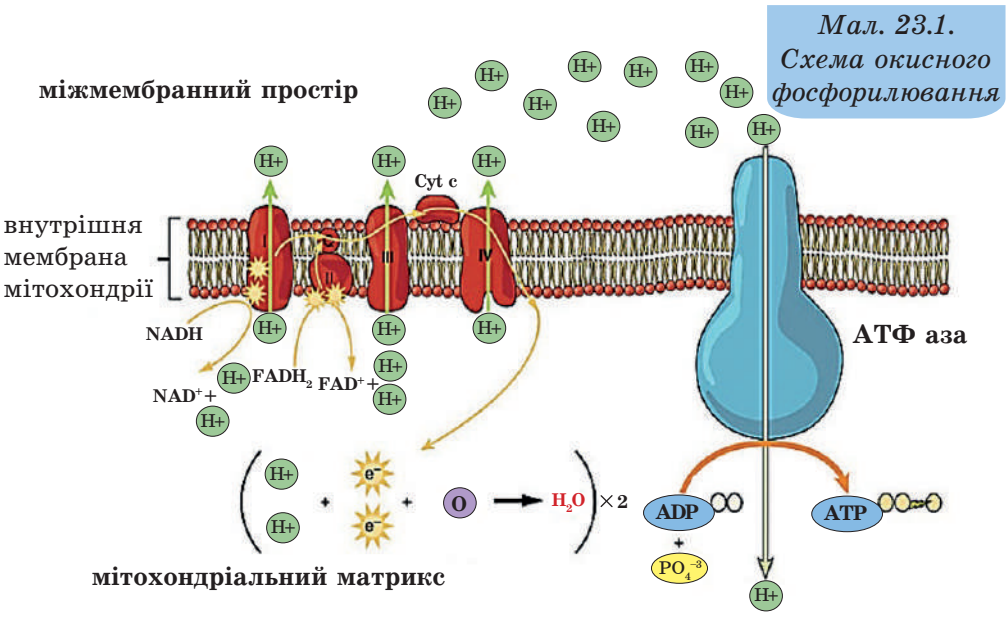
Перший етап: *цикл Кребса* — ряд біохімічних перетворень, що відбувається в матриксі мітохондрії. Це циклічна серія реакцій, внаслідок якої органічні речовини повністю окиснюються до вуглекислого газу. У циклі Кребса з 2 молекул піровиноградної кислоти, що утворилися внаслідок гліколізу, утворюється 6 молекул вуглекислого газу, відновлюються 8 молекул переносників гідрогену (6 молекул НАД · Н, 2 молекули ФАД · H_2), утворюється **2 молекули АТФ**.

А чи знаєте ви...

ФАД · H_2 — це відновлена форма флавінаденіндинуклеотиду, назву якого не обов'язково запам'ятовувати.

Другий етап: *окисне фосфорилювання*, що відбувається на внутрішній мембрані мітохондрії (мал. 23.1). НАД · Н і ФАД · H_2, що відновилися в циклі Кребса, передають електрони на білки *дихального ланцюга*. Енергія електронів використовується для перекачування протонів (H^+) з матриксу мітохондрії в міжмембранний простір. Так створюється градієнт концентрації протонів та виникає різниця потенціалів з обох боків мембрани. На мембрані в деяких місцях є *фермент АТФ-синтетаза*.

Коли різниця потенціалів, внаслідок перекачування протонів, досягає критичного рівня (200 електрон вольт), протони проходять через канал у АТФ-синтетазі. Їх кінетичної енергії достатньо для синтезу **34 молекул АТФ**. Кисень приєднує електрони і протони й утворює воду.



Мал. 23.1. Схема окисного фосфорилювання

Отже, з 2 молекул пірувату (чи лактату) в мітохондрії внаслідок реакцій циклу Кребса утвориться 2 молекули АТФ, а внаслідок реакцій окисного фосфорилювання — ще 34 молекули АТФ. Сумарна схема кисневого етапу:

$$2C_3H_6O_3 + 6O_2 + 36H_3PO_4 + 36АДФ = 6CO_2 + 36АТФ + 42H_2O$$

молочна кислота; ортофосфатна кислота

Таким чином, сумарно при повному розщепленні 1 молекули глюкози утвориться: у процесі гліколізу — 2 молекули АТФ; під час перетворень циклу Кребса — ще 2 молекули АТФ; під час окисного фосфорилювання — ще 34 молекули АТФ. Всього — **38 молекул АТФ**.

Бродіння — це форма безкисневого енергетичного обміну, що дозволяє клітині отримувати енергію з глюкози в умовах відсутності кисню (анаеробно). Відбувається бродіння у цитоплазмі клітини без участі кисню. В загальному під час бродіння 1 молекула глюкози розщеплюється на 2 молекули піровиноградної кислоти (пірувату), при цьому виділяється швидка енергія, якої достатньо для утворення 2 молекул АТФ. Далі піруват перетворюється на інші речовини, залежно від типу бродіння (табл. 23.1).

Таблиця 23.1

Види бродіння

Вид бродіння	Продукти бродіння	Приклади організмів	Значення для людини
Молочнокисле	Молочна кислота (лактат)	Молочнокислі бактерії, м'язові клітини	Виробництво йогуртів, кефіру, квашення овочів; енергія у м'язах при нестачі кисню
Спиртове	Етиловий спирт, вуглекислий газ	Дріжджі	Хлібопекарська справа, виноробство, пивоваріння, виробництво етилового спирту
Оцтовокисле	Оцтова кислота	Оцтовокислі бактерії	Виробництво оцту, консервування
Маслянокисле	Масляна кислота	Деякі анаеробні бактерії з роду Клостридіум	Анаеробне зброджування органіки, біогазові установки, силосування зеленої маси для відгодівлі тварин узимку

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

1. Назвіть основні етапи енергетичного обміну. У чому їх суть?
2. Яке біологічне значення безкисневого і кисневого етапів енергетичного обміну?
3. Яка роль АТФ у клітині? Чому її називають універсальним переносником енергії в межах клітини?
4. Чому безкисневі етапи енергетичного обміну можуть відбуватись як у клітинах евкаріотів, так і в клітинах прокаріотів?
5. Після інтенсивного тренування учень 9 класу відчув біль у м'язах ніг, хоча травм на тренуванні не було. Поясніть можливу причину болю. Що треба робити, щоб відновити нормальний стан м'язів ніг?
6. У родині дев'ятикласниці Марійки готують домашній квас. Марійка прочитала в табл. 23.1 свого підручника з біології про 4 види бродіння. Допоможіть Марійці розібратися, який саме вид бродіння застосовують для виробництва квасу.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ftJV4CuR і виконайте вправи.

24 КЛІТИННА ТЕОРІЯ. КЛІТИННИЙ ЦИКЛ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про основні положення сучасної клітинної теорії та її розвиток в історичній ретроспективі;
- що таке клітинний цикл і які фази він включає;
- як відбувається підготовка клітини до поділу в інтерфазі.

Хто і коли вперше побачив клітини? Яку роль відіграють хромосоми в передачі спадкової інформації? Яке біологічне значення має здатність клітин до поділу?

Клітинна теорія — одна з основоположних теорій біології, яка стверджує, що всі живі організми складаються з клітин, і саме клітини є одиницями структури та функціонування організмів.

Історія створення клітинної теорії

Становлення клітинної теорії тривало понад 200 років. *У 1665 році* англієць *Роберт Гук* вперше описав «клітини» у зрізі корка дуба за допомогою власного мікроскопа і заклав основу для досліджень будови і життєдіяльності організмів на клітинному рівні. Детальніше про дослідження Р. Гука йдеться в §15. Після відкриття клітини впродовж приблизно 170 років природодослідники і лікарі накопичували дані про клітинну будову організмів на основі світлової мікроскопії: у *1674 — 1676 роках Антоні ван Левенгук* відкрив бактерії і найпростіші, описав пластиди у клітинах рослин, еритроцити, сперматозоїди та різноманітні мікроструктури в клітинах рослин і тварин; у *1827 році Карл Ернст фон Бер* відкрив яйцеклітини ссавців; у *1831 році Роберт Броун* вперше описав ядро рослинної клітини. Однак, узагальненої теорії про клітинну будову організмів на той час не було.

Перші формулювання клітинної теорії, запропоновані німецькими вченими ботаніком *Матіасом Шлейденом* і зоологом *Теодором Шванном* у *1838 – 1839 роках*, містили такі ключові положення:

1. Усі живі організми складаються з клітин або є однією клітиною (одноклітинні організми).

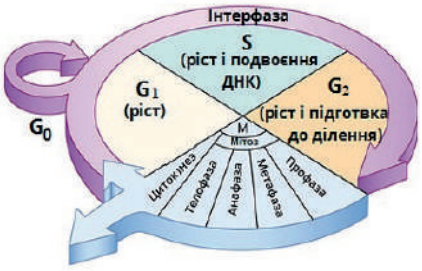
2. Клітина є основною одиницею будови та життєдіяльності у всіх організмів.

Причому, М. Шлейден дійшов висновку, що всі рослини складаються з клітин, а Т. Шванн переніс цю ідею і на тварин, стверджуючи, що тварини також складаються з клітин. На цьому етапі природодослідники ще не знали, що більшість клітин виникає шляхом поділу інших клітин. Це положення було додане пізніше *Рудольфом Вірховом у 1855 році,* і сформулював він його так: «Кожна клітина походить від іншої клітини». Це формулювання стало мемом на латині: **«Omnis cellula e cellula»**.

У XX столітті була сформульована цілісна клітинна теорія, актуальна і сьогодні. Вона не має єдиного автора і є результатом синтезу знань, отриманих за приблизно 150 років досліджень від М. Шлейдена і Т. Шванна до досліджень у молекулярній біології.

Сучасні положення клітинної теорії:

1. Клітина — елементарна одиниця живого, основна одиниця будови, функціонування, розмноження і розвитку всіх живих організмів.
2. Клітини всіх одноклітинних і багатоклітинних організмів мають спільне походження і подібні за своєю будовою і хімічним складом, основними проявами життєдіяльності та обміном речовин.
3. Розмноження клітин відбувається шляхом їх поділу. Нові клітини виникають лише з уже існуючих клітин.
4. У багатоклітинних організмів, які розвиваються з однієї клітини, різні типи клітин формуються завдяки їхній спеціалізації протягом індивідуального розвитку особин і утворюють тканини.
5. Із тканин формуються органи, які тісно пов'язані між собою.



Мал. 24.1. Етапи клітинного циклу

Клітинний цикл — це період життя клітини від моменту її утворення до наступного поділу або загибелі. Складається клітинний цикл з *інтерфази* — близько 90–95% часу клітинного циклу та *мітозу* — близько 5–10% часу клітинного циклу (мал. 24.1).

Інтерфаза — період між поділами клітини, або від поділу клітини до її загибелі. В інтерфазній клітині хроматин деконденсований (неущільнений). Інтерфаза складається з трьох етапів:

G_1-фаза (пресинтетична) — клітина росте, утворює нові білки, вуглеводи, ліпіди, накопичує енергію (у вигляді АТФ);

S-фаза (синтетична) — відбувається подвоєння **ДНК** (редуплікація), синтез гістонових білків, подвоєння центріолей (у тваринних клітинах); також діляться мітохондрії та пластиди;

G_2-фаза (постсинтетична) — завершується підготовка до мітозу: клітина накопичує ферменти та білки, необхідні для поділу.

Деякі клітини, які зазнають крайньої форми диференціації і втрачають здатність до поділу, вступають у період клітинного циклу — **G_0-фазу спокою**. У такому стані клітина живе, виконує свої функції, але не ділиться. Наприклад, нейрони, чи клітини серцевих м'язів (табл. 24.1).

Таблиця 24.1

Тривалість клітинного циклу та здатність до поділу деяких клітин організму людини

Тип клітини	Тривалість клітинного циклу	Здатність до поділу	Коментар
Ембріональні клітини	6–12 годин	Дуже висока; не входять у фазу-G_0	Швидке ділення під час розвитку
Клітини епітелію шкіри, кишечника	12–24 години	Висока; постійне оновлення	Постійно діляться
Клітини червоного кісткового мозку	12–24 години	Висока	Утворюють клітини крові
Клітини печінки — гепатоцити	1–2 доби (під час регенерації)	Зазвичай у фазі-G_0; можуть повернутися до клітинного циклу	Активуються при пошкодженні печінки
Клітини нервової тканини — нейрони	–	У фазі-G_0	У деяких ділянках мозку дорослих (наприклад, у гіпокампі) можливий нейрогенез
Еритроцити	–	Не мають ядра і не діляться	Виходять з клітинного циклу після дозрівання
Лейкоцити	–	У фазі-G_0; можуть повертатися у клітинний цикл після зустрічі з антигеном	Клітини імунної системи
Тромбоцити	–	Не мають ядра і не діляться	Виходять з клітинного циклу після утворення
Остеоцити	–	У фазі-G_0	Зрілі клітини кісткової тканини
Остеобласти	20–30 годин	Активно діляться	Забезпечують ріст кісток, диференціюють у остеоцити
Остеокласти	–	Не діляться, формуються з клітин-попередників	Руйнують кісткову тканину
Клітини хрящової тканини — хондроцити	Кожних кілька днів або тижнів	Дуже повільний поділ	Здатні до обмеженої регенерації
Клітини посмугованої м'язової тканини — міоцити	–	У фазі-G_0; не діляться	Збільшуються в розмірах, але не в кількості

Клітини серцевої м'язової тканини — кардіоміоцити	–	Здебільшого у фазі-G_0; поділ майже неможливий	Не регенерують після ураження
Клітини непосмугованої м'язової тканини — міоцити	–	Здебільшого у фазі-G_0; можуть повертатися у клітинний цикл під впливом стимулюючих факторів, наприклад, ушкоджень, запальних процесів	При поверненні до поділу змінюються фенотипово: зі скорочувальних стають секреторними — синтезують компоненти позаклітинного матриксу
Клітини жирової тканини — адипоцити	Кілька тижнів	У фазі-G_0, але можуть утворюватися з клітин-попередників	Не діляться, але накопичують ліпіди, запасають енергію

Клітинний цикл — це чітко контрольований процес. Його регулюють спеціальні білки-регулятори, гормони, сигнали від інших клітин. Якщо в цій системі виникає збій, можуть з'являтися серйозні наслідки для організму. Можливі **порушення клітинного циклу**:

- *клітини починають ділитися безконтрольно*, що приводить до утворення пухлин (доброякісних або злоякісних — раку);
- *зупинка поділу клітин*, які мали поділитися, наприклад, якщо клітини кісткового мозку не поділяться вчасно, то зменшиться кількість еритроцитів, лейкоцитів, виникнуть імунні порушення або анемія;
- *пошкодження ДНК*, якщо клітина з пошкодженою ДНК проходить контрольну точку і ділиться, *вона передає мутації дочірнім клітинам*.

Контрольна точка — це особливий етап у клітинному циклі, де клітина «перевіряє», чи все готове до переходу в наступну фазу. У контрольних точках клітина «приймає рішення»: продовжувати цикл, призупинити його, або самознищитися, якщо виявлено помилки. У нормі клітини, які не пройшли контроль, запускають механізм самознищення — апоптоз (табл. 24.2).

Таблиця 24.2

Основні контрольні точки клітинного циклу

Точки контролю клітинного циклу	Що перевіряється?	Коли перевіряється?
G_1-контрольна точка	Чи пошкоджена ДНК? Чи достатньо енергії та поживних речовин?	Після завершення G_1-фази
G_2-контрольна точка	Чи завершилось подвоєння ДНК? Чи не містить ДНК помилок?	Після S-фази, перед мітозом
M-контрольна точка	Чи всі хромосоми правильно прикріплені до веретена поділу?	Перед анафазою мітозу

Про *мітоз (М-фазу клітинного циклу)* ви детальніше дізнаєтесь у наступному параграфі.

Виконайти **навчальний проєкт** на тему: «Клітинний цикл: його порушення та їхні наслідки».

1. Назвіть основні положення сучасної клітинної теорії. У чому полягає їхнє значення для сучасної біологічної науки?
2. Назвіть етапи інтерфази. Які процеси відбуваються на кожному з них?
3. Чому G_0-фазу називають фазою спокою? Які клітини можуть у неї переходити?
4. Що таке контрольні точки клітинного циклу? Наведіть приклади та поясніть їхню роль.
5. Чим схожі й чим відрізняються клітинні цикли прокаріотів і евкаріотів?
6. Під час лабораторного дослідження клітин печінки учні виявили, що більшість з них перебуває в G_0-фазі. Поясніть, чому це можливо. Що може «повернути» ці клітини до поділу?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/xtJV5jWg і виконайте вправи.

25 ПРОЦЕСИ МІТОЗУ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які фази включає мітоз і які процеси відбуваються в кожній з них;
- як відбувається рівномірний розподіл генетичного матеріалу між дочірніми клітинами у процесі мітозу;
- яке біологічне значення мітозу для існування багатоклітинних організмів;
- як порушення мітозу впливають на життєдіяльність організмів.

Що таке клітинний цикл і які етапи він включає? Які зміни відбуваються з хромосомами в інтерфазі? Яка роль веретена поділу у процесі мітозу?

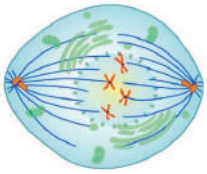
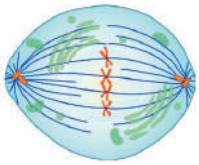
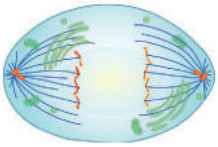
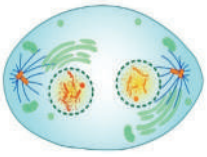
Мітоз — це непрямий поділ соматичних клітин евкаріотичних організмів, внаслідок якого з однієї материнської клітини утворюються дві генетично ідентичні дочірні клітини з диплоїдним набором хромосом. Мітоз включає два основні процеси: *каріокінез* (поділ ядра) і *цитокінез* (поділ цитоплазми). Виділяють чотири основні фази каріокінезу (мітозу): *профазу*, *метафазу*, *анафазу* і *телофазу*.

Каріокінез

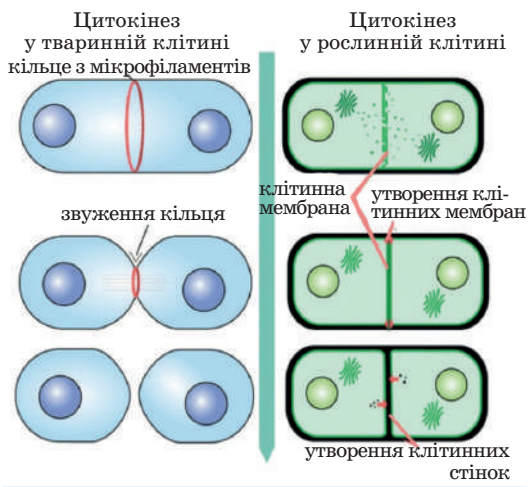
Каріокінез — це непрямий поділ ядра, у ході якого хромосоми ядра материнської клітини рівномірно розподіляються між двома ядрами дочірніх клітин. Цей процес забезпечує генетичну ідентичність дочірніх клітин і рівномірний розподіл генетичного матеріалу між ними. Внаслідок каріокінезу з 1 ядра материнської клітини з *диплоїдним набором двохроматидних хромосом* (2n 4c) утворюється 2 ядра дочірніх клітин з *диплоїдними наборами однохроматидних хромосом* (2n 2c), де n — кількість хромосом; c — кількість хроматид. Фази каріокінезу представлені в табл. 25.1

Таблиця 25.1

Основні етапи каріокінезу (фази мітозу)

Назва фаз мітозу	Основні процеси	Графічна модель
Профаза — перша і найтриваліша фаза мітозу	Хромосоми конденсуються, вкорочуються і стають видимими у світловий мікроскоп; кожна хромосома складається з 2 сестринських хроматид, з'єднаних у місці первинної перетяжки; ядерна оболонка поступово розпадається на окремі везикули; зникають ядерця; з мікротрубочок починає формуватися веретено поділу; у клітинах тварин і людини (не в рослин!) центріолі розходяться до полюсів клітини	
Метафаза характеризується завершенням формування веретена поділу	Хромосоми розміщуються в екваторіальній площині клітини й утворюють метафазну пластинку. До центромери кожної хромосоми з обох боків приєднуються нитки веретена поділу — по одній від протилежних полюсів клітини	
Анафаза — фаза активного руху хромосом, найкоротша фаза мітозу	Мікротрубочки веретена поділу скорочуються, хроматиди однієї хромосоми відділяються одна від одної і рухаються до протилежних полюсів клітини	
Телофаза — завершальна фаза мітозу, в якій відбуваються процеси, протилежні профазі	Відбувається деконденсація хромосом, руйнується веретено поділу, навколо груп хромосом на полюсах клітини утворюються ядерні оболонки, у дочірніх ядрах формуються ядерця	

Цитокінез



Мал. 25.1. Етапи цитокінезу

Цитокінез — це завершальний етап поділу клітини. Під час цитокінезу відбувається поділ цитоплазми материнської клітини між дочірніми клітинами. У тваринних клітин відбувається стягування плазматичної мембрани за допомогою скорочувального кільця з актинових філаментів, а в рослинних клітин утворюється клітинна пластинка з целюлози. Потім з обох боків клітинної пластини утворюються спочатку нові плазматичні мембрани, а потім клітинні стінки дочірніх клітин.

А чи знаєте ви...

Тривалість мітозу в середньому становить 1–2 години, але може варіювати залежно від типу клітин та умов навколишнього середовища. У клітинах організму людини мітоз відбувається мільйони разів щодня для підтримання нормального функціонування тканин і органів.

Біологічне значення мітозу

Біологічне значення мітозу полягає в забезпеченні точного розподілу генетичного матеріалу між дочірніми клітинами.

Основні функції мітозу:

- *ріст багатоклітинних організмів* — мітоз забезпечує збільшення кількості клітин в організмів;
- *збереження каріотипу* — підтримання сталої кількості та структури хромосом у всіх соматичних клітинах організму;
- *регенерація тканин і органів* — заміна пошкоджених чи відмерлих клітин новими;
- *нестатеве розмноження* — у деяких організмів мітоз є основним способом розмноження;
- *порушення мітозу* може призвести до утворення клітин з аномальною кількістю хромосом (анеуплоїдія), розвитку онкологічних новоутворень, генетичних захворювань.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/RrUbTsAO або за QR-кодом і виконайте лабораторне дослідження: «Вивчення фаз мітозу (на прикладі клітин кореня цибулі)».

Створіть лепбук «Мітоз».

1. Які основні фази мітозу ви знаєте? Охарактеризуйте процеси, що відбуваються в кожній з них.
2. Чому мітоз називають «непрямим» поділом клітини?
3. Порівняйте процеси цитокінезу в рослинних і тваринних клітинах.
4. Чому для лабораторного дослідження мітозу використовують саме мікропрепарати мітозу в корінці цибулі?
5. Що станеться, якщо у метафазі нитки веретена не прикріпляться до центромери?
6. Як ви можете визначити, в якій фазі мітозу перебуває клітина?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/StJV6fPS і виконайте вправи.

26 ПРОЦЕСИ МЕЙОЗУ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які фази включає мейоз і які процеси відбуваються в кожній з них;
- як відбувається редукція хромосомного набору та утворення гамет;
- яке біологічне значення кон'югації і кросинговеру;
- як порушення мейозу впливають на розвиток організмів.

Яка роль гамет у статевому розмноженні організмів?

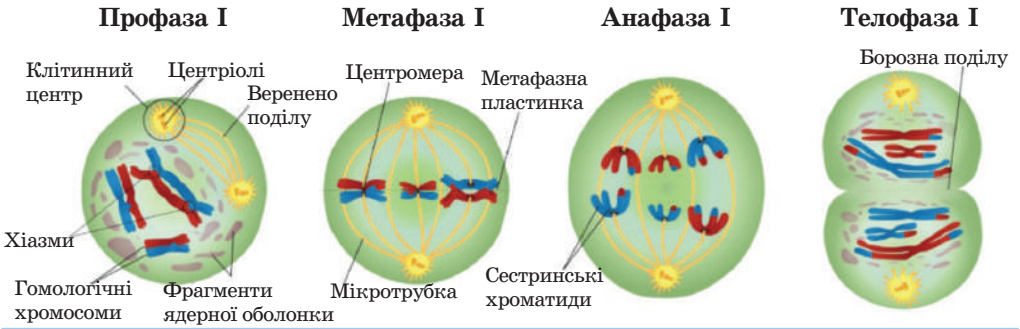
Мейоз — це редукційний поділ евкаріотичних клітин, внаслідок якого з однієї диплоїдної материнської клітини утворюються чотири генетично різні гаплоїдні дочірні клітини — *гамети* або *спори*. Мейоз складається з двох послідовних поділів: *мейоз I — редукційний поділ*, відбувається з редукцією (зменшенням вдвічі) кількості хромосом, і *мейоз II — екваційний поділ*, відбувається без попереднього подвоєння ДНК.

Інтерфаза

Перед початком мейозу I в інтерфазі відбувається реплікація хромосом і утворення сестринських хроматид у складі кожної хромосоми. Тепер кожна пара хромосом складається з 2 хромосом і 4 хроматид (2n 4c). У випадку людини n=23, а c=46, де n — кількість хромосом; c —кількість хроматид.

Мейоз I

У мейозі I з однієї диплоїдної материнської клітини (2n 4c) утворюється дві гаплоїдні дочірні клітини (1n 2c), відбувається редукція кількості хромосом. Мейоз I складається з чотирьох послідовних фаз: *профази I, метафази I, анафази I і телофази I* (мал. 26.1).



Мал. 26.1. Мейоз I

Профаза I: хромосоми конденсуються (ущільнюються) і стають видимі у світловий мікроскоп; відбувається *кон'югація* (злипання) гомологічних хромосом і утворення *тетрад*, що складаються з 4 хроматид; відбувається *кросинговер* — обмін аналогічними ділянками між гомологічними хромосомами, а точки на хромосомі, де такі обміни відбуваються безпосередньо, називають *хіазмами*; розчиняються ядерця і ядерна оболонка; утворюється веретено поділу.

Метафаза I: гомологічні двохроматидні хромосоми вишиковуються посередині клітини, але по обидва боки від її екваторіальної площини; до хромосом від полюсів клітини приєднуються нитки веретена поділу.

Анафаза I: нитки веретена поділу скорочуються і тягнуть по одній цілій хромосомі з кожної пари до протилежних полюсів клітини; хроматиди не роз'єднуються і хромосоми залишаються двохроматидними.

Телофаза I: формуються ядерні оболонки двох дочірніх ядер; хромосоми частково деспіралізуються; цитоплазма ділиться й утворюються дві дочірні клітини з гаплоїдними наборами хромосом.

Мейоз II

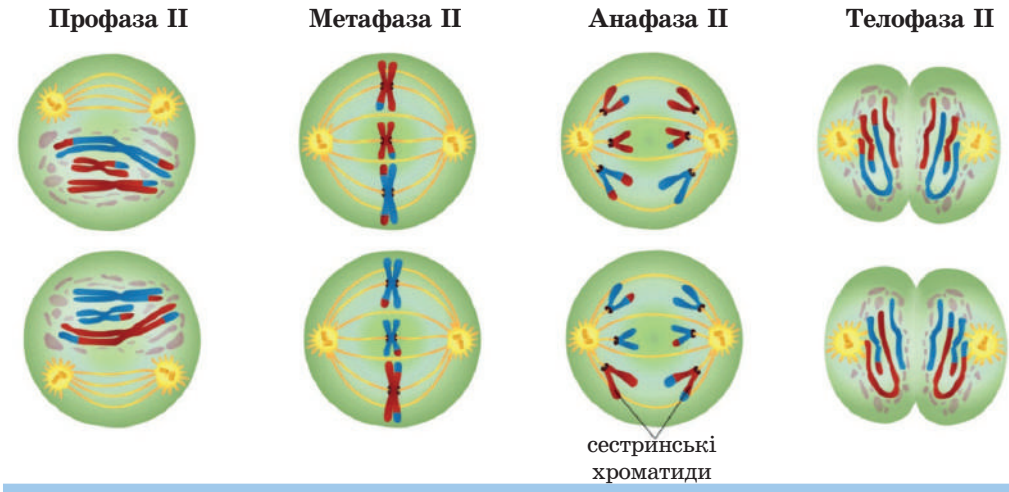
Після мейозу I дві клітини, що утворилися, без інтерфази і редуплікації ДНК відразу вступають у наступний поділ — *мейоз II* (мал. 26.2).

Профаза II: у ядрах двох клітин, що утворилися в мейозі I, хромосоми конденсуються (ущільнюються); розчиняються ядерця і ядерна оболонка; утворюється веретено поділу.

Метафаза II: двохроматидні хромосоми розміщуються в екваторіальній площині клітини, до них прикріплюються нитки веретена поділу.

Анафаза II: сестринські хроматиди кожної хромосоми розходяться до полюсів клітин як самостійні хромосоми.

Телофаза II: навколо груп хромосом на полюсах клітин утворюються ядерні оболонки, відбуваються цитокінези.



Мал. 26.2. Мейоз II

А чи знаєте ви...

Тривалість мейозу може значно варіювати в різних організмів. Наприклад, у людини профаза I мейозу в жіночих статевих клітинах може тривати десятиліттями — від періоду ембріонального розвитку до овуляції. У деяких рослин, наприклад лілії, профаза I триває всього 8–10 діб.

Біологічне значення мейозу

Біологічне значення мейозу полягає в забезпеченні статевого розмноження та генетичної різноманітності живих організмів. Процеси мейотичного поділу клітин є ключовими для еволюції органічного світу та пристосування організмів до змінних умов навколишнього середовища.

Редукція кількості хромосом під час мейозу та утворення гамет з гаплоїдним набором хромосом має значення для статевого процесу та запліднення. Чоловіча і жіноча гамети передають зиготі по одній хромосомі з кожної пари, і так в зиготи відновлюється диплоїдний набір хромосом. Отже, кожний організм, що утворився шляхом статевого розмноження, має в ядрах своїх клітин половину хромосом від батьківського організму й іншу половину — від материнського.

Забезпечення генетичної різноманітності. Мейоз створює унікальні комбінації генів, тому що в профазі I відбувається кросинговер, в анафазі I до дочірніх клітин випадково розходяться хромосоми, в анафазі II до дочірніх клітин випадково розходяться хроматиди. Таким чином кожна гамета отримує унікальний набір генів. У людини 23 пари хромосом — отже, кількість можливих комбінацій гамет без урахування кросинговеру $2^{23} \approx 8{,}4$ млн варіантів.

Мейоз — це *основна умова статевого розмноження*, оскільки саме у процесі мейозу утворюються гамети; мейоз *має значення для нестатевого розмноження*, оскільки шляхом мейозу утворюються спори у вищих спорових рослин і в деяких грибів.

Мейоз **забезпечує сталість каріотипів** видів організмів. Саме завдяки мейозу кількість хромосом у ядрах клітин залишається сталою.

Репарація ДНК — під час кросинговеру відбувається виправлення пошкоджень у молекулах ДНК.

Порушення мейозу та їх наслідки

Порушення нормального перебігу мейозу можуть призводити до виникнення серйозних генетичних аномалій. Найчастішою причиною є порушення розходження хромосом або хроматид під час мейозу. Наприклад, у людини найвідоміший приклад порушення мейозу — *синдром Дауна*. Він виникає внаслідок нерозходження під час мейозу хромосом 21-ї пари, що призводить до *трисомії* (наявності трьох хромосом у 21-й парі замість двох) у зиготи після запліднення. Синдром Дауна зустрічається з частотою приблизно 1 випадок на 700 новонароджених. Детальніше про наслідки порушення мейозу ви дізнаєтеся в наступному розділі.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/hrYU5Gug або за QR-кодом і виконайте практичну роботу: «Порівняльна характеристика процесів мітозу та мейозу».

Створіть лепбук «Мейоз».

1. Назвіть основні відмінності між мейозом I та мейозом II. У чому полягає біологічне значення кожного з них?
2. Чому профаза I мейозу є найтривалішою? Які процеси відбуваються під час профази I?
3. Яке біологічне значення кросинговеру та незалежного розходження хромосом і хроматид?
4. Які наслідки для організмів може мати порушення розходження хромосом під час мейозу?
5. Порівняйте процеси анафази мітозу, анафази I та анафази II мейозу. Яка основна відмінність?
6. Яке значення мітозу і мейозу у підтриманні сталості каріотипу виду?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ztJBqEa4 і виконайте вправи.

«Клітина — структурно-функціональна одиниця організмів»

1. Який тип мікроскопії дозволяє досліджувати живі прозорі клітини без попереднього фарбування?
   а) світлова *б)* флуорисцентна
   в) фазово-контрастна *г)* трансмісійна електронна
2. Які з наведених органел мають дві мембрани?
   а) ендоплазматична сітка і комплекс Гольджі *б)* лізосоми і пероксисоми
   в) мітохондрії і пластиди *г)* рибосоми і включення
3. На якому етапі клітинного циклу відбувається подвоєння ДНК?
   а) G_1-фаза *б)* S-фаза *в)* G_2-фаза *г)* профаза мітозу
4. Під час якого процесу клітина поглинає тверді частки або бактерії?
   а) піноцитозу *б)* екзоцитозу
   в) полегшеної дифузії *г)* фагоцитозу
5. Скільки молекул АТФ утворюється внаслідок повного окиснення однієї молекули глюкози в клітині?
   а) 2 *б)* 4 *в)* 36 *г)* 38
6. Де відбувається темнова фаза фотосинтезу?
   а) на мембранах тилакоїдів *б)* у стромі хлоропласта
   в) на кристах мітохондрій *г)* у цистернах комплексу Гольджі
7. Установіть відповідність між фазами мітозу та процесами, що в них відбуваються:

а) профаза	*1)* самоподвоюється ДНК
б) метафаза	*2)* хромосоми конденсуються, зникає ядерна оболонка
в) анафаза	*3)* хромосоми вишиковуються в екваторіальній площині клітини
г) телофаза	*4)* хроматиди розходяться до полюсів клітини
	5) формуються ядерні оболонки, з'являються ядерця

8. Установіть відповідність між фазою мейозу, подією, яка в ній відбувається, та її біологічним значенням

1. Профаза I	А. Кон'югація гомологічних хромосом і кросинговер	I. Утворення унікальних гамет
2. Анафаза I	Б. Розходження сестринських хроматид до полюсів клітини	II. Редукція хромосомного набору
3. Анафаза II	В. Утворення чотирьох гаплоїдних клітин	III. Створення генетичної різноманітності
4. Телофаза II	Г. Розходження цілих гомологічних хромосом до полюсів	IV. Забезпечення статевого розмноження

ТЕМА 3

ЗАКОНОМІРНОСТІ СПАДКОВОСТІ ТА МІНЛИВОСТІ ОРГАНІЗМІВ

27 ГЕНИ ТА ГЕНОМИ. БУДОВА ГЕНІВ ПРО- ТА ЕВКАРІОТІВ. ГЕНИ АЛЕЛЬНІ ТА НЕАЛЕЛЬНІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

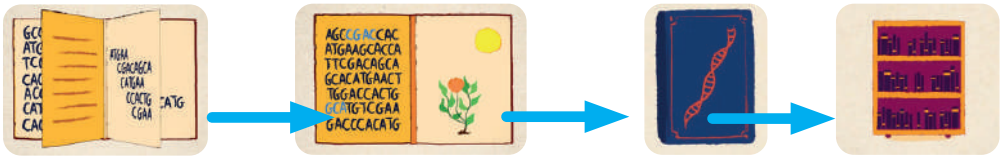
- що таке гени і геноми;
- як організований генетичний матеріал на молекулярному рівні;
- чим відрізняються геноми прокаріотів та евкаріотів;
- що таке алельні гени і чому алельних генів не можу бути у прокаріотів.

Протягом багатьох років учені розмірковували над природою інформації, яка керує діяльністю клітин, які молекули переносять цю інформацію і як вона передається від одного покоління до наступного. Ключові експерименти, проведені на початку XX століття, переконливо довели, що ця генетична інформація переноситься ДНК.

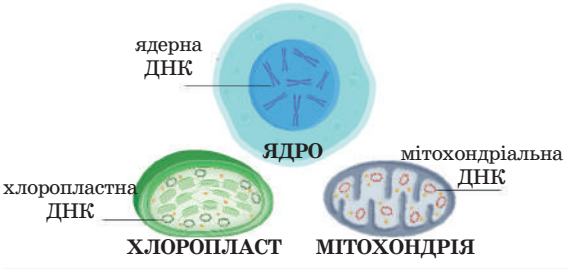
ДНК — це ланцюг парних хімічних одиниць (нуклеотидів), чотирьох різних типів (А, Г, Ц, Т), що містить інформацію, організовану в одиниці, які називають генами. Гени зазвичай надають інструкції для створення білків, які надають клітинам та організмам їхні функціональні характеристики. Є група неклітинних форм життя, в яких генетична інформація записана не в ДНК, а в РНК. Це РНК-вмісні віруси й віроїди.

Геном

Геном — це вся послідовність нуклеотидів у ДНК, яка міститься у всіх хромосомах клітини. Якщо уявити, що ген — короткий абзац книги, який містить рецепт про побудову білка, то хромосомою буде вуся книга, разом іздодатками, що описують, як користуватися цими рецептами. Бібліотека з таких книг сформує геном (мал 27.1).



Мал. 27.1. Аналогія організації геному



Мал. 27.2. ДНК у клітині

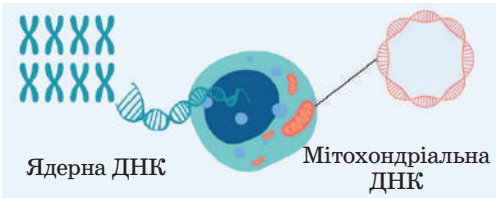
В евкаріотів, більшість ДНК знаходиться в ядрі (ядерна ДНК). Мітохондрії містять власну мітохондріальну ДНК, а хлоропласти — хлоропластну ДНК (мал 27.2).

А чи знаєте ви...

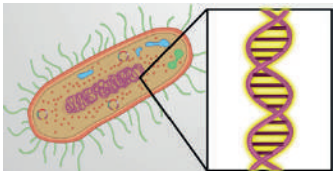
Якщо витягнути ДНК з однієї клітини, вона матиме довжину ≈2 метри. А якщо з усіх клітин — вистачить, щоб кілька разів обмотати Землю навколо екватора.

Кількість ДНК, що міститься в мітохондріях та хлоропластах, набагато менша, ніж кількість, що міститься в ядрі. (мал. 27.3).

У прокаріотів більша частина ДНК знаходиться в нуклеоїді , кільцевій молекулі ДНК, яка функціонує подібно до ядра, але не оточена мембраною (мал. 27.4).



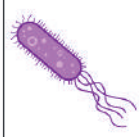
Мал. 27.3. Порівняння ядерної ДНК і мітохондріальної ДНК



Мал. 27.4. Нуклеоїд — кільцева молекула ДНК прокаріотів

Зверніть увагу, що хлоропластна та мітохондріальна ДНК теж кільцеві, як і у прокаріотів.

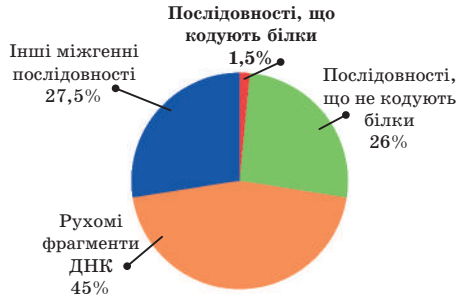
Здавалося б що якщо гени визначають білки, то чим більше білків виробляє організм, тим більшим буде його геном. Насправді, порівнння геномів показує, що не існує прямого зв'язку між складністю організму та розміром його геному (мал. 27. 5).

ВИДИ	Escherichia coli (кишкова паличка)	Gaiius gallus (курка)	Homo sapiens (людина розумна)	Daphnia pulex	Oryza sativa
Кількість генів	≈ 4200	≈ 17 000	≈ 21 000	≈ 31 000	≈ 38 000
					

Мал. 27.5. Порівняння геномів різних видів

Необхідно визнати, що не вся ДНК складається з генів. У геномі людини менше 2% від загальної кількості ДНК є тим типом послідовності, яка кодує синтез білків (мал. 27.6).

Некодувальну ДНК у геномах вважали марною та описували як «сміттєву ДНК», хоча дивувало те, що, здавалося, було так багато «непотрібних» послідовностей. Однак нещодавні відкриття показали, що значна частина цієї так званої «сміттєвої ДНК» може відігравати важливу роль в еволюції, а також у регуляції експресії генів. Коли ген вико-



Мал. 27.6. Компоненти послідовностей, що складають геном людини

ристовуєтьсяв клітині, кажуть, що ген експресується. Простіше кажучи, ген вмикається, і інформація, що міститься в ньому, використовується для створення білка або іншого генного продукту.

Якщо повернутися до аналогій моделювання геному через рецепти чи інструкції у книзі, то експресією можна назвати продукт, який отриманий згідно цих інструкцій.

За функціональним значенням бувають структурні і регуляторні.

Мал. 27.7. Гени за функціональним значенням

Структурні — кодують білок або РНК (мал. 27.7).

Регуляторні — визначають початок, швидкість і послідовність процесів експресії генів.

Розміри регуляторних генів, як правило, незначні — кілька десятків пар нуклеотидів, структурних — сотні й тисячі нуклеотидів.

Згідно попередніх аналогій, де букви у словах — нуклеотидні послідовності, абзаци з інструкціями — гени, книги — хромосоми, а бібліотека — геном, можемо уявити, що виробниче підприємство з величезною кількістю приміщень — організм. Так от, у кожному приміщенні (кабінеті, цеху, диспетчерській) є повна бібліотека з усіма інструкціями. Але далеко не всі інструкції використовуються в кожному з них.

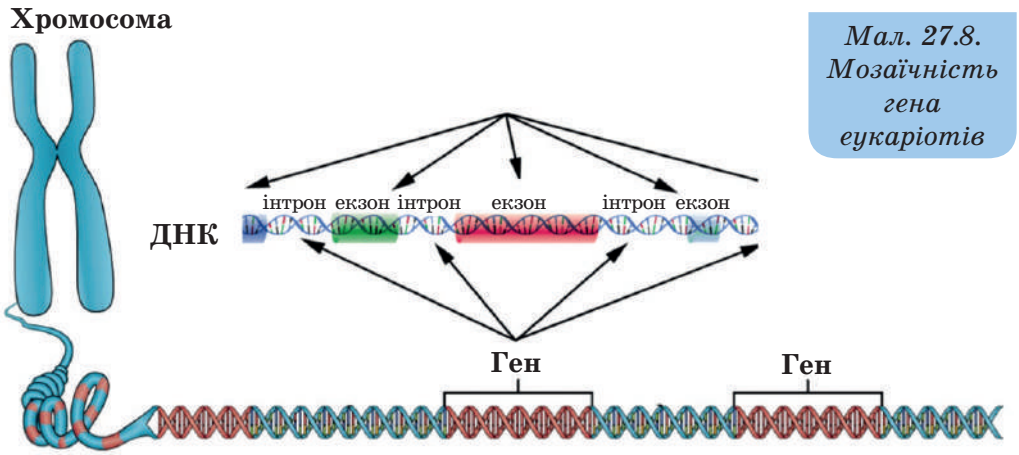
За активністю гени поділяють на **конститутивні**, або «гени домашнього господарства» і **неконститутивні**, або «гени розкоші».

Конститутивні. Працюють постійно у всіх клітинах організму. Відповідають за: синтез основних білків, утворення АТФ.
Вони активні завжди — бо клітина завжди має «жити, дихати і їсти».

Неконститутивні. Вмикаються лише при потребі і тільки в певних клітинах. Відповідають за: спеціалізовану роботу клітини, реакцію на сигнали ззовні, адаптацію до змін. Не працюють постійно.

Геноми евкаріотів і прокаріотів однаково складаються з генів, але мають і суттєві відмінності.

Гени евкаріотів містяться у хромосомах і мають мозаїчну будову. Ген евкаріотів містить ділянки, які кодують спадкову інформацію — **екзони**, і містить ділянки, які її не кодують, — **інтрони** (мал. 27. 8).



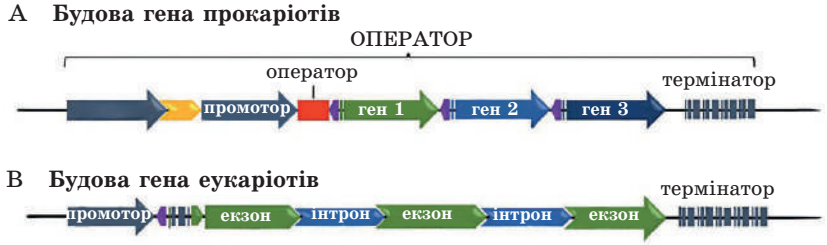
Мал. 27.8. Мозаїчність гена еукаріотів

Гени ж прокаріотів містяться у кільцевій ДНК — нуклеоїді і в більшості не мають екзонно-інтронної організації.

Усі гени складаються з кількох основних частин:

- промотор — початок гена, який не кодує білок, але саме тут починається зчитування інформації — така собі «стартова кнопка»;
- структурна частина;
- термінатор — ділянка, яка завершує зчитування гена.

Хоча гени у прокаріотів та евкаріотів виконують одну функцію — зберігають і передають інструкції для синтезу білків, — спосіб їхньої організації суттєво відрізняється. Як ми вже згадували, ген евкаріотів містить інтрони й екзони. Крім того, в евкаріотів перед кожним геном є свій промотор. А от у прокаріотів гени часто об'єднані в **оперони** — ділянки з декількох генів, об'єднаних одним промотором (мал. 27.9).



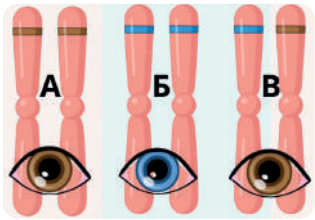
Мал. 27.9. Будова прокаріотичного та евкаріотичного гена

Отож, ген — це ділянка ДНК, яка несе інструкцію для створення певної ознаки, наприклад, кольору очей, групи крові чи форми носа. Гени ми успадковуємо від наших батьків. Половину набору генів від мами, а половину — від тата. Ген може мати декілька версій — алелей.

Алель — варіант ознаки одного і того ж гена. Так, ген кольору очей може мати алелі блакитного кольору очей, чи карого кольору.

Кожна людина має 2 копії кожного гена: одну — від мами й одну — від тата. Ці копії можуть бути однакові або різні. Зрозуміло, що якщо в людини обидва алелі визначають однаковий колір, то райдужка буде саме такого забарвлення.

А що буде, коли один алель відповідає за карий колір, а другий — за блакитний? Це залежатиме від того, який алель є домінантним, а який рецесивним.



Мал. 27.10. Прояв алелей гена пігментації райдужки очка

Домінантний — алель, який проявляється, навіть якщо він лише один, пригнічуючи прояв рецесивного. **Рецесивний** же проявляється у випадку, коли тільки він присутній в обох гомологічних хромосомах, бо у випадку присутності домінантного він не проявляється (мал. 27.10).

А чи знаєте ви...

Близько 8% геному людини — це ендогенні ретровіруси. Це фрагменти вірусної ДНК, які вбудувалися в геном наших предків мільйони років тому. Деякі з них стали нам у пригоді: наприклад, ген Syncytin допомагає формувати плаценту — і він має вірусне походження.

Скористайтеся віртуальною лабораторією для дослідження ДНК, перейшовши за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/utJNZnXB

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ZtJBsQ2g і виконайте вправи.

28 ГЕНЕТИЧНИЙ КОД ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ. РЕАЛІЗАЦІЯ СПАДКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В КЛІТИНІ: БІОСИНТЕЗ БІЛКОВИХ МОЛЕКУЛ ТА ЙОГО ЕТАПИ (ПРОЦЕСИ ТРАНСКРИПЦІЇ ТА ТРАНСЛЯЦІЇ)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке генетичний код і як він дозволяє «розшифрувати» послідовності ДНК;
- властивості генетичного коду;
- етапи біосинтезу білка, місце й умови цих процесів.

Ви коли-небудь писали таємне повідомлення комусь зі своїх друзів? Якщо так, можливо, ви використовували код, щоб приховати повідом-

лення. Наприклад, ви могли замінити літери слова цифрами або символами, дотримуючись певного набору правил. Щоб ваш друг зрозумів повідомлення, йому потрібно знати код і застосувати той самий набір правил, щоб розшифрувати його.

Таке розшифрування є ключовим кроком в експресії генів, під час якого інформація з гена зчитується для побудови білка.

Гени, що надають інструкції для білків, експресуються у два основні етапи: **транскрипцію** і **трансляцію**.

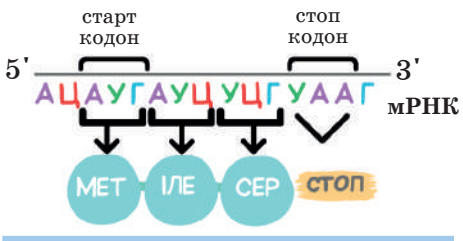
- Під час *транскрипції* послідовність ДНК гена «переписується» в РНК. В евкаріотів ця РНК повинна пройти додаткові етапи обробки, щоб стати матричною РНК (мРНК).
- При *трансляції* послідовність нуклеотидів у мРНК «перетворюється» на послідовність амінокислот у поліпептиді (білковому ланцюгу).

Клітини декодують мРНК, зчитуючи їхні нуклеотиди групами по три, які називають **кодонами**.

Ось деякі *особливості кодонів*:

- більшість кодонів визначають амінокислоту;
- три «стоп-кодони» —УАГ, УГА, УАА — позначають кінець синтезу білка;
- один «стартовий» кодон — АУГ — позначає початок синтезу білка; а також кодує амінокислоту метіонін.

Кодони в мРНК зчитуються під час трансляції, починаючи зі стартового кодона і продовжуючи до досягнення стоп-кодона. Кодони мРНК зчитуються від 5′ до 3′, і вони визначають порядок амінокислот у білку.



Мал. 28.1. Триплети кодують амінокислоту, або стоп-сигнал

Зверніть увагу, що старт-кодон кодує амінокислоту, а стоп-кодони — ні.

Трансляція включає зчитування нуклеотидів мРНК групами по три — триплетами. Кожен триплет визначає амінокислоту (або забезпечує стоп-сигнал, що вказує на завершення трансляції) (мал. 28.1).

Повний набір взаємозв'язків між кодонами та амінокислотами (або стоп-сигналами) називають генетичним кодом. Генетичний код зведено в таблицю (мал. 28.2).

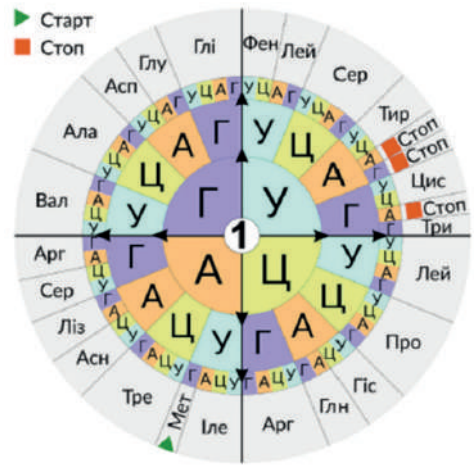
Щоб побачити, як працювати з таблицею кодонів, розглянемо приклад. Припустимо, що нас цікавить кодон ЦАГ, і ми хочемо знати, яку амінокислоту він визначає.

- Вісь з лівого боку відповідає першій літері кодона, тому ми знаходимо Ц вздовж лівої осі.
- Верхня вісь позначає другу літеру кодона, тому вздовж верхньої осі ми знаходимо літеру А.
- Знайшовши третій нуклеотид кодона на осі перетину, ви можете ви-

значити точний рядок у прямокутнику, де знаходиться ваш кодон. Наприклад, якщо ми шукаємо Г на цій осі в нашому прикладі вище, ми виявимо, що ЦАГ кодує амінокислоту глутамін (Глн).

1-й	2-й У	2-й Ц	2-й А	2-й Г	3-й
У	УУУ, УУЦ — Фен; УУА, УУГ — Лей	УЦУ, УЦЦ, УЦА, УЦГ — Сер	УАУ, УАЦ — Тир; УАА, УАГ — Стоп	УГУ, УГЦ — Цис; УГА — Стоп; УГГ — Триптофан	У, Ц, А, Г
Ц	ЦУУ, ЦУЦ, ЦУА, ЦУГ — Лей	ЦЦУ, ЦЦЦ, ЦЦА, ЦЦГ — Про	ЦАУ, ЦАЦ — Гіс; ЦАА, ЦАГ — Глн	ЦГУ, ЦГЦ, ЦГА, ЦГГ — Арг	У, Ц, А, Г
А	АУУ, АУЦ, АУА — Іле; АУГ — Метіонін	АЦУ, АЦЦ, АЦА, АЦГ — Тре	ААУ, ААЦ — Асн; ААА, ААГ — Ліз	АГУ, АГЦ — Сер; АГА, АГГ — Арг	У, Ц, А, Г
Г	ГУУ, ГУЦ, ГУА, ГУГ — Вал	ГЦУ, ГЦЦ, ГЦА, ГЦГ — Ала	ГАУ, ГАЦ — Асп; ГАА, ГАГ — Глу	ГГУ, ГГЦ, ГГА, ГГГ — Глі	У, Ц, А, Г

Мал. 28.2. Таблиця кодонів генетичного коду



Мал. 28.3. Кругова діаграма кодонів генетичного коду

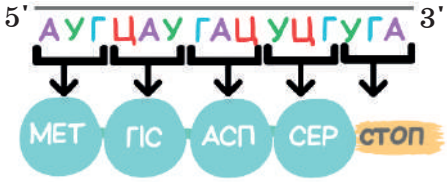
У круговій діаграмі мал. 28.3 перший нуклеотид знаходимо у внутрішньому колі й обмежуємо пошуки сектором, у центрі якого знаходиться Ц. У наступному колі цього ж сектора знаходимо А і в зовнішньому колі в межах сектора А знаходимо Г.

Зверніть увагу, що багато амінокислот представлені в таблиці більш ніж одним кодоном. Наприклад, існує шість різних способів «записати» лейцин мовою мРНК. Перевірте, чи зможете ви знайти всі шість.

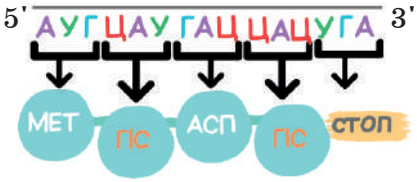
Властивості генетичного коду (мал. 28.4, 28.5).

- **Універсальність.** У більшості організмів однакові кодони кодують однакові амінокислоти: від бактерій до людини.
- **Триплетність.** Кожна амінокислота кодується трьома нуклеотидами (кодоном).
- **Однозначність.** Один кодон кодує лише одну амінокислоту.
- **Надлишковість** (виродженість). Одна амінокислота може кодуватися кількома різними кодонами. Наприклад, гістидин — це амінокислота, яка кодується як кодонами ЦАУ, так і ЦАЦ.

- **Неперекривність.** Генетичні кодони не перекриваються, його нуклеотиди не можуть одночасно входити до двох різних триплетів.
- **Безперервність.** Кодони зчитуються послідовно, без пропусків або перекриттів. Простими словами, генетичний код не має розділових знаків.



Мал. 28.4. Генетичний код триплетний, однозначний, неперекривний, безперервний



Мал. 28.5. Генетичний код надлишковий

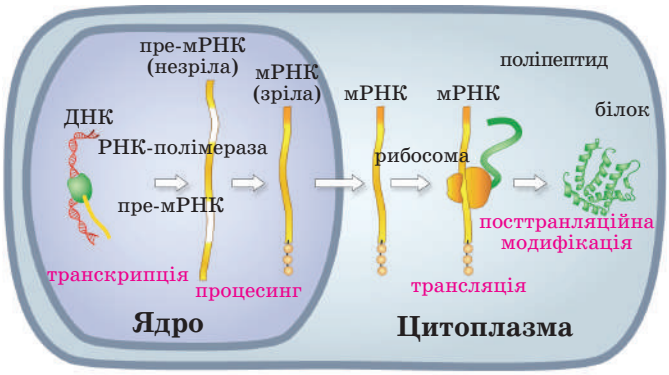
Вся закодована інформація про будову білка знаходиться в ядрі (якщо ми говоримо про евкаріоти).

Які органели беруть участь у біосинтезі білка? Де вони знаходяться?

Рибосоми знаходяться в цитоплазмі: у цитозолі, або на гранулярній ЕПС. Як же інструкції про відтворення структури білка потрапляють до місця, де він синтезується?

Уявіть, що вам у подорожі терміново знадобилося приготувати страву, рецепт якої знаходиться лише у вас вдома. Таких рецептів вдома багато. Мама дуже ними дорожить і категорично забороняє виносити з дому. А ще її телефон має обмеження в довжині повідомлень і підтримує лише піктограми. Але вона таки надсилає вам потрібне повідомлення. Якщо ви знаєте код значення піктограм, то легко розпізнаєте рецепт. Проблема вирішена.

У клітинах транскрипція — це процес, що нагадує копіювання рецепта, а повідомлення — транскрипт матричної РНК. Транскрипт мРНК — це один ланцюг РНК, який копіює інформацію, що міститься в гені. Такий собі портативний ген: менший і рухливіший за ДНК, але містить ту саму інформацію, — незріла мРНК (мал. 28.6).

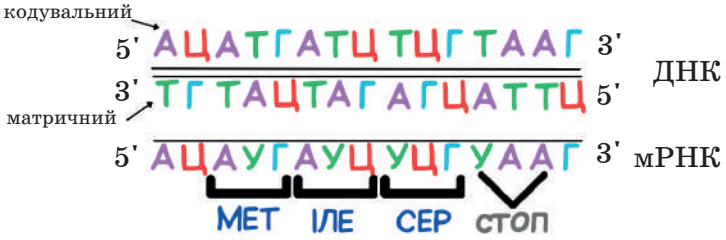


Мал. 28.6. Біосинтез білка

Транскрипція є матричним синтезом, де матрицею виступає ДНК. Матриця — це шаблон, зразок, на основі якого створюються однакові продукти. Наприклад, матрицею є формочка для печива чи печатка, якою можна зробити багато однакових відбитків. Пригадайте таку властивість ДНК, як реплікація. Це теж матричний синтез, і теж матрицею для нього є ДНК. Тільки продукти в цих процесах різні. У реплікації: ДНК → ДНК, а у транскрипції ДНК → РНК.

У молекулі ДНК ланцюги антипаралельні. Пригадайте, що це означає.

Транскрибується лише ланцюг 3′→5′. Його називають матричним або транскрибованим. Антипаралельний ланцюг 5′→3′ називають кодувальним (кодогенним) або нетранскрибованим. Новостворена мРНК буде ідентичною саме йому, де лише Тимін буде заміненим на Урацил. (мал. 28.7).



Мал. 28.7. Антипаралельні ланцюги молекули ДНК у біосинтезі білка

РНК, яка утворилася, не може бути функціональною, бо містить інтрони (ділянки, що не кодують білок), а також вона не захищена від ферментів, що можуть її зруйнувати в цитоплазмі. Тому цю молекулу називають первинною мРНК, або пре-мРНК. Пре-мРНК має бути оброблена, перш ніж вона зможе вийти з ядра. Така обробка має назву процесинг і має дві фази: захист та сплайсинг. Під час захисту до кожного кінця мРНК додаються нуклеотидні послідовності, щоб захистити його від руйнування. Мета ж сплайсингу полягає у видаленні інтронів з мРНК. Адже інтрони не містять жодної інформації про те, як будувати білок. Так мРНК стає зрілою мРНК (мал. 28.6).

А чи знаєте ви...

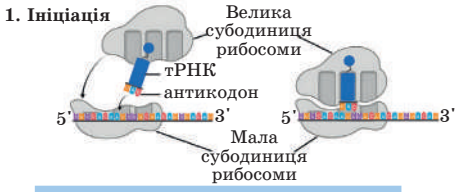
Те, що дезоксирибоза замінюється рибозою, а тимін — урацилом у мРНК полегшує її функціонування та здатність залишати ядро. Це робить РНК структурно гнучкою порівняно з ДНК. Підвищена гнучкість є вирішальною для того, щоб мРНК могла приймати різні конформації, необхідні для взаємодії з рибосомами та іншими клітинними механізмами. Крім того, урацил, який замінює тимін у РНК, простіше синтезувати, ніж тимін. Тимін більше стабілізує ДНК, знижуючи частоту мутацій для тривалого зберігання генетичних даних, а РНК є короткоживучою та тимчасовою.

Коли зріла мРНК виходить із ядра в цитоплазму вона зв'язується з рибосомами й активується наступний етап: **трансляція**.

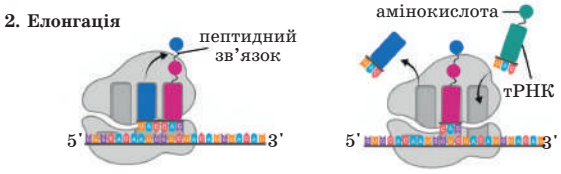
Трансляція у свою чергу відбувається у три етапи.

Ініціація. Трансляція починається зі стартового кодону АУГ, який кодує амінокислоту метіонін і сигналізує рибосомі про початок трансляції. Стартовий кодон розпізнає тРНК, яка несе метіонін. Мала рибосомна субодиниця зв'язується з мРНК поблизу 5'-кінця, скануючи стартовий кодон АУГ Потім приєднується велика рибосомна субодиниця (мал. 28.8).

Елонгація. Рибосома, рухаючись вздовж мРНК, каталізує утворення пептидного зв'язку між амінокислотами, які підносяться відповідними тРНК. тРНК зчитує інформацію за допомогою триплета її нуклеотидів, який має назву **антикодон** і є комплементарним кодону (мал. 28.9).

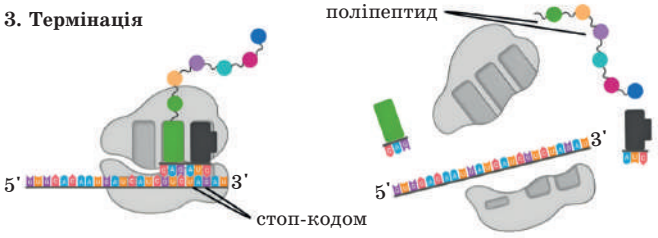


Мал. 28.8. Ініціація



Мал. 28.9. Елонгація

Термінація. Трансляція триває, доки рибосома не досягне стоп-кодону — УАА, УАГ або УГА. Ці кодони не кодують жодної амінокислоти, а сигналізують про кінець трансляції (мал. 28.10).



Мал. 28.10. Термінація

Поліпептид готовий. Але це ще не зовсім білок.

Пригадайте, які є структури білка, і в яких з них білок може бути функціональним.

У результаті трансляції утворився білок у своїй первинній структурі, тому для того, щоб він зміг виконувати свої функції, йому потрібно набути певної структури (конформації).

Це останній етап біосинтезу, який називають посттрансляційною модифікацією (мал. 28.6). Крім того, на цьому етапі відбувається приєднання додаткових функціональних груп до молекули.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/DrUZS2zU або за QR-кодом і виконайте практичну роботу: «Розв'язання елементарних вправ з реплікації, транскрипції та трансляції».

1. Що таке кодон?
2. Яка роль старт-кодона АУГ у трансляції?
3. Які властивості має генетичний код?
4. Чому генетичний код називають однозначним і надлишковим одночасно?
5. У ділянці мРНК було встановлено таку послідовність нуклеотидів:
   5′ – ААА ЦАЦ АУГ ЦАЦ ГАУ УАА – 3′
   Визначте, яку амінокислотну послідовність буде синтезовано в результаті трансляції.
   Як зміниться структура білка, якщо замість ГАУ у послідовності буде ГАГ?
6. Уявіть, що під час біосинтезу білка відбувся зсув рамки зчитування. Поясніть, які наслідки це може мати для структури й функції білка.
7. Кодувальний ланцюг (той, що НЕ є матрицею для РНК): 5′ – АТГ ЦАТ ААА ГАА ЦГУ ТТГ ТГА – 3′
   - Запишіть комплементарний матричний ланцюг ДНК (антипаралельний).
   - Визначте послідовність мРНК, яка буде синтезована на матричному ланцюзі.
   - Визначте антикодони відповідних тРНК.
   - Визначте послідовність амінокислот, що буде синтезована (використовуйте таблицю генетичного коду).
   - Чому останній триплет у мРНК не буде трансльовано у жодну амінокислоту?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ftJBf4Jj і виконайте вправи.

29 ФОРМУВАННЯ ФЕНОТИПУ ОРГАНІЗМІВ ЯК РЕЗУЛЬТАТ ВЗАЄМОДІЇ ГЕНОМУ З УМОВАМИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке фенотип і як він пов'язаний з генотипом;
- чому організми з різним генотипом можуть мати однаковий фенотип;
- чому організми з однаковим генотипом можуть мати різний фенотип.

Мал. 29.1. Монозиготні близнюки

Ми всі унікальні. Навіть монозиготні близнюки, які є генетично ідентичними, завжди мають певні відмінності у зовнішньому вигляді та поведінці (мал. 29.1). Ця унікальність є результатом взаємодії між нашим генетичним складом, успадкованим від батьків, та впливом навколишнього середовища з моменту нашого зачаття.

Вільгельм Йоганнсен, учений, який працював у Данії наприкінці XIX та на початку XIX століть, під час серії експериментів спостерігав варіації в генетично ідентичних бобах. Він дійшов висновку, що варіації мають бути зумовлені факторами навколишнього середовища, і в 1911 році ввів терміни «генотип» та «фенотип».

Генотип

Генотип — це генетичний склад окремого організму. Ваш генотип функціонує як набір інструкцій для росту та розвитку вашого тіла. Слово «генотип» зазвичай використовується, коли йдеться про генетику певної ознаки (наприклад, кольору очей).

Фенотип

Фенотип — це спостережувані фізичні або біохімічні характеристики окремого організму, що визначаються як генетичною схильністю, так і впливом навколишнього середовища, наприклад, зростом, вагою та кольором шкіри вашого тіла.

Термін «генотип» зазвичай використовують для позначення певних алелів. Пригадайте. Алелі — це альтернативні форми одного й того ж гена , які займають одне й те саме місце на хромосомі. У будь-якому заданому локусі (місце розташування гена у хромосомі) є 2 алелі (по одному на кожній хромосомі з пари). Ви отримуєте 1 алель від матері та 1 від батька. Ці 2 алелі можуть бути однаковими або різними. Різні алелі гена зазвичай виконують одну й ту ж функцію (наприклад, вони кодують білок, який впливає на колір очей), але можуть призводити до різних фенотипів (наприклад, блакитні або карі очі) залежно від того, який набір з 2 алелів у вас є.

На зображенні троє кошенят з трьома різними генотипами, але лише двома фенотипами (мал. 29.2).

Мал. 29.2. Кошенята від одних батьків з різними генотипами

Кожна пара алелів представляє генотип конкретної особини, і в цьому випадку існує три можливих генотипи: гомозиготний домінантний, коли обидва алелі домінантні; гомозиготний рецесивний, коли обидва алелі рецесивні; і гетерозиготний, коли один алель домінантний, а другий рецесивний.

У наведеному прикладі в гетерозиготному поєднанні проявляється домінантна ознака, тому двоє кошенят мають чорне забарвлення хутра.

Наші гени несуть інструкції для росту та розвитку нашого тіла. Однак, на наш фенотип впливають фактори навколишнього середовища під час ембріонального розвитку та протягом усього життя. Фактори навколишнього середовища численні та різноманітні, зокрема дієта, клімат, хвороби та стрес.

Фенотип може визначатися генетичним складом організму (генотипом) або впливом навколишнього середовища, хоча більшість ознак є результатом поєднання обох факторів.

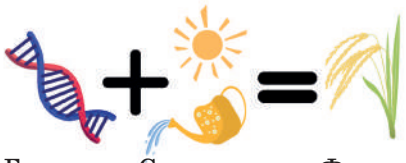
Тільки генотип: група крові, колір очей, певні генетичні захворювання (такі як гемофілія).

Тільки середовище: клітинні травми (обмороження), деякі інфекційні захворювання (проказа).

Поєднання генотипу і середовища: колір шкіри, зріст, вага, певні метаболічні стани (діабет).

Ступінь, до якого фенотип визначають генотипом, називають «фенотиповою пластичністю». Якщо фактори навколишнього середовища мають сильний вплив, фенотипова пластичність висока. Якщо генотип можна використовувати для надійного прогнозування фенотипу, фенотипова пластичність низька.

Тривале перебування на сонці змушує одних людей засмагати, а інших — обгорати, і те, як ми реагуємо на сонце, є результатом нашого генотипу. Однак, ніхто не народжується засмаглим чи обгорілим на сонці. Швидше, ультрафіолетове випромінювання сонця активує наші гени, виробляти пігмент, який робить темнішою шкіру.



Мал. 29.3. Фенотип особини створюється поєднанням її генотипу та умов навколишнього середовища

На завершення, ваш генотип або генетичний склад відіграє вирішальну роль у нашому розвитку. Однак фактори навколишнього середовища впливають на наші фенотипи протягом усього нашого життя, і саме ця постійна взаємодія між генетикою та навколишнім середовищем робить нас усіх унікальними.

1. Які фактори впливають на формування фенотипу?
2. Що таке алелі і як вони пов'язані з генотипом?
3. Як називається ступінь залежності фенотипу від генотипу?
4. Яке з наведених нижче тверджень точно відображає зв'язок між генотипом, середовищем та фенотипом?
   - Фенотип і середовище працюють разом, щоб сформувати генотип індивіда.
   - Генотип залежить від середовища, але фенотип — ніколи.
   - Генотип і середовище працюють разом, щоб сформувати фенотип індивіда.
   - Фенотип знаходиться під контролем генотипу, незалежно від середовища організму.
5. Чому неможливо повністю передбачити фенотип людини лише за її генотипом?
6. Як довкілля може вплинути на реалізацію спадкової схильності до ожиріння?
7. Чому діти в одній родині можуть мати різний зріст і вагу, навіть якщо харчуються однаково?

8. Уявіть, що агрохолдинг вирощує однаковий сорт пшениці в різних регіонах України. Поясни, чому врожайність і вигляд рослин можуть значно відрізнятися, хоча генотип однаковий.
9. Наведи приклад хвороби, що має генетичну природу, але її прояв залежить від зовнішніх факторів. Поясніть, як це демонструє взаємодію геному і середовища.
10. Розробіть схему чи інфографіку, що пояснює, як на прикладі однієї ознаки (наприклад, маси тіла) взаємодіють гени та чинники довкілля.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/2tJBgP2f і виконайте вправи.

30 МЕТОДИ ГЕНЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ: КЛАСИЧНІ ТА СУЧАСНІ

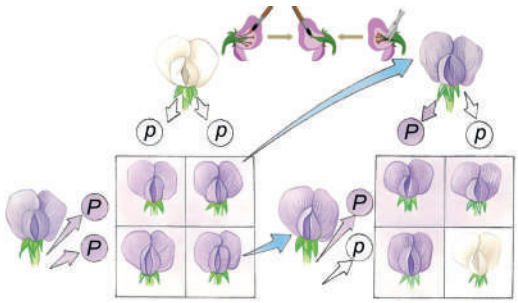
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що вивчає генетика;
- основні методи, що застосовуються в генетичних дослідженнях;
- які методи дозволяють розкривати таємниці спадковості, виявляти мутації, діагностувати хвороби.

Генетика — це наука про спадковість та мінливість. Спадковість — це здатність потомства набувати ознак та особливостей розвитку батьків. Мінливість — це протилежність спадковості, оскільки вона проявляється як здатність до змін спадкових факторів або варіацій у їхньому виявленні під час розвитку організму.

Наукова історія генетики почалася з праць *Грегора Менделя* в середині XIX століття.

Генетичні дослідження здійснюють у напрямках вивчення матеріальних носіїв спадкової інформації — генів, а також закономірностей її зберігання і передачі нащадкам, дослідження залежності проявів спадкової інформації від умов довкілля, встановлення причин змін спадкової інформації та механізмів їх виникнення, вивчення генетичних процесів, які відбуваються у популяціях організмів.



Гібриди першого покоління Гібриди другого покоління

Мал. 30.1. Гібридологічний метод

Гібридологічний метод полягає у схрещуванні (гібридизації) організмів, які відрізняються за певними станами однієї чи кількох спадкових ознак. Нащадків, одержаних від такого схрещування, називають *гібридами*. Гібридизація лежить в основі гібридологічного аналізу — дослідження характеру успадкування станів ознак з допомогою системи схрещувань (мал. 30.1).

Генеалогічний метод полягає у вивченні родоводів організмів. Використання цього методу можливе лише в тому випадку, коли відомі прямі родичі — батьки — власники спадкової ознаки (пробанда) по материнській і батьківській лініях у ряді поколінь або нащадки пробанда також у декількох поколіннях. Пробанд — людина, з якої починається генетичне обстеження сім'ї та складання родоводу. При складанні родоводів у генетиці використовують певну систему позначень. Після складання родоводу проводять її аналіз з метою встановлення характеру успадкування ознаки, що вивчається (мал. 35.6-9).

Близнюковий метод полягає у вивченні однояйцевих близнят. Близнятами називають одночасно народжених дітей. Вони бувають монозиготними (однояйцевими) і дизиготними (різнояйцевими).

Монозиготні близнята розвиваються з однієї зиготи, яка на стадії дроблення розділилася на дві (або більше) частин. Тому такі близнята генетично ідентичні і завжди однієї статі. Монозиготні близнята характеризуються великим рівнем схожості (конкордантності) за багатьма ознаками (табл. 30.1).

Таблиця 30.1

Порівняння конкордантності деяких ознак між однояйцевими та різнояйцевими близнятами

Ознака	Однояйцеві близнята (% конкордантності)	Різнояйцеві близнята (% конкордантності)
Колір волосся	79	22
Колір очей	99.6	28
Кров'яний тиск	63	36
Праворукість / ліворукість	79	77
Туберкульоз	53	22
Рак молочної залози	6	3
Шизофренія	80	13
Біполярний афективний розлад	80	20

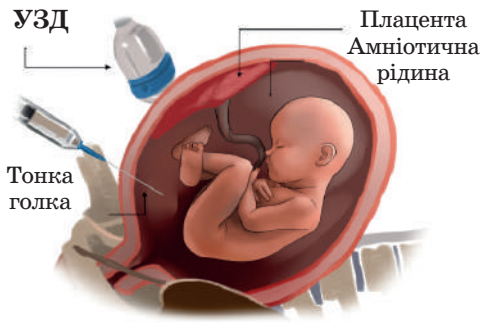
За всіма наведеними ознаками конкордантність у монозиготних близнят значно вища, ніж у дизиготних, однак вона не є абсолютною.

Різний прояв ознаки однояйцевих близнят виникає в результаті порушень внутрішньоутробного розвитку одного з них або під впливом зовнішнього середовища, якщо вона була різною. Завдяки близнюковому методу, була з'ясована спадкова схильність людини до ряду захворювань: шизофренії, розумової відсталості, епілепсії, цукрового діабету та інших.

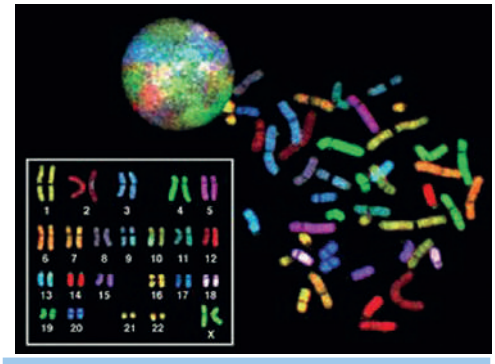
Спостереження за монозиготними близнятами дають матеріал для з'ясування ролі спадковості і середовища в розвитку ознак. Причому під зовнішнім середовищем розуміють не тільки фізичні фактори середовища, а й соціальні умови.

Цитогенетичний метод заснований на вивченні хромосом людини в нормі і при патології. У нормі каріотип людини включає 46 хромосом — 22 пари аутосом і дві статеві хромосоми. Використання даного методу дозволило виявити групу хвороб, пов'язаних або з зміною числа хромосом, або зі змінами їх структури. Для визначення наявності генетичних відхилень плоду застосовують аналіз амніотичної рідини, що оточує плід, — амніоцентез (мал. 30.2). Клітини, отримані при взятті матеріалу, культивуються в лабораторії, а потім піддаються хромосомному аналізу (мал. 30.3).

Популяційно-статистичний метод дає можливість вивчати частоти зустріваності алелей у популяціях організмів, а також генетичну структуру популяцій. Крім генетики популяцій, його застосовують і в медичній генетиці для вивчення поширення певних алелей серед людей (головним чином тих, ті чи інші спадкові захворювання). Для цього вибірково досліджують частину населення певної території та статистично обробляють одержані дані.



Мал. 30.2. Амніоцентез — інвазивна пренатальна діагностика: під УЗД-контролем тонкою голкою беруть зразок навколоплідних вод для генетичного аналізу



Мал. 30.3. Спектральне каріотипування (SKY) — метод, що забарвлює кожну хромосому в унікальний колір, дозволяючи одночасно виявляти всі хромосомні аномалії

Мал. 30.4. Провідний автор дослідження, доктор Тарас Олексик допомагає помістити Україну на карту світового геному

Так, українські вчені під керівництвом професора *Тараса Олексика*, ужгородця, який працює в Оклендському університеті США, ство-

рили перший публічний референтний ресурс геномної різноманітності геномів українців, виявивши понад 13 млн генетичних варіантів, серед яких близько 500 тис. раніше не відомі. Ці результати показують, що населення України формує близько чверті генетичної варіації Європи і містить унікальні алелі медичного значення, які мають потенціал для розвитку персоналізованої медицини (мал. 30.4).

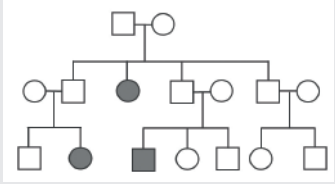
Біохімічний метод дозволяє виявити порушення в обміні речовин, викликані зміною генів і, як наслідок, зміною активності різних ферментів.

Спадкові хвороби обміну речовин поділяють на хвороби вуглеводного обміну (цукровий діабет), обміну амінокислот (фенілкетонурія), ліпідів (хвороба Тея-Сакса) тощо.

Фенілкетонурію відносять до хвороб амінокислотного обміну. Блокується перетворення незамінної амінокислоти фенілаланін у тирозин. Захворювання призводить до швидкого розвитку недоумства у дітей. Рання діагностика і дієта дозволяють призупинити розвиток захворювання. Хвороба Тея-Сакса викликається накопиченням ліпідів в нервових клітинах, у результаті — розумова відсталість, сліпота, м'язова слабкість.

Методи генетичної інженерії — такі, за допомогою яких учені виділя- ють із організмів окремі гени або синтезують їх штучно, перебудовують певні гени, вводять їх у геном іншої клітини або організму.

1. Як називають нащадків, отриманих у результаті гібридизації?
2. Скільки хромосом міститься у нормальному каріотипі людини?
3. Які методи досліджень можна віднести до класичних, а які — до сучасних?
4. Який із методів генетичного дослідження було застосовано при створенні схеми? Якої статі особини, що несуть досліджувану ознаку?



5. Чим відрізняється генеалогічний метод від популяційно-статистичного?
6. Як за допомогою біохімічного методу можна виявити спадкову хворобу?
7. Уявіть, що в дитини виявили фенілкетонурію. Обґрунтуйте, які методи генетичних досліджень доцільно застосувати для встановлення діагнозу та запобігання подальшим ускладненням.
8. На основі таблиці конкордантності проаналізуйте, яка роль спадковості та середовища в розвитку таких ознак, як тиск, праворукість і шизофренія. Як пояснити, що захворювання на кір має таку високу конкордантність у дизиготних близнюків?
9. Ви працюєте в генетичній лабораторії. Вам надіслали зразки ДНК батьків і дитини, в якої виявлено рідкісне генетичне захворювання. Які методи генетичних досліджень ви застосуєте, щоб визначити, чи є захворювання спадковим?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/GtJBhzBI і виконайте вправи.

31 ЗАКОНИ СПАДКОВОСТІ МЕНДЕЛЯ ТА ЇХНІ ЦИТОЛОГІЧНІ ОСНОВИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- як Мендель відкрив основні закони спадковості, використовуючи модельну систему — рослину гороху;
- про закони домінування, розщеплення та незалежного успадкування ознак;
- як застосовувати гратку Пеннета для передбачення результатів моногібридного та дигібридного схрещування;
- про цитологічне підґрунтя спадковості — роль хромосом і мейозу у розходженні алелів.

Як генетична інформація передається між поколіннями? Може бути цікаво, як ознаки можуть «пропускати» покоління, або чому одна дитина в сім'ї може страждати від генетичного захворювання, а інша — ні. Як би ви могли підійти до постановки таких питань з наукової точки зору?

Очевидною першою ідеєю було б безпосередньо вивчати закономірності успадкування у людей, але це виявляється складною пропозицією. Людині потрібно багато років, щоб вирости, розвинутись та народити дітей, що уповільнює збір даних. Крім того, коли в людей народжуються мало дітей, що ускладнює виявлення математичних закономірностей у даних. Нарешті, і, мабуть, найголовніше, було б неможливо проводити контрольовані експерименти з генетики людини — тобто ви не можете попросити пару людей народити дітей лише тому, що вам цікаво, як ці діти виглядатимуть.

Мал. 31.1. Йоган Грегор Мендель (1822 – 1884)

Грегор Мендель, якого часто називають «батьком генетики», був учителем, ученим і людиною віри (мал. 31.1). Мендель проводив експерименти з гібридизації городнього гороху (*Pisum sativum*). Саме його він обрав головною модельною системою. **Модельна систем**а — це організм, який дозволяє досліднику легко досліджувати певне наукове питання. Між 1856 і 1863 роками він виростив і протестував близько 28 000 рослин гороху. З цих експериментів він вивів два узагальнення, які пізніше стали відомими як закони спадковості Менделя або менделівське успадкування. Він описав ці закони у статті з двох частин

«Експерименти з гібридизації рослин», яка була опублікована в 1866 році.

Мендель вивчав успадкування семи різних ознак гороху, включаючи висоту, колір квітки, колір та форму плодів і насіння (мал. 31.2).

ОЗНАКИ	Колір віночка	Колір бобів	Колір насінин	Форма плодів	Форма насінин	Висота рослини
Домінантні						
Рецесивні						

Мал. 31.2. Альтернативні ознаки гороху

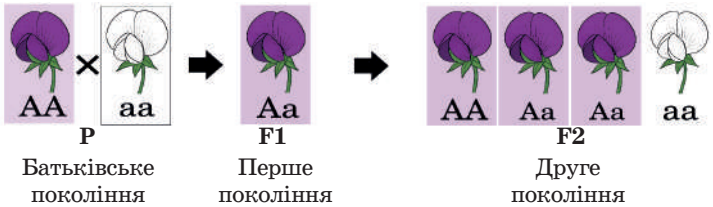
Він вирощував ці лінії протягом поколінь, поки вони не стали «чистими» (завжди давали потомство, ідентичне батьківській лінії), потім схрещував їх між собою та спостерігав, як успадковувалися ці ознаки.

Мендель виявив, що шляхом схрещування чистопородних рослин з білою квіткою та чистопородних рослин з пурпуровою квіткою утворюється гібридне потомство. Замість того, щоб бути сумішшю двох кольорів, потомство мало пурпурову квітку. Він впровадив ідею одиниць спадковості, які він назвав «факторами», один з яких є рецесивною ознакою, а інший — домінантною. Мендель стверджував, що фактори, які пізніше назвали генами, зазвичай зустрічаються парами у звичайних клітинах тіла, але розділяються під час формування статевих клітин. Кожен ген пари стає частиною окремої статевої клітини. Домінантний ген, такий як пурпурова квітка у рослин Менделя, приховуватиме рецесивний ген — білу квітку.

Тому, при схрещуванні двох чистих ліній усе потомство буде одноманітним з домінантною ознакою — **закон одноманітності першого покоління**, або **закон домінування**.

Так Мендель схрестив рослини, що були чистопородними за пурпуровим забарвленням квіток, з рослинами, що були чистопородними за білим забарвленням квіток (покоління Р). Отримані гібриди в поколінні F1 мали пурпурові квіти (мал. 31.3).

Згідно з Менделем, кожен організм має два алелі однієї ознаки (по одному від батьків). За **правилом чистоти гамет**, під час їхнього формування нащадку передається лише один випадковий алель від кожного з батьків: один через яйцеклітину, інший — через сперматозоїд.



P Батьківське покоління — **F1** Перше покоління — **F2** Друге покоління

Мал. 31.3. Схема генетичних схрещувань гороху за ознакою кольору віночка

Пригадайте що таке алелі, гомозигота, гетерозигота.

У поколінні F2, яке утворюється в результаті схрещування особин першого покоління між собою, приблизно три чверті рослин мали пурпурові квіти, а одна чверть — білі (мал. 31.3).

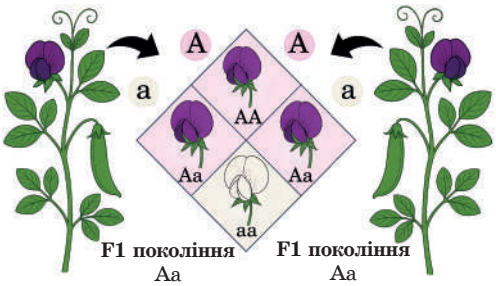
Тобто у другому поколінні при схрещуванні однакових особин відбувається розщеплення із співвідношенням 3 : 1 — **закон розщеплення.**

Генотипічні та фенотипічні частоти, очікувані від генетичного схрещування, можна розрахувати за допомогою гратки Паннета. Коли очікувані частоти розраховуються лише для одного гена, проводиться **моногібридне схрещування.**

Моногібридне схрещування можна розрахувати, виконавши такі кроки:

1. Позначте літери для позначення алелів (домінантна — велика літера; рецесивна — мала літера).
2. Запишіть генотип та фенотип майбутніх батьків.
3. Запишіть генотип батьківських гамет, які будуть гаплоїдними, тобто складатимуться з одного алеля кожна (правило чистоти гамет).
4. Намалюйте сітку з материнськими гаметами на одній грані та батьківськими гаметами на сусідній (це квадрат Пеннета).
5. Заповніть гратку Пеннета, об'єднавши літери, що позначають гамети.

Мендель також проаналізував закономірність успадкування інших пар контрастних ознак у рослини домашнього гороху (мал. 31.4).



Мал. 31.4. Схема моногібридного схрещування з використанням решітки Пеннета

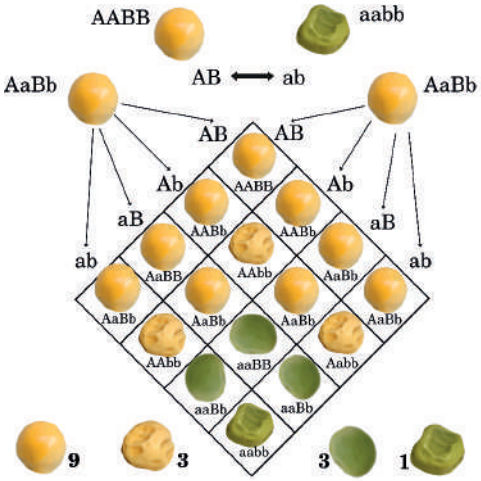
Вчений провів дигібридне схрещування рослин, гетерозиготних за двома ознаками (форма та колір насіння). Якщо б ознаки були пов'язані, він очікував би лише два типи потомства: 75% кругло-жовтих і 25% зморшкувато-зелених.

Натомість з'явилися всі чотири можливі комбінації в співвідношенні 9:3:3:1 (9/16 кулясто-жовтих, 3/16 кулясто-зелених, 3/16 зморшкувато-жовтих, 1/16 зморшкувато-зелених).

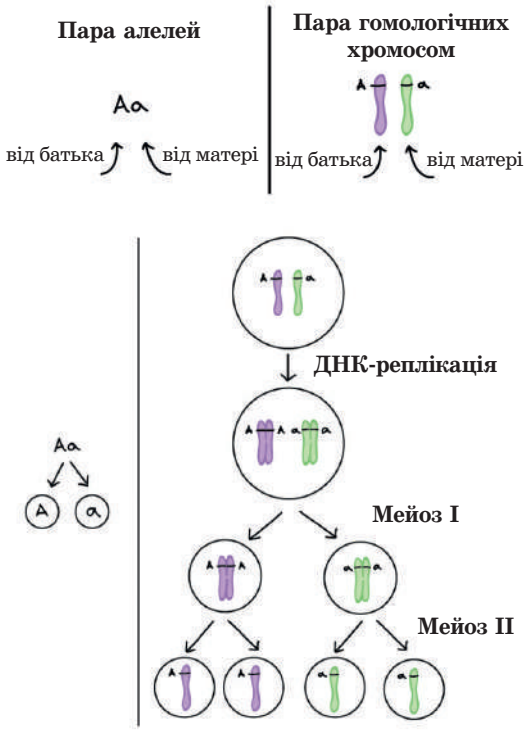
На основі досліджень семи ознак Мендель сформулював закон незалежного успадкування: успадкування однієї пари генів не залежить від іншої. Сьогодні відомо, що цей закон діє, лише коли гени розташовані на різних хромосомах.

За життя Менделя його роботу не визнали. Лише близько 1900 року її перевідкрили. Незалежно один від одного Вальтер Саттон і Теодор

Бовері показали, що під час мейозу хромосоми розходяться випадково, точно так, як описав Мендель. Вони довели цитологічну (хромосомну) основу законів Менделя.



Мал. 31.5. Закон незалежного успадкування онак



Мал. 31.6. Поведінка хромосом під час поділу клітини

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/5rUZD4aI або за QR-кодом і виконайте практичну роботу: «Розв'язання елементарних вправ з генетики (моно- та дигібридне схрещування)».

1. Який організм був обраний модельною системою для досліджень Грегора Менделя?
2. Яку назву отримав закон, згідно з яким у поколінні F1 з'являється лише домінантна ознака?
3. Яке співвідношення ознак спостерігається у поколінні F2 при моногібридному схрещуванні?
4. Чим відрізняються домінантні й рецесивні алелі за проявом у фенотипі гетерозиготи?
5. Як гратку Пеннета допомагає передбачити результати схрещування?
6. У родині обоє батьків мають карі очі, але в них народилася дитина з блакитними очима. Блакитний колір домінантна чи рецесивна ознака?

7. Складіть схему схрещування гетерозиготної рослини гороху з пурпуровими квітками (Pp) з рослиною з білими квітками (pp). Вкажіть: генотипи батьків; гамети; генотипи та фенотипи нащадків.
8. Рослини з круглим жовтим насінням (RrYy) схрестили між собою. *Вкажіть*: генотипи батьків; можливі комбінації гамет (використайте правило добутку); ґратку Пеннета (можна обмежитися виведенням співвідношення фенотипів); очікуване фенотипічне співвідношення в поколінні F1.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/NtJBzhLN і виконайте вправи.

32 ЯВИЩЕ ЗЧЕПЛЕНОГО УСПАДКУВАННЯ. ХРОМОСОМНА ТЕОРІЯ СПАДКОВОСТІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке зчеплені й незчеплені гени;
- як їхнє розташування в хромосомах впливає на успадкування ознак;
- що таке кросинговер і як він зумовлює появу рекомбінантних гамет;
- як за частотою рекомбінацій можна побудувати карти зчеплення для визначення відстаней між генами.

Організми мають набагато більше генів, ніж хромосом. Наприклад, людина має приблизно 20 000 генів на 23 хромосомах.

Тому кожен ген не може бути в окремій хромосомі. Багато генів розташовані в ряд на кожній хромосомі, а деякі з них будуть розташовані дуже близько один до одного. Чи впливає це на те, як успадковуються гени? У більшості випадків — так. Гени, розташовані достатньо близько один до одного на хромосомі, мають тенденцію «зчеплюватися», а алелі цих генів, що знаходяться разом на хромосомі, частіше успадковуються парами.

Це явище називають **генетичним зчепленням**. Коли гени зчеплені, генетичні схрещування за участю цих генів призводять до співвідношень гамет і типів потомства, які не відповідають тому, що б передбачалося згідно із законами Менделя. Можна сказати, що Менделю пощастило, що ознаки, які він обрав для дослідження, не були зчепленими. Інакше закономірність була б порушена.

Але зчеплення рідко буває повним. Гени все одно можуть опинитися в різних хромосомах внаслідок кросинговеру (мал. 32.3).

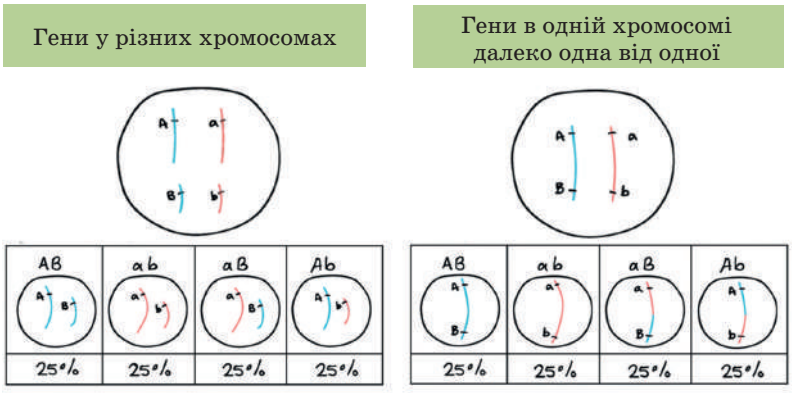
Пригадайте, що це таке, і коли цей процес відбувається.

Коли гени знаходяться на окремих хромосомах або дуже далеко один

від одного на одних і тих самих хромосомах, вони **сортуються незалежно**. У подвійному гетерозиготному організмі (*AaBb*) це призводить до утворення всіх 4 можливих типів гамет (по 25%) (мал. 32.1).

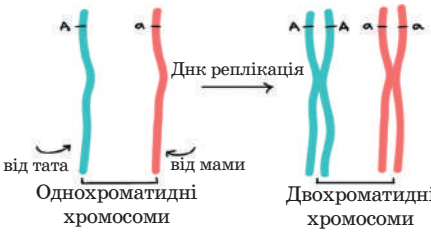
Чому це так? Гени на окремих хромосомах розташовуються незалежно через випадкову орієнтацію гомологічних пар хромосом під час мейозу. **Гомологічні хромосоми** — це парні хромосоми, які несуть однакові гени, але можуть мати різні алелі цих генів (мал. 32.2).

Гомологи кожної пари розділяються на першому етапі мейозу. У цьому процесі, в який бік потрапляють хромосоми «тата» та «мами» кожної пари, є випадковим. Коли ми відстежуємо два гени, це призводить до утворення чотирьох типів гамет, які утворюються з однаковою частотою.

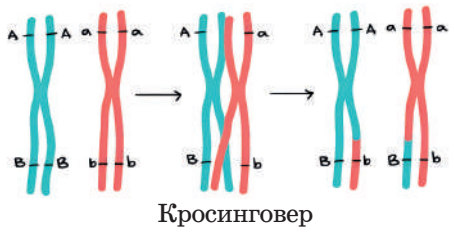


Мал. 32.1. Розподіл генів у гаметах залежно від їхнього розміщення у хромосомах

Коли гени розташовані дуже близько один до одного на одній хромосомі, кросинговер все одно відбувається, але результат (з точки зору типів гамет, що утворюються) інший. Замість незалежного сортування, гени схильні «зчіплятися» під час мейозу. Тобто, алелі генів, які вже знаходяться разом на хромосомі, схильні передаватися гаметам як єдине ціле. У цьому випадку гени зчеплені.



Мал. 32.2. Гомологічні хромосоми



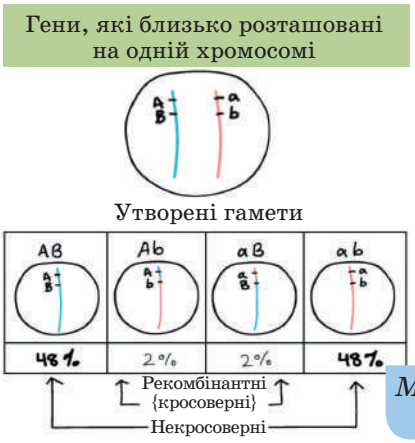
Мал. 32.3. Зміна хромосом під час кросинговеру

Цього разу ми бачимо типи гамет, які присутні в дуже нерівних пропорціях. Більша частина гамет містять **батьківські** конфігурації алелів, тобто ті, які вже були зчепленими на хромосомі організму до мейозу. Менша частина гамет (мал. 32.4) містять **рекомбінантні** конфігурації алелів, тобто ті, які можуть утворюватися лише за умови рекомбінації

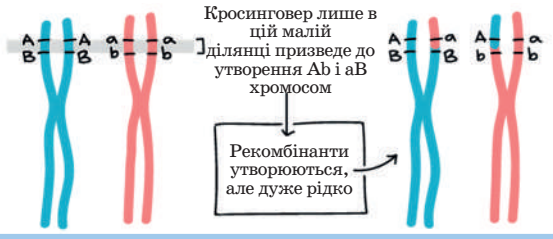
(кросинговеру) між генами.

Чому рекомбінантні типи гамет трапляються рідше? Основна причина полягає в тому, що кросинговер під час мейозу відбувається більшменш випадково вздовж хромосоми, тому частота перехрестів між двома генами залежить від відстані між ними. Дуже коротка відстань, фактично, є дуже малою «мішенню» для кросинговеру порівняно з кількістю між двома генами, розташованими подалі один від одного.

Два гени, розташовані дуже близько один до одного, матимуть дуже мало рекомбінацій і будуть щільно зчеплені, тоді як два гени, розташовані далі один від одного, матимуть більше рекомбінацій і будуть менш щільно зчеплені (мал. 32.5).



Мал. 32.4. Утворення кросоверних і некросоверних хромосом



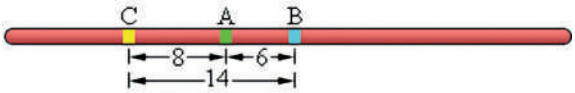
Мал. 32.5. Чим ближче розташовані зчеплені гени, тим рідше між ними може відбутися кросинговер

Один зі способів використання частот рекомбінації — це побудова **карт зчеплення**, хромосомних карт на основі частот рекомбінації. Фактично, вивчення зчеплення допомогло встановити, що хромосоми насправді лінійні, і що кожен ген має своє специфічне місце на хромосомі (мал. 32.7).

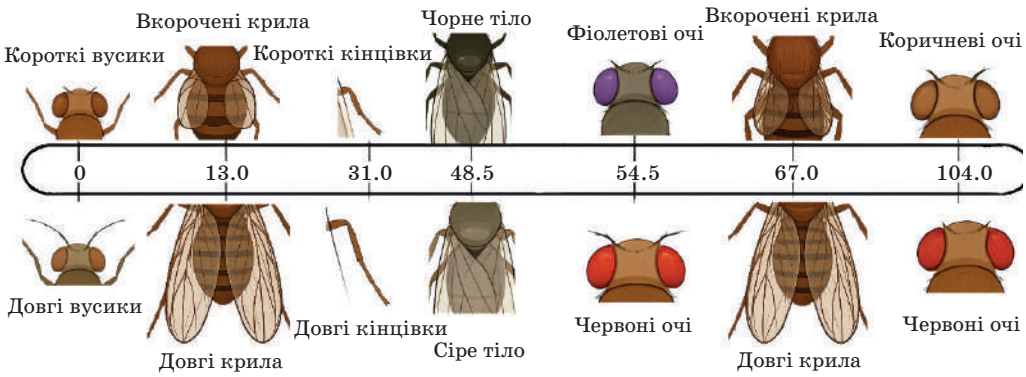
Припустимо, що в нас є три гени: A, B та C, і ми хочемо знати їхній порядок на хромосомі (мал. 32.6). Якщо ми розглянемо частоти рекомбінації серед усіх трьох можливих пар генів (AC, AB, BC), то можемо з'ясувати, які гени розташовані найдалі один від одного, а який інший ген знаходиться посередині. Якщо частота кросинговеру між генами C і A відбуватиметься з частотою 8%, між генами A і B — 6%, а між C і B — 14%, то карта виглядатиме так.

На картах зчеплення ви можете побачити відстані, виражені в сантиморганідах. Частота 1% рекомбінації еквівалентна 1 **сантиморганіді**.

Хромосомна теорія спадковості — це фундаментальна теорія в генетиці, яка пояснює матеріальну основу спадковості та механізми успадкування ознак. Вона була сформульована американським генетиком Томасом Хантом Морганом та його співробітниками (зокрема, *А. Стертевантом, Г. Меллером, К. Бріджесом*) у період 1911 – 1926 рр.



Мал. 32.6. Зразок побудови генетичної карти



Мал. 32.7. Генетична карта хромосоми плодової мушки (Drosophila melanogaster)

Ще до Моргана, у 1902 році, В. Саттон (США) та Т. Бовері (Німеччина) висунули хромосомну гіпотезу спадковості, припустивши, що менделівські «спадкові чинники» локалізовані в хромосомах. Дослідження Моргана на плодових мушках дрозофілах підтвердили і деталізували цю гіпотезу, зробивши її повноцінною теорією.

Основні положення хромосомної теорії спадковості:

- матеріальною основою спадковості є хромосоми;
- гени розташовані в хромосомах лінійно, у певній послідовності;
- кожна негомологічна хромосома має свій унікальний набір генів;
- гени, що знаходяться в одній хромосомі, успадковуються разом, утворюючи групу зчеплення. Кількість груп зчеплення в організмів певного виду дорівнює гаплоїдному числу хромосом (наприклад, у людини 23 групи зчеплення, оскільки гаплоїдне число хромосом — 23);
- зчеплене успадкування генів може порушуватися внаслідок кросинговеру;
- частота кросинговеру між генами пропорційна відстані між ними;
- кожний біологічний вид характеризується специфічним набором хромосом (каріотипом) та своїми групами зчеплених генів.

Значення хромосомної теорії спадковості:

- доведено матеріальну основу спадковості, підтвердивши, що гени є фізичними структурами, розташованими в хромосомах;
- пояснено закони Менделя та причини їх можливих відхилень (наприклад, зчеплене успадкування та кросинговер);
- сформульовано основу для розвитку сучасної генетики, дозволивши зрозуміти механізми успадкування ознак, складати генетичні карти, вивчати мутації та багато іншого;

- має велике значення для медицини, селекції рослин і тварин, генетичної інженерії та інших біологічних наук.

1. Як називають явище, коли алелі кількох генів передаються разом?
2. Який процес може порушити зчеплене успадкування генів?
3. Скільки груп зчеплення в людини?
4. Поясніть, чому частота кросинговеру між генами залежить від відстані між ними.
5. Установіть відповідність між поняттям і його описом:

а) генетична карта	*1)* обмін ділянками між гомологічними хромосомами під час мейозу
б) зчеплені гени	*2)* генетична відстань, що відповідає 1% рекомбінацій
в) кросинговер	*3)* гени, розташовані близько один до одного на одній хромосомі
г) сантиморганід	*4)* лінійне розташування генів із вказаними відстанями між ними

6. Частота кросинговеру між генами A і B — 10%, між B і C — 15%, між A і C — 5%. Побудуйте можливу карту зчеплення.

Перевір себе

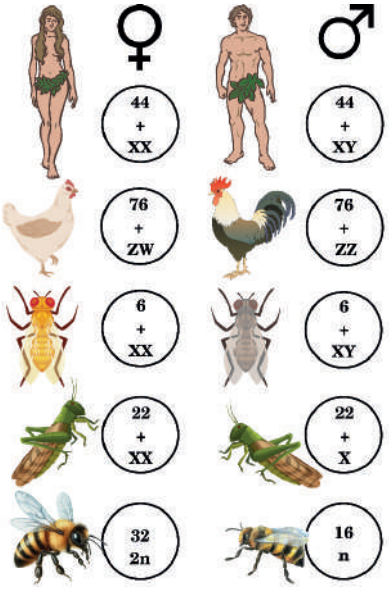
Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ztJBxuB7 і виконайте вправи.

33 ГЕНЕТИКА СТАТІ; УСПАДКУВАННЯ, ЗЧЕПЛЕНЕ ЗІ СТАТТЮ. ВИЗНАЧЕННЯ СТАТІ У РІЗНИХ ГРУП ОРГАНІЗМІВ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- як визначають стать у різних групах організмів;
- про типи хромосомного визначення статі та їхні приклади у природі;
- що таке зчеплене зі статтю успадкування і чим воно відрізняється від аутосомного;
- чому деякі захворювання, наприклад гемофілія чи дальтонізм, частіше зустрічаються у чоловіків.

Стане тварина самцем, самицею чи гермафродитом, визначається на ранніх стадіях розвитку. Вчені сотні років працювали над тим, щоб зрозуміти систему визначення статі. Наприклад, у 335 році до нашої ери Арістотель припустив, що тепло партнера-самця під час статевого акту визначає стать. Якщо тепло самця могло подолати холод самки, то народжувалося потомство чоловічої статі. Якщо холод самиці був занадто сильним (або тепло самця занадто слабким), народжувалася дитина жіночої статі. Екологічні теорії визначення статі, такі як теорія Арістотеля, були популярними приблизно до 1900 року, коли були відкриті статеві хромосоми. Як виявилося, Арістотель мав рацію, принаймні



Мал. 33.1. Різні системи хромосомного (генетичного) визначення статі: XX/XY (архетипова, ссавці, людина, дрозофіла), ZW/ZZ (птахи, метелики — гетерогаметна самиця), XX/XO (коники, деякі комахи — самець XO) диплоїдно/гаплоїдна (бджоли, мурахи, оси — самці з незапліднених яєць, гаплоїдні)

у випадку деяких рептилій, у яких температура гнізда визначає стать ембріона. Однак у переважної більшості тварин стать визначається хромосомно.

Наприклад, у людей та інших ссавців ембріони XY розвиваються як чоловічі особини, тоді як ембріони XX стають жіночими. Ця різниця в розвитку зумовлена наявністю гена на Y-хромосомі. Його присутність та експресія визначають чоловічу стать особини. Його відсутність призводить до жіночого фенотипу.

Хоча Drosophila melanogaster також має статеві хромосоми XX і XY, її система визначення статі використовує інший метод, а саме співвідношення наборів аутосом до кількості X-хромосом. Особини з двома наборами аутосом та двома X-хромосомами (2A:2X) розвиватимуться як самиці, тоді як ті, хто має лише одну X-хромосому (2A:1X), розвиватимуться як самці. Наявність чи відсутність Y-хромосоми та її генів не має значення. Стать, яка утворює лише один тип статевих гамет називають гомогаметною, стать, яка утворює два різні типи статевих гамет — гетерогаметною. Якщо ж ознака представлена одним алелем, без пари, то її називають гемізиготною

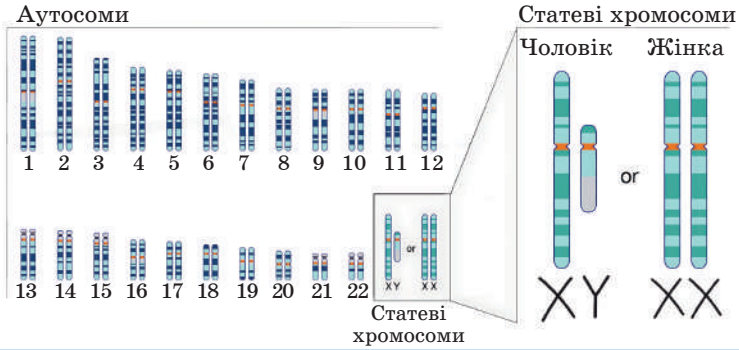
В інших видів тварин стать може визначатися кількістю хромосомних наборів. Наприклад, гаплоїдно-диплоїдна система використовується у бджіл, мурах та ос. Зазвичай гаплоїди — це самці, а диплоїди — самиці.

Птахи використовують систему статевих хромосом ZZ-ZW. Де гомогаметною (ZZ) є чоловіча стать, а гетерогаметною (ZW) — жіноча.

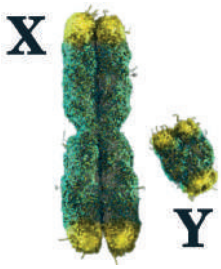
В інших видів, як ми вже згадували, стать особини може визначатися навколишнім середовищем. У алігаторів (та деяких інших рептилій) стать визначає температура розвитку, тоді як у багатьох рифових риб співвідношення статей у популяції може призвести до зміни статі деяких особин (мал. 33.1).

Якщо ви людина (що здається непоганим варіантом!), більшість ваших хромосом утворюють гомологічні пари. Чи всі ваші хромосоми організовані в гомологічні пари? Відповідь залежить від того, чи є ви (хромосомно) чоловіком чи жінкою (мал. 33.2). Коли ген присутній

на Х-хромосомі, але не на Y-хромосомі, кажуть, що він Х-зчеплений. Х-зчеплені гени мають інші моделі успадкування, ніж гени на нестатевих хромосомах (аутосомах). Це пояснюється тим, що ці гени присутні в різній кількості копій у чоловіків і жінок.



Мал. 33.2. Чоловік має 44 аутосоми (22 гомологічні пари) і дві статеві хромосоми: Х та Y, які не є гомологічними. У жінки дві Х-хромосоми, які утворюють гомологічну пару



Мал. 33.3. За розміром Y-хромосома менша за Х приблизно у 3 рази, а за кількістю генів — у 15 разів

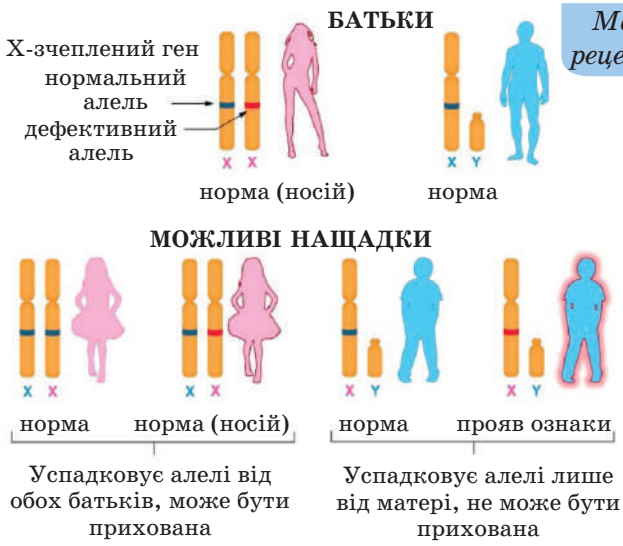
Статеві хромосоми (Х та Y) можна розрізнити за розміром — Х-хромосома набагато більша та містить більше генів (мал. 33.3).

Зчеплення зі статтю означає, що ген, який контролює певну ознаку, розташований на статевій хромосомі (Х або Y).

Оскільки чоловіки та жінки мають різні комбінації статевих хромосом, моделі успадкування будуть відрізнятися залежно від статі.

Y-пов'язані ознаки:	**Х-зчеплені домінантні ознаки:**	**Х-зчеплені рецесивні ознаки:**
Тільки чоловіки мають Y-хромосому, тому зчеплені з Y-хромосомою ознаки завжди присутні лише в чоловіків. Оскільки у чоловіків лише одна Y-хромосома, ця ознака не є домінантною чи рецесивною (вона завжди проявляється). Y-зчеплена ознака завжди успадковуватиметься синами та ніколи не успадкується доньками.	Оскільки жінки мають дві Х-хромосоми, Х-зчеплена домінантна ознака буде частіше зустрічатися в жінок. У хворого батька завжди є хворі доньки (доньки повинні успадкувати Х-хромосому батька). Сини успадковують захворювання лише за наявності в матері ураження (сини успадковують Х-хромосому від матері).	Оскільки чоловіки мають лише одну Х-хромосому, Х-зчеплена рецесивна ознака буде частіше зустрічатися в чоловіків. Це пояснюється тим, що чоловіки не можуть бути носіями Х-зчеплених рецесивних ознак (вони не можуть бути гетерозиготними). У хворих матерів завжди є хворі сини, тоді як у хворих батьків не може бути хворих дочок.

Зчеплене зі статтю успадкування відрізняється від аутосомного тим, що в чоловіків хромосоми непарні (XY). Ознаки можуть зчеплені з Х-хромосомою, а можуть бути зчеплені з Y. Зчеплені зі статтю алелі представляють як верхні індекси, приєднані до відповідної статевої хромосоми (наприклад: X^A або X^a).



Мал. 33.4. Схема Х-зчепленого рецесивного успадкування ознаки

У людей алелі певних станів (включаючи деякі форми дальтонізму, гемофілії та м'язової дистрофії) зчеплені з Х-хромосомою.

Пригадайте, що характерно для цих станів.

Ці захворювання набагато частіше зустрічаються в чоловіків, ніж у жінок, через їх Х-зчеплений тип успадкування. Чому це так?

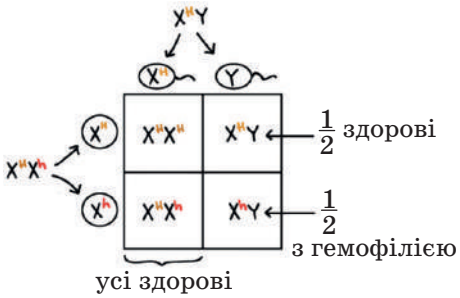
Розглянемо приклад успадкування гемофілії, яка спричинена мутацією гена, розташованого в Х-хромосомі. У нашому прикладі жінка, яка є гетерозиготною за нормальними та гемофілічними алелями XHXh, має дітей від чоловіка, який є гемізиготним за нормальною формою XHY. Проілюструємо схему успадкування граткою Пеннета.

У самиць ссавців (XX) одна з двох Х-хромосом у кожній клітині «вимикається» на ранньому етапі розвитку. Це явище називають інактивацією Х-хромосоми. Воно потрібне для того, щоб уникнути подвійної дії генів Х-хромосоми у самиць, адже самці (XY) мають лише одну Х-хромосому. Неактивну конденсовану Х-хромосому називають тільцем Барра.

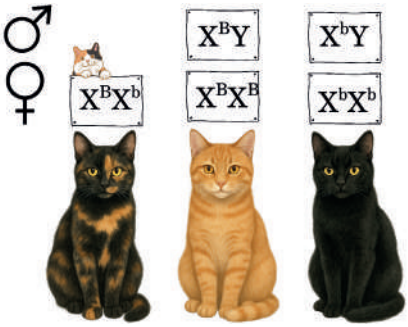
Яка саме з двох Х-хромосом стане неактивною, визначається випадково в кожній окремій клітині. Так, в організмі самиці утворюється мозаїка клітин з різними активними Х-хромосомами.

Приклад дії цього процесу можна побачити в черепахових кішок. У гені забарвлення, що міститься в Х-хромосомі, одна алель може зумовлювати чорне хутро, а інша — руде. Через інактивацію в одних ділянках шкіри працює ген чорного забарвлення, в інших — рудого. У результаті, шерсть у таких кішок має плями різного кольору — саме так виникає черепахове забарвлення.

У самців (XY) черепахове забарвлення не зустрічається, бо вони мають лише одну Х-хромосому.



Мал. 33.5. Схема запису успадкування рецесивної ознаки, зчепленої зі статтю (гемофілії)



Мал. 33.6. Стать і забарвлення котів з різним генотипом за геном рудого і чорного кольору

Виконайте **інформаційно-пошуковий проєкт** на тему: «Визначення статі в різних тварин».

1. Яка комбінація статевих хромосом характерна для жінки людини?
2. Що таке тільце Барра?
3. Як називають систему визначення статі, де самка має хромосоми ZW?
4. Поясніть, чому Х-зчеплена рецесивна ознака частіше проявляється в чоловіків.
5. Чому у черепахових кішок зустрічається мозаїчне забарвлення, а в котів — ні?
6. Порівняйте системи визначення статі в людини, дрозофіли та бджоли.
7. У жінки, гетерозиготної за гемофілією, та чоловіка, який не має цієї хвороби, народився син.
   а) Яка ймовірність, що він буде хворим?
   б) Побудуйте схему схрещування.
   в) Як зміниться результат, якщо замість сина народилася б дочка?
8. У якій з наступних пар батьків найімовірніше народиться донька з дальтонізмом?
   а) мати з дальтонізмом та батько-дальтонік
   б) мати-дальтонік та здоровий батько
   в) мати-носійка та здоровий батько
   г) мати-носійка та батько-дальтонік

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/QtJBcwYM і виконайте вправи.

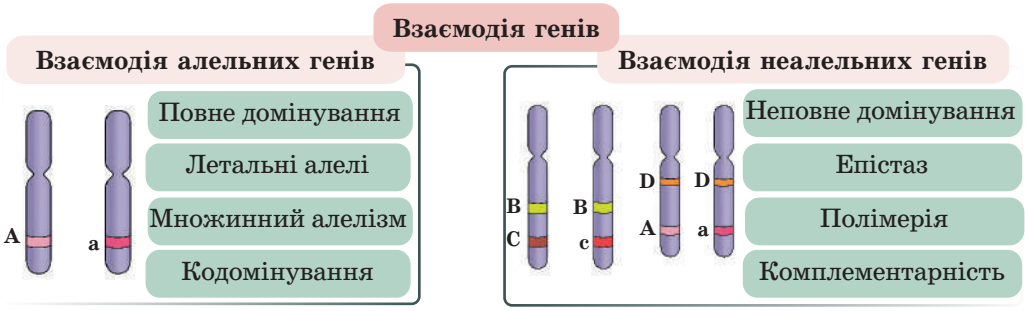
34 ГЕНОМ ЯК ЦІЛІСНА ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА. ВАРІАНТИ ВЗАЄМОДІЇ АЛЕЛЬНИХ ТА НЕАЛЕЛЬНИХ ГЕНІВ, МНОЖИННА ДІЯ ГЕНІВ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чому не всі ознаки успадковуються за законами Менделя;
- як взаємодіють гени в організмі;
- про типи взаємодії генів алельних генів;
- про типи взаємодії генів неалельних генів.

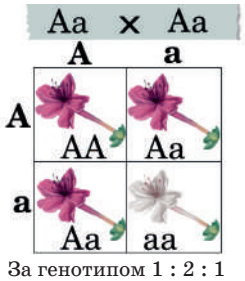
Один ген — одна ознака. Чи завжди так? Чи завжди домінантний ген пригнічує прояв рецесивного? Чи тільки алельні гени взаємодіють між собою? Насправді все набагато складніше. Геном — інтегрована система, де гени знаходяться у складній взаємодії. Тому закони Менделя справджуються не кожної пари генів.

У своїх експериментах Мендель працював з ознаками, що контролювалися генами з двома алелями й повним домінуванням одного над іншим. Сучасна генетика встановила, що успадкування часто складніше: алелі можуть мати інші типи взаємодії, а ген — більше двох варіантів.



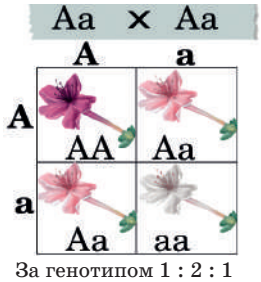
При **повному домінуванні** гібриди I покоління одноманітні з ознакою (домінантною) одного з батьків. У другому поколінні відбувається розщеплення 3 : 1 за фенотипом і 1 : 2 : 1 за генотипом (мал. 34.1).

У випадках **неповного домінування** домінантний алель гена не є повністю домінантним, що призводить до проміжного фенотипу, який проявляється у гетерозигот. У цих випадках гетерозиготний фенотип можна розглядати як проміжний, або «суміш» гомозиготного домінантного фенотипу та гомозиготного рецесивного фенотипу (мал. 34.2).



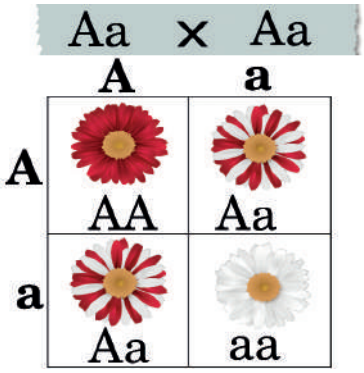
За генотипом 1 : 2 : 1
За фенотипом 3 : 1

Мал. 34.1. Фенотип і генотип гібридів при повному домінуванні



За генотипом 1 : 2 : 1
За фенотипом 1 : 2 : 1

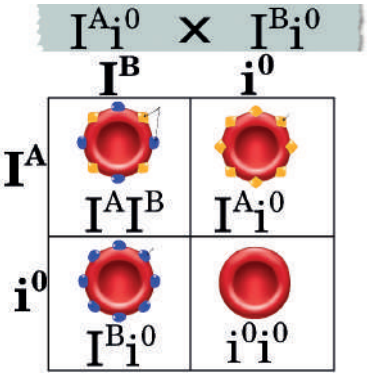
Мал. 34.2. Фенотип і генотип гібридів при неповному домінуванні



Мал. 34.3. Фенотип і генотип гібридів при кодомінуванні

Кодомінування спостерігається, коли обидва алелі для ознаки однаково виражені у фенотипі організму. Для гетерозиготних організмів як домінантний, так і рецесивний алелі проявлятимуться незалежно у фенотипі. Наприклад, забарвлення віночка квітів. У гетерозиготи проявляються обидва алелі повною мірою. Гомозиготне домінантне потомство матиме суцільний червоний колір, а гомозиготне рецесивне потомство матиме суцільний білий колір. Тоді як гетерозиготні особини потомства проявлятимуть як червоний, так і білий кольори в пелюстках (мал. 34.3).

Інший неменделівський тип успадкування, множинний алелізм, виникає, коли для одного гена існує більше двох алелів. Наприклад, ген, що кодує групу крові людини, контролюється трьома алелями. У людей можуть бути три різні типи еритроцитів: А, В та О. Ці три типи кодуються трьома різними алелями: I^A , I^B та I^0 . Еритроцити типу А містять антигени А на поверхні клітини, тоді як еритроцити типу В мають антигени В на своїй поверхні. Еритроцити типу 0 не мають жодних антигенів на своїй поверхні. Залежно від того, які алелі людина успадковує, а отже, і від їх антигенів, присутніх на її еритроцитах, визначається група крові людини: А, В, АВ або 0.



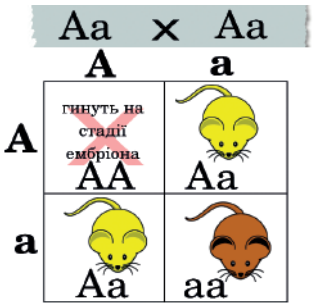
Мал. 34.4. Множинний алелізм і кодомінування при успадкуванні груп крові

Між цими трьома різними алелями спостерігається як кодомінантність, так і просте домінування. Кодомінантність можна спостерігати, коли алелі I^A та I^B успадковуються разом, що дає групу крові АВ. Просте домінування також можна спостерігати, коли I^A та I^B є домінантними до i^0. Наприклад, людина з генотипами I^Ai^0 і / або I^Bi^0 і матиме антигени типу А або типу В на своїх еритроцитах, бо рецесивний алель i^0 не експресується у фенотипі. Тільки якщо хтось успадкує дві копії алеля I^0, у нього буде кров групи 0, яка не містить поверхневих антигенів (мал. 34.4).

Деякі гени мають алелі, які призводять до загибелі організму в гомозиготному або гетерозиготному стані.

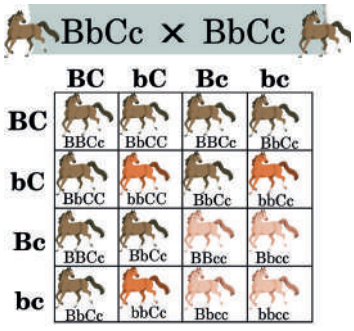
Класичним прикладом алеля, який впливає на виживання, є **летальний алель**, який робить їхню шерсть жовтою (мал. 34.5). Миші, які є гомозиготними, за цим алелем гинуть на ранніх стадіях розвитку. Саме

цей алель є домінантним, але летальні алелі можуть бути як домінантними, так і рецесивними, і можуть проявлятися в гомозиготних або гетерозиготних умовах.



За генотипом і фенотипом 2 : 1

Мал. 34.5. Фенотип і генотип гібридів у присутності летального гена

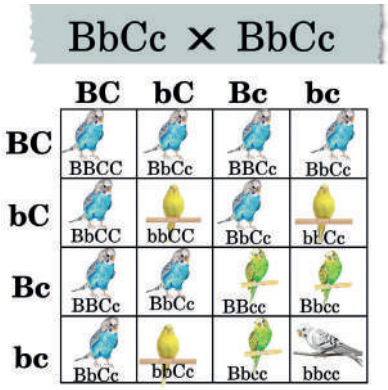


За фенотипом 9 : 3 :4

Мал. 34.6. Фенотип і генотип гібридів при рецесивному епістазі

Взаємодіяти можуть не тільки алельні гени, а й неалельні.

Епістаз — це така взаємодія неалельних генів, за якої один ген пригнічує дію іншого неалельного гена. Пригнічення можуть викликати як домінантні, так і рецесивні гени, залежно від цього розрізняють епістаз домінантний і рецесивний. Ген пригнічення отримав назву інгібітора, або супресора. Явище епістазу було відкрите в ході аналізу успадкування забарвлення коней (мал. 34.6): відомо, що чорне забарвлення шерсті визначає домінантний алель (B), а руде — рецесивний алель (в). Інший ген (C) контролює нормальний розвиток і пігментацію шерсті. Наявність домінантного алеля (C) зумовлює в коней раннє посивіння шерсті й сіру масть, тоді як наявність рецесивного алеля (c) не викликає раннього посивіння.



За фенотипом 9 : 3 : 3 : 1

Мал. 34.7. Фенотип і генотип гібридів при комплементарному успадкуванні ознак

Явище, коли ознака розвивається тільки при взаємній дії двох домінантних неалельних генів, кожний з яких окремо не викликає розвиток ознаки, називають **комплементарністю**. У випадку із забарвленням папуг (мал. 34.7) причиною є те, що блакитний пігмент і жовтий пігмент визначаються різними генами, а сам пігмент знаходиться у різних частинах пір'їни: зовні і всередині. Тому, коли лише один домінантий з двох, то забарвлення або блакитне, або жовте. Коли обидва домінанті присутні в організмі, то, сумуючись, дають зелений. А коли обидва рецесивні, то забарвлення відсутнє і оперення — біле.

1. У гібридів при повному домінуванні спостерігається розщеплення 3:1 за фенотипом. Скільки особин із домінантною ознакою буде серед 80 нащадків?
2. При неповному домінуванні в F1 усі квіти рожеві. Яке співвідношення за фенотипом буде в F2 при самозапиленні? Яку частину складуть червоні квіти, якщо всього 120 рослин?
3. Задача з аналізом схеми. На мал. 34.2 зображено схрещування рослин із червоними й білими квітами. Який генотип мають рожеві нащадки? Яке співвідношення генотипів у F2?
4. У схемі мал. 34.4 показано спадкування груп крові. Які можливі групи крові можуть мати діти в батьків із групами А (IAi0) та В (IB і 0)?
5. У людини з групою крові 0 народилася дитина з групою АВ. Чи може ця дитина бути біологічною дитиною цієї людини? Поясніть.
6. Ген В — чорний пігмент у коней, b — рудий. Ген С у домінантному стані викликає посивіння (епістаз). Яке забарвлення матиме кінь із генотипом BbCc?
7. У папуг жовтий колір контролюється геном А, блакитний — геном В. Для зеленого оперення потрібні обидва домінантні алелі. Побудуйте схему схрещування між жовтим (AAbb) та блакитним (aaBB) папугами. Які кольори й у якому співвідношенні будуть у F1 та F2?
8. Висловте гіпотезу. Чому летальні алелі, що викликають загибель у гомозигот, можуть зберігатися в популяції?
9. Уявіть, що ви — лікар. Як ви поясните пацієнту, чому його дитина має групу крові АВ, хоча він сам має А, а мати — В?
10. Чому для селекції декоративних рослин і тварин важливо враховувати комплементарність і епістаз?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/BtJBc96k і виконайте вправи.

35 ОЗНАКИ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬСЯ ВЗАЄМОДІЄЮ АЛЕЛІВ ОДНОГО (МОНОГЕННІ) ТА РІЗНИХ (ПОЛІГЕННІ) ГЕНІВ. ПЛЕЙОТРОПІЯ. МЕТОД РОДОВОДІВ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

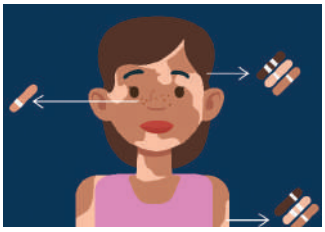
- як гени одного або кількох типів взаємодіють, формуючи ознаки організму;
- чим відрізняються моногенні, полігенні та плейотропні ознаки;
- як аналізувати родоводи та визначати типи спадкування на прикладі генетичних діаграм.

Якби ви запитали когось про такі його специфічні риси, як кучеряве волосся чи високий зріст, то ви б почули, що це генетично успадковано від батьків. Хоча ця відповідь частково правильна, вона змальовує за-

надто просту картину, щоб пояснити складність і різноманітність рис. Насправді, гени, які ми успадковуємо, — це лише один елемент пазла.

Існує багато факторів, які впливають на те, як проявляються та презентуються наші фізичні риси. На генетичному рівні наші риси можуть бути **моногенними** — під впливом одного гена або **полігенними** — під впливом кількох генів. Крім того, наше середовище суттєво впливає на те, які гени експресуються. Загалом ці фактори — генетичні, екологічні чи їх поєднання — сприяють великій різноманітності, яку ми бачимо у фізичних рисах усього живого, включаючи людей, рослин і тварин.

Деякі ознаки (такі як веснянки або розщеплення підборіддя) та певні генетичні розлади (такі як серпоподібноклітинна анемія або муковісцидоз) існують у результаті впливу одного гена. Ці ознаки відомі як моногенні ознаки. Через вплив одного гена моногенна ознака, ймовірно, матиме менше варіацій, коли йдеться про її фенотип.



Мал. 35.1. Моногенні ознаки, такі як веснянки на обличчі, залежать лише від одного гена. Полігенні ознаки, такі як колір волосся та вітиліго, залежать від кількох генів

Однак на полігенні ознаки впливають два або більше генів. Зверніть увагу! Не алелей, як при кодомінуванні, а генів. Генів, які знаходяться в різних локусах однієї чи різних хромосом (мал. 35.1). Кожен ген робить невеликий внесок у загальний внесок у прояв ознаки. Як результат, чим більше генів сприяє розвитку ознаки, тим більший потенціал для широкого діапазону значень ознаки. В основі полігенного успадкування лежить явище полімерії. Це тип взаємодії неалельних генів, коли кілька генів впливають на одну ознаку в одному напрямку. Кожен полімерний ген має подібний вплив, і ступінь прояву ознаки залежить від кількості домінантних алелів цих генів. Полімерія буває кумулятивною (ефект накопичується) і некумулятивною (достатньо одного домінантного алеля).

Мал. 35.2. Блакитна і рожева гортензія обумовлені кислотністю ґрунту

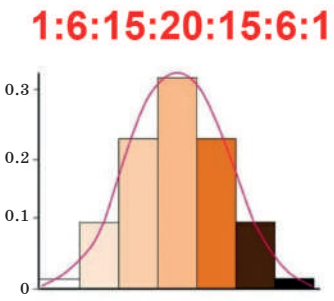
Однак, наші фізичні риси залежать не лише від генів. Навколишнє середовище також сприяє прояву як моногенних, так і полігенних ознак. Його вплив більш помітний для полігенних ознак, що призводить до ще більшої варіабельності їхніх фенотипів (мал. 35.2).

Прикладом полігенної ознаки, на яку впливають і гени, і фактори навколишнього середовища, є колір шкіри людини (мал. 35.3). Колір шкіри контролюється кількома генами, що виробляють меланін, але на нього також впливає такий фактор, як вплив сонця.

Вивчаючи полігенні ознаки, вчені використовують кількісну генетику, щоб зрозуміти індивідуальний генетичний та екологічний внесок у

прояв ознаки. Вони також використовують моделі для оцінки того, як середовище взаємодіє з нашими генами, щоб сформувати прояв ознаки в популяціях та між ними. У статистичних моделях використовують реальні дані і застосовують математичні інструменти для прогнозування інших популяцій у подібних середовищах.

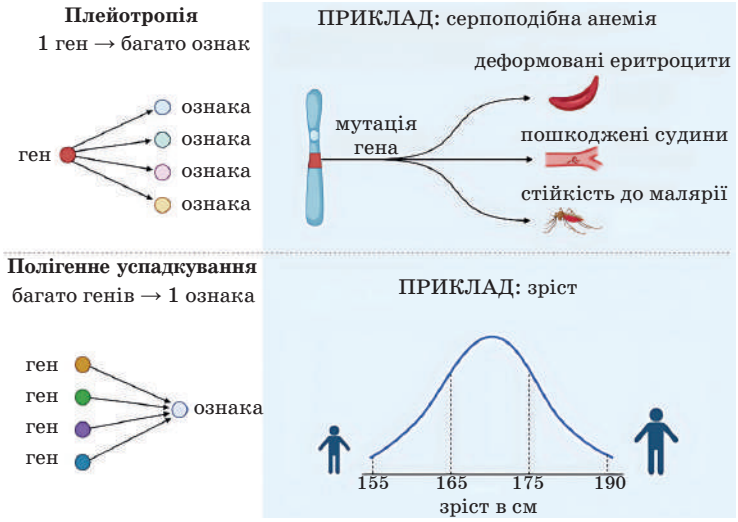
	ABC	ABc	AbC	aBC	Abc	aBc	abC	abc
ABC	6	5	5	5	4	4	4	3
ABc	5	4	4	4	3	3	3	2
AbC	5	4	4	4	3	3	3	2
aBC	5	4	4	4	3	3	3	2
Abc	4	3	3	3	2	2	2	1
aBc	4	3	3	3	2	2	2	1
abC	4	3	3	3	2	2	2	1
abc	3	2	2	2	1	1	1	0



Мал. 35.3. Полігенне успадкування. Гени A, B та C, де домінантні алелі надають темнішого забарвлення, тоді як рецесивні нічого не додають. Кожен ген має однаковий ступінь впливу на кінцевий фенотип. Співвідношення результатів кольорів у стовпчастій діаграмі

Не тільки одну ознаку можуть визначати багато генів, а й один ген може визначати декілька ознак. Це явище називають — **плейотропією**.

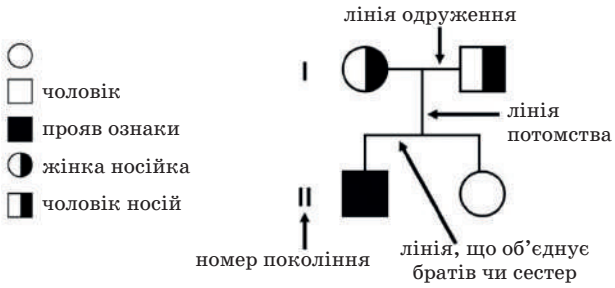
Плейотропія — явище, коли один ген або мутація впливає на кілька, здавалося б, не пов'язаних між собою ознак або фізіологічних процесів. Це відбувається, коли одна генетична зміна призводить до низки різних ефектів у різних аспектах фенотипу організму (мал. 35.4).



Мал. 35.4. Схеми та приклади Плейотропії та полігенного успадкування

Щоб побачити генетичну історію сім'ї, можна скласти родовідну діаграму. Родоводи відстежують генетичне успадкування одного гена протягом кількох поколінь. Найчастіше ці діаграми відстежують успад-

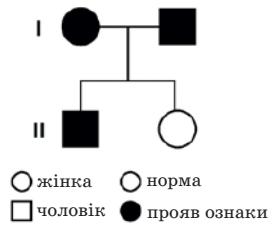
кування генетичного захворювання через сімейну лінію. Ці діаграми також допомагають визначити тип схеми успадкування, що має місце для конкретного аналізованого гена. Під час читання родоводів існує стандартизована нотація для представлення різних людей (мал. 35.5).



Мал. 35.5. Стандартні позначення у схемах родоводів

Родовід нижче показує схему успадкування аутосомно-домінантної ознаки. На цій діаграмі ми бачимо двох батьків, які обидва мають цю ознаку. Ці батьки мають двох дітей, одна з яких уражена, а одна — ні (мал. 35.6).

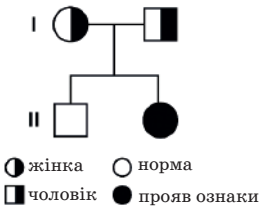
АУТОСОМНО-ДОМІНАНТНЕ



Мал. 35.6. Ця ознака вражає обидві статі; у кожної хворої людини є хтось з батьків, який також страждає на цю проблему; ця риса проявляється в кожному поколінні; у хворої особини половина її потомства хвора

У наведеному нижче прикладі родовід показує наявність ознаки, яка контролюється аутосомно-рецесивним геном. Тут дві особини, обоє носії, мають двох дітей. Одна дитина має цю рису, а інша — ні (мал. 35.7).

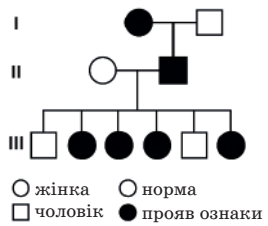
АУТОСОМНО-РЕЦЕСИВНЕ



Мал. 35.7. Ця ознака вражає обидві статі; часто у хворих людей батьки не хворіють, але є носіями; ця риса пропускає покоління; уражається приблизно чверть потомства

У цьому родоводі ми бачимо успадкування Х-зчепленої домінантної ознаки протягом трьох поколінь. Щоб визначити, чи демонструє родовід Х-зчеплений домінантний тип успадкування.

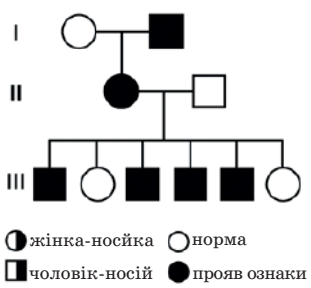
Х-ЗЧЕПЛЕНЕ ДОМІНАНТНЕ



Мал. 35.8. Якщо уражається чоловік, то уражаються всі його доньки та його мати; ця ознака частіше проявляється в жінок, ніж у чоловіків; ця закономірність виникає тому, що якщо чоловік проявляє Х-зчеплену ознаку, він має домінантний алель для цієї ознаки на своїй єдиній Х-хромосомі. Потім, оскільки він має лише одну Х-хромосому для передачі своїм дочкам, усі дочки отримають домінантний алель принаймні на одній зі своїх статевих хромосом, що призводить до прояву цієї ознаки

Як і попередня діаграма родоводу, ця показує прояв ознаки протягом трьох поколінь; однак у цьому родоводі можна спостерігати закономірності, специфічні для Х-зчепленого рецесивного успадкування.

Х-ЗЧЕПЛЕНЕ РЕЦЕСИВНЕ



Мал. 35.9. Якщо вражається жінка, то вражаються всі її сини та батько; риса частіше проявляється в чоловіків, ніж у жінок; якщо жінка має Х-зчеплену рецесивну ознаку, обидві її Х-хромосоми повинні нести рецесивний алель. Отже, всі її діти отримають від неї рецесивний алель Х-хромосоми. Але у гетерозигот (носійок) не проявлятиметься

Від одного експерименту Грегора Менделя, галузь генетики перетворилася на велику, важливу галузь науки. Генетична поведінка є складною, і тому не всі гени демонструють два алелі з простими патернами домінування. Неменделівські патерни, такі як кодомінування, неповне домінування, множинні алелі та зчеплені зі статтю ознаки, демонструють більшу складність, ніж те, що спочатку спостерігав Мендель. Щоб візуалізувати всі ці генетичні закономірності, зокрема по всій сімейній лінії, можна створити родовідні діаграми. Якщо ознака невідома, ці діаграми можуть дати уявлення про те, яку закономірність успадкування демонструє ця ознака. Такі принципи та методи є фундаментальними елементами дослідження й сьогодні.

Виконайте **творчий проєкт** за вибором: «Визначення можливих проявів станів ознак у майбутньої дитини обраної подружньої пари» або «Складання родоводу родини видатних людей / літературних персонажів вбо власної родини».

1. Яка з ознак є моногенною?
   а) зріст людини *б)* колір шкіри *в)* веснянки *г)* вага тіла
2. Установіть відповідність між терміном і його означенням:

а) плейотропія	*1)* одна ознака — кілька генів
б) моногенна ознака	*2)* один ген — одна ознака
в) полігенне успадкування	*3)* один ген — багато ознак

3. Поясніть, чому колір шкіри не можна віднести до моногенних ознак.
4. Оберіть усі правильні твердження про полігенні ознаки.
   - Залежить від одного гена.
   - Мають широкий діапазон варіацій.
   - Зазвичай не залежать від навколишнього середовища.
   - Зумовлені багатьма генами, що діють в одному напрямку.
   - Успадковуються за законами Менделя.
5. Учений вивчає родину, в якій у трьох поколіннях спостерігається певна ознака. Виявлено, що ознака зустрічається як у жінок, так і в чоловіків, проявляється в кожному поколінні, а кожна хвора особа має хоча

б одного хворого з батьків. Який тип успадкування, ймовірно, має ця ознака?

6. Порівняйте полімерію та плейотропію і запишіть.

Ознака	Полімерія	Плейотропія
Кількість генів		
Кількість ознак		
Приклад		

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/VtJBQTwz і виконайте вправи.

36 ЯВИЩЕ ЦИТОПЛАЗМАТИЧНОЇ (ПОЗАЯДЕРНОЇ) СПАДКОВОСТІ. РЕГУЛЯЦІЯ АКТИВНОСТІ ГЕНІВ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що гени містяться не лише у хромосомах;
- як відбувається успадкування ознак позаядерних генів;
- чому таке успадкування в людини називають материнським;
- як розпізнавати цитоплазматичне успадкування на схемах родоводів;
- як відбувається регуляція активності генів.

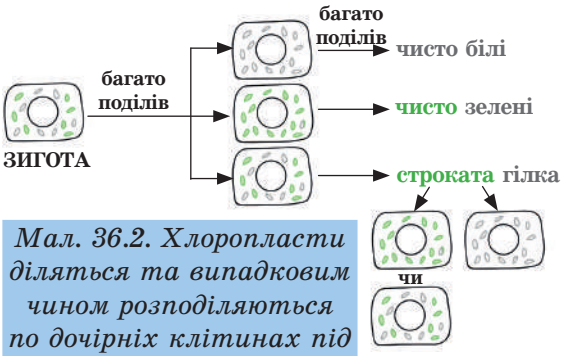
Які органели клітини містять ДНК? Більшості з вас першим словом, що спало на гадку, було ядро. І це, звісно, правильно. Але ще слід не забувати, що ДНК містяться і в цитоплазмі, а саме: у двомембранних органелах — пластидах і мітохондріях. Чи містять вони гени? За що вони відповідають і як успадковуються?

ДНК мітохондрій і хлоропластів невелика і кільцева, як у бактерій. Кожна органела має кілька копій ДНК, а клітина — багато мітохондрій (у рослин — хлоропластів), тому в клітині містяться тисячі копій мітохондріальної (мтДНК) і хлоропластної (хпДНК) (мал. 36.1).

Мал. 36.1. Хлоропластні та мітохондріальні кільцеві ДНК

Мітохондрії та хлоропласти під час поділу клітини випадково розподіляються між дочірніми клітинами. Неядерна ДНК зазвичай успад-

ковується лише від одного з батьків: у людей мтДНК передається від матері, бо цитоплазму зигота отримує з яйцеклітини.

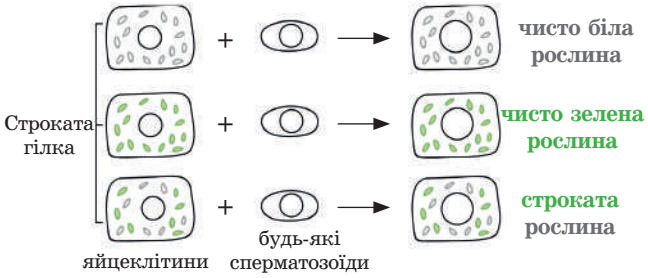


Мал. 36.2. Хлоропласти діляться та випадковим чином розподіляються по дочірніх клітинах під час кожного поділу

У строкатих рослин частина хлоропластів має мутації генів синтезу хлорофілу, тому вони безбарвні. Якщо в зиготі є нормальні й мутовані хлоропласти, їхній випадковий розподіл під час поділів призводить до різних фенотипів (мал. 36.2).

А як щодо статевого успадкування? Квітки, що утворюватимуться на чисто зеленій гілці, продукуватимуть яйцеклітини із зеленими хлоропластами, що даватимуть початок чисто зеленому потомству, а квітки, що утворюватимуться на білій гілці, даватимуть потомство з білими, строкаті — різні варіанти (мал. 36.3).

Подумайте, чи рослини всіх утворених варіантів будуть життєздатними.



Мал. 36.3. Успадкування хлоропластів при статевому розмноженні залежно від присутності органел у яйцеклітині

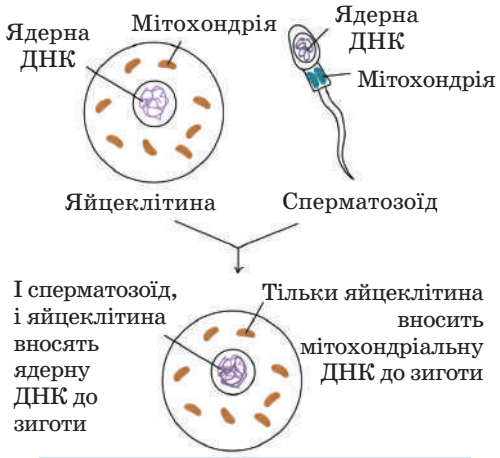
Мітохондрії, як і хлоропласти, зазвичай успадковуються від одного з батьків. У людини мтДНК передається від матері, бо зигота отримує цитоплазму з мітохондріями з яйцеклітини; батьківське успадкування трапляється вкрай рідко (мал. 36.4).

МтДНК успадковується матрилінійно (від матері усім дітям) і не зазнає рекомбінації, тому без нових мутацій діти мають ті самі мітохондріальні гени, що й мати. Мутація мтДНК, яка виникла в предків по материнській лінії, передається всім нащадкам цієї лінії (мал. 36.5).

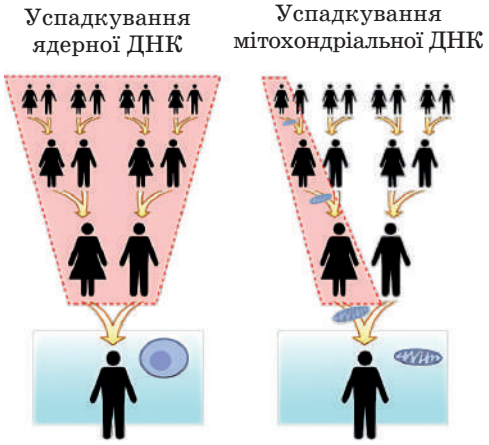
Генетичні порушення, спричинені мітохондріальними мутаціями, можуть передаватися від матері до дітей одним із таких способів (мал. 36.6).

- Якщо в матері відсутні нормальні мітохондрії, усі її діти успадкують мутантні.
- За наявності суміші нормальних і мутантних мітохондрій вони

випадково розподіляються в яйцеклітини, тому тяжкість захворювання у дітей залежить від частки мутантних мітохондрій — від відсутності симптомів до тяжкого перебігу (мал. 36.7).

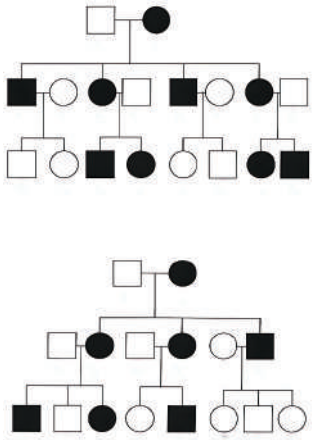


Мал. 36.4. Після запліднення у зиготу потрапляють мітохондрії лише яйцеклітини



Мал. 36.5. Схема успадкування мтДНК відрізняється від схеми успадкування ядерної ДНК

Мал. 36.6. Можлива передача генетичних порушень, спричинених мітохондріальними мутаціями



Мал. 36.7. Перший родовід показує, як успадкування передається від жінки цитоплазмою її яйцеклітини. Другий родовід показує, як експресія може змінюватися залежно від частки мітохондрій, що несуть мутацію

При аналізі родоводів із цитоплазматичним успадкуванням слід зважати на особливі закономірності: уражаються як чоловіки, так і жінки; стан передається від жінки до її потомства; якщо чоловік має цю ознаку,

а його дружина — ні, то їхнє потомство не матиме цієї ознаки. А також те, що можлива патологія, коли всі мітохондрії уражені, або лише частина з них.

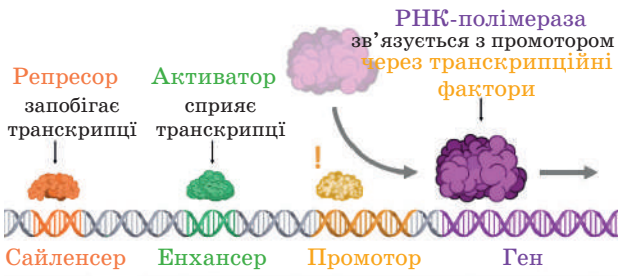
Регуляція активності (експресії) гена — це механізми, за допомогою яких клітина контролює, коли, де і скільки продуктів гена (РНК або білків) синтезується. Це дозволяє клітинам адаптуватися до умов середовища, диференціюватися та економити ресурси.

Регуляція може відбуватися на рівні хроматину (в евкаріотів), на рівні транскрипції (синтез мРНК), на посттранскрипційному рівні (сплайсинг), на рівні трансляції і на посттрансляційному рівні.

Розглянемо приклади регуляції на транскрипційному рівні.

Для того щоб РНК-полімераза почала транскрипцію, потрібні спеціальні білки — **транскрипційні фактори**. Є два головних типи таких регуляторів.

- Активатори, які зав'язуються зі спеціалізованими ділянками і підсилюють роботу РНК-полімерази. Їх називають **енхансерами**. Енхансери зазвичай віддалені від промотора.
- Репресори — зв'язуються з ділянками-пригнічувачами, що стримують роботу РНК-полімерази. Їх називають **сайленсерами** (мал. 36.8).

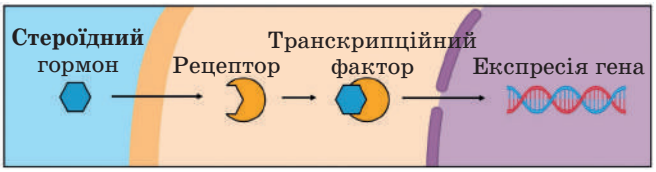


Мал. 36.8. Фактори транскрипції

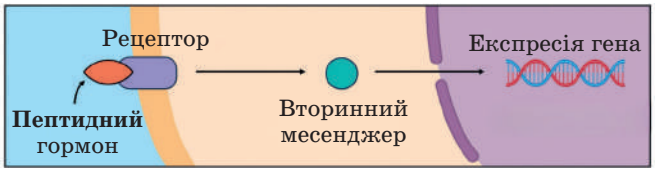
У кожної тканини є свої «улюблені» транскрипційні фактори. Наприклад, у м'язах багато факторів, які вмикають гени м'язових білків, а в нервових клітинах інші фактори, які вмикають гени для передачі нервових сигналів. Крім того, клітина отримує сигнали ззовні та зсередини. Ці сигнали часто приходять у вигляді молекул, які називають **лігандами**. Найяскравіші приклади — гормони .

Стероїдні гормони (тестостерон, естроген, кортизол) — гідрофобні і легко проходять через мембрану клітини, як крізь відкриті двері. Гормон заходить у клітину. Знаходить свій рецептор (у цитоплазмі або вже в ядрі). Разом вони утворюють активний комплекс. Цей комплекс зв'язується з ДНК і сам працює як транскрипційний фактор і вмикає потрібні гени (мал. 36.9).

Білкові гормони (інсулін, адреналін) водорозчинні і не можуть пройти крізь мембрану. Гормон чіпляється до рецептора на поверхні клітини. Рецептор подає сигнал усередину (через молекули-посередників — **вторинні месенджери**). Ці сигнали доходять до ядра і вмикають (або вимикають) певні гени (мал. 36.10).



Мал. 36.9. Механізм дії стероїдного гормону

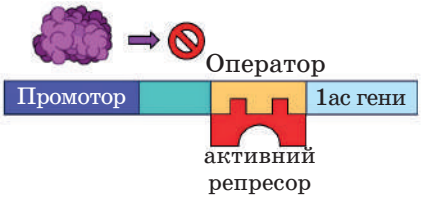


Мал. 36.10. Механізм дії білкового гормону

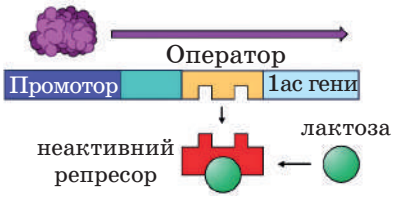
У бактерій класичним прикладом регуляції є лактозний оперон.

Бактерії живляться лактозою, коли вона є в середовищі. Гени, які кодують фермент, що розщеплює лактозу, «сплять», заблоковані білком-репресором, бо лактози у клітині немає. Місце, з яким зв'язаний білок репресор, називається **оператором** і знаходиться поряд з промотором (мал. 36.11).

Коли лактоза з'являється, то приєднується до репресора. Репресор змінює форму і від'єднується від оператора ДНК. Транскрипція триває і лактаза синтезується доти, доки вся лактоза у клітині не розкладеться, а білок репресор не повернеться на оператор (мал. 36.12).



Мал. 36.11. Пригнічення генів (лактоза відсутня)



Мал. 36.12. Експресія генів (лактоза присутня)

1. Які органели клітини, крім ядра, містять ДНК, і в якій формі вона існує в цих органелах?
2. Чому в людей мітохондріальна ДНК успадковується лише від матері?
3. Чому стероїдні гормони можуть діяти напряму на ДНК, а інсулін чи адреналін — ні?
4. Поясніть, чому при цитоплазматичному успадкуванні в людей діти не отримують мтДНК від батька.
5. Проаналізуйте родовід: мати має мітохондріальне захворювання, батько — здоровий. Усі діти — з ознаками хвороби. Як успадковується ця ознака?
6. Поясніть, чому при цитоплазматичному успадкуванні в людей діти не отримують мтДНК від батька.
7. Уявімо, що ви — лікар-генетик. Звертається пацієнт із запитанням, чому всі його діти мають одне й те саме мітохондріальне захворювання, як у матері, хоча сам він — здоровий. Дайте йому відповідь.

8. Якщо уявити, що мутація зробила репресор лактозного оперону постійно неактивним, то що відбуватиметься з бактерією постійно?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/5tJBWYzn і виконайте вправи.

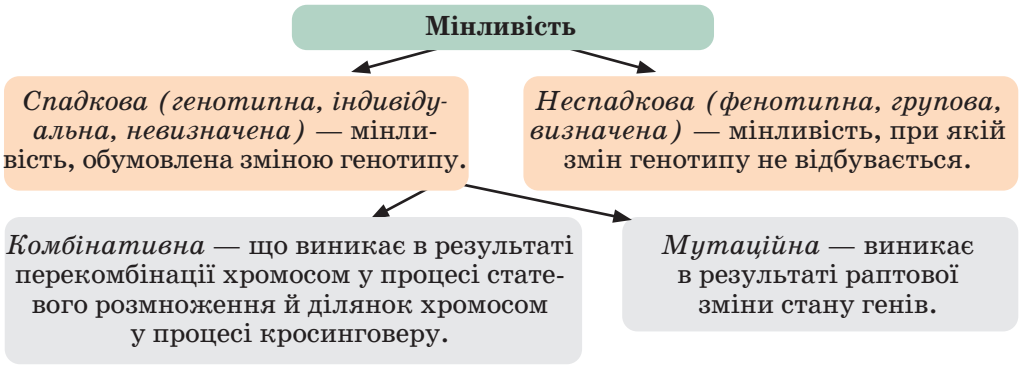
37 МІНЛИВІСТЬ СПАДКОВА ТА НЕСПАДКОВА. ФОРМИ СПАДКОВОЇ МІНЛИВОСТІ: МУТАЦІЙНА ТА КОМБІНАТИВНА. ДЖЕРЕЛА КОМБІНАТИВНОЇ МІНЛИВОСТІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чому не існує двох абсолютно однакових людей;
- як неспадкова мінливість дозволяє організмам пристосовуватися до змін у довкіллі;
- що спільного між помилкою в гені та появою нових ознак;
- чому під час успадкування ознак потомство ніколи не буває точною копією батьків.

Ви коли-небудь замислювалися, що робить кожного з нас унікальним/унікальною? Озирніться довкола: навіть рідні брати й сестри ніколи не бувають абсолютно однаковими. У когось темніше волосся, хтось вищий, хтось краще співає чи швидше бігає. Чому так? Причина криється в явищі мінливості — здатності організмів набувати відмінностей. Саме завдяки їй у світі немає «копій» людей чи тварин, а існує різноманіття.

Мінливість буває двох видів — неспадкова та спадкова. Неспадкова виникає під впливом середовища. Наприклад, улітку ваша шкіра темнішає на сонці, але ця засмага не передається дітям. Або пшениця, вирощена в засушливому степу, буде нижчою за ту, що виросла на родючому чорноземі. Такі зміни зникають, щойно змінюються умови. Спадкова мінливість пов'язана зі змінами в генетичному матеріалі. Такі відмінності «записуються» в ДНК і можуть передаватися наступним поколінням.

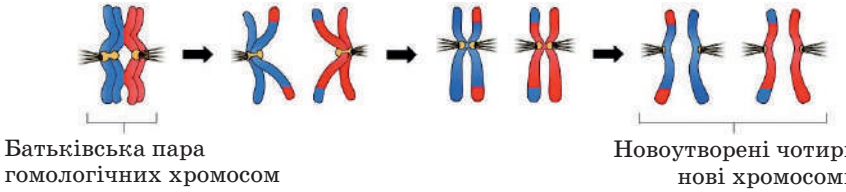


Зауважте, що хоч генотипна мінливість і називається спадковою, це не завжди означає, що вона може передаватися по спадковості. Якщо зміни генотипу виникли в соматичних клітинах, а організм розмножується статево (за допомогою гамет), то така мінливість не успадковуватиметься потомством.

Існує три фактори, які впливають на комбінативну мінливість:

1. Кросинговер.

Кросинговер включає обмін ділянками ДНК між гомологічними хромосомами під час профази I. Внаслідок цієї рекомбінації всі чотири хроматиди, що утворюють пару двохроматидних хромосом, будуть генетично різними. Потомство з такими хромосомами матиме унікальні комбінації генів, яких немає в жодного з батьків (мал. 37.1).

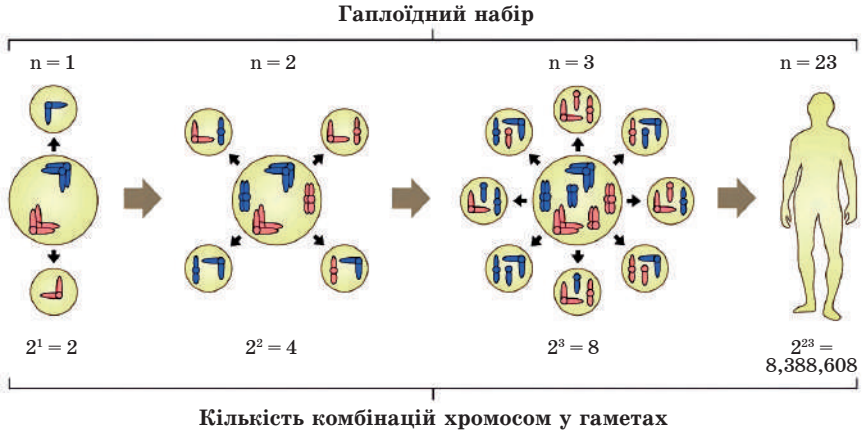


Мал. 37.1. Перекомбінування ділянок хромосом при кросинговері

2. Незалежне розходження хромосом у процесі утворення гамет.

Коли гомологічні хромосоми вишиковуються в метафазі I, їхня орієнтація до протилежних полюсів є випадковою. Тому в анафазі I гомологічні хромосоми розходяться довільно. Загальна кількість комбінацій, які можуть виникнути в гаметах, дорівнює 2^n,— де n — гаплоїдна кількість хромосом.

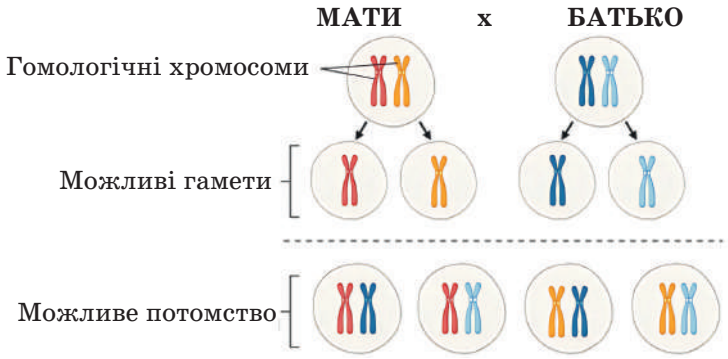
Люди мають 46 хромосом (n = 23) і таким чином можуть виробляти 8 388 608 різних гамет шляхом випадкової орієнтації (мал. 37.2). Якщо ж враховувати кросинговер, кількість різних комбінацій гамет стає невимірною.



Мал. 37.2. При незалежному розходженні хромосом утворюється різноманітна їх комбінація

3. Випадкове поєднання гамет під час запліднення.

Потомство утворюється в результаті випадкового поєднання гамет, які несуть уже різні комбінації генів. Тому особина успадковує іншу комбінацію хромосом порівняно зі своїми братами та сестрами (мал. 37.3).



Мал. 37.3. При заплідненні під час статевого розмноження кожна зигота отримує різні поєднання хромосом і генів

Ось чому кожен з вас є унікальною комбінацією генів.

1. Що таке мінливість? Наведіть приклади спадкової та неспадкової мінливості.
2. Назвіть три фактори, які забезпечують комбінативну мінливість.
3. У людини 46 хромосом ($2n = 46$, отже, $n = 23$). Кількість можливих комбінацій хромосом у гаметах визначають за формулою 2^n.
   - Обчисліть кількість різних комбінацій гамет, що може утворитися.
   - Поясніть, як ця величезна кількість поєднується з фактом, що у природі немає «копій» людей.
4. Уявіть, що ви працюєте консультантом у медико-генетичному центрі. Батьки запитують, чому їхні діти не є «точними копіями» одне одного. Поясніть це, посилаючись на механізми комбінативної мінливості.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/HtJBE4dU і виконайте вправи.

38 ВИДИ МУТАЦІЙ ТА ЇХ ПРИЧИНИ. ЗНАЧЕННЯ МУТАЦІЙ В ЕВОЛЮЦІЇ ОРГАНІЧНОГО СВІТУ. ЗАСТОСУВАННЯ МУТАЦІЙНОЇ МІНЛИВОСТІ ЛЮДИНОЮ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- ✓ чому помилки в генах можуть стати джерелом нових можливостей для життя;
- ✓ як одна «зайва» або «зникла» хромосома здатна змінити організм;

- що в природі «підкидає» мутації: випадок чи конкретні чинники;
- як люди навчилися керувати мутаціями й використовувати їх на користь собі.

Види мутацій

Мутаційна мінливість викликається мутаціями. Мутації — це зміни послідовності нуклеотидів ДНК, перебудови хромосом або зміни їхньої кількості.

Мутації за місцем виникнення

Соматичні — виникають у соматичних клітинах.

Генеративні — виникають у статевих клітинах.

За характером прояву

Рецесивні

Домінантні

За адаптивним значенням

Нейтральні мутації не мають помітного впливу на ознаки організму. Наприклад, деякі генні мутації не призводять до змін амінокислот, а отже, не впливають на функцію білка.

Корисні мутації позитивно впливають на здоров'я та виживання організму. Наприклад, у деяких людей є мутації, які знижують ризик розвитку діабету 2 типу.

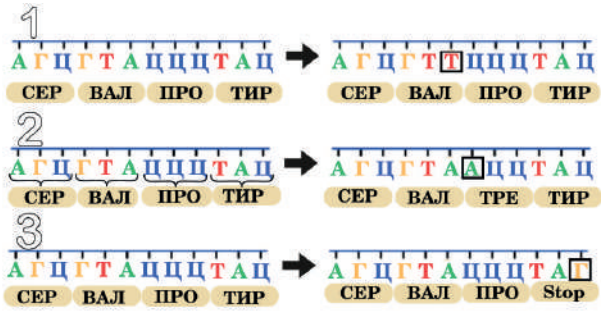
Шкідливі мутації негативно впливають на здоров'я та виживання організму. Наприклад, деякі мутації викликають спадкові захворювання, такі як серпоподібноклітинна анемія чи муковісцидоз.

За характером зміни генотипу

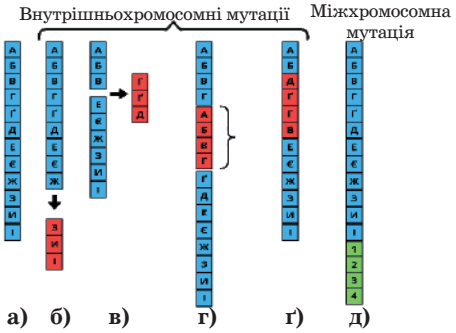
Генні мутації виникають у межах гена. Найчастіше випаданням, заміною чи вставкою нуклеотиду (мал. 38.1).

Хромосомні мутації виникають у цілій області хромосоми заміною, випаданням, обертанням чи додаванням цілої ділянки хромосоми (мал. 38.2).

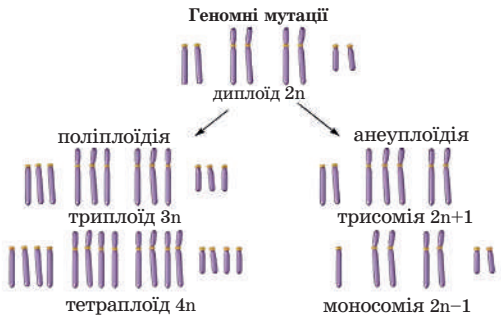
Геномні мутації виникають при помилках під час розходження хромосом, що призводить до зміни їхньої кількості в утворених клітинах (мал. 38.3).



Мал. 38.1 Генні мутації можуть не впливати на послідовність амінокислот (1), можуть замінювати амінокислоту на іншу (2) або припиняти трансляцію (3)

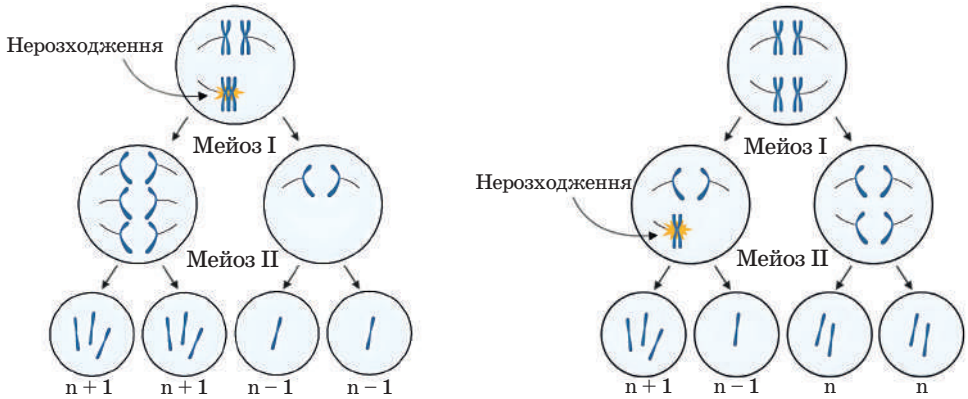


Мал. 38.2. Хромосомні мутації обумовлені порушенням частини хромосоми: втратою (б), випаданням (в), подвоєнням (г), обертанням (ґ) або переміщенням з іншої хромосоми (д)



Мал. 38.3. Порушення кількості хромосом призводить до геномних мутацій. Поліплоїдія — кратне збільшення їхньої кількості. Анеуплоїдія — некратне зменшення або збільшення (на одну чи більше)

Порушення числа хромосом спричинені нерозходженням, яке виникає, коли пари гомологічних хромосом або сестринських хроматид не розходяться під час поділу клітини (мал. 38.4).



Мал. 38.4. Нерозходження хромосом може відбуватися під час мейозу I, якщо гомологічні хромосоми не розділяються, чи в мейозі II, коли не розділяються сестринські хроматиди

У людини автосомні моносомії завжди летальні для ембріона. Більшість трисомій теж. Однак, додаткова копія деяких менших хромосом (13, 15, 18, 21 або 22) може дозволити ураженій особі вижити протягом короткого періоду після народження або, в деяких випадках, протягом багатьох років. Найпоширенішою трисомією серед ембріонів, які доживають до народження, є синдром Дауна, або трисомія 21.

Мутації можуть бути *спонтанними* (викликаними помилками копіювання під час реплікації ДНК) або *індукованими* впливом зовнішніх факторів. Фактори, що збільшують швидкість генетичних мутацій, називаються мутагенами і можуть призвести до розвитку генетичних

захворювань.

Приклади мутагенів, які можуть викликати мутації, включають:

- **Фізичні** — наприклад, ультрафіолетове випромінювання сонця, гамма-випромінювання радіоізотопів, Х-промені медичного обладнання
- **Хімічні** — наприклад, бензапірен (містяться в тютюновому димі), акролеїн (у пересмажених жирах), нітрити (копченості, консерви)
- **Біологічні** — наприклад, бактерії (такі як Helicobacter pylori), віруси (такі як вірус папіломи людини)

Мутагени, що призводять до утворення раку, більш конкретно називають *канцерогенами*.

Значення мутацій в еволюції органічного світу

Мутації є важливими для еволюції. Кожна генетична особливість у кожному організмі спочатку була результатом мутації.

Більшість мутацій відбуваються в окремих точках гена, змінюючи, можливо, один білок, і тому можуть здаватися неважливими. Наприклад, гени контролюють структуру та ефективність травних ферментів у слинних залозах. На перший погляд, мутації слинних ферментів можуть здаватися маловажливими для впливу на виживання. Однак саме накопичення незначних мутацій слини відповідає за зміїну отруту і, отже, за значну частину еволюції змій. Природний добір у деяких предкових змій сприяв ферментам з дедалі більш агресивними властивостями, але самі мутації були випадковими, створюючи різні отрути в різних групах змій. Зміїні отрути насправді є коктейлем з різних білків з різними ефектами, тому генетично споріднені види мають іншу суміш, ніж інші родини отруйних змій.

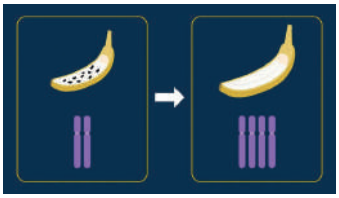
Хоча на історію багатьох видів вплинуло поступове накопичення крихітних точкових мутацій, іноді еволюція відбувається набагато швидше. Кілька типів організмів мають предка, який не зміг правильно пройти мейоз перед статевим розмноженням, що призвело до повної дуплікації кожної пари хромосом. Такий процес створив подію «миттєвого видоутворення» в сірої деревної жаби Північної Америки (мал. 38.5).

Мал. 38.5. Історія сірої деревної жаби, Hyla versicolor є прикладом мутації та її потенційних наслідків. Коли предкова сіра деревна жаба Hyla chrysocelis не змогла розсортувати свої 24 хромосоми під час мейозу, результатом стала H. versicolor . Ця деревна жаба ідентична за розміром, формою та кольором H. chrysocelis, але має 48 хромосом та шлюбний сигнал, який відрізняється від оригінальної H. chrysocelis

Наслідком подвоєння розміру геному в рослин часто є аномально велике насіння або плоди, що може бути значною перевагою, якщо це квіткова рослина (мал. 38.6).

Більшість злаків, які їдять люди, мають більше насіння порівняно з іншими травами, і це часто пов'язано з геномними дуплікаціями, які

відбулися у предків сучасного рису та пшениці, і, оскільки помилка сталася в репродуктивних органах, була успішно передана майбутнім поколінням. Еволюція просто неможлива без випадкових генетичних змін для її матеріалу.



Мал. 38.6. Вплив поліплоїдії на плоди банана. Диплоїдна рослина має невеликі плоди з насінням, тетраплоїдна — великі плоди без насіння

Застосування мутаційної мінливості людиною

Селекція: використання штучно викликаних мутацій для створення нових сортів рослин і порід тварин (мутагенез у пшениці, рису, цитрусових тощо).Наприклад, штучно викликану поліплоїдію, впливом мутагена колхіцину, який перешкоджає формуванню веретена поділу і, як наслідок, розходженню хромосом під час мейозу, в результаті чого гамета матиме подвійний набір хромосом.

Медицина: вивчення мутацій для розуміння причин спадкових хвороб, діагностика генетичних порушень, розробка методів лікування. Наприклад, виявлення мутацій у гені BRCA1 допомагає оцінити ймовірність розвитку раку молочної залози.

Біотехнології: використання мутагенезу для створення промислових штамів мікроорганізмів (наприклад, виробників антибіотиків чи ферментів). Це робить виробництво дешевшим та ефективнішим.

Сучасні напрямки: кероване редагування генів (CRISPR-Cas9) як спосіб точного створення потрібних змін у ДНК організмів.

1. Виберіть правильну відповідь: До фізичних мутагенів належить: *а)* акролеїн; *б)* ультрафіолетове випромінювання; *в)* Helicobacter pylori; *г)* нітрити.

2. • Визначте, які мутації є генними, хромосомними чи геномними.
— Випадіння одного нуклеотиду в гені;
— трисомія 21;
— перестановка ділянки всередині хромосоми;
— подвоєння цілої хромосоми.
• Укажіть приклад із тексту, де геномна мутація стала передумовою видоутворення. Поясніть, у чому суть цього процесу.

3. До вас звернувся підліток, який чув про «корисні мутації». Наведіть приклад такої мутації в людини і поясніть, чому вона може мати адаптивне значення.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/5tJBRWzX і виконайте вправи.

39 МОДИФІКАЦІЙНА (НЕСПАДКОВА) МІНЛИВІСТЬ. НОРМА РЕАКЦІЇ. ВАРІАЦІЙНИЙ РЯД ТА ВАРІАЦІЙНА КРИВА. АДАПТИВНИЙ ХАРАКТЕР МОДИФІКАЦІЙНИХ ЗМІН. ЕПІГЕНЕТИЧНЕ УСПАДКУВАННЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чим модифікаційна мінливість відрізняється від мутаційної;
- що таке норма реакції і як вона відображає мінливість;
- як побудувати варіаційний ряд і варіаційну криву;
- про адаптивність модифікацій;
- як епігенетичні механізми впливають на фенотип.

Чи можуть відрізнятись однояйцеві (монозиготні) близнюки, в яких однаковий генотип, які зростають в одній і тій же сім'ї, відвідують одну і ту ж школу чи дитячий садок?

Якщо серед ваших знайомих є такі, то ви, мабуть, не просто помічали, що різниця є, а навіть вам вони здаються дуже різними. Яка ж мінливість спричиняє цю особливість? Така мінливість називається неспадковою або модифікаційною. **Модифікаційна мінливість** — це зміни ознак організмів під впливом факторів навколишнього середовища, які не пов'язані зі зміною генотипу і не успадковуються.

Розпізнати модифікації можна за характерними властивостями.

Мал. 39.1. Рачок-артемія і стрілиця

1. Ступінь вираження модифікації залежить від інтенсивності та тривалості дії на організм певного чинника. Наприклад, у дрібного рачка-артемії ступінь волохатості задньої частини черевця залежить від солоності води: вона тим більша, чим нижча концентрація солей у воді. У всіх рослин стрілиці, занурених у воду, утворюються довгі й тонкі листки, а в тих, які ростуть на суходолі, — вони стрілоподібні. У рослин стрілиці, занурених у воду частково, формуються листки обох типів (мал. 39.1).

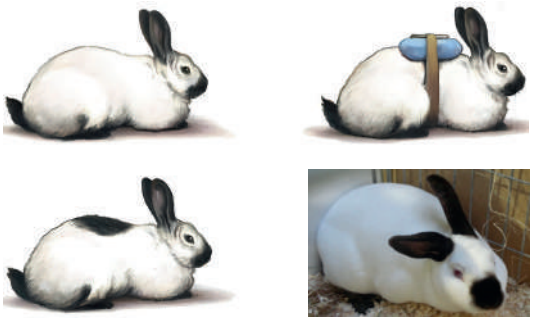
2. Модифікації не успадковуються. Август Вейсман, німецький зоолог, протягом багатьох поколінь відрізав мишам хвости, але в безхвостих батьків завжди народжувалися хвостаті нащадки.

3. Модифікації можуть зникати протягом життя особин, якщо припиняється дія чинника, який їх спричинює. Засмага, набута людиною влітку, поступово зникає протягом осінньо-зимового періоду. Якщо рослину стрілолист пересадити з води на суходіл, то нові листки матимуть не видовжену, а стрілоподібну форму.

4. Модифікаційні зміни, що виникають на ранніх етапах онтогенезу можуть зберігатися впродовж усього життя особин. Викривлення кісток нижніх кінцівок унаслідок рахіту зберігаються протягом усього життя.

5. Модифікації спрямовані на пристосування організмів до змін дії

тих чи тих факторів довкілля. Зміна листків стрілолиста із стрілоподібної на стрічкоподібну форму при зануренні цієї рослини у воду захищає її від ушкодження течією. Зміна хутра ссавців під час осіннього линяння на густішу забезпечує захист від дії низьких температур, а засмага людини — від шкідливої дії сонячного випромінювання.



Мал. 39.2. Якщо виголити хутро на тілі гімалайського кролика і залишити на цьому місці міхур з льодом, то під ним почне рости темна шерсть

Гімалайський кролик (мал. 39.2) має біле забарвлення хутра, але вуха, лапи і хвіст вкриті темним хутром. Якщо такий кролик зростатиме при температурі вище 25°С, то він буде повністю білим, а якщо при низьких температурах, то може бути повністю чорним.

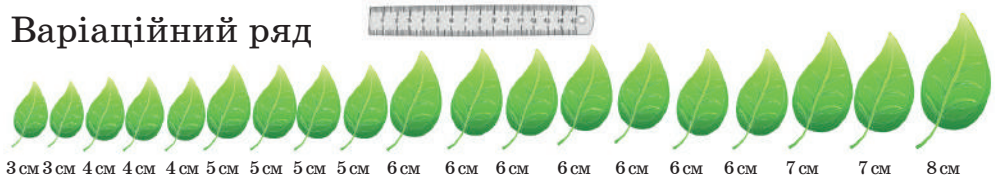
Поміркуйте, до яких факторів довкілля спрямована така адаптація.

Мал. 39.3. Двоє друзів з однаковою пігментацією шкіри провели однаковий час на сонці, але засмагли по-різному

Модифікаційна мінливість залежить від умов середовища, але міру прояву ознаки визначає відповідний ген. Засмага залежить не тільки від кількості ультрафіолетового випромінювання, отриманого клітинами шкіри, а й від того, яка норма реакції цієї ознаки (мал. 39.3). **Норма реакції** — межі зміни ознаки під дією середовища.

Як ви вважаєте, у кого із дітей ширші межі вироблення пігменту, а отже, і ширша норма реакції?

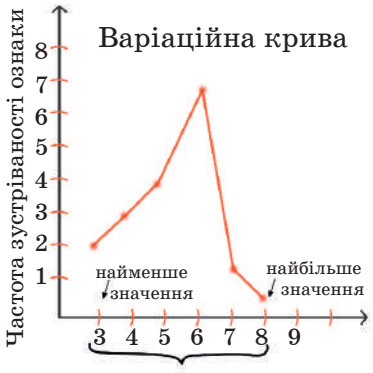
Як можна визначити норму реакції? Якщо взяти з одного дерева з різних місць крони листки і викласти їх в один ряд за розміром, то ми отримаємо варіаційний ряд, або ряд мінливості ознаки. Відразу можна зауважити, що найбільше листків середнього розміру, попри те, що є як зовсім малі, так і досить великі (мал. 39.4).



Мал. 39.4. Зразок побудови варіаційного ряду

Якщо ж на основі цих даних побудувати графік, то ми отримаємо варіаційну криву (мал. 39.5).

Усі листки дерева мають однаковий генотип, але відмінний фенотип саме через те, що реалізація генотипу проходила в дещо різних умовах: кількість світла, постачання водою, вплив сторонніх чинників. Таким чином рослина адаптується до максимальної можливості виживання.



Мал. 39.5. Щоб побудувати варіаційну криву, за горизонталлю (X) розміщуємо значення ознаки, за вертикаллю (Y) — скільки разів це значення зустрічалося. Для кожного значення ознаки ставимо точку навпроти його частоти

Є ще один цікавий механізм впливу середовища на прояв роботи гена: епігенетичний. Ми знаємо, що гени — це ділянки ДНК, у яких записано інформацію про білки. Але не всі гени працюють одночасно. У кожній клітині нашого тіла однаковий набір ДНК, проте одні гени активні в м'язових клітинах, інші — у нервових. Хтось має «тихий» ген, хтось «гучний», і це не випадковість, а результат *епігенетичних* механізмів. **Епігенетика** — це наука, що вивчає, як клітина керує активністю генів без зміни самої послідовності ДНК. Вона пояснює, чому однакові гени можуть працювати по-різному залежно від середовища, харчування, стресу, сну чи навіть емоцій.

Наприклад, **метилювання** ДНК, коли до певних ділянок ДНК приєднуються метильні групи ($-CH_3$), «закривають» доступ до цього гена — він перестає зчитуватися. Модифікації **гістонів** можуть змінювати свій заряд чи форму через приєднання активних груп — і ділянка ДНК або стає доступною, або згортається щільніше і ген «замовкає». Не всі РНК кодують білки. Деякі короткі молекули **мікроРНК** можуть: блокувати матричну РНК і не давати їй транслюватися в білок або притягати білкові комплекси, які змінюють активність генів.

На епігенетичні механізми може впливати харчування: нестача або надлишок певних речовин, фізична активність: регулярні тренування активують гени, пов'язані з обміном речовин, хронічний стрес змінює рівень гормонів, що впливають на роботу епігенетичних ферментів, вік: із роками накопичуються епігенетичні «мітки», і клітини поступово змінюють активність генів.

Під час вагітності харчування матері, рівень стресу, гормони, навіть емоційний стан впливають на епігенетичні мітки в клітинах плоду. Наприклад: якщо мати під час вагітності переживала сильний стрес, у дитини можуть бути змінені гени, пов'язані з реакцією на кортизол; якщо жінка мала бідний раціон — гени, що регулюють обмін жирів і вуглеводів, можуть працювати інакше, підвищуючи ризик хвороб обміну речовин.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/br3gUWb8 або за QR-кодом і виконайте лабораторну роботу «Вивчення мінливості в рослин і тварин».

1. Чим відрізняється модифікаційна мінливість від мутаційної?
2. Що організм успадковує: ознаку чи норму реакції ознаки?
3. • Визначте, до яких умов виникли адаптації таких модифікацій:
— форма листків стрілиці;
— розвиток м'язової системи людини;
— пігментація шкіри людини на сонці;
— покриття тіла гімалайського кролика темним хутром.
• Побудуйте варіаційну криву, використовуючи наведений варіаційний ряд, за зразком малюнка 39.5.
— Маса насінин квасолі (г): 2,4; 2,6; 2,7; 2,7; 2,8; 2,8; 2,9; 2,9; 2,9; 3,0; 3,0; 3,0; 3,1; 3,1; 3,1; 3,2; 3,2; 3,3; 3,3; 3,4; 3,4; 3,4; 3,5; 3,5; 3,6; 3,6; 3,7; 3,8; 3,8; 3,9; 4,0.
• Чим епігенетика відрізняється від класичної генетики?
4. Фермер вирішив розводити гімалайських кроликів. Влітку тварини були майже білі, а взимку — помітно потемніли. Фермер занепокоївся й подумав, що це ознака хвороби. Як ви поясните таку ситуацію і що можете порадити фермерові, якщо він хоче, щоб його кролики залишалися білими?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/9tJBITMM і виконайте вправи.

Проєктна діяльність: «Дослідження властивостей модифікаційної мінливості на прикладі деяких ознак відомих людей».

40 ГЕНЕТИКА ЛЮДИНИ. ОСОБЛИВОСТІ ГЕНОМА ЛЮДИНИ. СПАДКОВІ ЗАХВОРЮВАННЯ І ВАДИ ЛЮДИНИ, ЗАХВОРЮВАННЯ ЛЮДИНИ ЗІ СПАДКОВОЮ СХИЛЬНІСТЮ, ЇХНІ ПРИЧИНИ. МЕДИКО-ГЕНЕТИЧНЕ КОНСУЛЬТУВАННЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- ✓ про особливості генома людини;
- ✓ як одна зайва хромосома здатна змінити ціле життя;
- ✓ чому знання про свої гени — це не вирок, а компас;
- ✓ про медицину майбутнього, в якій можна передбачити ризики, обрати лікування й навіть змінити долю.

Коли ми дивимося в дзеркало, бачимо щось більше, ніж просто відо-

браження. Ми бачимо історію — мільярди років еволюції, закодовані в кожній клітині нашого тіла. У кожному з нас власний «генетичний сценарій», який визначає, як ростуть наші кістки, як працює мозок, навіть як реагує організм на каву.

Людський геном містить більше 20 тисяч генів, але вони займають лише близько 1,5% усієї ДНК. Решта довго вважалася «сміттєвою ДНК», однак тепер відомо, що ці ділянки регулюють, коли, де і наскільки активно працюють гени, як диригент у великому генетичному оркестрі.

Мал. 40.1. Вітрувіанська людина на пам'ятній монеті НБУ. Малюнок під назвою «Вітрувіанська людина» був створений Леонардо да Вінчі в 1490 році. Він мав на меті показати нормальні пропорції людського тіла. «Вітрувіанська людина» використовується сьогодні для представлення іншого підходу до людського тіла. Він символізує науково-дослідний проєкт, який розпочався рівно через 500 років після того, як да Вінчі створив цей малюнок. «Проєкт геному людини» є найбільшим спільним біологічним дослідницьким проектом, який будь-коли здійснювався

У 1990 році понад 20 країн світу розпочали грандіозний міжнародний експеримент — Human Genome Project (HGP). Його метою було вперше прочитати повний текст людського геному — тобто визначити послідовність 3,2 мільярда нуклеотидів ДНК. У 2003 році було офіційно оголошено, що геном «прочитано» на 99%. Це відкриття стало революцією в біології: людина вперше побачила власну генетичну інструкцію. Проєкт дав змогу знайти гени багатьох спадкових вад, розробити нові методи діагностики та створити основу персоналізованої медицини (мал. 40.1).

У 2022 році вчені завершили роботу, яку розпочали попередники: вдалося прочитати геном людини повністю, без прогалин, навіть у ділянках центромер і теломер, де раніше це здавалося неможливим. Тепер ми маємо не лише карту, а повний атлас геному людини. У геномі людини є десятки унікальних генів: FOXP2 — ген мовлення, який забезпечує здатність до складної артикуляції; HAR1 — бере участь у формуванні кори головного мозку, розвивається інакше, ніж в інших приматів; ARHGAP11B – сприяє збільшенню кількості нейронів у мозку людини, особливо в лобових частках; SRGAP2C — гальмує дозрівання нервових клітин, що дозволяє мозку довше розвиватися, — одна з причин нашої здатності до навчання. Усі люди на Землі на 99,9% мають однакову ДНК. Решта 0,1% визначає колір очей, шкіри, групу крові тощо. EPAS1 — допомагає тибетцям жити на висоті; LCT — дає змогу дорослим перетравлювати молоко; AMY1 — підвищує здатність перетравлювати крохмаль.

У більшості випадків гени працюють злагоджено, але іноді трапляються мутації — зміни в послідовності ДНК. Вони можуть бути випад-

ковими або спричиненими мутагенами. Якщо мутація відбувається у статевих клітинах, вона може передатися дітям — тоді виникають спадкові захворювання. **Генні** мутації, коли пошкодження ДНК відбувається в межах одного гена, викликають:

- *муковісцидоз* — дефект гена у 7 хромосомі, який відповідає за транспорт солей у клітинах, призводить до накопичення густого слизу в легенях;
- *фенілкетолургію* — дефект гена у 12 хромосомі, що викликає порушення обміну амінокислот, що може спричинити ураження мозку, якщо не дотримуватися спеціальної дієти;
- *гемофілію* — дефект гена у Х хромосомі, спричинює недостатність факторів зсідання крові;
- *серпоподібну клітинну анемію* — ген в 11 хромосомі, де один аденін замінюється на тимін, що веде до утворення аномального гемоглобіну.

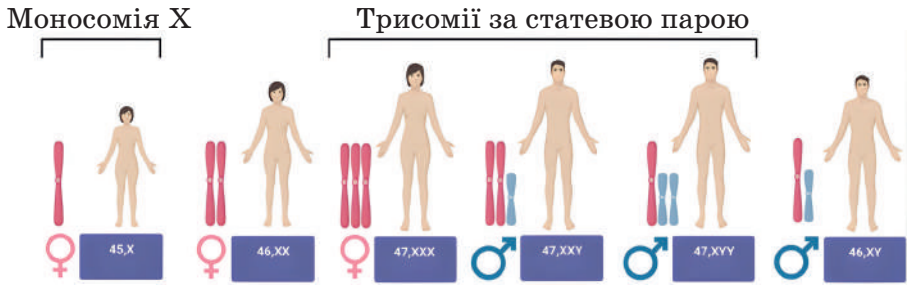
Геномні мутації, які змінюють кількість хромосом у ядрі, можуть призводити до виникнення вад розвитку внаслідок трисомії аутосом:

Синдром Дауна (трисомія 21-ї хромосоми). *Ознаки*: характерні риси обличчя, знижений м'язовий тонус, затримка розвитку, але тепле, доброзичливе ставлення до людей. Люди з цим синдромом часто мають чудову соціальну адаптацію за підтримки родини.

Синдром Едвардса (трисомія 18-ї хромосоми). *Ознаки*: порушення розвитку внутрішніх органів, низька маса тіла, коротка тривалість життя.

При анеуплоїдії за статевою парою (мал. 40.2) виникають:

Синдром Клайнфельтера (47,XXY) — зайва Х-хромосома. *Ознаки*: високий зріст, слабкий розвиток вторинних статевих ознак, безпліддя. Часто прояви незначні, тому діагноз встановлюють у дорослому віці.



Мал. 40.2. Анеуплоїдії за статевими хромосомами мають схожі, але помірні прояви через інактивацію зайвих Х-хромосом та малу кількість генів на Y-хромосомі

Синдром Шерешевського-Тернера (45,X) — відсутня одна хромосома. *Ознаки*: низький зріст, набряки, недорозвинені статеві ознаки, безпліддя. Інтелект зазвичай збережений.

Синдром Якоба (XYY) — зайва Y-хромосома. Такі чоловіки зазвичай мають високий зріст, можуть мати легкі труднощі з навчанням або

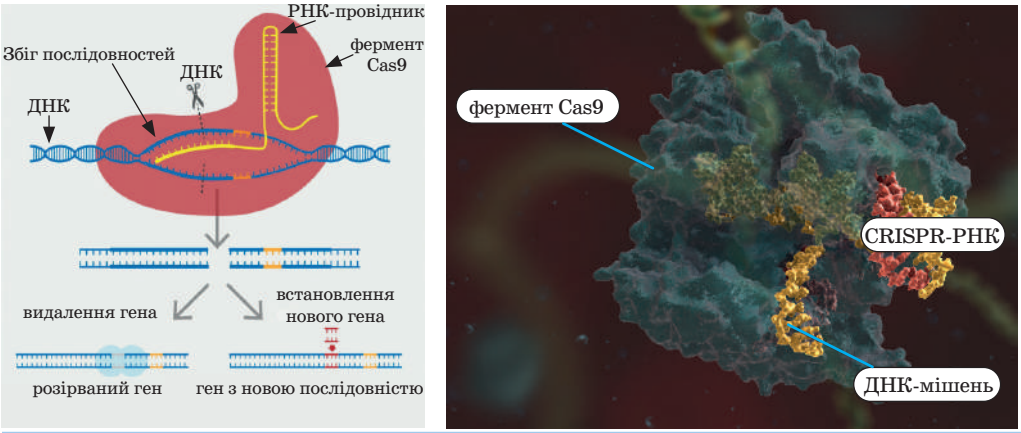
мовленням, але більшість живе звичайним життям.

Завдяки сучасним методам діагностики такі хвороби можна виявити ще до народження дитини, а деякі — ефективно контролювати лікуванням чи змінами способу життя.

Не всі хвороби «запрограмовані». Часто гени лише підвищують ризик, але все вирішує середовище. Наприклад: варіанти генів BRCA1 і BRCA2 підвищують ризик раку молочної залози, але не гарантують його; гени, пов'язані з ожирінням чи діабетом, активуються лише при неправильному харчуванні та низькій руховій активності; стрес може запускати гени, пов'язані з депресією або серцевими розладами.

Наука дедалі чіткіше показує: генетика задає напрямок, але середовище малює карту. Здоровий сон, фізична активність, раціональне харчування, підтримка близьких — усе це буквально змінює роботу наших генів. Особливості способу життя можуть передаватися дітям, навіть якщо вони не зазнавали тих самих умов, про що свідчать дослідження у галузі епігенетики. Так наука поступово розкриває, як досвід батьків може впливати на здоров'я наступних поколінь.

Сьогодні ж нові технології — секвенування нового покоління — дають змогу розшифрувати геном за кілька днів і за сотні, а не тисячі доларів. А завдяки системі CRISPR-Cas9 (мал. 40.3) вчені вже можуть редагувати окремі гени, ніби текст у документі. Такі методи використовують для лікування спадкових хвороб, раку, ВІЛ, а також для створення персоналізованих ліків, підібраних під конкретну людину.



Мал. 40.3. Програмоване редагування генома за допомогою генетичних ножиць CRISPR-Cas9 — це новий молекулярно-біологічний метод, який дозволяє вченим розрізати будь-який ланцюг ДНК у певній точці та, під час подальшого ремонту, вирізати, обмінювати або навіть вставляти окремі будівельні блоки ДНК і таким чином перезаписувати окремі гени

Проте редагування генів викликає й етичні питання: де межа між лікуванням і втручанням у природу людини? Чи маємо ми право змінювати геном ще ненародженої дитини? Саме тому наука і суспільство

шукають баланс між можливістю і відповідальністю.

Коли в родині є спадкові захворювання, майбутні батьки можуть звернутися до медико-генетичного консультанта. Медико-генетичне консультування — генетика, що допомагає родинам. Такі фахівці аналізують родовід, результати аналізів, генетичні тести і пояснюють, який ризик передання захворювання дитині. Вони не «пророкують долю», а допомагають приймати інформовані рішення.

Сьогодні генетичне консультування особливо важливе: при плануванні вагітності; якщо в родині були випадки генетичних хвороб; при безплідді або повторних викиднях; для вибору персоналізованого лікування.

Генетичні дослідження сьогодні — не лише про хвороби.

Вони допомагають підібрати ліки, визначити схильність до спортивних навантажень, оцінити ризики старіння або навіть реакцію на кофеїн. Ми живемо в час, коли наука навчилася читати, тлумачити і навіть переписувати генетичне кодування організму. Уже сьогодні розробляються генотерапевтичні препарати, які виправляють помилки в ДНК, а лікарі можуть прогнозувати реакцію пацієнта на ліки ще до початку лікування.

Але, попри всі досягнення, головне — розуміти, що наші гени не визначають нас повністю. Вони дають можливості, а що з ними робити, вирішуємо ми самі. Наше майбутнє не в генах. Воно — в наших руках.

1. Скільки генів містить геном людини?
2. Коли офіційно завершили основний етап проєкту «Геном людини»?
3. Яка мутація спричиняє синдром Дауна?
4. Поясніть, чому анеуплоїдії за статевими хромосомами мають менш виражені прояви, ніж за аутосомами?
5. Як сучасні методи, такі як CRISPR-Cas9, можуть допомогти в лікуванні спадкових хвороб?
6. Наведіть приклади впливу епігенетичних чинників на здоров'я людини.
7. До медико-генетичного центру звернулася пара: у родині жінки є випадок фенілкетонурії, а чоловік — здоровий.
   Поясніть: чому лікар призначить молекулярно-генетичне тестування обом; яке значення має результат для планування вагітності і чи може їхня дитина бути хворою, якщо обоє здорові.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/QtJBPsnb і виконайте вправи.

Інформаційно-пошуковий проєкти (за вибором): 1) програма «Геном людини»: етапи, результати; 2) захворювання зі спадковою схильністю: причини прояву, профілактика.

«Закономірності спадковості та мінливості організмів»

1. Ген — це:
   а) уся ДНК клітини
   б) ділянка ДНК, що кодує РНК або білок
   в) послідовність, що не несе інформації
   г) послідовність амінокислот у білку
2. У прокаріотів ДНК знаходиться:
   а) у ядрі *б)* у хлоропластах *в)* у нуклеоїді
   г) у цитоплазматичних пухирцях
3. Старт-кодон, з якого починається трансляція:
   а) УАА *б)* УГА *в)* ЦАГ *г)* АУГ
4. У якому процесі утворюється мРНК?
   а) реплікація *б)* транскрипція *в)* трансляція *г)* мутація
5. Синдром Дауна виникає внаслідок:
   а) мутації в одному гені *б)* трисомії 21-ї хромосоми
   в) делеції частини хромосоми *г)* нестачі ферменту
6. Мутації — це:
   а) адаптивні зміни фенотипу
   б) зміни послідовності нуклеотидів ДНК
   в) тимчасові реакції на середовище
   г) результат нормальної реплікації
7. Мінливість — це:
   а) здатність організмів підтримувати сталість ознак
   б) здатність набувати відмінностей під впливом середовища і спадковості
   в) процес передавання спадкових ознак
   г) мутація генів
8. Установіть відповідність між методом і його описом:

Метод	*Опис*
а) гібридологічний	*1)* вивчення родоводів людини
б) генеалогічний	*2)* схрещування особин із різними ознаками
в) цитогенетичний	*3)* аналіз хромосом під мікроскопом
г) близнюковий	*4)* вивчення співвідношення ролі спадковості і середовища на фенотип
	5) збір та аналіз статистичних даних про частоту ознак у популяціях

9. Установіть відповідність між видом мутації та її прикладом:

Вид мутації	*Приклад*
а) генна	*1)* випадіння одного нуклеотида
б) хромосомна	*2)* перестановка ділянки у хромосомі
в) геномна	*3)* трисомія 18
	4) метилювання ДНК

ТЕМА 4

РОЗМНОЖЕННЯ ТА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ РОЗВИТОК ОРГАНІЗМІВ

41 ЗДАТНІСТЬ ДО РЕПРОДУКЦІЇ — УНІВЕРСАЛЬНА ВЛАСТИВІСТЬ ОРГАНІЗМІВ. СПОСОБИ РОЗМНОЖЕННЯ ОРГАНІЗМІВ: СТАТЕВЕ ТА НЕСТАТЕВЕ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- в чому різниця між статевим і нестатевим розмноженням;
- про тип розмноження, для якого немає терміна;
- чи можливе безстатеве розмноження в людей.

Живі істоти наявні на планеті понад 4 мільярди років, тоді як тривалість життя окремих організмів не перевищує декількох тисяч років (зокрема, такого віку досягають деякі дерева). Отож, час існування живої матерії суттєво перевищує час існування окремих представників. Це можливо завдяки одній із головних властивостей живих організмів — здатності до розмноження, тобто відтворення собі подібних.

Дану властивість слід розглядати вкупі з іншою важливою ознакою життя — здатністю еволюціонувати, тобто змінюватися, пристосовуючись до змін у навколишньому середовищі. Нащадки завжди схожі і водночас трішки відрізняються від предків. Самовідтворення та зміна — процеси із різним спрямуванням. Та саме завдяки балансу між ними життя не припиняється впродовж 4 мільярдів років і ще довго існуватиме надалі.

Яка різниця між статевим і нестатевим розмноженням?

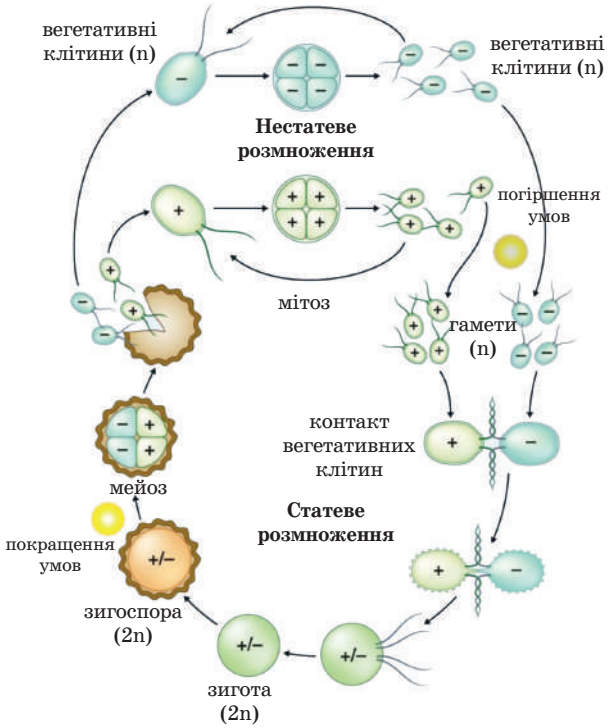
Поділ розмноження на статеве і нестатеве

Наявні чимало способів розмноження, їх можна поділити на два різновиди: статеве і нестатеве розмноження. Межа між ними складніша, ніж спершу здається. На рівні багатоклітинних організмів головною ознакою статевого розмноження є використання гамет — особливих клітин, що утворилися шляхом мейозу, їхнім основним призначенням є утворення нових організмів. Зазвичай для розвитку гамети в новий організм необхідне злиття з іншою статевою клітиною, але, як переконаємося далі, це не обов'язкова умова. Нестатеве розмноження багатоклітинних організмів відбувається за участю соматичних клітин, тобто клітин, що утворилися шляхом мітозу і необхідні перш за все власному організму, а не наступному поколінню.

В одноклітинних організмів межа між статевим і нестатевим розмноженням нечітка. Існує чимало варіантів чергування статевого і нестатевого розмноження, які розглянемо на прикладі відомого модельного об'єкта біологічних досліджень — зеленої одноклітинної водорості хламідомонади *Chlamydomonas reinhardtii*.

За сприятливих умов хламідомонади розмножуються безстатево — поділяються шляхом мітозу на окремі гаплоїдні вегетативні клітини, кожна з яких є самодостатнім організмом (мал. 41.1). На цьому етапі непомітні відмінності в будові різних клітин. Коли ж умови змінюються

на несприятливі (засуха, похолодання тощо), хламідомонади вдаються до статевого розмноження. Найчастіше це відбувається шляхом злиття двох вегетативних клітин, однакових у зовнішній будові, але відмінних за будовою білків на джгутиках. Носіїв одного різновиду білків позначають знаком плюс (+), інших — знаком мінус (–). Об'єднання і подальший статевий процес можливий лише між носіями різних білків (+ та –). Носії одного різновиду не об'єднуються.



Мал. 41.1. Схема життєвого циклу хламідомонади Chlamydomonas reinhardtii. Зауважте, що це лише один із варіантів розмноження, властивий даному виду. Понад те: в інших видів роду Chlamydomonas життєві цикли відрізняються

Внаслідок злиття двох вегетативних клітин, утворюється одна диплоїдна зигота, що перетворюється на зигоспору. Для цього вона вкривається захисною оболонкою і так переживає несприятливі умови. Коли обставини змінюються для хламідомонад на краще, в зигоспорі відбувається мейоз, утворюється чотири гаплоїдних вегетативних клітини, що незабаром покидають захисну оболонку і переходять до самостійного життя. Як бачимо, в даному випадку статевий процес (злиття клітин) відбувся раніше від мейотичного поділу.

На цьому життєвий цикл хламідомонади замкнено, водорості знову перейшли до вегетативних клітин. Але внаслідок статевого процесу вони не є точними копіями вегетативних клітин попередніх поколінь, а трішки відрізняються від них. Це важливо, адже умови довкілля також змінюються і з часом з'являються нові обставини. Збільшення різноманіття дозволяє пристосуватися до змін. Звісно, деякі особини виявляться менш життєздатними і зникнуть, внаслідок дії природного добору. Але будуть такі, що пристосовані до нових умов краще, ніж попереднє

покоління.

На прикладі хламідомонади помітні переваги стратегій нестатевого і статевого розмноження. Нестатеве розмноження доцільне, коли умови сприятливі, отже, не потрібно пристосовуватися до змін. Основне завдання організму — збільшити чисельність, у цьому випадку нестатеве розмноження більш ефективне за статеве. Коли ж умови довкілля далекі від оптимальних, організми пристосовуються — збільшують різноманіття.

Поширення статевого і нестатевого розмноження в природі

Жива матерія вражає розмаїттям проявів, для деяких ще не розроблено термінів, що описують розмноження. Безумовно, що у вірусів та віроїдів відбувається самовідтворення та еволюція, але цей процес не є ні статевим, ні нестатевим розмноженням. Збільшення числа віроїдів відбувається шляхом реплікації їхнього генетичного матеріалу. Для вірусів цього терміну недостатньо, оскільки реплікація стосується виключно генів, тоді як розмноження вірусів передбачає також утворення інших компонентів. Звісно, в цьому немає жодних ознак статевого процесу. Однак для розмноження вірусів обов'язкове використання іншого організму. Паразитична бактерія спроможна самостійно розмножуватися шляхом поділу, хазяїн є лише джерелом ресурсів. Віруси в розмноженні залежать від об'єднання із клітиною хазяїна.

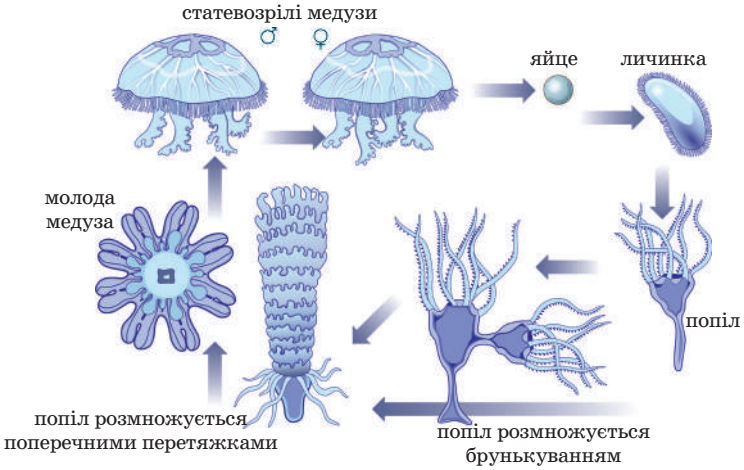
Прокаріотичним організмам — бактеріям, ціанобактеріям та археям — притаманне лише нестатеве розмноження. Збільшення числа відбувається шляхом подвоєння генетичного матеріалу і простого поділу клітини навпіл. Мітоз у прокаріотів відсутній, що буде пояснено в подальших параграфах. Одним із шляхів збільшення різноманіття для прокаріот є кон'югація — злиття двох клітин, обмін спадковою інформацією і подальше розділення на дві клітини. Внаслідок цього генотип однієї клітини змінено завдяки вбудовуванню фрагментів ДНК іншої клітини. Кон'югація є статевим процесом, внаслідок якого зростає різноманіття, але не кількість. Отже, у прокаріот наявний статевий процес, але немає статевого розмноження.

В евкаріот наявне як статеве розмноження, так і нестатеве. Збільшення кількості клітин, зокрема при нестатевому розмноженні, відбувається шляхом мітотичного поділу. В одноклітинних евкаріот також можлива кон'югація.

Безстатеве розмноження поширене поміж усіх еволюційних ліній грибів і рослин. У багатьох тварин також можливе безстатеве розмноження, але тільки в тих представників, що мають відносно просту нервову систему. У тварин зі складною нервовою системою ембріон на ранніх стадіях спроможний поділитись із подальшим розвитком двох незалежних організмів. Цей процес по суті не відрізняється від безстатевого розмноження і відбувається в різних тварин, зокрема людей. Коли нервова система досягає більш-менш високого рівня складності,

безстатеве розмноження неможливе навіть на стадії ембріону.

Деяким видам тварин притаманна послідовна зміна статевого і нестатевого покоління. Прикладом чергування поколь у жалких (мал. 41.2). Одне покоління — медузи. Більшість видів на цьому етапі вільно плавають у воді і розмножуються статевим шляхом. Із запліднених яйцеклітин народжується личинка, яка згодом осідає на дно і виростає в поліп — наступне покоління в життєвому циклі жалких. Поліпи не вміють плавати, більшість із них все життя прикріплені до місця де осіла личинка. Поліпи розмножуються безстатево. Час від часу з тіла поліпа відбруньковується новий поліп. На певному етапі життя поліп поділяється, але не брунькуванням, а поперечними перетяжками на декілька частинок, з кожної утворюється нова медуза.



Мал. 41.2. Життєвий цикл жалких на прикладі медузи Ауралія. Медузи — покоління, що розмножується статево, поліпи — покоління, що розмножується безстатево

У межах кожного типу розмноження — нестатевого та статевого — є різні шляхи реалізації, які розглянемо на наступних уроках.

1. Дайте визначення терміна «кон'югація організмів».
2. Чому реплікація вірусів не тотожна поняттю розмноження?
3. Вкажіть особливості розмноження прокаріотичних організмів.
4. Охарактеризуйте особливості статевого розмноження хламідомонади.
5. Охарактеризуйте поширення безстатевого розмноження в різних груп евкаріотичних організмів.
6. Слони вирізняються багатьма особливостями. Зокрема, це тварини із надзвичайно тривалою вагітністю (більше 2 років!) і, відповідно, низькою народжуваністю. Попри те, що це сильні тварини, в еволюції слонів часто траплялися вимирання: впродовж останніх 40 мільйонів років зникло щонайменше 100 видів слонів, що дуже високий показник. Поясніть, як можуть бути пов'язані між собою вказані особливості.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/EtJBPBPK і виконайте вправи.

42 ОСНОВНІ ФОРМИ НЕСТАТЕВОГО РОЗМНОЖЕННЯ ОРГАНІЗМІВ (ЗА УЧАСТЮ ОДНІЄЇ КЛІТИНИ ТА ВЕГЕТАТИВНЕ)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про способи збільшити генетичне різноманіття;
- про різноманіття способів нестатевого розмноження у природі;
- чи важко створити клона.

Першими живими організмами на планеті були прокаріоти. Ці істоти розмножуються виключно нестатево, отже нестатеве розмноження з'явилося раніше від статевого. У процесі еволюції з'явилися різні форми нестатевого розмноження, частина евкаріотичних організмів зберегла або набула повторно здатності розмножуватися нестатево.

Нестатеве розмноження прокаріотичних організмів

Основним способом розмноження прокаріотів є бінарний поділ, тобто розділення однієї материнської клітини на дві дочірніх. Перед початком поділу створюється копія хромосоми, яка надходить до однієї із дочірніх клітин. Оскільки у прокаріот лише одна хромосома, то немає потреби в мітозі, адже основне призначення мітозу — правильний розподіл хромосом. Інколи в прокаріот виникає поліплоїдія і кількість хромосом зростає. Подальший розподіл хромосом не має значення і відбувається нерівномірно. Головне, щоб кожна дочірня клітина отримала не менше однієї хромосоми. Виникнення поліплоїдії спершу було не пов'язане із розмноженням. Наприклад, деякі бактерії використовують додаткові молекули ДНК як спосіб запасання Фосфору в середовищі із нестачею цього елемента. Втім, можливо, поліплоїдія прокаріотичних предків евкаріот стала причиною появи більшого числа хромосом і, відповідно, мітозу.

Швидкість поділу прокаріот висока. За сприятливих обставин більшість бактерій поділяються щопівгодини, у деяких видів між поділами проходить менше 10 хвилин. Це сприяє швидкому опануванню середовища, але новоутворені клітини є клонами материнських організмів. Для кращого пристосування до змін довкілля необхідна поява нових комбінацій генів. Прокаріоти використовують *горизонтальне перенесення генів*, тобто обмін спадковою інформацією між представниками одного покоління.

Пригадайте, які три способи горизонтального перенесення генів наявні у бактерій.

Нестатеве розмноження одноклітинних евкаріотичних організмів

В евкаріотичних організмів завжди більше однієї хромосоми: в одноклітинних мінімальний гаплоїдний набір — три хромосоми (у паразитичної джгутикової істоти трихомонада вагінальна), більшість видів

мають понад 10 хромосом. Всі одноклітинні евкаріотичні організми здатні до нестатевого розмноження поділом навпіл, але для правильного розподілу хромосом використовується мітоз.

Інколи поділ відбувається шляхом *брунькування*. Під час поділу утворюється дві дочірні клітини однакових розмірів, менших, ніж у материнської клітини. У випадку брунькування одна клітина (материнська) залишається великих розмірів, від неї від'єднується клітина менших розмірів — дочірня. Брунькування властиве, зокрема, дріжджам.

Деякі одноклітинні евкаріотичні організми вдаються до збільшення чисельності шляхом *шизогонії*. При цьому ядро материнської клітини декілька разів поділяється, клітина розпадається на велику кількість невеликих клітин. Таким чином відбувається розмноження малярійного плазмодію в клітинах печінки та еритроцитах людини.

Поміж одноклітинних евкаріот деяким властиве горизонтальне перенесення генів завдяки кон'югації (інфузорії, діатомові та зелені водорості. В усіх можлива вірусна трансдукція.

Нестатеве розмноження багатоклітинних евкаріотичних організмів

У багатоклітинних евкаріотичних організмів розрізняють три способи нестатевого розмноження: спорами, вегетативне розмноження та фрагментацію.

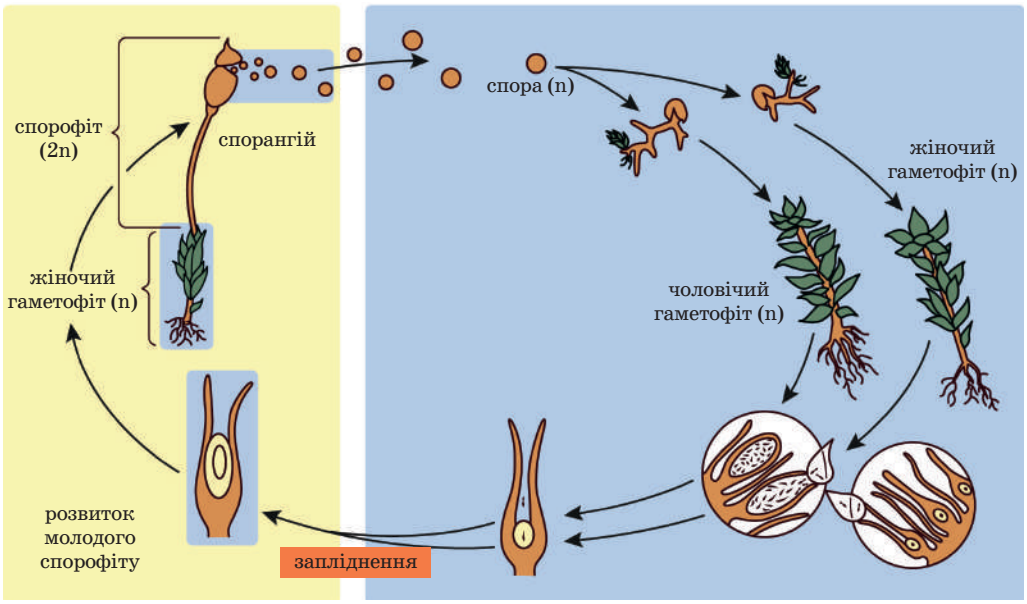
Розмноження спорами властиве рослинам і грибам. У даному випадку термін «спора» позначає не стадію для переживання несприятливих умов (як у бактерій), а клітину, що призначена для формування нового організму. Спори, як і гамети, не потрібні безпосередньо для життєдіяльності організму, що їх утворив. Також спори та гамети мають гаплоїдний набір хромосом, але, на відміну від гамет, ніколи не потребують злиття з іншою клітиною.

Пригадайте особливості чергування поколінь у рослин. У яких рослин у життєвому циклі переважає гаметофіт, а в яких — спорофіт?

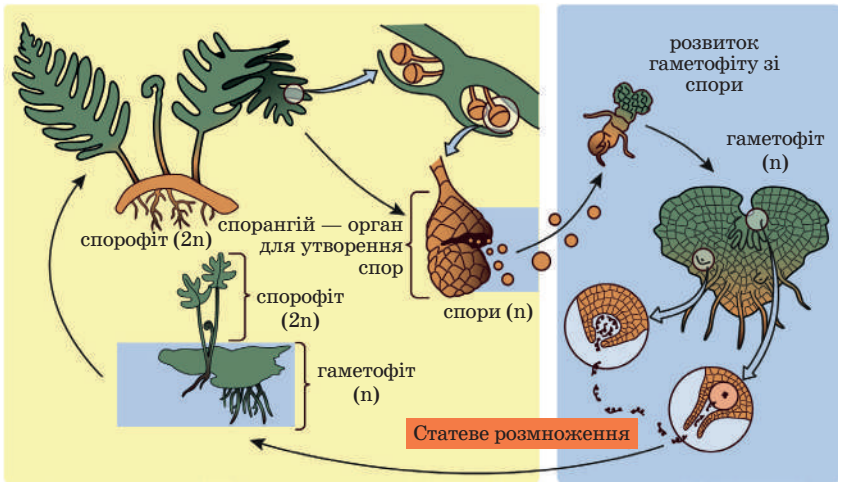
У рослин має місце чергування поколінь: спорофіту та гаметофіту. Спорофіт — диплоїдне покоління, яке шляхом нестатевого розмноження спорами утворює наступне покоління — гаметофіт. Особливості чергування статевого й нестатевого покоління в різних групах відрізняються.

У мохоподібних, на відміну від інших рослин, гаметофіт тривалий час існує самостійно. Завдяки статевому розмноженню, на жіночому гаметофіті розвивається спорофіт, який утворює спори. Зі спор з'являється нове покоління гаметофіту (мал. 42.1).

У плауноподібних, хвощеподібних та папоротеподібних спорофіт існує впродовж тривалого часу і досягає великих розмірів (інколи це дерева). Гаметофіт невеликий та існує недовго. У спеціальних органах спорофіту з'являються спори, які розповсюджуються і дають початок поколінням гаметофіту (мал. 42.2).



Мал. 42.1. Життєвий цикл моху політрих



Мал. 42.2. Життєвий цикл папороті

У голонасінних та покритонасінних рослин також переважає спорофіт (уявіть будь-якого представника, і це буде рослина покоління спорофіту). Спори не покидають організм, нове покоління гаметофіту утворюється на спорофіті. Наприклад, у хвойних рослин спори з'являються під лусочками шишок і там розвиваються в гаметофіт. У покритонасінних рослин квітка є частиною спорофіту. Всередині пиляків та зав'язі з'являються спори, які розвиваються в невеликі гаметофіти.

Диплоїдні та гаплоїдні покоління також наявні у водоростей та грибів. У цих організмів існує чимало цікавих різновидів чергування поколінь (якщо бажаєте — знайдіть інформацію та підготуйте розповідь у класі).

Завдяки *вегетативному розмноженню* новий організм утворюється не зі спеціальної клітини, а з різних органів. Наприклад, із бульби (в картоплі), окремих листочків (сенполія — популярна домашня рослина, яку часто помилково називають фіалкою), кореневища (імбир), верхівок пагонів, що вкоренились у ґрунті (ожина) тощо.

У деяких тварин із простою нервовою системою наявне вегетативне розмноження. Особливо добре розвинуте в жалких (пригадайте два різновиди нестатевого розмноження поліпів у медузи аурелії). Коралові поліпи завдяки вегетативному розмноженню утворюють великі колонії. Також це властиве представникам іншого типу — губкам. Загалом вегетативне розмноження властиве небагатьом типам тварин. Але відоме у представників нашого типу — хордові. В морях (але не Чорному та Азовському) поширені асцидії — тварини від декількох сантиметрів до одного метра, що ведуть прикріплений спосіб життя. Ознаки хордових тварин помітні лише в личинок асцидій, у дорослих особин вони зникають. У цих тварин є статеве розмноження і різні способи вегетативного розмноження — утворенням бруньок, поперечним поділом та ін.

Якщо організму властиве вегетативне розмноження, то воно є нормальним і виникає часто, інколи частіше, ніж статеве розмноження. Натомість *фрагментація* є пристосуванням до надзвичайних обставин, таких як травми. У деяких істот при травмуванні і розподілом на декілька частин, кожна спроможна розвинутися в самостійний організм. Але за відсутності травмування вид існуватиме скільки завгодно довго, не вдаючись до фрагментації. Цей спосіб нестатевого розмноження притаманний губкам і деяким тваринам із простою нервовою системою — жалким, плоским червам, кільчастим червам, морським зіркам. Деякі групи (наприклад, круглі черви, двостулкові молюски) неспроможні до фрагментації, хоч мають просту нервову систему. У рослин непомітна межа між фрагментацією та вегетативним розмноженням, тому термін «фрагментація» використовують переважно щодо тварин.

Новоутворені організми, що з'явилися шляхом вегетативного розмноження або фрагментації, мають той же набір генів, що й материнський організм, отже, вони є *клонами*. Клонування асоціюється зі складними діями в лабораторії і таким воно є, коли йдеться про тварин. Рослин клонувати легше, наприклад, посадити картоплю чи поставити гілочку у воду.

У багатоклітинних еукаріотичних організмів неможливе горизонтальне перенесення генів шляхом кон'югації або трансформації. В усіх істот можлива вірусна трансдукція. Щонайменше 8% геному людини є залишками ДНК, що потрапила до наших предків через зараження вірусами.

1. Назвіть різновиди горизонтального перенесення генів у прокаріот.
2. Які типи нестатевого розмноження є в рослин?
3. Що спільного і відмінного між спорами і гаметами?

4. Пригадайте і розкажіть, як вегетативно розмножуються картопля, полуниця, верба, малина, часник.
5. Які типи нестатевого розмноження наявні в рослин, а які — у тварин?
6. У рослин поширене як статеве, так і нестатеве розмноження. Кожний спосіб має переваги для рослин у природі та селекції і вирощування людиною. Вкажіть, які переваги нестатевого розмноження для рослин у природі, які — у вирощуванні людиною, які — у селекції людиною?
7. У прокаріотів немає інтронів, вся ДНК є кодуючою. Які переваги це надає прокаріотам?

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/Ar3gDq0J або за QR-кодом і виконайте практичну роботу: «Характеристика різних способів вегетативного розмноження рослин і тварин».

Виконайте **інформаційно-пошуковий проєкт**: «Способи вегетативного розмноження культурних рослин».
Виконайте **творчий проєкт**: «Живі організми, в яких трапляється явище партеногенезу».

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/HtJNv49Z і виконайте вправи.

43 СТАТЕВЕ РОЗМНОЖЕННЯ: ІЗ ЗАПЛІДНЕННЯМ ТА БЕЗ ЗАПЛІДНЕННЯ (ПАРТЕНОГЕНЕЗ)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:
- чим відрізняється чоловіча і жіноча стать;
- про особливості будови гамет;
- про різновиди партеногенетичного розвитку.

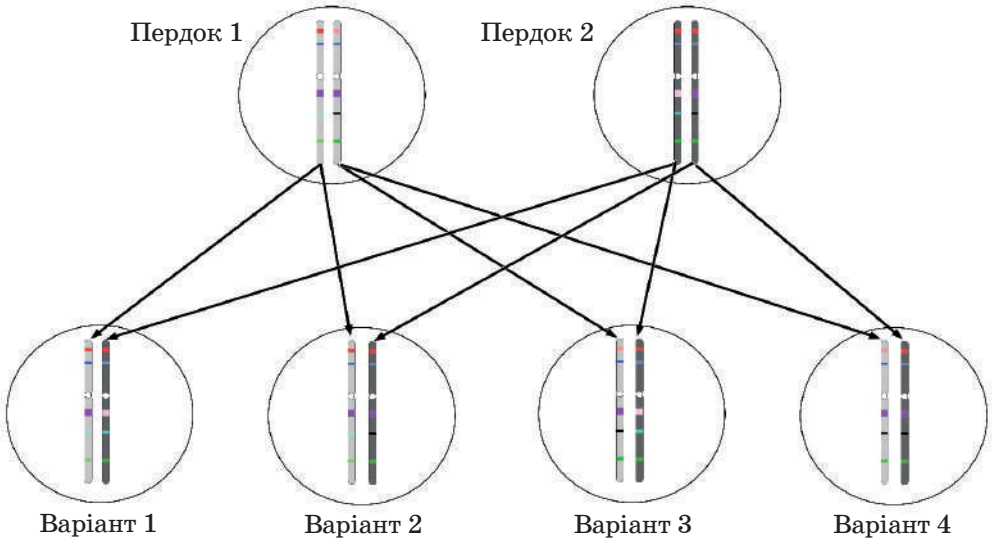
Загальна інформація про статеве розмноження

Мета будь-якого розмноження — відтворення або збільшення чисельності виду. Завдання статевого процесу (зокрема кон'югації) — збільшення комбінацій геному. Відповідно, призначення статевого розмноження — відтворення або збільшення чисельності виду зі збільшенням комбінацій геному.

Існують різні шляхи статевого розмноження, у вихідному варіанті передбачений контакт двох особин, що передають частину свого геному клітині, яка розвивається в новий організм. Для підвищення ефективності статевого розмноження в ранніх евкаріот сформувався диплоїдний набір хромосом. При цьому з'являється поділ алелей на домінантні

та рецесивні і організм може бути носієм як корисних, так і шкідливих алелей. Якщо останні є рецесивними, то це не впливає на виживання гетерозиготного організму. У прокаріот лише одна хромосома, отже, наявність шкідливої алелі завжди зменшує виживання.

До появи диплоїдності природний добір вилучав із популяції носіїв шкідливих алелей, навіть якщо більшість генотипу особини становили корисні алелі. З появою диплоїдності природний добір вилучає із популяції шкідливі алелі, носії можуть існувати, розмножуватись і передавати наступним поколінням корисні алелі. Звісно, нащадки можуть успадкувати шкідливу алель. Але завдяки статевому розмноженню також з'являються нащадки, що успадкують від батьківських особин найкращі алелі (мал. 43.1).



Мал. 43.1. Варіанти успадкування шкідливих і корисних алелей при статевому розмноженні гіпотетичного диплоїдного організму (2n=2). Кольорами спектру позначено алелі, що сприяють виживанню, чорним кольором — шкідливі алелі. Внаслідок статевого розмноження можлива поява нащадків, що будуть гомозиготні за шкідливою алеллю (варіант 4). Але також існує ймовірність появи нащадків без шкідливих алелей (варіант 1)

Статеве розмноження вирізняється від нестатевого двома ознаками. Новий організм розвивається із гамет — спеціальних клітин, що утворилися шляхом мейозу і не виконують ніяких важливих функцій безпосередньо в організмі, що їх утворив. За цією ознакою статеве розмноження нагадує розмноження спорами. Але спори ніколи не потребують злиття з іншими спорами, тоді як у статевому розмноженні зазвичай відбувається *запліднення* — злиття двох гамет в одну клітину (окрім партеногенезу, про який дізнаєтесь наприкінці параграфа).

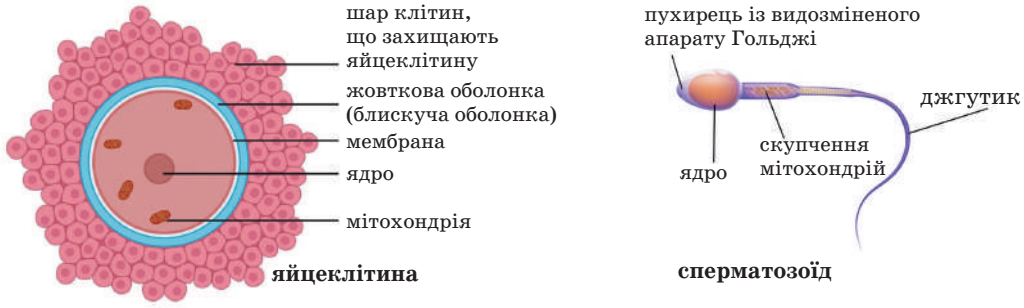
Для багатьох евкаріотичних видів властивий поділ на статі. За якими ознаками розрізняють чоловічу та жіночу стать у різних організмів? Відповідь на це запитання проста, але неочевидна. Багато хто вважає ознакою жіночої статі здатність народжувати, хоч часто розвиток відбувається за межами материнського організму. Інколи ознакою чоловічої статі називають більші розміри, що також неправильно. Наявність XX та XY хромосом забезпечує поділ на статі ссавців, до того ж не всіх. Є багато інших способів формування ознак статі. Наприклад, у птахів XX хромосоми притаманні самцям, у деяких рептилій стать ембріону залежить від температури піску, в якому розвивається яйце.

Поділ на статі базується на різниці в гаметах. Організм, що утворює *яйцеклітини*, є представником жіночої статі (у рослин: жіноча особина; у тварин: самка). Організм, що утворює *сперматозоїди*, є представником чоловічої статі (у рослин: чоловіча особина; у тварин: самець). Тварин, що можуть утворювати обидва типи гамет, називають гермафродитами. Це властиво більшості рослин і грибів, але до них не прийнято використовувати термін «гермафродит».

Не слід використовувати термін «гермафродит» по відношенню до людей. Гермафродити тварин здатні до розмноження. Інколи народжуються люди, що мають чоловічі та жіночі статеві ознаки (зазвичай вторинні). Їхній організм може утворювати гамети лише одного типу або є безплідним.

Особливості будови яйцеклітин і сперматозоїдів

Якщо певний вид евкаріотів утворює гамети двох типів, то вони відрізняються розмірами і здатністю до руху (мал. 43.2). Гамети більших розмірів без спеціальних органів руху називають яйцеклітинами. Гамети менших розмірів із засобами руху називають сперматозоїдами. Обидва типи клітин мають ядро, у видів із диплоїдним набором хромосом ядра гамет гаплоїдні.



Мал. 43.2. Будова яйцеклітини і сперматозоїда (на прикладі гамет людини)

Яйцеклітини тварин мають великі запаси білка. Всередині знаходяться *морфогенетичні фактори* — так називають молекули, що відпо-

відальні за різницю в розвитку клітин майбутнього організму та утворення тканин. Цитоплазма яйцеклітини ззовні оточена плазматичною мембраною, ззовні якої в багатьох видів наявна жовткова оболонка (у ссавців називають блискучою оболонкою). Завдяки ній яйцеклітини мають вибіркову проникність, всередину можуть проникнути лише сперматозоїди певного виду. Часто ззовні є желеподібний шар із глікопротеїдів, який захищає клітину, «приваблює» та активує сперматозоїди.

Сперматозоїди мають апарат для переміщення. У більшості видів тварин це джгутик. Поблизу основи джгутика розташовані мітохондрії, що забезпечують його енергією. В деяких видів (наприклад, круглих червів) переміщення сперматозоїда виникає завдяки невеликим виростам мембрани. На передньому кінці джгутика тварин розташовано пухирець із видозміненого апарату Гольджі, функція якого — розщеплення білків і полісахаридів поверхневого апарату яйцеклітини.

Запліднення

Як вже було зазначено, перевагою статевого розмноження є поява організмів із генотипом, що відрізняється від попереднього покоління. Це можливе завдяки *заплідненню* — злиттю двох гамет, кожна з яких має лише половину необхідного набору хромосом. Запліднену яйцеклітину називають *зигота*.

Запліднення може бути зовнішнім або внутрішнім. У першому випадку гамети контактують за межами батьківських організмів. Такий спосіб розмноження властивий багатьом водним мешканцям, перш за все малорухливим — губкам, жалким, двостулковим молюскам та іншим. Але також зовнішнє запліднення властиве більшості кісткових риб. При внутрішньому заплідненні сперматозоїди повинні потрапити в організм жіночої особини, де відбувається злиття. Це властиво всім хрящовим рибам, усім первинно наземним хребетним, комахам, багатьом рослинам.

Запліднення гермафродитів має певні особливості. У тварин із внутрішнім заплідненням (черевоногі молюски, малощетинкові кільчасті черви та інші) будова статевих органів унеможливлює самозапліднення. Тварини-гермафродити із зовнішнім заплідненням (наприклад, згадані в попередньому параграфі асцидії) можуть почергово бути або самцем або самкою, щоб уникнути самозапліднення.

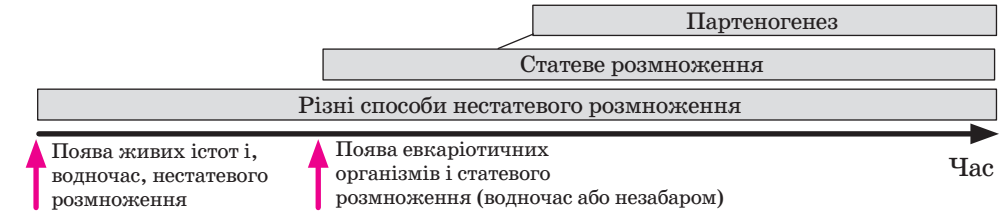
В яких складових евкаріотичної клітини є власна ДНК?

У диплоїдних організмів при заплідненні об'єднуються гаплоїдні набори хромосом сперматозоїда та яйцеклітини. Ядро — основна складова сперматозоїда, що проникає в яйцеклітину, решта залишається за межами. Новоутворений організм успадковує мітохондрії яйцеклітини. Отже, у потомства ядерна ДНК від самця і самки, мітохондріальна ДНК лише від самки.

Партеногенез — розвиток без запліднення

У деяких видів можливий *партеногенез*, тобто розвиток незапліднені яйцеклітини. За своїм кінцевим результатом партеногенез ближче до розмноження спорами. Тому інколи його розглядають як різновид нестатевого розмноження. Однак за своїм походженням партеногенез є різновидом статевого розмноження, оскільки з'явився пізніше за нестатеве розмноження та основний різновид статевого розмноження (мал. 43.3). Партеногенез з'являється в різних груп евкаріотів, і його призначення може бути різним.

Оскільки партеногенез нагадує нестатеве розмноження, то може бути ефективним, коли потрібно швидко збільшити чисельність виду. Це притаманно деяким ракоподібним, рослинам тощо. Також партеногенез стає у принагоді, якщо в популяції ймовірність зустрічі самців і самок невисока. У суспільних комах (бджоли та мурахи) самці розвиваються із незапліднених яєць, тобто партеногенез можна розглядати як спосіб утворення однієї із груп.



Мал. 43.3. Партеногенез нагадує нестатеве розмноження, але з'явився як різновид статевого розмноження

Генетичний матеріал розподіляється різними шляхами. Наприклад, у бджіл і мурах у диплоїдній самці формуються гаплоїдні яйцеклітини. Якщо вони залишаться незапліднеими, то з них вилупляться гаплоїдні самці. У диплоїдних самок попелиць мейоз відбувається особливим чином, гомологічні хромосоми розподіляються нерівномірно. Одна яйцеклітина забирає всі хромосоми, тобто є диплоїдною, інша залишається без ДНК і незабаром зникає. Із незапліднених диплоїдних яйцеклітин розвиваються нові диплоїдні попелиці. Різноманіття шляхів партеногенезу вказує, що цей спосіб виникав неодноразово в різних евкаріотів, отже, є видозміною статевого розмноження.

У рослин партеногенез трапляється часто, але як доповнення до інших типів розмноження. Здатність рослин до партеногенезу полегшує селекцію (особливо цитрусових, буряків, цибулі). Створивши сорт із бажаними ознаками, селекціонери можуть збільшити кількість рослин завдяки партеногенетичному розмноженню.

1. На чому базується поділ на чоловічу і жіночу стать?
2. Хто такі гермафродити?
3. Що таке партеногенез?
4. Опишіть будову яйцеклітини або сперматозоїда (на вибір учителя).

5. Які переваги та недоліки партеногенезу?
6. Розкажіть, як тварини-гермафродити уникають самозапліднення, і поясніть, чому вони уникають.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/7r2x5QUH або за QR-кодом і виконайте лабораторне дослідження: «Вивчення будови статевих клітин тварин».

Виконайте **творчий проєкт**: «Живі організми, в яких трапляється явище партеногенез».

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/KtJNbYZI і виконайте вправи.

44 ІНДИВІДУАЛЬНИЙ РОЗВИТОК ОРГАНІЗМУ (ОНТОГЕНЕЗ). ЗАРОДКОВИЙ (ЕМБРІОНАЛЬНИЙ) РОЗВИТОК (НА ПРИКЛАДІ ХОРДОВИХ ТВАРИН). ПОНЯТТЯ ПРО ПОЛІЕМБРІОНІЮ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про гаструляцію — найголовнішу подію у вашому житті;
- чому вважають, що зуби людей сформувалися з луски акул;
- як з'являються близнюки.

Індивідуальний розвиток організму називають *онтогенезом*. Він починається із запліднення та завершується смертю організму (в параграфі не будемо враховувати партеногенетичне розмноження). Багатоклітинну істоту очікує чимало змін на шляху розвитку від одноклітинної зиготи в організм, що має функціонуючі органи. Цей етап онтогенезу називають зародковим розвитком, або *ембріогенезом*. Оскільки багатоклітинні евкаріоти різноманітні, ембріогенез різних істот має унікальні особливості. Познайомимося з ембріогенезом на прикладі еволюційної лінії хордових тварин, представниками якої є люди.

Ембріогенез хордових тварин

Ембріональний розвиток хордових складається з декількох етапів:

- *запліднення* — злиття ядер сперматозоїда та яйцеклітини;
- *дроблення* — видозміни одноклітинної зиготи в багатоклітинний зародок. Більшу частину дроблення становить *бластуляція*. в результаті якої утворюється *бластула* — багатоклітинний одношаровий ембріон;
- *гаструляції* — видозміни одношарового ембріону в гаструлу — багатошаровий ембріон;

- *нейруляції* — стадії розвитку в ембріона нервової трубки.

Впродовж вказаних етапів формуються ознаки, що притаманні всім хордовим тваринам і становлять основу нашої тілобудови. У подальшому представники різних еволюційних ліній (кісткових і хрящових риб, амфібій, рептилій, птахів, ссавців) набувають особливостей, що властиві їхній групі. Тому після нейруляції не вирізняють окремих етапів, хоч ембріогенез ще триватиме довго (в людини нейруляція завершується до кінця 5 тижня вагітності.

Дроблення відбувається шляхом мітотичного поділу. Спершу зигота поділяється на дві клітини, з них утворюється 4, 8, 16 і так далі. На цьому етапі розвиток клітин залежить перш за все від чинників, що діють на ембріон ззовні. Якщо зникне одна або декілька клітин — це не вплине на подальший онтогенез. Однак, цікаво, що вже на ранньому етапі клітини нерівномірні, розподіл внутрішнього вмісту зиготи відбувається непропорційно.

На початкових етапах дроблення ембріон нагадує скупчення клітин. Згодом всередині з'являється порожнина, зародок перетворюється на одношарову кульку, яку називають *бластулою*. Клітини продовжують поділ, внутрішня порожнина збільшується в розмірах. При цьому клітини не ростуть, за розмірами бластула близька до зиготи.

Наступний етап — гаструляція, перетворення одношарового зародка в багатошаровий, який називають *гаструлою*. На відміну від бластули, гаструла росте, збільшуючись у розмірах.

На початку гаструляції ембріон вгинається у власну порожнину, утворюючи два шари клітин (мал. 44.1). Зовнішній називають *ектодермальним зародковим листком*, або *ектодермою*, внутрішній — *ентодермальним зародковим листком* або *ентодермою*. У хордових, як і більшості тварин, між ектодермою та ентодермою формується третій шар — мезодермальний зародковий листок або мезодерма.

Мал. 44.1. Ембріогенез людини від запліднення до гаструли

На попередньому етапі — дробленні, — клітини були взаємозамінні, втрата частини з них не впливає на онтогенез. Поділ зародка на три шари — перший крок до спеціалізації клітин, він має велике значення для подальшого життя. Пошкодження клітин гаструли призводить до

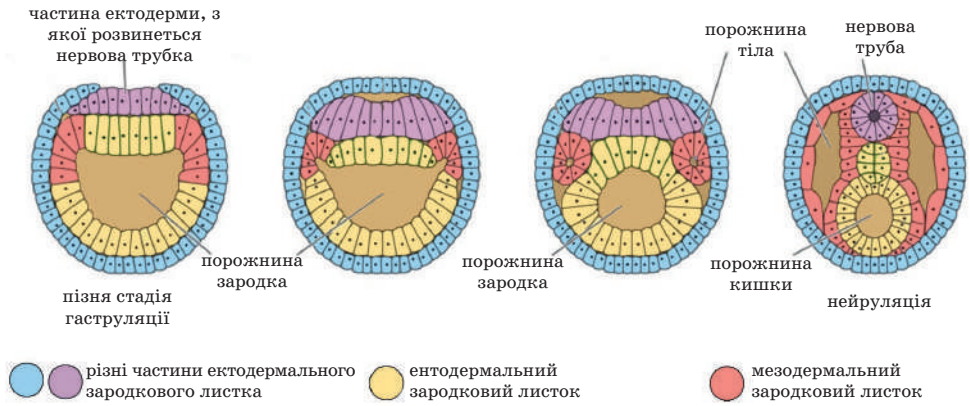
суттєвих вад розвитку або загибелі ембріона.

Із клітин ектодермального зародкового листка розвиваються тканини, що розташовані близько до поверхні тіла, — епідерміс шкіри, епітелій носової порожнини, ротової порожнини та глотки, епітелій прямої кишки, кришталики ока та ін. Деякі клітини ектодермального зародкового листка проникають вглиб тіла, зокрема клітини, з яких розвивається центральна нервова система.

Із клітин ентодермального зародкового листка розвиваються органи, розташовані вглибині тіла: більша частина шлунково-кишкового тракту, трахея, бронхи та легені та інші. Із мезодермального зародкового листка формується багато органів — кістки, значна частина кровоносної системи, скелетні м'язи та гладенькі м'язи шлунково-кишкового тракту, нирки і частина видільної системи та інші. Багато органів мають у своєму складі клітини, що походять від різних зародкових листків.

Дослідження зародкових листків важливе для розуміння еволюційних взаємозв'язків між органами різних тварин. Можливо, ви чули, що зуби хребетних тварин утворилися з луски, що нагадує луску акул? Як це встановили? Наші зуби, як і луска акул, ззовні вкриті емаллю, під якою розташований шар дентину. Погляньмо на особливості ембріонального розвитку цих структур. Зовнішній шар — емаль зубів та луска акул — розвивається із ектодерми, а дентин — із мезодерми. Однакові особливості розвитку є аргументом на користь зв'язку.

Особливим етапом ембріогенезу, що наявний лише у хордових тварин, є *нейруляція* (мал. 44.2). На цій стадії клітини ектодерми занурюються в зародок, утворюючи нервову трубку. У хребетних тварин вона розвивається в головний і спинний мозок.



Мал. 44.2. Перехід від стадії пізньої гаструли до нейрули

Після нейруляції розвиток зародка дедалі більше залежить від особливостей, притаманних певній еволюційній групі хордових.

Поліембріонія

Як ви знаєте, на стадії дроблення клітини зародка може бути вилуче-

но. Понад те: якщо до початку гаструляції зародок розділити на дві або декілька частин, кожна розвивається в самостійний організм. Процес утворення декількох істот із однієї зиготи називають *поліембріонією*.

Ймовірно, поліембріонія з'явилась у ранніх багатоклітинних евкаріотів, що жили в морях і мали зовнішнє запліднення. У сучасних коралів, яким також властиві вказані ознаки, хвилі часто розбивають ембріони на декілька частин, що потім розвиваються самостійно. Очевидно, зародки ранніх евкаріотів також зазнавали розділення хвилями. Здатність формувати декілька особин із однієї зиготи збереглася в усіх еволюційних лініях багатоклітинних евкаріотів. Навіть поява внутрішнього запліднення не вплинула, ембріон може бути розділено під дією внутрішніх причин. У таких випадках народжуються *однояйцеві близнюки*. У деяких видів поліембріонія стала нормою і завжди наявна в зародковому розвитку деяких рослин, перетинчастокрилих комах та броненосців. У більшості видів поліембріонія трапляється нерегулярно, зокрема в людей.

Оскільки однояйцеві близнюки розвиваються із однієї зиготи, вони схожі один на одного і завжди однакової статі. Двояйцеві близнюки розвиваються з різних яйцеклітин, тобто без поліембріонії. Вони можуть суттєво відрізнятись і бути різної статі.

В основі поліембріонії лежать ті ж процеси, що забезпечують нестатеве розмноження шляхом фрагментації. Це не підстава стверджувати, що в людей можливе нестатеве розмноження, оскільки поліембріонія несамостійна. Вона відбувається лише в ембріонів, тобто передувало статеве розмноження. Втім, це також показує, що ознаки, притаманні давнім предкам, принаймні у видозміненому вигляді можуть зберігатися впродовж сотень мільйонів років.

Численні факти поліембріонії мають значення в обговоренні важливого питання за межами біології: з якого етапу онтогенезу зародок стає людиною? Існує точка зору, що появу нової людини слід відраховувати з моменту злиття яйцеклітини та сперматозоїда. Відкриття поліембріонії спростовує цю позицію. Із розділених бластул розвиваються різні люди, схожі ззовні, але з різним характером, різними поглядами. Ніхто не назве однояйцевих близнюків однією людиною, хоч вони були однією зиготою і навіть однією бластулою. На сьогодні неможливо чітко визначити, з якого етапу онтогенезу людина є людиною, але можна однозначно стверджувати, що пізніше, ніж з моменту зачаття і бластуляції.

1. Назвіть стадії ембріогенезу хордових у правильній послідовності.
2. Чи відрізняється стадія бластуляції та гаструляції за темпами росту?
3. Яка різниця між однояйцевими і двояйцевими близнюками?
4. Наведіть приклади частин тіла, що розвиваються із ектодерми, ентодерми та мезодерми.
5. Охарактеризуйте стадію нейруляції.

6. У випадку незапланованої вагітності жінка може дізнатися про вагітність через декілька тижнів після зачаття і розпочне із запізненням дотримуватися рекомендацій (зокрема, утримання від алкоголю або нікотину). Використовуючи знання про ембріогенез хордових, поясніть переваги планування вагітності.

Проєктна діяльність. Створіть колаж «З яких зародкових листків формуються органи хордових тварин?».

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/RtJNnqtV і виконайте вправи.

45 ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИН ЗАРОДКА, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- завдяки чому руки розвиваються на передній частині тулуба;
- про українського студента, що виконував дослідження світового рівня;
- про гени, які майже не змінилися впродовж мільярда років

Пригадайте рівні організації живої матерії.

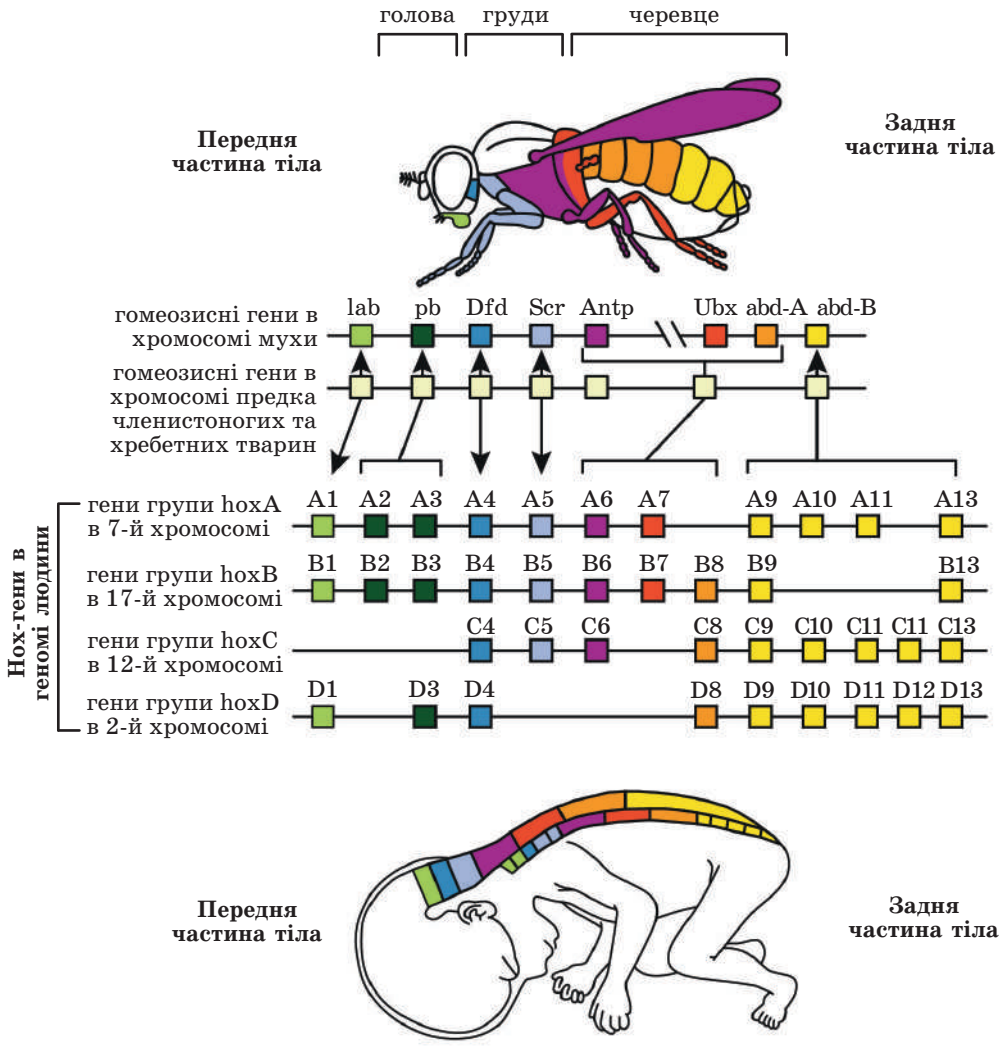
З появою багатоклітинних істот з'явилися тканинний та органний рівні організації живої матерії. Вони з'явилися не лише завдяки об'єднанню багатьох клітин (колоніальні форми відомі і поміж одноклітинних організмів). У тканинах та органах клітини відрізняються за будовою та функцією. Розвиток багатоклітинних організмів починається із поділу однієї клітини. Кожна нова клітина отримує генетичний матеріал, що був у зиготі, але подальший розвиток відрізняється. Природнича історія багатоклітинних організмів розпочалася з появи в клітини зародка здатності до спеціалізації. Це досягається завдяки різним процесам, поміж яких розглянемо два: вплив *гомеозисних генів* та *ембріональної індукції*.

Гомеозисні гени (на прикладі тварин)

Починаючи від першого дроблення зиготи, цитоплазма двох клітин зародка відрізняється. Відмінності не стільки в об'ємі, а перш за все у складі білків цитоплазми. У бластули, яка ще не має навіть зародкових листків, помітна різниця в будові. Можна виділити передній та задній кінці тіла майбутнього організму. Надалі ця різниця збільшується, в ембріона з'являється голова, кінцівки, тулуб. Чому клітини розвиваються по-різному, хоч генетичний матеріал у них однаковий? Важли-

вий вплив *гомеозисних генів*.

Гомеозисні гени відповідають за формування загального плану зародка — послідовність розташування голови, тулуба, задньої частини тіла, розвиток кінцівок на тулубі, а не на голові, і т. д. Відомо чимало прикладів, коли в процесі еволюції відбувалося збільшення або зменшення сегментів тіла — у птахів і ссавців більше шийних хребців, ніж їхнього предка-амфібії, у комах менше сегментів тіла, ніж предка членистоногих, і т. д. Такі перебудови зазвичай виникають під впливом гомеозисних генів.



Мал. 45.1. Схема послідовності hox-генів у дрозофіли, людини та їхнього спільного предка (жив понад 600 мільйонів років тому). Кольором позначено однакові групи hox-генів та ділянки тіла, що сформувалися під їхнім впливом

Порівняння гомеозисних генів тварин вказує на разючу подібність, недарма більшість тварин має двобічну симетрію, голову на передньому кінці тіла тощо. Мутації гомеозисних генів викликають суттєву перебудову, в більшості випадків не підвищують виживання і їх носії знищуються дією природного добору (часто ще на стадії ембріогенезу). Поміж гомеозисних генів відомі такі, що без особливих змін існують щонайменше 1 мільярд років, тобто вони були ще у спільного предка всіх тварин із двобічною симетрією. Лише інколи мутації гомеозисних генів підвищують виживання, вони стають причиною стрімких еволюційних змін.

Найбільш відомий приклад гомеозисних генів — *hox-гени*. У минулому це була група генів в одній із хромосом спільного предка тварин із двобічною симетрією. У комах досі подібні гени зібрані в одній хромосомі. У предків хребетних тварин hox-гени примножилися, вони наявні в чотирьох хромосомах. Подібність у складі нуклеотидів, що обумовлена спільним походженням, помітна при порівнянні hox-генів різних хромосом і різних видів тварин (мал. 45.1). Білки цитоплазми зародка запускають експресію певної групи гомеозисних генів — у потрібних частинах зародка активуються необхідні гени. Результатом експресії гомеозисних генів є формування загального плану тілобудови.

Свої гомеозисні гени відомі в рослин, але не виявлені у грибів.

Ембріональна індукція

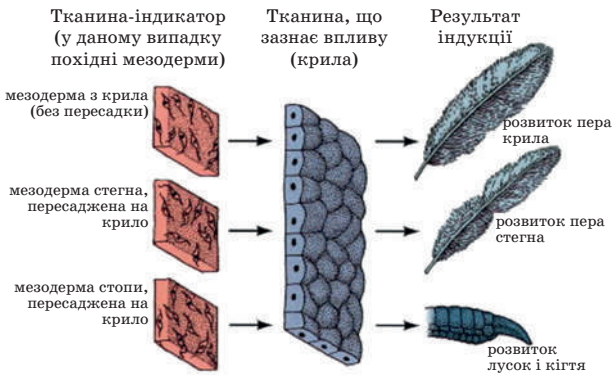
Також клітини зародка набувають спеціалізації завдяки *ембріональній індукції* — здатності одних частин ембріона впливати на розвиток клітин, що знаходяться поруч. Так, у хордових тварин клітини хорди індукують перетворення деяких клітин у нервову трубку. Отже, навіть якщо органи належать до різних систем, завдяки ембріональній індукції виникає зв'язок у їхньому розвитку.

Мал. 45.2. Молодий учений Борис Балінський ловить амфібій у водоймі неподалік Києва (1936 рік). Пізніше науковець буде вимушений емігрувати, уникаючи переслідування радянського режиму. Закордоном він отримає всесвітнє визнання, ставши одним із найвидатніших цитологів XX століття. Перейшовши за QR-покликанням, можете дізнатися більше про життя видатного українця у статті Олексія Болдирєва «Витертий з історії»

Явище ембріональної індукції було експериментально підтверджено в 1921 році німецькими вченими Гансом Шпеманом і Хільдою Мангольд. При пересадці фрагмента гаструли ембріона тритона на інший ембріон, пересаджені клітини індукували розвиток другої осі тіла, внаслідок чого розвивався двоголовий тритон. У 1924 році в Києві 19-річ-

ний студент Борис Балінський продовжив експерименти (мал. 45.2). Він пересаджував фрагменти ембріона тритона із місця, що відповідає за розвиток кінцівки, на спину зародка. Клітини індукували розвиток п'ятої кінцівки на спині амфібії. Експерименти аж ніяк не були «розвагами з утворення химер», а кропіткою працею, який результат зробив можливим розвиток ембріології та репродуктивної медицини. Завдяки ним було встановлено закономірності ембріональної індукції.

Перша закономірність: за наявності тканини-індуктора інша тканина зародка розвивається в певному напрямку. Наприклад: клітини шкіри, що розвиваються із мезодерми, є індукторами клітин епідермісу шкіри (розвивається із ектодерми). При експериментах на ембріонах курей розвиток структур в епідермісі визначається впливом клітин мезодерми. Пересадження частин мезодерми з інших частин тіла призводить до появи похідних епідермісу, не властивих цій ділянці (мал. 45.3).

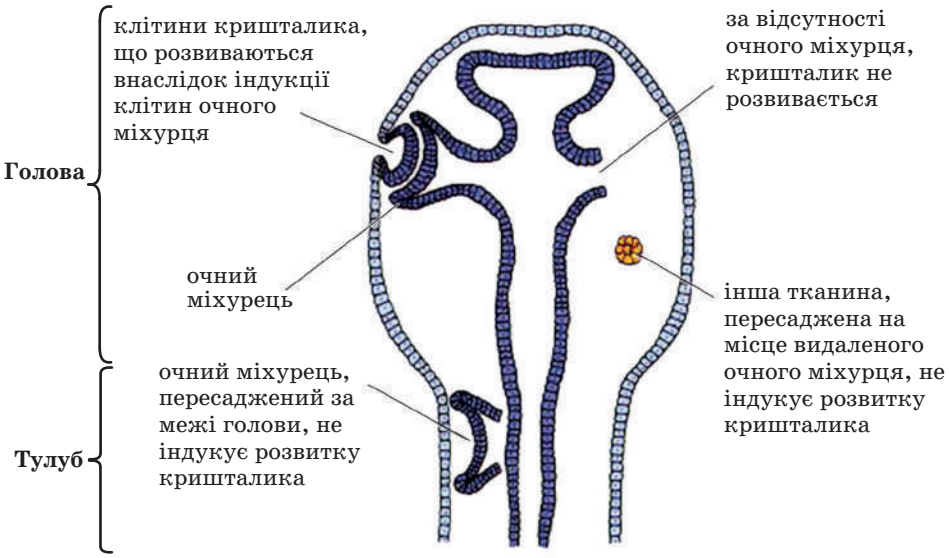


Мал. 45.3. Клітини мезодерми індукують розвиток структур епідермісу птаха. За нормальних обставин мезодерма крила індукує появу притаманних крилу махових пер. Якщо на крило пересадити мезодерму стегна, розвиваються пера стегна. Пересадка мезодерми стопи індукує розвиток луски і кігтів

Наступна закономірність: за відсутності індуктора, потрібні тканини не розвиваються, навіть якщо на місці індуктора наявні інші тканини. Наприклад: очний міхурець (структура, з якої розвивається око) впливає на клітини епідермісу, перетворюючи їх на кришталик. Якщо очний міхурець замінити іншою тканиною, кришталик не розвивається (мал. 45.4). Очний міхурець спроможний індукувати появу кришталика в будь-якій частині голови. В експерименті на голові зародка можна утворити два лівих або два правих ока з кришталиками. Але за межами голови очний міхурець не впливає на розвиток кришталика (мал. 45.4). Щоб тканина реагувала на вплив індуктора, необхідні додаткові умови, перш за все вплив генів. У випадку із розвитком органів чуття на голові, важлива експресія гена Pax6. Якщо штучно викликати експресію цього гена в інших частинах тіла, схожі на очі органи розвиваються за межами голови. Цей приклад демонструє важливість взаємодії генів та ембріональної індукції для нормального розвитку організму.

Розвиток ока вказує, наскільки важливим є дотримання правильного розташування різних частин зародка. Прозора рогівка,

кришталик та сітківка повинні знаходитись узгоджено одні відносно одного. Невелике зміщення принаймні однієї структури робить око повністю нефункціональним.



Мал. 45.4. Схема передньої частини зародка хребетної тварини. Очний міхурець індукує розвиток кришталика із епідермісу. Очний міхурець спроможний індукувати розвиток кришталика лише в межах голови.

1. Що таке гомеозисні гени?
2. Що таке ембріональна індукція?
3. Як швидко відбуваються еволюційні зміни в гомеозисних генах порівняно із іншими генами?
4. Опишіть закономірності ембріональної індукції.
5. Наведіть приклад взаємодії ембріональної індукції та експресії генів у розвитку зародка.
6. Більшість хребетних тварин мають хорду лише на стадії ембріона. Функцію осьового скелета виконує хребет — складова опорної системи, що розвивається незалежно від хорди. Але хорда є в ембріонів усіх хордових тварин. Навіщо вона потрібна?
7. В еволюції ссавців важливі еволюційні зміни відбувались у розвитку голови: 1) збільшення нюхового поля в носовій порожнині та відповідне збільшення лобових долей головного мозку для обробки нюхової інформації; 2) ускладнення щелепного апарату (ссавці спроможні жувати); 3) розвиток зубів різного типу. Ще одна особливість ссавців — стала кількість шийних хребців: більшість видів ссавців мають сім шийних. Таке число не має певного функціонального призначення, але в процесі еволюції ссавці уникали мутацій, що обумовлені збільшенням кількості шийних хребців. Поміркуйте, чим обумовлена така консервативність у розвитку передньої частини тіла.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/ptJNnUJU і виконайте вправи.

Виконайте **інформаційно-пошуковий проєкт:** «Ембріональна індукція: історія відкриття та перспективи застосування».

46 ПОНЯТТЯ ПРО СТОВБУРОВІ КЛІТИНИ ТА ДИФЕРЕНЦІАЦІЮ КЛІТИН

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

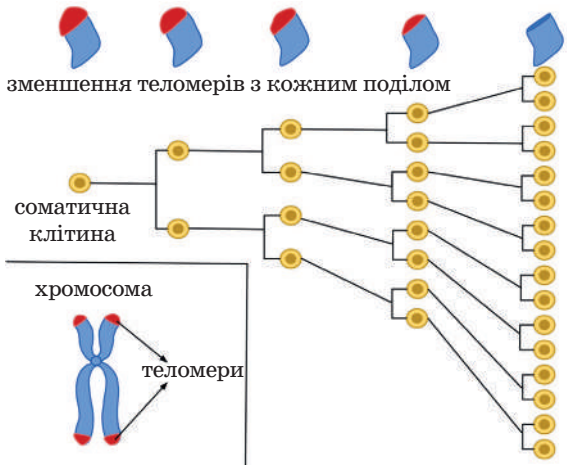
- про одну із причин старості;
- кого можна назвати «стовбуровими клітинами» суспільства;
- чи етично використовувати стовбурові клітини в медицині.

Стовбурові клітини

У розвитку багатоклітинних організмів важливе правильне розташування тканин та органів, що регулюється, зокрема, гомеозисними генами та ембріональною індукцією. Не менш важливим завданням ембріогенезу є *диференціація клітин* — тобто набуття спеціалізації. Це розширює можливості багатоклітинних організмів, з'являються функції, відсутні в одноклітинної істоти, нехай навіть колоніальної. Але еволюційні надбання завжди є балансуванням між перевагами і недоліками. Спеціалізація клітин збільшила функціональність, водночас з'явились обмеження по відтворенню. Спеціалізована клітина спроможна відтворювати лише собі подібну, а деякі навіть на таке не здатні. При інфаркті (омертвінні) м'язових клітин міокарда, вони не можуть бути заміщені сусідніми клітинами сполучної тканини епікарда чи епітеліальної тканини ендокарда.

Навіть за відсутності травм, організм потребує оновлення клітин. Час існування деяких важливих клітин значно менші від тривалості онтогенезу. У людей лише нейроцити спроможні існувати впродовж усього життя. Остеоцити існують приблизно 25 років, різні клітини сполучної тканини — від декількох місяців до декількох років. Епітеліальні клітини живуть 2–3 тижні, а якщо епітелій кишки — то менше доби. Зазвичай втрати компенсуються шляхом поділу вже існуючих спеціалізованих клітин, але це не може тривати роками, у зв'язку із явищем, що назвали *межею Хейфліка* (за прізвищем першовідкривача). Із кожним поділом соматичної клітини теломери на кінцях хромосом скорочуються на 3–6 нуклеотидів. Чим більше поділів, тим коротші теломери і з часом клітина досягає межі Хейфліка, після чого ділення неможливе (мал. 46.1). Для більшості соматичних клітин людини межа Хейфліка

становить 52 поділи. Отже, необхідний інший шлях відтворення, який реалізується завдяки *стовбуровим клітинам* — неспеціалізованим клітинам, що можуть утворювати інші клітини.



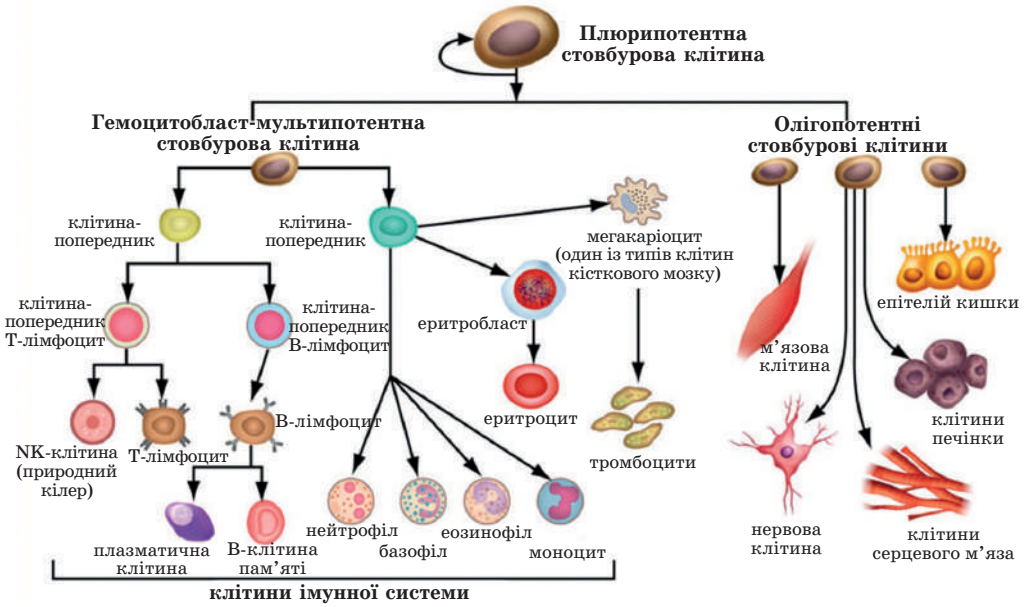
Мал. 46.1. З кожним поділом, теломери на кінцях хромосом соматичних клітин зменшуються. Критичне укорочення теломерів позбавляє клітину здатності ділитися, вона досягає межі Хейфліка

На ранніх стадіях ембріогенезу всі клітини зародка є стовбуровими. Пізніше більшість зазнає диференціації, деякі залишаються стовбуровими. Майже в кожній тканині тварин є стовбурові клітини, що відновлюють цю тканину. Впродовж онтогенезу кількість стовбурових клітин в організмі зменшується, та все ж вони наявні впродовж життя. Зменшення числа стовбурових клітин є однією із причин старіння. У людей це помітно на вікових змінах структури шкіри та волосся, ослабленні імунної системи тощо.

Попри те, що стовбурові клітини можуть утворити різні типи спеціалізованих клітин, вони також розрізняються між собою. Відомо три різновиди (мал. 46.2):

- олігопотентні стовбурові клітини — утворюють незначне різноманіття спеціалізованих клітин (до десяти);
- мультипотентні стовбурові клітини — дають велике різноманіття спеціалізованих клітин (від десяти до декількох десятків);
- плюрипотентні стовбурові клітини — утворюють дуже велике різноманіття спеціалізованих клітин (більше 200).

У минулому люди часто були обмежені у виборі професії. Відлунням цього є прізвища Коваль, Мельник, Швець, Бондар та інші — дитина змалку знала, що її фах буде такий, як і в батька, діда, прадіда. Сучасні підлітки не мають визначеної професії, ви можете обрати будь-яку спеціалізацію. Якщо порівняти суспільство з організмом, то ви — молодь, — його стовбурові клітини. Тому шкільна освіта орієнтована на знайомство з різними предметами, що часом викликає нарікання в учнівства. Поміркуйте, чи хотіли б ви, щоб ваша професія була визначена зарання, ще в дитинстві.



Мал. 46.2. Схема ділення стовбурових клітин в організмі дорослої людини

У рослин стовбуровими клітинами є клітини твірної тканини — меристеми та камбію. Вони спроможні до поділу і перетворення на спеціалізовані клітини інших тканин. У клітин гіфів грибів спеціалізація майже відсутня, кожна клітина є стовбуровою і, за потреби, може відтворювати цілий організм. Поміж тварин лише в деяких груп (зокрема, губок) клітини тіла спроможні змінюватися на клітини іншого типу.

Використання стовбурових клітин у біологічних дослідженнях і медицині

Від 1960-х років і донині дослідження стовбурових клітин вважають перспективним напрямком розвитку біології та медицини. Найбільшого успіху досягнуто в лікуванні деяких видів раку. При цьому знищують уражені клітини хворого і заміщують їх донорськими клітинами. Тобто стовбурова клітина не лікує, а відновлює організм після лікування.

Зі стовбурових клітин можна штучно вирощувати частини тіла для трансплантації, але ці експерименти на початкових етапах дослідження. Тривають дослідження можливостей стовбурових клітин у лікуванні хвороби Паркінсона, цукрового діабету 1 типу, серцевої недостатності, деяких форм склерозу та інших захворювань.

Помічено, що середня тривалість життя жінок, які народили 1–2 дитини, на декілька років довша від середньої тривалості життя чоловіків або жінок, які не народжували. Пояснення цьому знайдено на початку XXI століття. Виявилося, що стовбурові клітини дитини потрапляють в організм матері, де можуть зберігатися. Вони позитивно впливають на відновлення клітин серця, зменшуючи ризик розвитку серцево-судин-

них захворювань. Дитина лікує серце матері — це видається красивою метафорою, однак є описом факту, встановленого наукою. Щоправда, не варто покладатися на штучне введення стовбурових клітин як запоруку проти старіння. Відмічено певну ефективність таких методів, але значно дієвішим буде дотримання здорового способу життя — утримання від алкоголю, паління (зокрема, «електронних» «безнікотинових» засобів), тривалий сон замість часу, проведеного перед екраном комп'ютера, смартфона чи телевізора, уникнення їжі із високим вмістом жиру або цукру та напоїв із високим вмістом цукру.

Вивчення стовбурових клітин дає можливість дослідити цитологічні, гістологічні та ембріологічні процеси. Їх також використовують у клінічній перевірці безпечності деяких нових препаратів.

Як бачимо, стовбурові клітини мають велике значення для біології та медицини. Виникає питання: як їх отримати, особливо якщо необхідні стовбурові клітини людини? Однозначної відповіді не існує, оскільки стовбурові клітини різняться між собою. Наприклад, стовбурові клітини, що утворюють клітини крові, отримують із кісткового мозку донорів. Це відносно проста операція, що не завдає шкоди людині. Деякі типи клітин у дорослої людини отримати вкрай важко. Наприклад, стовбурові клітини, що утворюють нейроцити головного мозку, занурені в нервову тканину.

Найбільше стовбурових клітин в ембріоні. Однак виникають етичні питання щодо використання ембріонів людей. Пригадаймо, що бластула може бути розділена на два зародки, із кожного розвивається окрема особистість. Отже, від зачаття до бластули ембріон не є людиною. Звісно, неприпустимо здійснювати статевий акт заради отримання бластули і потім діставати її із тіла жінки. Проте ця проблема легко вирішується завдяки методиці штучного запліднення, яке не потребує контакту статевих партнерів. Водночас, частина суспільства вважає, що будь-яке використання зародків має бути заборонене, дискусії на цю тему тривають. Майже всі фахівці одностайні в думці, що після того,оли ембріон складається вже із 50–100 клітин (5-й день розвитку), його не можна використовувати в якості донора стовбурових клітин.

Популярний метод отримання стовбурових клітин — консервація пуповинної крові. При пологах у судинах пуповини наявний певний об'єм крові зародка, в якій вміст стовбурових клітин суттєво вищий, ніж у крові дорослої людини. Після народження пуповина не потрібна ні матері, ні дитині, зазвичай її утилізують. Консервація пуповинної крові шляхом швидкого заморожування дає можливість зберегти стовбурові клітини і використати їх через багато років для лікування людини, якій належала пуповина, або людей з високою генетичною схожістю. Цей метод не викликає заперечень у переважної більшості суспільства, але є відносно дорогим, а кількість збережених клітин незначна. У випадку лікування серйозного захворювання знадобляться стовбурові клітини із пуповинної крові декількох родичів.

1. Що таке диференціація клітин?
2. Що таке стовбурові клітини?
3. Чому виникає межа Хейфліка?
4. Дайте розгорнуту відповідь: Чи всі стовбурові клітини однакові?
5. В яких випадках є перспективним використання стовбурових клітин у медицині?
6. Існують методики вирощування органів зі стовбурових клітин. Один із перших успішних прикладів — трансплантація чоловіку, що в процесі лікування раку втратив ніс. Зі стовбурових клітин пацієнта в лабораторії виростили новий ніс і пересадили на обличчя. Операція була вдалою. Тривають дослідження щодо можливості вирощування зі стовбурових клітин інших донорських частин — від окремих м'язових клітин серця до цілої печінки і навіть мозку. Поміркуйте і дайте відповідь щодо перспектив і можливих труднощів подібних дій. У відповіді розглядайте виключно біологічну складову питання, а не етичну.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/AtJNmzXN і виконайте вправи.

Виконайте **практико-орієнтований проєкт:** «Стовбурові клітини та регенеративна здатність організму. Складання буклета».

47 ПОСТЕМБРІОНАЛЬНИЙ РОЗВИТОК У ТВАРИН ТА ЙОГО ТИПИ. ПОНЯТТЯ ПРО ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:
- які органи з'являються після ембріогенезу;
- про тварин, що «ростуть» у зворотному напрямку;
- чому роботи не можуть вважатися живими істотами.

Постембріональний розвиток тварин

В онтогенезі тварин помітне розділення на *ембріональний розвиток* і *постембріональний розвиток* (інша назва: післязародковий). Межею двох етапів онтогенезу є вихід із яйцевих оболонок або народження — вихід із яйця або організму матері. Розвиток органів продовжується, головна ознака постембріонального етапу — організм стає самостійним активним учасником харчової мережі, в якій він існує. Ембріон використовує виключно надходження речовини від запасів яйця або матері. Наприклад, личинки лосося в річках Аляски ростуть за рахунок речовини, яку материнські риби спожили в екосистемах, віддалених на сотні кілометрів, — у водах Тихого океану. З постембріональним етапом личинки починають живитися самостійно.

Упродовж постембріонального розвитку помітне зростання в розмірах більшості органів, але не всіх. Наприклад, у новонароджених людей вилочкова залоза (залоза внутрішньої секреції) значно більша, ніж у дорослих. Постембріональний розвиток може бути *прямим* або *непрямим*. У першому випадку перетворення молодої особини на статевозрілу відбувається без суттєвих змін. Можлива поява нових органів (наприклад, у людей кістки надколінки з'являються на другому–третьому році життя), але немає чітких стадій, зокрема личинкової стадії. Прямий розвиток притаманний перш за все наземним тваринам та вторинноводним — ссавцям, птахам, рептиліям, черевоногим молюскам та ін.

У непрямому постембріональному розвитку помітна личинкова стадія (або стадії), що передує формуванню дорослого статевозрілого організму (мал. 47.1). Він властивий переважно водним тваринам — різноманітним групам безхребетних, амфібіям тощо. Також непрямий розвиток притаманний більшості комах, хоч це переважно наземні істоти. Зазвичай при даному типу розвитку наявний метаморфоз — перетворення личинки на дорослу особину, що супроводжується суттєвими змінами організму (пуголовок перетворюється на жабу, гусінь, пройшовши стадію лялечки, перетворюється на метелика тощо). У деяких комах (тарганів, клопів та ін.) стадія лялечки відсутня, личинки в загальних рисах нагадують дорослу особину.

Мал. 47.1. Приклад непрямого розвитку (тритон) і прямого (ящірка)

Прямий розвиток потребує меншої кількості ресурсів, збільшує можливості прояву батьківського захисту нащадків. Непрямий розвиток потребує більше ресурсів, але дає можливість займати різні екологічні ніші. Внутрішньовидова конкуренція між молодими і дорослими особинами зменшується або взагалі зникає. Наприклад, пуголовки живуть у воді, і рослиноїдні, дорослі жаби живляться тваринами, деякі мешкають на суходолі.

Ріст організмів

Збільшення розмірів упродовж онтогенезу є важливим процесом, що дає можливість організму зайняти в екосистемі місце, властиве його

виду. Ріст може тривати впродовж усього онтогенезу, хоча з досягненням певних розмірів ріст сповільнюються (риби, амфібії, рептилії, китоподібні, більшість рослин). Або ж ріст відбувається впродовж певної частини життя (комахи, більшість ссавців, усі птахи). Цікаво, що в онтогенезі може бути зменшення розмірів. Наприклад, пуголовки південноамериканської жаби парадоксальної сягають 25 см завдовжки, а під час метаморфозу в дорослу амфібію зменшуються до 7 см.

У деяких істот у процесі росту пропорції частин тіла не змінюються або майже не змінюються (наприклад, кільчасті черви, деякі амфібії, риби). В інших відбуваються значні зміни пропорцій частин тіла (птахи, ссавці, частина комах тощо).

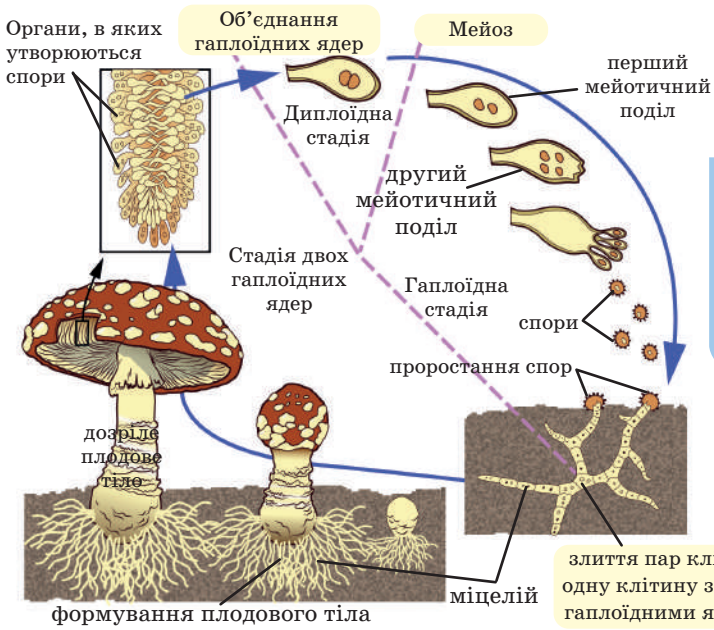
Життєві цикли

У фантастичних оповідях часом описують персонажів, що з'явилися шляхом оживлення неживих об'єктів (від легенд про глиняного Голема до роботів). За сюжетом вони живі, але насправді не підпадають під визначення живої матерії. Окрім руху, розвитку, обміну речовиною, важливою ознакою живих організмів є здатність утворювати подібних до себе. Особливе значення для оновлення популяції та еволюції становлять життєві цикли.

Життєвий цикл — послідовність змін, що відбувається із представниками певного виду і триває від початку онтогенезу однієї особини до початку онтогенезу цієї форми в наступному поколінні. Тобто вегетативне розмноження багатоклітинних організмів не є складовою життєвого циклу, оскільки в результаті збільшується чисельність покоління материнської особини, а не нове покоління. У прокаріотичних організмів життєві цикли прості — починаються з утворення клітини, яка незабаром поділяється на клітини нового покоління.

У багатьох тварин життєвий цикл простий і завершується з появою наступного покоління. Але можливі численні варіанти ускладнення завдяки непрямому розвитку — личинки проходять через декілька стадій, змінюють середовище існування тощо. У деяких тварин життєвий цикл має чергування поколінь. Відомий приклад: зміна статевого і нестатевого покоління у жалких (мал. 41.2). Правильне чергування статевого і нестатевого покоління відоме поміж інших тварин, що мають далеке споріднення між собою, але подібні за ознакою відносно простої будови.

У всіх рослин є чергування статевого покоління (гаметофіт) та нестатевого покоління (спорофіт). З особливостями життєвих циклів різних груп рослин ви познайомилися в сьомому класі. У життєвих циклах грибів також є стадії розвитку, що здатні до статевого або нестатевого розмноження. Але, на відміну від рослин, вони присутні в одному поколінні. Поміж грибів наявні не лише гаплоїдні та диплоїдні стадії, але і стадія з двома гаплоїдними ядрами (мал. 47.2), яка не властива рослинам і тваринам. Відомо сім варіантів чергування гаплоїдної, диплоїдної та двоядерної стадій грибів.



Мал. 47.2. Чергування стадії з різною кількістю ядер (наведено на прикладі мухомора, у грибів відомі різні варіанти)

1. Коли починається постембріональний розвиток?
2. Назвіть різницю між прямим і непрямим розвитком.
3. Що таке життєвий цикл?
4. Вкажіть переваги та недоліки непрямого розвитку.
5. Чим життєві цикли грибів відрізняються від життєвих циклів рослин?
6. Відомо чимало прикладів рептилій зі зрощеними тулубами (на фото). У природі їхні шанси на виживання невисокі, але за допомоги людини вони спроможні довго існувати. Також відомо багато випадків зрощення тулубами пуголовків амфібій. Але вони не доживали до дорослого віку. Використовуючи знання, отримані під час вивчення теми, поясніть, як з'являються тварини зі спільним тулубом та чому неможливі дорослі амфібії з цією особливістю.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/2tJNQT7Q і виконайте вправи.

Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/0r2x59Et або за QR-кодом і виконайте лабораторне дослідження: «Дослідження різних етапів ембріонального розвитку тварин».

Виконайте **інформаційно-пошуковий проєкт: «Життєві цикли рослин і тварин: спільне та відмінне».**

Самоконтроль знань з теми 4

«Розмножування та індивідуальний розвиток організмів»

1. Який процес забезпечує горизонтальне перенесення генів у бактерій?
   а) вірусна трансдукція *б)* кон'югація
   в) трансформація *г)* всі відповіді правильні
2. Яка перевага партеногенезу?
   а) зменшення міжвидової конкуренції
   б) можливість швидко збільшити чисельність популяції
   в) пришвидшує еволюційні зміни
   г) пришвидшує онтогенез
3. На якому етапі розвитку повинні відбутися зміни, що призводять до поліембріонії?
   а) бластуляція *б)* гаструляція *в)* запліднення *г)* нейруляція
4. Які процеси сприяють тому, що клітини зародка досягають спеціалізації?
   а) бластуляція та вплив гомеозисних генів
   б) вплив гомеозисних генів та клітинна індукція
   в) досягнення межі Хейфліка та клітинна індукція
   г) клітинна індукція та вкорочення теломерів
5. Які клітини можуть утворювати найбільше різновидів інших клітин?
   а) мультипотентні стовбурові клітини
   б) олігопотентні стовбурові клітини
   в) плюрипотентні стовбурові клітини
   г) всі відповіді правильні
6. Оберіть правильне твердження (на прикладі ссавців):
   а) із завершенням життєвого циклу завершується онтогенез
   б) онтогенез складається із ембріонального і постембріонального розвитку
   в) після завершення постембріонального розвитку починається онтогенез
   г) постембріональний розвиток передує онтогенезу

7. Розташуйте складові онтогенезу людини в правильній послідовності (від найбільш раннього етапу):
   а) бластуляція *б)* запліднення
   в) нейруляція *г)* початок дроблення
   ґ) поява ектодерми та ентодерми *д)* поява мезодерми
   е) початок постембріонального розвитку

8. Увідповідніть групу організмів та особливості, які притаманні лише їм:
   а) віруси *1)* здатність до статевого розмноження
   б) гриби *2)* наявність однієї кільцевої хромосоми
   в) евкаріоти *3)* наявність стадії з двома гаплоїдними ядрами
   г) прокаріоти *4)* чергування гаметофіту та спорофіту
   ґ) рослини

ТЕМА 5

БІОЛОГІЯ ЯК ОСНОВА СЕЛЕКЦІЇ, БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНИ

48 ОСНОВНІ МЕТОДИ І ЗАВДАННЯ СУЧАСНОЇ СЕЛЕКЦІЇ. ШТУЧНИЙ ДОБІР (ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ТА МАСОВИЙ)

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- як люди «управляють еволюцією»;
- що спільного між селекціонером і тренером, який збирає найкращу команду;
- чим відрізняється індивідуальний добір від масового, і чому обидва ще працюють;
- як сучасні біологи поєднують класичні методи з технологіями на рівні ДНК.

У природі існує природний добір, коли природа відбирає найпристосованіших. Але є ще й штучний добір — коли роль природи бере на себе людина. Ми самі вирішуємо, які ознаки цінні, і дозволяємо організмам передавати їх далі.

Люди штучно відбирають та одомашнюють тварин і рослини протягом багатьох тисяч років. Фактично, одомашнення — це довгостроковий практичний експеримент, який чітко демонструє, що види можуть насправді кардинально змінюватися шляхом їх вибіркового схрещування. Прикладом штучного добору, який більшість людей добре розуміють, є розведення собак. Налічують сотні сучасних порід собак. Проте всі ці породи належать до одного виду. Якби сьогодні одомашнених собак виявила якась інопланетна раса, їх би вважали окремими видами з морфологічної точки зору. Однак завдяки генетичному тесту було б з'ясовано, що всі ці породи споріднені і споріднені з вовком (мал. 48.1). То як же цей вид розділився на стільки рас?

Іншим прикладом є різновиди нащадка дикої капусти, Brassica oleracea. Броколі та брюссельська капуста мають мало зовнішньої схожості зі своїми родичами, проте всі вони походять від цієї майже неїстівної рослини (мал.48.2).

Мал. 48.1. Сучасні породи собак — нащадки вовка

Мал. 48.2. Сорти капусти та дикорosла рослина, від якої вони пішли

Селекція — це наука про створення нових організмів із потрібними властивостями. Вона — конструктор, у якому замість деталей — гени. Людина вже понад 10 000 років змінює світ навколо себе: від диких зла-

ків, що осипалися, до сучасних гібридів кукурудзи, які витримують спеку Сахари.

За допомогою селекції ми можемо створювати не просто «врожайніші» сорти, а й такі, що рятують життя. Наприклад, «золота рисова» лінія, яку створили біотехнологи, містить більше β-каротину — речовини, з якої організм утворює вітамін А. У країнах, де діти помирають від його нестачі, цей сорт — справжній порятунок.

Сьогодні перед селекціонерами стоять складні виклики:

- нагодувати зростаюче населення планети;
- надати стійкості проти шкідників і хвороб;
- зменшити шкоду від пестицидів;
- зекономити добрива і воду;
- адаптувати рослини й тварин до кліматичних змін;

і все це зробити без втрати смаку і поживності та без шкоди для екосистеми.

У результаті селекції людина створює сорт, породу або штам — залежно від того, з якими організмами працює.

Сорт — це група рослин одного виду, що має спільне походження і спадково закріплені господарсько цінні ознаки (урожайність, стійкість до засухи, смак). Приклад: пшениця Миронівська-808, рис Золотий.

Порода — це група тварин одного виду, створена людиною шляхом добору і схрещування за бажаними ознаками (продуктивність, ріст, поведінка). Приклад: українська червоно-ряба молочна корова, українська степова біла свиня.

Штам — це чиста лінія мікроорганізмів (бактерій, грибів, дріжджів, вірусів), яка має певні спадкові властивості й використовується у виробництві або медицині. Штами відрізняються швидкістю росту, здатністю утворювати потрібні речовини або стійкістю до умов середовища. Наприклад: Penicillium chrysogenum — виробник антибіотика пеніциліну, Saccharomyces cerevisiae — використовують у хлібопекарстві та виноробстві, Lactobacillus bulgaricus — у виробництві йогуртів.

Селекціонер XXI століття — це не лише агроном чи зоотехнолог. Це біоінженер, генетик та еколог одночасно. Він працює не тільки з організмами, а й з даними: зчитує геноми, користується штучним інтелектом, прогнозує результати.

Уявімо, що в нас 10 000 рослин пшениці. Обираємо з них найкращі колоски, збираємо насіння — і засіваємо нове поле. Це і є **масовий добір**. Простий, давній, але дієвий спосіб, який рятував фермерів ще до появи лабораторій. Його сила — у великій кількості. Коли не можемо оцінити кожну рослину окремо, то довіряємо статистиці. Його слабкість — у неточності. Якщо рік видався дощовим, то навіть найкращі рослини можуть виглядати «середньо». Масовий добір частіше застосовують у селекції рослин, рідше — у тварин, коли для розмноження відбирають цілу групу особин з бажаними ознаками, не оцінюючи їхніх родичів.

Індивідуальний добір — «професійний режим». Тут працюють, як у лабораторії: оцінюють кожен організм окремо. Наприклад, у стаді корів відбирають тих, чиє молоко має найвищу жирність. Їхніх дочок знову тестують, і через кілька поколінь отримують лінії з прогнозованими якостями. Так само в рослин — кожна лінія вирощується, перевіряється, схрещується з іншими. Це довго, але ефективно.

Мал. 48.3. Генетик з майже ручними чорнобурими лисицями

Усього за кілька десятків поколінь добір може радикально змінити поведінку, зовнішність і навіть фізіологію виду. У дослідах генетика Дмитра Бєляєва проводився добір лисиць за ознакою лагідності. Через 20 поколінь тварини не лише перестали боятися людини, а й почали махати хвостом, мати висячі вуха й строкате хутро, стали дещо схожими на собак (мал. 48.3). Цей експеримент довів: поведінкові гени пов'язані з фізіологічними, добір за характером впливає і на зовнішність.

Індивідуальний добір за надоєм, вмістом жиру і білка в молоці призвів до появи сучасних порід — наприклад, голштинської (до 10–12 тис. л молока за рік). В Україні виведено українську червоно-рябу молочну (мал. 48.4) та українську чорно-рябу молочну породи — результат поєднання місцевих порід з голштинами. Наші тварини мають кращу адаптацію до клімату та міцнішу конституцію, ніж імпортовані.

Мал. 48.4. Українська червоно-ряба молочна

Мал. 48.5. Українська степоваряба

На півдні України створено українську степову білу й рябу породи свиней (мал. 48.5) — завдяки схрещуванням і відбору тварин, які швидко ростуть і витримують спеку. Сучасні українські лінії не поступаються європейським, але краще пристосовані до наших кормів і клімату.

У тваринництві часто буває так, що ознака, яка цікавить селекціонера, не проявляється у самця. Наприклад, півень не несе яєць, а бик не дає молока. Тому оцінити їхню спадкову цінність можна лише за якістю їхніх дочок або синів.

Такий метод називають **добором за потомством**. Він дає змогу визначити, наскільки добре бажані ознаки передаються наступним поколінням: півнів оцінюють за яйценосністю дочок, биків — за молочною продуктивністю дочок, за вмістом білка і жиру в молоці.

Цей метод повільніший, ніж індивідуальний добір, зате значно надійніший — він показує справжню генетичну цінність виробника.

Коли людина відбирає певних тварин для розмноження, вона змінює частоти генів у популяції. Наприклад, якщо залишають лише теличок із генами, що визначають високий надій, через кілька поколінь ці алелі стають переважаючими. Таким чином, селекція — це керована мікроеволюція.

Селекційні центри в Харкові, Полтаві, Сумах — це місця, де сьогодні поєднують традиційний добір із молекулярною генетикою. Сьогодні селекціонери не просто дивляться на колосок чи форму яблука. Вони бачать «генетичний паспорт», де за кожну ознаку відповідає певна ділянка ДНК.

Сучасна селекція завдяки технологіям геномного добору прогнозує, які з молодих рослин найперспективніші — ще до того, як вони виростуть. У 2023 році команда дослідників з Інституту Ротамстед (Велика Британія) створила пшеницю, яка на 15% краще поглинає азот із ґрунту. У Китаї застосували CRISPR-редагування, щоб підвищити врожайність рису без втрати смаку. В Україні ведуть селекцію морозостійких сортів винограду, використовуючи геномний аналіз. У 2025 р. українські дослідники проаналізували послідовність гена міостатину (MSTN) в овець гірськокарпатської породи. Цей ген контролює розвиток м'язової тканини. Деякі його варіанти (алелі) пов'язані з кращою м'язистістю тварин. Такі дані допомагають проводити молекулярний добір — тобто відбирати тварин не лише за зовнішніми ознаками, а й за конкретними спадковими маркерами.

Такі дослідження доводять: селекція — вже не просто «вибір кращих», а керування генетичною інформацією. Сучасні технології дозволяють не чекати роками: використовують ДНК-тести для виявлення тварин-носіїв потрібних генів (наприклад, стійкості до маститу); застосовують геномну селекцію — добір тварин на основі аналізу тисяч генетичних маркерів.

Метод	Суть	Переваги	Недоліки
Масовий добір	Відбір багатьох особин без аналізу родин	Простота, швидкість	Менш точний
Індивідуальний добір	Вибір найкращих окремих організмів	Висока точність, спадковий контроль	Довготривалий, потребує ресурсів
Сучасна селекція (геномна, маркерна)	Вибір за генетичними маркерами	Прогноз, швидкість, менше помилок	Висока вартість

Кожен шматок хліба, кожен помідор і навіть ваша улюблена порода собаки — це результат багаторічної роботи селекціонерів. Ті, хто колись вибрав «найкращі» зерна чи тварин, змінили світ більше, ніж могли уявити. Сьогодні ви можете побачити еволюцію в дії.

1. Що таке штучний добір?
2. Чим відрізняється масовий добір від індивідуального?
3. Назвіть три приклади ознак, які можуть бути об'єктом добору у тваринництві.
4. Чому масовий добір вважають «статистичним», а індивідуальний — «точним»?
5. Як селекціонери зменшують вплив середовища під час добору?
6. Які сучасні методи допомагають передбачити спадкові якості ще до вирощування рослин?
7. Вам потрібно створити сорт моркви, що швидше росте й має яскравіший колір. Який тип добору ви оберете? Як можна поєднати масовий та індивідуальний добір для досягнення кращого результату?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/FtJNWblI і виконайте вправи.

Інформаційно-пошуковий проєкт: «Дослідіть історію створення будь-якого українського сорту» (наприклад, пшениця Миронівська-808 або яблуко Симиренка).

49 СПОРІДНЕНЕ (ІНБРИДИНГ) ТА НЕСПОРІДНЕНЕ (АУТБРИДИНГ) СХРЕЩУВАННЯ, ЇХНІ ГЕНЕТИЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ. МІЖВИДОВА ГІБРИДИЗАЦІЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

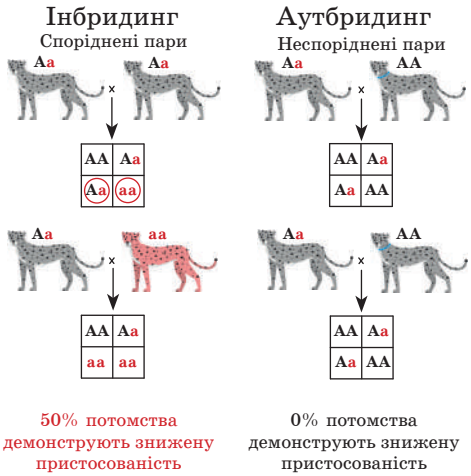
- що схрещування — один із найпотужніших інструментів еволюції й селекції;
- у чому сила і слабкість спорідненого і неспорідненого схрещування;
- які можуть бути генетичні, екологічні та еволюційні наслідки міжвидового схрещування;
- чим може загрожувати потомству шлюб між близькими родичами;
- як фермери використовують інбридинг та аутбридинг для створення нових сортів рослин і порід тварин.

Пригадайте старовинні народні казки, які ви чули в дитинстві, де в короля одна донька, що страждає на недугу, яку нікому не вдається вилікувати. А у простих незаможних родинах завжди багато дітей, які

ще й до того багато працюють змалку. Люди віддавна помітили таку особливість і перенесли в народні байки. Лише у XX столітті біологи пояснили цю загадку: в усьому винен інбридинг — споріднене схрещування. Адже королівські родини одружувалися між собою століттями, щоб «зберегти чистоту крові». Але разом із гербами вони зберігали й небезпечні гени. Найвідоміший приклад — іспанська династія Габсбургів. Її останній представник, Карл II (мал. 49.1), у якого батьки внаслідок споріднених шлюбів були генетично ближчими, ніж брат і сестра. Він страждав від численних вад, не міг мати дітей і став символом того, що природа не терпить «замкнених родин».

Мал. 49.1. Карл II Іспанський. Його щелепа була деформована до такої міри, що він був абсолютно нездатний жувати, а його збільшений язик змушував постійно пускати слину. Він страждав від галюцинацій і судом. До XVIII століття лінія настільки погіршилася, що стала безплідною, що ознаменувало буквальне зникнення Габсбургів у 1740 році

У живих організмів генетичний матеріал (ДНК) передається від батьків до нащадків. Коли двоє батьків мають спільних родичів або належать до дуже близько споріднених груп, то їхній потомок отримує набір генів, який має значну кількість ідентичних алелів. Це споріднене схрещування, або **інбридинг**. У протилежному випадку, коли батьки є відносно неспоріднені, тобто генетично різні — це **аутбридинг**. При інбридингу підвищується гомозиготність — тобто збільшується шанс, що обидві хромосоми в потомка несуть однаковий алель гена. Це може призвести до прояву рецесивних генетичних варіантів, які в гетерозиготному стані не проявляються (мал. 49.2).



Мал. 49.2. Інбридинг підвищує ризик появи шкідливих рецесивних генів і знижує пристосованість потомства, тоді як аутбридинг зберігає генетичне різноманіття та життєздатність

Знижена життєздатність, зниження здатності до розмноження, підвищення частоти захворювань називають *інбридинговою депресією*. У рослин інбридинг знижує урожайність, стійкість до хвороб і засухи. Популяції гепардів мають надзвичайно низьке генетичне різноманіття через давній інбридинг. Усі гепарди настільки схожі, що можуть отримати трансплантацію шкіри один від одного без відторгнення, але, водночас, вони надзвичайно вразливі до вірусів і проблеми із розмноженням. Леви в невеликих заповідниках Африки стали занадто спорідненими. У деяких популяціях зросла кількість потомків із деформаціями хребта і безпліддям. Коли до них привезли кількох «чужих» левів — народилися сильні й здорові левенята. Це був живий доказ, що генетичне різноманіття — справжній «подих життя». Проте іноді інбридинг може допомогти «витіснити» шкідливі рецесивні алелі — процес, який називають *генетичним очищенням*.

У сільському господарстві селекціонери використовують інбридинг як інструмент закріплення ознак. Коли потрібно отримати сорт зі стабільними властивостями (наприклад, пшеницю з певною висотою колоса чи корову з рекордною молочністю), кілька поколінь схрещують близьких родичів, щоб усі нащадки мали однакові гени. Для наукових досліджень, де потрібно використовувати максимально однакових особин, виводять чисті лінії. Так, породи мишей, які використовують у лабораторіях усього світу, були створені саме інбридингом. Усі вони настільки подібні генетично, що їхня ДНК відрізняється менш ніж на 1%.

Крім того, інбридинг використовують як матеріал для іншого способу гібридизації — **аутбридингу**. Коли дві різні інбредні (високогомозиготні) лінії схрещують між собою, народжується потомство, яке росте краще, дає більше потомства і живе довше (мал. 49.3). Це явище називають **гібридною силою**, або **гетерозисом**. Майже всі сучасні кукурудзяні гібриди створені саме так. У результаті фермери отримують рослини, які дають удвічі більше врожаю, ніж звичайні сорти. Але спробуйте посадити зерна від цих гібридів — і врожай різко впаде. Генетична «магія» діє лише в першому поколінні (F_1).

Мал. 49.3. Качани кукурудзи інбредних ліній (зліва і справа) і гібридної рослини з проявом гетерозису (посередині)

Мал. 49.4. Інбредні батьківські форми кукурудзи та гібриди (справа)

Аутбридинг — це схрещування між особинами, які **не є близькими родичами** або навіть належать до різних популяцій одного виду, з генетично значно різними фондами. Тут гомозиготність зменшується, підвищується гетерозиготність — тобто потомок отримує два різні алелі. У природі це відбувається постійно: міграції, пошук нових партнерів, переміщення пилку вітром чи комахами.

Гібриди кукурудзи, які вирощують у всьому світі, дають урожай на 25–50% більший, ніж батьківські лінії (мал. 49.4). При схрещуванні різних порід свиней отримують потомство з міцнішим здоров'ям і кращими м'ясними якостями.

Гетерозис у малих ізольованих популяціях покращує стан. Але може бути і негативний ефект — *аутбридингова депресія*: якщо схрещуються дуже генетично різні популяції, потомки можуть мати знижену пристосованість. Отже, і аутбридинг не гарантовано «хороший» — усе залежить від ступеня генетичної відстані, середовища, історії популяцій.

Наприклад, при схрещуванні різних підвидів риб зникає пристосованість до певних водойм.

Біологи схрестили дві популяції лосося з різних річок Канади. Перші покоління зростали швидше, але вже за кілька — знизилася виживаність мальків. Причина: кожна популяція мала свої гени пристосування до температури й швидкості течії. Коли гени змішалися — механізм адаптації зламався.

А тепер найцікавіше. Чи можливе схрещування між різними видами? Так, і в природі, і навіть у лабораторіях це трапляється частіше, ніж здається.

Мал. 49.5. Helianthus anomalus, отриманий шляхом гібридизації двох інших видів соняшнику, H. annuus та H. petiolaris, кілька разів приблизно між 60 000 та 200 000 років тому

Зазвичай міжвидові бар'єри (географічні, екологічні, генетичні) заважають схрещуванню між особинами різних видів, але сучасні дослідження показують: такі гібриди — не рідкість. Останні дослідження показують, що в 10% усіх відомих ссавців є сліди міжвидової гібридизації. У риб — понад 30%.

Схрещування між особинами різних видів називають **міжвидовою гібридизацією**.

Серед рослин це відбувається часто: гібриди можуть мати нові ознаки або адаптації. Саме так з'явився соняшник Helianthus anomalus — новий вид, утворений унаслідок природного схрещування двох інших (мал. 49.5).

Сучасні генетики називають це «гібридним видоутворенням». Проте підвищується ризик для рідкісних чи ендемічних видів: коли відбу-

вається гібридизація з більш численним видом, відбувається заміщення генетичного фонду меншого виду — явище називають *генетичним поглинанням*. Також гібриди можуть мати низьку життєздатність або бути стерильними через розбіжності в хромосомах або в генетичних системах — це механізм, що стримує гібридизацію. Але якщо бар'єри слабкі — гібриди можуть виживати і розмножуватися. Гібриди можуть змінювати екосистеми — наприклад, стати інвазійними формами або змінити взаємодії зі збудниками, конкурентами чи середовищем.

Відомі міжвидові гібриди і серед тварин. **Лігр** — гібрид лева і тигриці. Величезний, майже удвічі більший за звичайного лева (мал. 49.6). Має водночас гриву й смуги. Але лігри зазвичай стерильні: різна кількість хромосом у батьків не дозволяє їм мати потомство.

Мал. 49.6. Лігр. У природних умовах левиці мають ген, який обмежує ріст, тоді як у тигрів цей ген має самець; таким чином, лігри (як потомство лева-самця та тигриці) не отримують копії гена від жодного з батьків і, як наслідок, страждають від гігантизму, дуже швидко переростаючи і матір, і батька

Мал. 49.7. Мул. Коні мають 64 хромосоми, віслюки — 62, а мули — 63, тому в них не утворюються статеві клітини і, як наслідок, ці особини стерильні

Безплідним теж є **мул** — гібрид коня (самиці) і віслюка (самця) (мал. 49.7). Неймовірно витривалий, розумний, слухняний. Але теж не здатний до розмноження.

А як щодо людини? Геном сучасної людини зберігає 1–3% генів неандертальців і денисівців. Це означає, що предки сучасної людини не лише зустрічалися з іншими видами Homo, а й залишали спільних дітей. І багато з цих «чужих» генів допомагають нам виживати — наприклад, ті, що відповідають за імунітет до вірусів.

Селекціонери теж використовують міжвидову гібридизацію.

Тритикале — це штучно створений гібрид пшениці (Triticum) та жита (Secale). Нова культура поєднує врожайність пшениці й витривалість жита. Перші спроби схрещування робили ще в XIX ст., але родючі форми отримали лише в середині XX ст. Адже і тут перешкодою була стерильність гібридів. Пшениця і жито мають різні набори хромосом, тому їхні первинні гібриди не могли утворювати повноцінні гамети.

Стерильність усунули подвоєнням хромосомного набору — так з'явилися поліплоїди.

Пригадайте яким шляхом це можна здійснити і за допомогою якої речовини.

Тепер кожна хромосома мала свою пару для кон'югації і повноцінного мейозу.

Сучасна геноміка дозволяє вченим точно знати, які гени успадковуються і як вони взаємодіють. Тому гібридизація — вже не «гра наосліп», а точне поєднання бажаних ознак. Використовуючи аналіз ДНК, дослідники створюють моделі, що передбачають успіх схрещування. У 2022 році біотехнологічна компанія з Нідерландів створила новий сорт полуниці, застосувавши схрещування за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, які передбачили найкращу генетичну комбінацію. Результат — солодка, ароматна, але стійка до грибкових хвороб ягода. Майбутнє гібридизації — у точній генетиці, де природні механізми поєднуються з технологіями CRISPR і штучного добору.

Людство теж стоїть перед вибором. Ми створюємо гібриди в лабораторіях — від рослин до генетично модифікованих тварин. Це потужний інструмент, але також і велика відповідальність.

Ми можемо рятувати види, що вимирають, схрещуючи їх із близькими родичами (як у проєкті відновлення європейського зубра), але можемо й негативно вплинути на природну різноманітність.

1. Чим відрізняється інбридинг від аутбридингу?
2. Як змінюється гомозиготність і гетерозиготність при інбридингу?
3. Що таке гібридна сила (гетерозис)?
4. Чому при розведенні декоративних тварин інбридинг іноді є необхідним?
5. Наведіть приклади природних або штучних міжвидових гібридів.
6. Чому міжвидові гібриди здебільшого безплідні? Як можна подолати цю безплідність у рослин і чому не можна це зробити у тварин?
7. Оксані Оленка подарувала декілька насінин кукурудзи, розказавши, що це дуже смачний сорт. Кукурудза і справді вродила дуже щедро, була надзвичайно смачною і великою. Оксана знову висадила кукурудзу, скориставшись зернівками з цього врожаю, ще й дала сусідам. Але яким її було здивування, коли наступного літа не тільки врожай був неочікувано слабшим, а й смак плодів був зовсім не таким, як попереднього року. Сусіди, які теж не отримали очікуваного, припустили, що проблема у неправильному догляді, але Оленка пояснила, що причина в самому насінні. Що сказала Оленка?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/KtJNEoDN і виконайте вправи.

Інформаційно–пошукові проєкти (на вибір) (*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 в господарствах вашого регіону.
- Породи домашніх улюбленців у вашій школі (класі) або вдома.

50 МЕТОДИ СЕЛЕКЦІЇ РОСЛИН, ТВАРИН ТА МІКРООРГАНІЗМІВ. СПОРІДНЕНЕ (ІНБРИДИНГ) ТА НЕСПОРІДНЕНЕ (АУТБРИДИНГ) СХРЕЩУВАННЯ, ЇХНІ ГЕНЕТИЧНІ ТА БІОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ. МІЖВИДОВА ГІБРИДИЗАЦІЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які методи застосовують у селекції рослин, які — у селекції тварин, а які — у селекції мікроорганізмів;
- у чому відмінності та схожості між селекцією цих трьох груп організмів;
- які сучасні наукові підходи (наприклад, геномні методи) використовуютьс та як це змінює класичну селекцію.

Мал. 50.1. Ассирійський дух запилює священну фінікову пальму — символ життя й родючості. Це свідчить, що ассирійці мали уявлення про значення запилення та штучного добору, пов'язуючи зародження життя з відтворенням рослин

Селекція — це процес, за допомогою якого люди обирають особин із бажаними властивостями і дають їм «право» передавати свої гени наступному поколінню. У сільському господарстві це означає: «вирощуємо ті рослини, які більші, кращі, стійкіші», «розводимо тварин із бажаними характеристиками», «відбираємо мікроорганізми, які корисні промислово». Селективний процес — це баланс між генетикою (які гени є), спадковістю (наскільки риси передаються) та умовами середовища (що дозволяє цим рисам проявитися).

Селекція рослин найдавніша. Люди займалися нею ще тоді, коли не знали, що таке ген. Пшениця, яку ми вирощуємо сьогодні, — результат тисячоліть добору.

У предкових форм пшениці насіння висипалося ще до того, як людина встигала його зібрати. Стародавні хлібороби відкладали насіння з рослин, які тримали зерно довше, — і саме таким чином почався процес селекції.

І досі серед потомства вибирають найкращі рослини за бажаною ознакою (урожайність, смак, стійкість до шкідників). Використовують, як індивідуальний добір, так і масовий.

Завдяки гібридизації отримують нові рослини з новими комбінаціями ознак. Наприклад, поєднавши морозостійку озиму пшеницю з високоврожайною м'якою, селекціонери створюють нові сорти, стійкі до холоду й хвороб. Гібридизацію використовують і для прояву гібридної сили — гетерозису. Мутаційна селекція змінює рослини, спричиняючи мутації (радіоактивним випромінюванням або хімічними речовинами), з яких можна обрати корисні варіанти. Маркер-асоційована селекція та геномна селекція — сучасні методи, коли використовують генетичні маркери або дані геному, щоб обирати рослини ще до масового вирощування.

Рослини легко розмножуються вегетативно, тому цінні ознаки можна швидко закріпити. Але висока врожайність або смакові якості часто йдуть у парі з втратою стійкості — тому селекціонеру доводиться шукати баланс.

Рослини мають велике число нащадків, можна виростити багато сіянців і обрати найкращих. У самозапильних рослин (наприклад, пшениця, ячмінь) легше отримати лінії з фіксованими ознаками. У перехреснозапильних (наприклад, кукурудза, соняшник) — більше генетичного різноманіття, але й більше викликів. Селекція може бути дуже швидкою: завдяки технологіям маркерів можна скоротити час від першого схрещування до нового сорту. Сильно впливає і середовище: наприклад, сорт, який дає високий врожай в одному регіоні, може давати менший в іншому через ґрунт, клімат, шкідників.

Мал. 50.2. Юр'єв Василь Якович (20.02.1879–08.02.1962). Іменем цього селекціонера присвоюють нагороду за видатні наукові роботи в галузі генетики і створення нових методів акліматизації, більш високоврожайних сортів сільськогосподарських культур та високопродуктивних порід тварин

Україна завжди була відома як «житниця Європи», і це не випадково — наші традиції селекції сягають глибоко в минуле. Ще в XIX столітті селяни помічали, що деякі рослини краще витримують суворі зими чи літні дощі, і почали вибірково розмножувати їх. Але справжній стрибок стався у XX столітті, коли селекціонери, як Василь Юр'єв (мал. 50.2) у Харкові, почали систематизувати цю роботу. Його інновації в селекції пшениці не просто покращили врожайність, а й стали

основою для сучасних гібридів, які використовують по всьому світу. Це факт, заснований на архівних записах і практиці, що показує, як місцеві знання перетворювалися на науку.

До 2025 року українська селекція інтегрувалася в глобальні мережі, обмінюючись технологіями з міжнародними організаціями. Тепер, з використанням генної інженерії та цифрових інструментів, наші вчені створюють сорти, які витримують екстремальні температури. Зверніть увагу: в регіонах, де клімат змінюється швидше, ніж ми встигаємо адаптуватися, такі розробки стають рятівним кругом. Це не про прості покращення, а про стратегічні кроки, що роблять українську селекцію конкурентоспроможною на світовому ринку, де раніше домінували інші країни.

Сьогодні селекціонери в Україні — це команда експертів з Національної академії аграрних наук (НААН), які працюють на десятках дослідних станцій (мал. 50.3, 50.4).

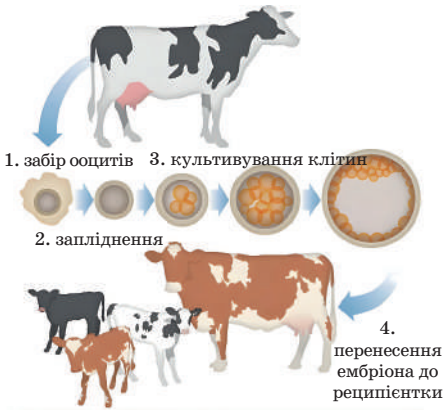
Мал. 50.3. Миронівський інститут пшениці імені В. М. Ремесла спеціалізується на сортах, що витримують морози до −25°C, дозволяючи фермерам у північних областях не боятися зимових втрат

Мал. 50.4. В Одеському селекційно-генетичному інституті фокус на соняшнику, який не лише дає більше олії, а й стійкий до засухи, що критично для південних регіонів

Гібриди кукурудзи генетично захищені від шкідників, зменшуючи потребу в пестицидах на 30% . Нові лінії ячменю адаптовані до піщаних ґрунтів, що допомагає в регіонах з ерозією.

Ці досягнення не просто покращують статистику — вони змінюють життя фермерів: дрібний господар у Полтавській області може тепер вирощувати культури, які раніше були ризикованими. Сільське господарство стає стійкішим до криз, як-от засухи 2023 року, яка зачепила багато країн.

Селекція тварин складніша. Якщо в рослин можна висіяти тисячі насінин і вибрати кращу, то у тварин кожне покоління обмежене кількома нащадками. Крім того, тварини мають довгий період дозрівання — результатів доводиться чекати роками. У тварин мішені-ознаки (молоко, м'ясо) зазвичай вимірюються пізніше, ніж у рослин, бо тварина росте роками. Це робить селекцію довшою. Менша кількість нащадків за один цикл,



Мал. 50.5. Трансплантація ембріонів широко використовується для збільшення кількості потомства, народженого від продуктивно кращої матері протягом її життя

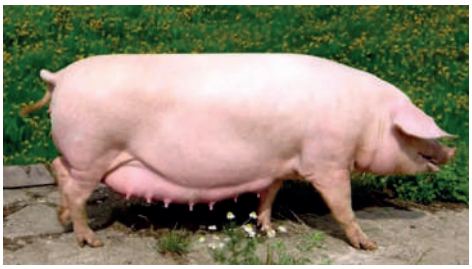
ніж у рослин, обмежує швидкість селекції. Збільшити кількість бажаних нащадків можна за допомогою штучного осіменіння чи трансплантації ембріонів (мал. 50.5).

За допомогою геномних маркерів можна «викривити» час і прискорити процес. У великої рогатої худоби (корів) геномна селекція дозволяє вже на ранньому етапі прогнозувати молочну продуктивність, що значно знижує час до прийняття рішення.

Багато ознак (молочність, м'ясність, плодючість) мають полігенну природу — їх складно «виміряти» за одним геном. Головний виклик — баланс між продуктивністю і здоров'ям: дуже високі показники продуктивності можуть супроводжуватися проблемами (захворюваність, порушення норм тощо). Переважає індивідуальний добір за потомством і продуктивністю. Наприклад, корова дає багато молока і її потомство використовують як основу для подальшої селекції. Гібридизація (інбридинг, аутбридинг) — залежно від цілей: чи хочемо фіксувати певні риси, чи отримати гібридний ефект. Велику роль відіграють умови утримання — навіть найкраща генетика не проявиться при поганому догляді.

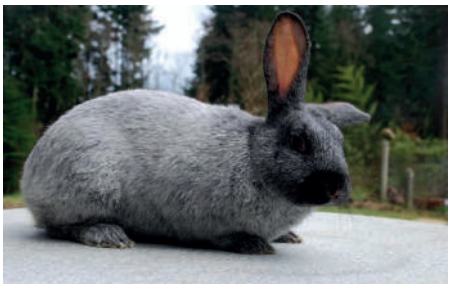
У сучасному тваринництві значних успіхів досягли українські селекціонери, які створили вітчизняні породи великої рогатої худоби (мал. 50.6), свиней (мал. 50.7), овець (мал. 50.8), птахів і кролів (мал. 50.9), які пристосовані до умов нашої країни та відзначаються високою продуктивністю.

Мал. 50.6. Українська чорно-ряба молочна порода створена схрещуванням чорно-рябої худоби вітчизняної селекції з голштинською



Мал. 50.7. Полтавська — порода свиней м'ясного типу. Виведена вченими Інституту свинарства УААН (Полтава) методом складного схрещування 2-х вітчизняних та 3-х зарубіжних порід

Мал. 50.8. Асканійська тонкорунна вівця — м'ясо-вовнова порода овець, виведена вченими в Асканії-Нова шляхом схрещування місцевих українських мериносів з американськими породами



Мал. 50.9. Полтавське срібло — це порода кроликів, яку вивели в 1952 році брати І. І. та А. І. Каплевські

Мікроорганізми — особливий об'єкт селекції. Їх не видно неозброєним оком, але саме завдяки їм ми маємо антибіотики, ферменти, пробіотики, йогурти і хліб. Методи теж особливі.

- Добір серед колоній: із тисяч колоній бактерій відбирають ті, що продукують більше потрібної речовини. Так, штам Aspergillus oryzae, відібрано серед природних цвілей, що найкраще ферментували рис і сою, застосовується у виготовленні саке, соєвого соусу, місо.
- Індуковані мутації — спричиняють зміни ДНК за допомогою УФ-опромінення або хімічних агентів, щоб знайти штам із поліпшеними властивостями. Штам Bacillus subtilis виведений шляхом фізичного і хімічного мутагенезу для підвищеного синтезу амілази (фермент для промисловості).
- Рекомбінація — обмін спадковою інформацією між клітинами. Bacillus subtilis — штами з підвищеною продукцією протеаз після трансформації ДНК від споріднених штамів.
- Селекція на середовищі — створюють умови, де виживають лише найпродуктивніші клітини. Penicillium roquefortii — штами, краще пристосовані до росту при низьких температурах і високій солоності, добором у середовищах, що імітують умови визрівання сирів.

Особливості селекції мікроорганізмів характеризуються коротким життєвим циклом: за добу можна отримати десятки поколінь, тому процес надзвичайно швидкий. Можливість працювати з мільярдами клітин одночасно — імовірність знайти потрібний варіант дуже висока. Усе проводиться в стерильних лабораторних умовах, де важливу роль відіграє чистота культури. Нові штами можуть бути комерційною таємницею — наприклад, виробники антибіотиків часто не розкривають «свій» мікроорганізм.

Але весь процес може бути складним: мікроорганізми можуть поводитися по-іншому в лабораторії і в промисловому масштабі; треба враховувати мутаційну стабільність, збереження властивостей.

Українські селекціонери рослин, тварин і мікроорганізмів від класичної селекції до сучасної біотехнології та геномної селекції (мал. 50.10–15).

Мал. 50.10. Левко Платонович Симиренко. Селекціонер яблук. Автор понад 100 сортів (Ренет Симиренка). Яблуневий календар (сорти з різними термінами дозрівання)

Мал. 50.11. Володимир Левкович Симиренко. Селекція плодових понад 50 сортів (Мліївська зимова); репресований сталінським режимом

Мал. 50.12. Василь Миколайович Ремесло. Засновник Миронівського інституту пшениці НААН. Автор 19 сортів озимої пшениці

Мал. 50.13. Данило Кирилович Заболотний. Розробив методи селекції штамів чуми та сибірки для вакцин; перші штами для імунізації (проти чуми в Азії)

Мал. 50.14. Олена Володимирівна Мошинець. Розробила CRISPR-відредаговані штами Pseudomonas fluorescens для деградації нафти

Мал. 50.15. Сергій Юрійович Рубан. Розробив методи генетичного аналізу для свиней (породи Велика біла, Миргородська)

1. Назвіть три основні цілі селекції в рослинництві.
2. Який основний недолік масового добору в селекції рослин?
3. Чому в селекції тварин процес може бути повільнішим, ніж у рослин?
4. Порівняйте селекцію рослин і мікроорганізмів з точки зору масштабу (кількість нащадків) і часу (швидкість поколінь). Заповніть таблицю:

Критерій	Рослини	Мікроорганізми
Кількість нащадків		
Час одного покоління		

5. Чому геномні методи змінюють класичну селекцію? Поясніть на прикладі великої рогатої худоби.
6. Створіть інфографіку або слайд «Українські селекціонери: від минулого до майбутнього». Включіть 3 історичні постаті і 3 сучасні. Для кожної вкажіть: культуру/породу/штам, ключовий метод селекції, результат.
7. Змоделюйте етапи селекції певного сорту сільськогосподарської рослини (декоративної, овочевої) з певними якостями чи етапи створення нової породи тварин (з певними якостями).

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/OtJNEcr6 і виконайте вправи.

51 БІОТЕХНОЛОГІЯ. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГЕНЕТИЧНОЇ ТА КЛІТИННОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В СЕЛЕКЦІЇ, БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чому хліб, сир, йогурт є продуктами біотехнології;
- як сучасна біотехнологія змінює сільське господарство, промисловість і медицину;
- про новітні досягнення біотехнології XX–XXI століть;
- про нові можливості та етичні питання, які постають перед людством у зв'язку з розвитком біотехнологій.

Біотехнологія — це наука, яка використовує живі організми, клітини чи їхні компоненти для створення корисних продуктів і технологій. Біотехнологія не почалася в лабораторії. Вона почалася на кухні, у хліві й у глиняному горщику. Хліб — перша біотехнологічна революція (мал. 51.1). Адже для приготування хліба потрібні живі організми — дріжджі. Дріжджі — факультативні анаероби і в кисневих умовах проводять повне окиснення вуглеводів, що містяться в зернах злакових з виділенням великої кількості CO_2, який збільшує тісто в об'ємі. Хліб був відомий ще за часів єгипетських фараонів та мав особливе значення в раціоні давніх єгиптян (мал. 51.2).

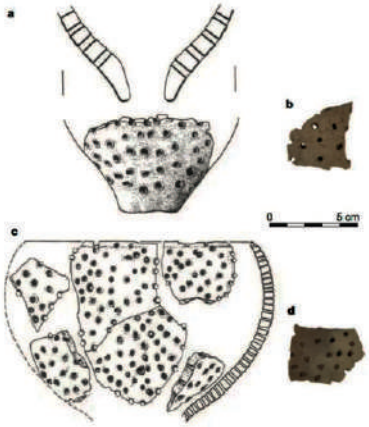
Мал. 51.1 Давні обвуглені крихти, знайдені в пустелі в Йорданії залишки хліба, якому 14 400 років. Знахідка доводить, що хлібопекарство виникло щонайменше на 4000 років раніше, ніж поява сільського господарства

Мал. 51.2. Ілюстрація зі стіни єгипетської гробниці. Одна людина готує тісто, інша стежить за випіканням хлібних форм. Вапняк (2500–2350 рр. до н. е.)

У Месопотамії (сучасний Ірак) жінки варили пиво з ячменю. Дріжджі (ті ж самі, що й у хлібопекарстві) в анаеробних умовах здійснюють спиртове бродіння й утворюють спирт. Спирт убивав бактерії, тому був безпечніший за воду (мал. 51.3).

У пустелях кочівники носили молоко в шлунках тварин (сичугах). Фермент ренін і бактерії давали ще один біотехнологічний продукт — сир. Виробництво сиру сягає більше 7000 років (мал. 51.4).

Мал. 51.3. Глиняна табличка з рецептом пива, 1800 р. до н. е. (Британський музей)



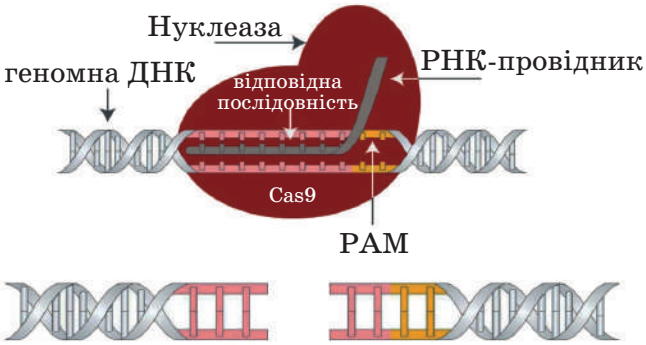
Мал. 51.4. Посудина для проціджування молока і виробництва сиру. Датується 5200–4900 роками до нашої ери

Надалі біотехнологія тільки розширювала свої можливості: соєвий соус, кефір, йогурт — все це продукти традиційної біотехнології. Але справжній прорив стався у XX столітті, коли вчені навчилися маніпулювати генами та культивувати клітини поза організмом. Сучасні вчені 10 000-річну естафету прискорили в мільйон разів.

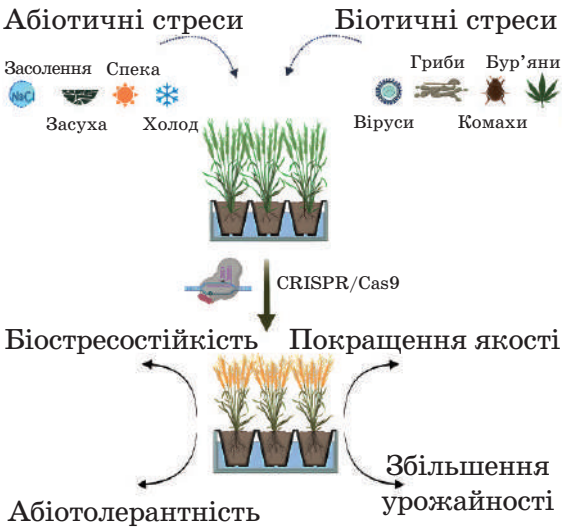
Сьогодні біотехнологія — це генна інженерія (внесення змін у ДНК), клітинна інженерія (робота з клітинами) і біореактори (апарати для вирощування клітин у лабораторії). Ці технології змінюють сільське гос-

подарство, промисловість і медицину.

Найвідоміший інструмент генетичної інженерії — CRISPR/Cas9. Це «молекулярні ножиці», які дозволяють вирізати, вставляти чи вимикати гени з точністю до одного нуклеотида в ДНК. Вчені вводять у клітину молекулу-провідник (РНК), яка «шукає» потрібний ген. Фермент Cas9 «розрізає» ДНК у місці сигнальної мітки (PAM). Клітина «ремонтує» розрив сама або за шаблоном, який ми дамо (мал. 51.5).



Мал. 51.5. Система CRISPR/Cas9 складається з двох основних компонентів: фрагмента РНК, який зв'язується з послідовністю-мішенню за принципом комплементарності, який служить маркером для нуклеїнової кислоти і білком Cas9. CRISPR/Cas9 зв'язується з позначеною послідовністю та розрізає її завдяки своїй нуклеазній активності коло сигнальної мітки (PAM)



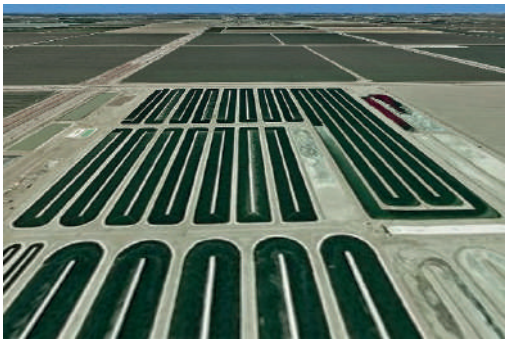
Мал. 51.6. Пшениця має змінений ген, який активує захист від засухи. Урожайність зросла на 20% у засушливих регіонах

У 2024 році CRISPR використали для створення засухостійкої пшениці Durum CRISPR Wheat (мал. 51.6).

У 2024 році вчені Інституту інноваційної геноміки використали CRISPR для створення сортів рису, які випускають до 70% менше метану — потужного парникового газу, — водночас підвищуючи врожайність на 20%.

Ще один прорив стався у 2023 році, коли CRISPR-відредаговану кукурудзу розробили для потреби на 30% менше добрив, завдяки ШІ-при-

Мал. 51.7. Дослідники Нью-Йоркського університету використовують генетику рослин з штучний інтелект для вивчення ефективності використання азоту рослинами



Мал. 51.8. Ставки для водогонів, де вирощують водорості для біопалива. Зображення надано Управлінням енергоефективності та відновлюваної енергії Міністерства енергетики США

скореному геномному аналізу, що визначає гени фіксації азоту (мал. 51.7). Фермери в рfсушливих регіонах, якот у Субсахарській Африці, вже сіють ці сорти, зменшуючи ерозію ґрунту та витрати.

Переходячи до промислової сторони біотехнології, генетична та клітинна інженерія готують «зеленіше» майбутнє. Тут мікроби та клітини стають мініфабриками для палив, пластмас і ліків. Синтетична біологія перепро'ктує організми з нуля. Фермент, інженерований з бактеріальних генів, розкладає пластмаси, такі як пляшки з PET, за години, а не століття, перетворюючи відходи на нешкідливі продукти.

Лабораторії в Європі масштабують це для біоремедіації, очищаючи забруднені океани від мікропластику у Великій Тихоокеанській сміттєвій плямі. **Біоремедіація** — це методика поводження з відходами, яка передбачає використання організмів для видалення або нейтралізації забруднювачів із забрудненої ділянки.

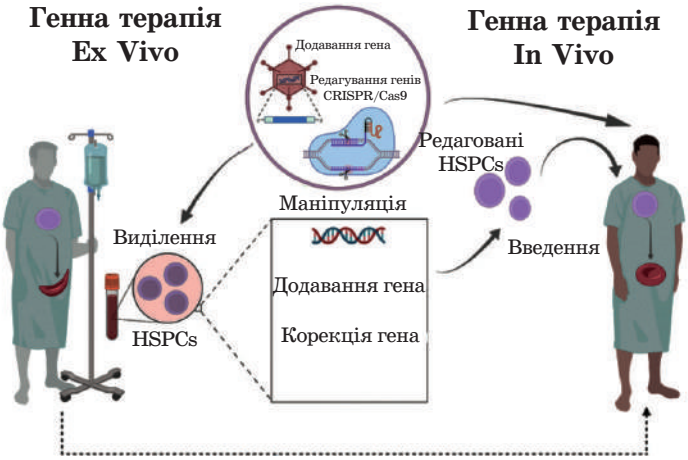
У біопаливах генетичні правки водоростей підвищили виробництво палива на 50% . Ці ферми водоростей у Техасі перетворюють CO_2 на біодизель, конкуруючи з викопним паливом без шкідливих викидів (мал. 51.8).

У медицині ці інструменти буквально переписують здоров'я людини. У 2023 році FDA схвалила першу CRISPR-терапію для серпоподібноклітинної анемії, яка редагує несправні кров'яні клітини, щоб зупинити болісні кризи (мал. 51.9). Понад 80% ремісій у випробуваннях означає, що діти, які колись стикалися з довічним болем, тепер бігають марафони.

Якщо генна інженерія редагує гени, клітинна інженерія перепрограмовує самі клітини, перетворюючи їх на фабрики ліків, тканин чи навіть штучні органи. **Генна терапія** передбачає маніпулювання та вве-

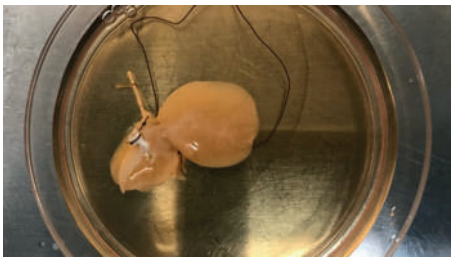
дення генетичного матеріалу в клітини пацієнта для виправлення генетичних порушень або посилення терапевтичного ефекту через введення здорових генів замість дефектних або модифікації існуючих генів для покращення їхньої функції.

Клітинна терапія, з іншого боку, використовує унікальні регенеративні властивості стовбурових клітин або інших функціональних типів клітин для відновлення або заміни пошкоджених тканин чи органів.



Мал. 51.9. Генна терапія/редагування для Ex Vivo (поза тілом) та In Vivo (всередині тіла). HSPCs — гемопоетичні стовбурові клітини, які є попередниками всіх типів клітин крові та імунної системи

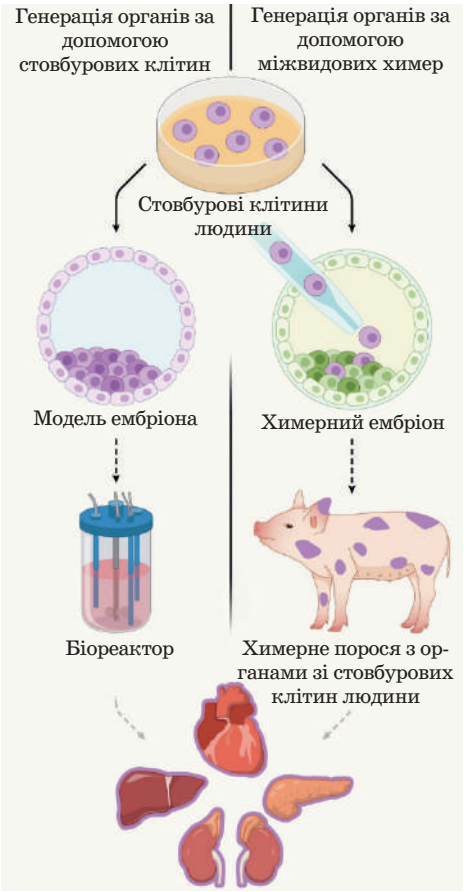
У 2025 році в Сінгапурі вперше пересадили міні-печінку, вирощену з власних клітин пацієнта. Як? Взяли клітину шкіри. Перепрограмували її в стовбурову. Додали «сигнали росту», клітини самі зібралися в 3D-органоїд (мал. 51.10). **Органоїд** — це мініатюрна, спрощена 3D-модель органа, яка створюється в лабораторії з клітин-попередників або стовбурових клітин.



Мал. 51.10. Повністю функціональна мініатюрна печінка людини, вирощена в лабораторії

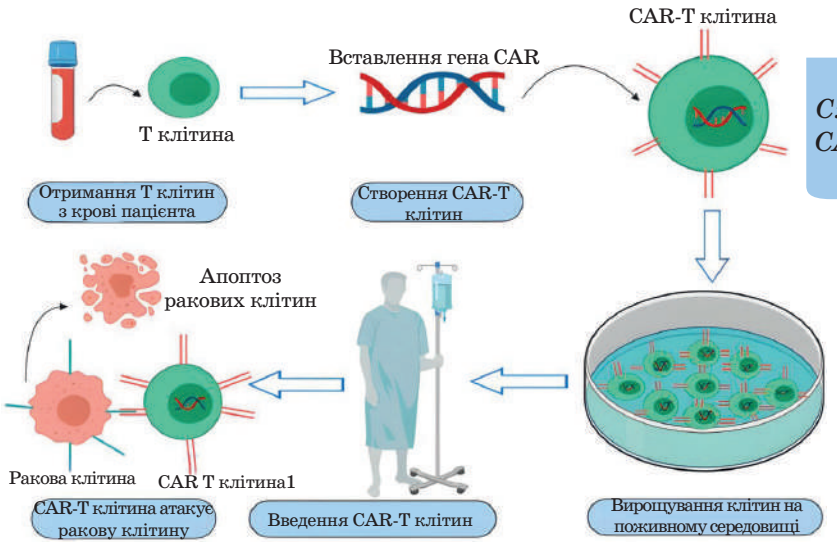
Для вирішення проблеми трансплантації, де основною з них є подолання відторгнення, увага зосереджена на двох передових стратегіях, заснованих на стовбурових клітинах людини: моделі ембріонів на основі стовбурових клітин та міжвидовому органогенезу (мал. 51.11).

У 2024–2025 роках у клініках Європи та США вилікували понад 85% дітей із гострою лімфобластною лейкемією, перепрограмувавши їхні Т-лімфоцити для атаки на ракові клітини (мал. 51.12).



Мал. 51.11. Схематичний огляд двох інноваційних стратегій створення органів людини з плюрипотентних стовбурових клітин (ПСК)

Мал. 51.13. Запатентована технологія біореактора від Ever After Foods підтримує вирощування «надзвичайно» високої щільності культивованого м'яса в дуже великих масштабах. Джерело зображення: Ever After Foods



Мал. 51.12. Схема процесу CAR-T-клітинної терапії

У Китаї генна терапія відновила слух у п'яти глухих дітей, виправивши ген otoferlin.

У біотехнології клітинна інженерія допомагає створювати штучне м'ясо: у 2025 році компанія Upside Foods (США) запустила комерційне виробництво курятини з культивованих клітин у біореакторах — без забою тварин, екологічно чисто й етично (мал. 51.13).

Генна і клітинна інженерія переплітаються. У селекції CRISPR-культури дають біотехнологічне паливо; у медицині клітинні фабрики виробляють ліки у великих масштабах. Інтеграція штучного інтелекту, зокрема платформ на кшталт DeepVariant, дає змогу аналізувати геноми за лічені години й прогнозувати наслідки генетичних правок. Проте виклики тривають: рівність, біобезпека, філософія. Та обіцянка заспліплює: біотехнологія може покінчити з голодом, вилікувати невиліковне та зцілити планету.

Усе це не фантастика, а реальність, яка годує, лікує й рятує планету!

1. Що таке генна інженерія?
2. Який інструмент називають «молекулярними ножицями»?
3. Назвіть приклад клітинної інженерії в рослин.
4. Яка терапія використовує Т-клітини пацієнта?
5. Порівняйте традиційну і сучасну біотехнологію за джерелами живих систем і прикладами продуктів.
6. Чим генетична інженерія відрізняється від клітинної? Наведіть приклад з медицини.
7. Чому штучне м'ясо вважають екологічнішим за традиційне?
8. Уявіть, що ви — біотехнолог. Який продукт (їжа, ліки, матеріал) ви б створили за допомогою клітинної інженерії? Опишіть ідею, процес і користь.
9. Чи варто редагувати гени ембріонів, щоб усунути спадкові хвороби? Обговоріть етичні ризики.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/itJNThfz і виконайте вправи.

Проєктна діяльність. Спроєктуйте і проведіть дослідження:

- швидкість процесів бродіння в різних штамів дріжджів (різних виробників) та продуктивність їх при випіканні хліба;
- приріст біомаси тварин (домашніх улюбленців залежно від корму);
- визначення схожості кількох сортів культурної рослини та вплив стимуляторів росту на біологічні ознаки вирощуваних рослин.

52 ГЕНЕТИЧНО МОДИФІКОВАНІ ОРГАНІЗМИ (ГМО). КЛОНУВАННЯ ОРГАНІЗМІВ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке генетично модифіковані організми, як і навіщо їх створюють;
- які методи використовують для перенесення або редагування генів у різних організмів;
- які переваги та ризики пов'язані з використанням ГМО;
- що таке клонування, які існують його типи та історичні етапи розвитку цієї технології;
- історію створення вівці Доллі та сучасні успіхи у відтворенні зникаючих видів.

Генетично модифіковані організми (ГМО) — це організми, геном яких був штучно змінений за допомогою методів генної інженерії для внесення певних змін в їхню морфологію, фізіологію чи біохімію.

Їх також можна описати як організми, в геном яких було введено чужорідні гени таким чином, що введені гени залишаються стабільними та кодують виробництво специфічних генних продуктів (білків).

ГМО вважаються одним із революційних технологічних досягнень у галузі біології. Коли ми чуємо про ГМО, нам на думку в першу чергу спадають продукти генетично модифікованих культур. Це пояснюється тим, що генетично модифіковані культури отримали величезне та пряме застосування в нашому житті.

Історія ГМО сягає півстолітньої давності. У 1973 році біохіміки Герберт Бойєр та Стенлі Коен вперше вирізали ген стійкості до антибіотика з однієї бактерії та вставили його в плазміду іншої бактерії, передаючи ознаку стійкості. Це був перший генетично модифікований організм, розроблений людством. Невдовзі, у 1974 році, вони перенесли ген з жаби в бактерію, створивши перший ГМО з генами з іншого царства.

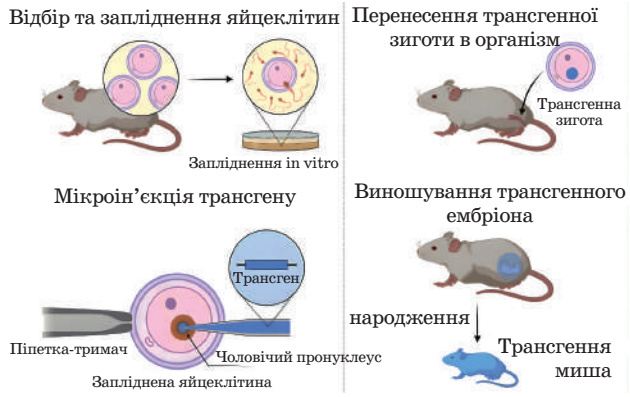
У 1977 році компанія Genetech, перша компанія з виробництва ГМО, розробила генетично модифікований вид кишкової палички, здатний кодувати людський гормон інсулін, який наступного року став першим продуктом ГМО, який використовувався для споживання.

Першим ГМО у тваринному світі була миша. Рудольф Єніш вперше створив трансгенну мишу в 1974 році. Першою генетичномодифікованою рослиною був тютюн, стійкий до вірусних хвороб, виведений у 1983 році. Першим ГМО-продуктом, який було схвалено та вирощено, був генетично модифікований помідор під назвою Flavr Savr з кращими можливостями транспортування зі збереженням смаку. Першою генетично модифікованою твариною, яку було схвалено та використано як їжу, був лосось AquAdvantage, який росте весь рік, а не лише в міжсезонні.

ГМО отримують шляхом введення чужорідних генів з певною цінною ознакою в певний організм. Існує три основні методи перенесення вибраних мічених генів у цільові організми, а саме:

1. Пряме перенесення.

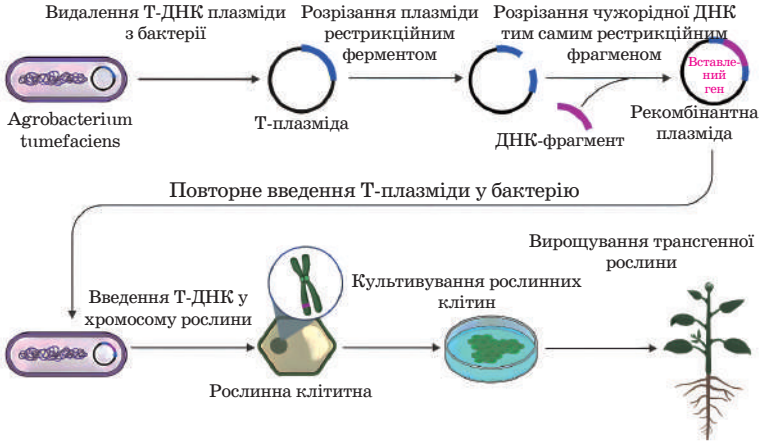
ДНК або гени спочатку редагують або маркують перед перенесенням. Генетично модифіковані фрагменти ДНК доставляють до гамет, насіння або ембріонів за допомогою кількох методів, таких як «генні гармати» — бомбардування гелієм під тиском, електропорація — обробка електричними імпульсами, що тимчасово збільшує проникність мембрани, мікроін'єкція, тепловий шок тощо (мал. 52.1).



Мал. 52.1. Отримання трансгенних тварин мікроін'єкційним методом

2. Використання вектора. Вектор у ГМО — це штучно створена ДНК-конструкція, яку використовують як «транспорт» для нового гена. Кілька видів вірусів або бактерій використовують як вектори для перенесення генів у геном цільового організму. Для перенесення генів за допомогою векторів зазвичай використовують рекомбінацію, опосередковану Agrobacetrium чи вірусну рекомбінацію (мал. 52.2).

Agrobacterium — опосередкована трансформація



Мал. 52.2. Схема трансформації рослин опосередкованим методом за допомогою агробактерії Agrobacterium tumefaciens

3. Пряме редагування існуючої ДНК.

Після розробки інструментів редагування генів, таких як CRISPR-Cas9 та нуклеаз, пов'язані з ними методи редагування генів використовують для редагування геному цільового організму та його модифікації

для отримання певних ознак. Це швидше, точніше і дешевше за попередні методи.

Хоча ГМО вважають науковим проривом, що має можливості вирішити проблему зростання населення та продовольчої кризи, скорочення площ орних земель, попиту на позасезонну, чужорідну, гібридну та збагачену поживними речовинами їжу, велика кількість експертів, екологів, теїстів та натуралістів вважають, що штучне втручання в природний потік генів створює великий ризик для природних законів, екосистеми та всієї живої системи. Наукові організації розробили принципи оцінки безпеки ГМО: перед використанням в їжу чи випуском у довкілля проводять докладну оцінку. Звичайно, кожен новий продукт оцінюють індивідуально. Частина наукових праць не знаходить серйозних ризиків для здоров'я при належній перевірці; інші публікації вказують на потребу додаткових довготривалих досліджень. Важливо відрізняти науково обґрунтовані результати від популістських тверджень. Генетична модифікація суворо дотримується законів кожної країни. Обов'язково потрібно отримати дозвіл перед генетичною модифікацією будь-якого організму та використанням ГМО для вирощування, торгівлі чи харчування.

В Україні у 2023–2025 роках були ухвалені закони та нормативні акти, що посилюють державний контроль за обігом ГМО, запроваджують держреєстр і вимоги до маркування продукції. Це означає, що продукти з ГМО повинні проходити реєстрацію і мати відповідне маркування.

Позитивний вплив генетично модифікованих організмів (ГМО)

- вища врожайність сільськогосподарських культур задовольняє зростаючий попит на продукти харчування;
- ГМ-культури дають можливість вирощувати їх на землях з дуже суворими умовами;
- ГМО містять необхідні вітаміни, ненасичені жирні кислоти, волокна, амінокислоти та пробіотики, що забезпечує споживачів необхідними поживними речовинами;
- ГМ-продукти оптимізовані до збереження стабільності за вищих температур, що полегшує транспортування, обробку і подовжує термін зберігання та придатності;
- ГМ-організми — бактерії та гриби, а також деякі рослини — використовують у виробництві гормонів, ферментів, антибіотиків та метаболітів фармацевтичної цінності;
- ГМ-ліки використовують для лікування хронічних захворювань, таких як діабет, гіпертонія, генетичні розлади тощо;
- ГМ-віруси використовують для виробництва вакцин;
- ГМ-культури зменшують потребу в шкідливих хімікатах для лікування та профілактики.

Негативний вплив і пов'язані ризики генетично модифікованих організмів (ГМО)

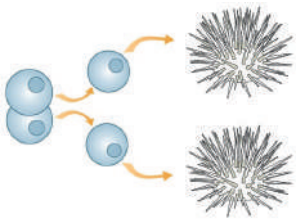
- неприродний потік генів, що впливає на природні закони, провокуючи стихійні лиха;
- неприродні білки, що кодуються вставленими генами, можуть бути алергічними чи токсичними;
- через стійкість ГМ-культур до шкідників, зменшиться використання агрохімікатів, що може вплинути на нестійкі види і зробити їх більш вразливими до шкідників;
- через вищу врожайність та стійкість до хвороб, люди зараз використовують ГМО замість традиційних для місцевості, що робить ці види рідкісними або зникаючими;
- впровадження чужорідних ГМО замінить місцеві види, і гетеротрофи, які залежать від них, постраждають, це може порушити харчовий ланцюг цієї екосистеми.

Змінювати спадкову інформацію — лише один із напрямків сучасної біотехнології. Інший, не менш захопливий, полягає в повному відтворенні організму з однієї клітини — **клонуванні**.

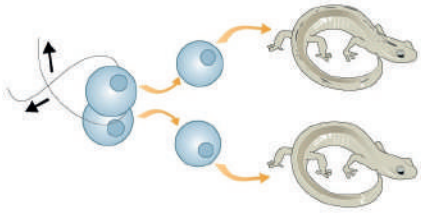
Клонування — це процес створення окремих організмів з ідентичною або практично ідентичною ДНК, природним або штучним шляхом. У біотехнології клонування — це процес створення клонованих організмів (копій), клітин чи фрагментів ДНК (молекулярне клонування). Існує три різні типи клонування:

- *клонування генів*, або клонування ДНК — створює копії генів або сегментів ДНК;
- *репродуктивне клонування* — створює дублікати цілих тварин;
- *терапевтичне клонування* — створює ембріональні стовбурові клітини, які використовуються для створення тканин, здатних відновлювати або замінювати пошкоджені тканини.

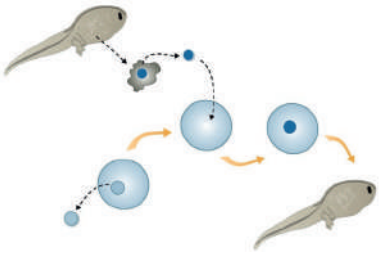
Перше дослідження клонування відбулося в 1885 році, коли німецький учений Ганс Адольф Едуард Дріш почав досліджувати розмноження. Після розділення двоклітинного ембріона кожна клітина перетворювалася на повноцінного морського їжака, що показало, що кожна клітина на ранній стадії ембріона може вирости в повноцінний організм (мал. 52.3). У 1902 році Гансу Шпеману вдалося створити пару близнюків-саламандр, розділивши один ембріон на два окремих життєздатних ембріони (мал. 52.4).



Мал. 52.3. Перша демонстрація штучного створювання двійників ембріонів



Мал. 52.4. Штучне створювання двійників ембріонів у хребетних

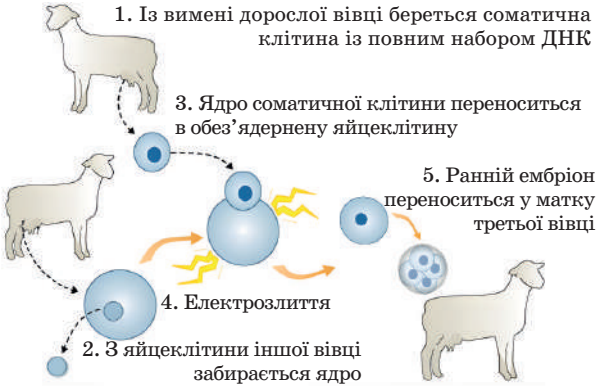


Мал. 52.5. Перенесення ядра диференційованої клітини в обез'ядернену яйцеклітину

У 1958 році британський біолог Джон Гурдон клонував жаб з клітин шкіри дорослих жаб (мал. 52.5).

5 липня 1996 року в Інституті Росліна в Шотландії вівця народила нині відому Доллі, ягня фінської породи — першого ссавця, клонованого з клітин дорослої тварини.

«Народження Доллі та нове розуміння можливості зміни функціонування клітин спонукало дослідників розглянути інші можливі способи модифікації клітин», — Ян Вілмут, учений, який очолював команду, що створила Доллі. З часів Доллі народилося багато клонів тварин, і цей процес стає все більш поширеним (мал. 52.6).



Мал. 52.6. Схема клонування шляхом перенесення ядер соматичних клітин

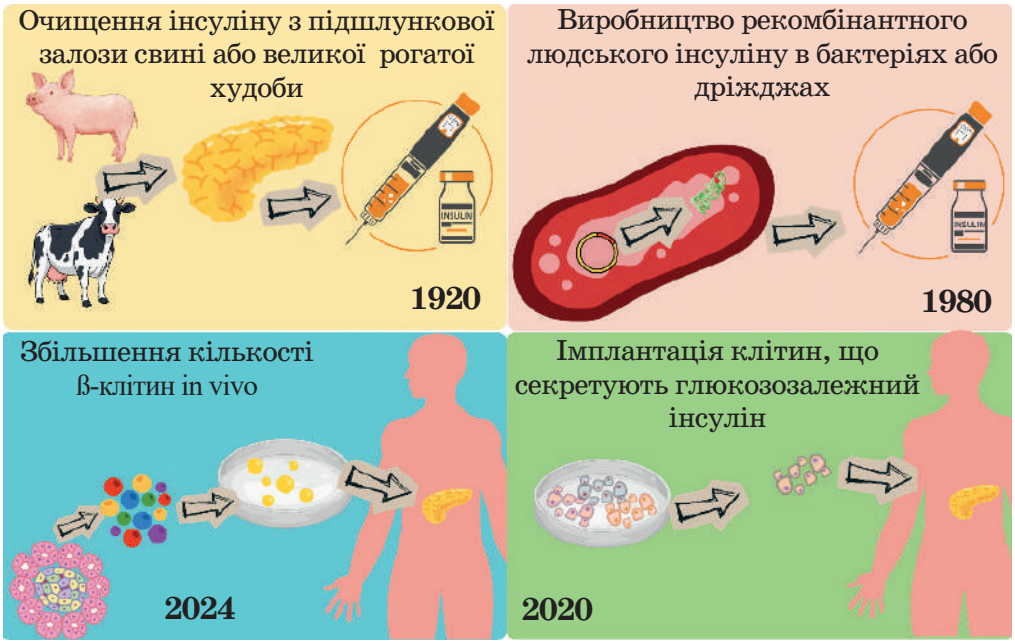
У 2025 році клонували чорноногих тхорів для порятунку зникаючого виду. Це стало важливою віхою в дослідженнях з охорони природи, демонструючи, що технологія клонування потенційно може допомогти відновити генетичне різноманіття та відкрити нові можливості для відновлення видів.

Мал. 52.7. Ромул і Рем — вовки з відредагованими генами вовка жахливого

Клонування є перспективним і для де-екстинкції. **Де-екстинкція** — це процес відновлення вимерлих видів за допомогою сучасних наукових методів. У 2025 році вдалося здійснити лише «функціональну де-екстинкцію» вовка із генетичними змінами (менше 20 генів) від вимерлого вовка жахливого (мал. 52.7).

Щоб зрозуміти темпи і масштаби розвитку сучасної біотехнології, можна звернутися до історії інсулінотерапії. Від використання очищеного інсуліну підшлункової залози свині або великої рогатої худоби, рекомбінантного людського інсуліну з покращеними характеристика-

ми — до імплантації панкреатичної ентодерми зі стовбурових клітин. У 2024 році, вперше в історії, вченим вдалося зупинити розвиток діабету 1-го типу у пацієнта за допомогою бета-клітин, отриманих зі стовбурових клітин. Ми можемо очікувати, що лікування діабету буде перевернуте за допомогою замісної терапії β-клітинами (мал. 52.8).



Мал. 52.8. Розвиток інсулінотерапії за останні 100 років

1. Поясніть, що таке генетично модифікований організм.
2. Назвіть три основні методи перенесення генів у ГМО.
3. Вкажіть приклади першого ГМО серед бактерій, рослин і тварин.
4. Порівняйте переваги та ризики використання ГМО.
5. Опишіть процес клонування і назвіть три типи клонування.
6. Порівняйте переваги та ризики використання ГМО.
7. Уявіть, що в Україні створили генетично модифіковану пшеницю, стійку до засухи. Які переваги це може дати країні? Які екологічні чи етичні проблеми можуть виникнути?
8. Якщо б учені могли клонувати вимерлих тварин, які моральні або екологічні питання це б поставило?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/OtJNYeRu і виконайте вправи.

«Біологія як основа селекції, біотехнології та медицини»

1. Який метод штучного добору передбачає відбір багатьох особин без аналізу родин і застосовується частіше для рослин?
   а) індивідуальний добір *б)* масовий добір
   в) добір за потомством *г)* геномний добір
2. Що є наслідком інбридингу?
   а) збільшення гетерозиготності та гібридної сили
   б) підвищення гомозиготності та ризику депресії
   в) зниження пристосованості до кліматичних змін
   г) збільшення кількості нащадків у поколінні
3. Що таке гетерозис (гібридна сила) у селекції рослин?
   а) зниження врожайності в першому поколінні гібридів
   б) підвищення продуктивності та життєздатності в першому поколінні гібридів
   в) фіксація рецесивних алелів через інбридинг
   г) зміна генома за допомогою CRISPR
4. Який організм уперше було використано для отримання людського інсуліну?
   а) цвілевий гриб Penicillium *б)* дріжджі Saccharomyces
   в) кишкова паличка Escherichia coli *г)* agrobacterium tumefaciens
5. Який метод використовують для прямого перенесення генів у клітину?
   а) мікроклонування *б)* мікроін'єкція
   в) використання агробактерії *г)* культивування клітин
6. Який можливий ризик від ГМ-культури для екосистем?
   а) підвищення врожайності *б)* зникнення місцевих видів
   в) підвищення стійкості *г)* більше поживних речовин
7. Установіть відповідність між термінами та їх описами:

а) сорт	*1)* група тварин одного виду з бажаними ознаками (наприклад, українська червоно-ряба корова)
б) порода	
в) штам	*2)* чиста лінія мікроорганізмів з певними властивостями (наприклад, Penicillium chrysogenum)
г) гетерозис	
д) добір	*3)* група рослин з цінними ознаками (наприклад, пшениця Миронівська-808)
	4) підвищення продуктивності в першому поколінні гібридів

8. Установіть відповідність між термінами біотехнології та їх описами:

а) ГМО	*1)* процес створення організмів з ідентичною ДНК, наприклад, репродуктивне для тварин
б) клонування	
в) генетична інженерія	*2)* зміна генома організму для внесення чужорідних генів, наприклад, стійкості до засухи
г) клітинна інженерія	*3)* робота з клітинами для створення тканин або органів, наприклад, перепрограмування клітин шкіри у стовбурові
д) традиційна біотехнологія	*4)* організми, геном яких змінено методами генної інженерії, наприклад, золота рисова лінія з β-каротином

ТЕМА 6

ЛЮДИНА І БІОСФЕРА

53 БІОСФЕРА ЯК ГЛОБАЛЬНА ЕКОСИСТЕМА НАШОЇ ПЛАНЕТИ

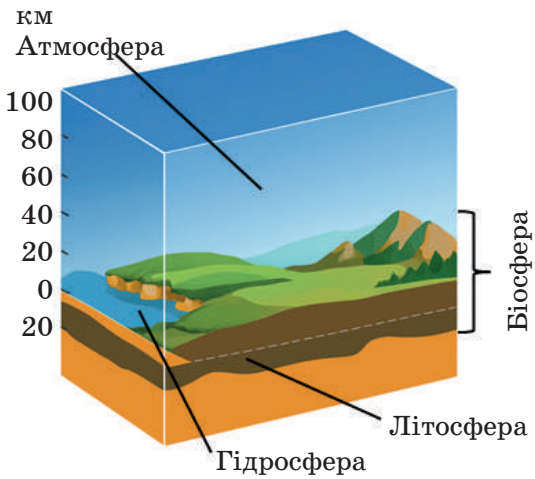
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке біосфера і з яких компонентів вона складається;
- про деяких науковців, що вивчали і вивчають біосферу та вплив на неї;
- чому так важливо вивчати біосферу.

Пригадайте з курсу біології 7 класу, що таке біосфера, екосистема та рівні організації життя. Як пов'язані між собою живі організми та середовище їх існування?

Загальне поняття про біосферу та її компоненти

Біосфера — це сукупність усіх живих організмів планети та середовища, з яким вони взаємодіють. Це найвищий рівень організації живої матерії. Біосфера охоплює верхні шари літосфери, всю гідросферу та нижні шари атмосфери (мал. 53.1).



Мал. 53.1. Склад біосфери

Робота в групах

Пригадайте та поміркуйте, чому до біосфери відноситься вся гідросфера і тільки частини літосфери й атмосфери.

Біосферу слід розглядати як глобальну екосистему, в якій усі живі істоти взаємодіють між собою та з компонентами неживої природи, забезпечуючи колообіг речовин і потік енергії. Як саме відбувається обмін речовинами та енергією в біосфері, ви дізнаєтесь у наступних параграфах.

Біосфера — це глобальна екосистема, яка включає всі живі організми на Землі та середовище їх існування, де забезпечено колообіг речовин і потік енергії.

Біосфера складається з чотирьох компонентів, кожен з яких є надзвичайно важливим для функціонування всієї глобальної екосистеми нашої планети (мал. 53.2).

Жива речовина
Усі живі організми, які здійснюють обмін речовин і енергії

Біогенна речовина
Утворена живими організмами або з їх участю (напр., торф, вугілля, кисень атмосфери)

Косна речовина
Нежива частина природи, утворена без участі живих організмів (напр., базальт, граніт)

Біокосна речовина
Результат взаємодії живої та неживої природи (напр., ґрунт, мул, вапняк)

Мал. 53.2. Компоненти біосфери

Робота в парі

Розділіться на пари та наведіть один одному свої приклади кожного з компонентів біосфери. Аргументуйте, чому ви відносите наведені приклади до певного компонента.

Розвиток вчення про біосферу

Мал. 53.3. Едуард Зюсс

Мал. 53.4. Володимир Вернадський

Уявлення про біосферу формувалося поступово. Ще давні філософи звертали увагу на взаємозв'язки між живими організмами й довкіллям. У XVIII столітті з розвитком географії та природознавства вчені почали досліджувати колообіг речовин у природі.

Уперше термін «біосфера» (від грец. bios — «життя», sphaira — «куля») запровадив Едуард Зюсс, австрійський геолог (мал. 53.3), у 1875 році. Він вважав біосферою оболонку Землі, заселену живими організмами.

Однак справжнє наукове вчення про біосферу створив Володимир Іванович Вернадський — видатний український учений (мал. 53.4). У 1920-х роках він довів, що жива речовина на Землі є потужною геологічною силою, яка змінює вигляд планети. Вернадський підкреслював, що жива речовина здатна перетворювати атмосферу, гідросферу й літосферу.

Наукове вчення про біосферу стало основою для подальших досліджень у галузі екології, географії, кліматології та охорони довкілля.

Сьогодні ці знання надзвичайно важливі для розуміння взаємозв'язків у природі та відповідального ставлення людини до планети.

У подальших дослідженнях Вернадський сформулював ідею *ноосфери* — нового етапу розвитку біосфери, в якому головну роль починає відігравати розумна діяльність людини.

Чому біосферу потрібно захищати?

Мал. 53.5. Рейчел Карсон

Рейчел Карсон — морська біологиня (мал. 53.5), яка своєю книгою «Мовчазна весна» (Silent Spring, 1962) змінила ставлення людства до біосфери. Вона вперше довела, що навіть нешкідливі на перший погляд дії людей можуть мати катастрофічні наслідки для всієї живої природи.

Проєктна діяльність. За допомогою додаткових джерел інформації дізнайтесь більше про внесок Рейчел Карсон: на чому саме вона акцентувала увагу та якими є результати її діяльності для охорони навколишнього середовища.
Чи всі науковці та дослідники сучасності згідні з її висновками?

А чи знаєте ви...

«Біосфера-2» — це науковий експеримент, під час якого люди намагалися відтворити замкнуту екосистему, подібну до біосфери Землі (мал. 53.6).

Мал. 53.6. Споруди комплексу «Біосфера-2»

Цей проєкт реалізували у США, у штаті Аризона. У 1991 році вісім людей протягом двох років жили всередині герметичної споруди площею 1,27 га, що містила моделі різних біомів: тропічний ліс, пустелю, океан з коралловим рифом, сільськогосподарські угіддя тощо.

Мета експерименту «Біосфера-2» — з'ясувати, чи зможе людина вижити у повністю закритій екосистемі, без зовнішнього обміну речовин. Попри технологічні досягнення, учасники зіткнулися з багатьма труднощами: падінням рівня кисню, порушенням балансу вуглецю, хворобами рослин і нестачею їжі.

Проєкт дав важливі уроки про вразливість штучних екосистем і незамінність біосфери Землі, яку не можна повноцінно скопіювати.

Сьогодні «Біосфера-2» використовується як дослідницький центр для вивчення змін клімату, ґрунтів, води та моделей життя на інших планетах.

1. Що таке біосфера? Які частини Землі вона охоплює?
2. Назвіть основні компоненти біосфери.
3. Хто першим запровадив термін «біосфера»?
4. Поясніть, чим відрізняється біогенна речовина від біокосної. Наведіть приклади.
5. У чому полягає внесок Володимира Вернадського у розвиток вчення про біосферу?
6. Чому, на думку вчених, жива речовина є геологічною силою?
7. Уявіть, що людство планує колонізувати іншу планету. Що слід створити на ній, щоб виникла штучна «біосфера»? Які компоненти слід передбачити?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/GtJNUdLq і виконайте вправи.

Прочитайте та перекладіть уривок твору «Nature» відомого американського поета, філософа та есеїста Ральфа Емерсона: «*Nature, in its ministry to man, is not only the material, but is also the process and the result. All the parts incessantly work into each other's hands for the profit of man. The wind sows the seed; the sun evaporates the sea; the wind blows the vapor to the field; the ice, on the other side of the planet, condenses rain on this; the rain feeds the plant; the plant feeds the animal; and thus the endless circulations of the divine charity nourish man.*»
Визначте, які природні явища згадано в уривку. Які з них є прикладами колообігу речовин та енергії в біосфері? Як у цьому тексті показано єдність усіх компонентів природи? Чи погоджуєтесь ви з таким баченням? Складіть просту схему, яка зображує описаний у тексті ланцюг взаємодій.

54 СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОСИСТЕМ. ЗВ'ЯЗКИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ МІЖ ОРГАНІЗМАМИ В ЕКОСИСТЕМАХ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке екосистема та як вона функціонує;
- які існують типи зв'язків між організмами;
- чому вивчення структури екосистем є важливим для розуміння біосфери.

Які є типи екосистем? Хто такі автотрофи та гетеротрофи, звідки вони отримують потрібні речовини та енергію? Що таке трофічний ланцюг?

Структура екосистеми

Мал. 54.1. Екосистема лісу

Екосистема — це сукупність живих організмів та середовища їх існування, пов'язаних між собою обміном речовин, енергії та інформації. Вона є функціональною одиницею біосфери (мал. 54.1).

Екосистема може бути будь-якого розміру та виду — крапля води, невеликий ліс, пустеля чи ціла наша планета. Загалом, розрізняють три основних групи природних екосистем, які у свою чергу поділяються на більш дрібні екосистеми згідно гідрологічних, ландшафтних, фізичних та інших властивостей (мал. 54.2).

Кожна екосистема має певну структуру, що включає два основних компоненти:

- *біотичний компонент* — усі живі організми, що населяють певне середовище;
- *абіотичний компонент* — сукупність фізичних і хімічних факторів середовища.

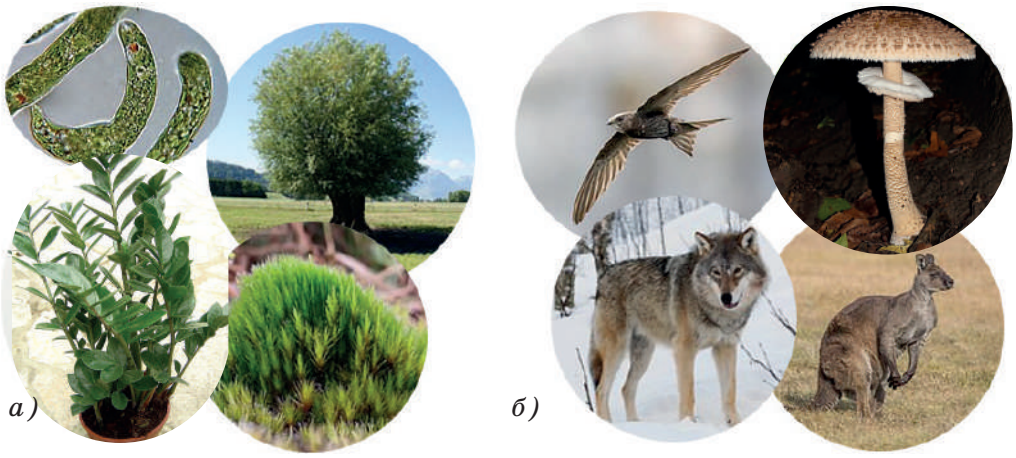
Наземні	Прісноводні	Солоноводні
широколисті ліси	річки	відкритий океан
тундра	озера	глибоководні рифтові зони
пустеля	болото	прибережні води
степ	водосховище	еустарії (лимани, гирла річок)

Мал. 54.2. Деякі приклади основних типів екосистем

Робота в групі

Розгляньте мал. 54.1 та назвіть біотичні та абіотичні компоненти для цієї екосистеми. Назвіть ці компоненти для інших екосистем, наприклад ставка, коралового рифу, міського парку, акваріума.

Біотичний компонент екосистеми умовно поділяють на два типи: автотрофні та гетеротрофні організми (мал. 54.3). Спосіб утворення потрібних органічних речовин та отримання енергії тісно пов'язують співіснування всіх організмів у межах однієї екосистеми.



Мал. 54.3. Автотрофні (а) та гетеротрофні (б) організми

Для характеристики екосистеми сучасна наука оперує такими термінами:

Біоценоз — угруповання популяцій різних видів живих організмів, які населяють спільну територію та взаємодіють між собою.

Біотоп — ділянка з певними однотипними умовами середовища (клімат, рельєф, ґрунт, вода), придатна для життя конкретних видів організмів.

Біогеоценоз — єдність біоценозу та біотопу, пов'язаних між собою обміном речовин, енергії та інформації.

Робота в групі

Поміркуйте, що означають у біоценозі поняття «зооценоз», «фітоценоз», «мікоценоз», «мікробіоценоз». Перевірте за допомогою додаткових джерел інформації правильність своїх міркувань.

Видовий склад біоценозу визначають кількістю видів та співвідношенням їх чисельності. Розрізняють домінантів — види, які мають найбільший вплив на функціонування біоценозу, та рідкісні види, чисельність яких у біоценозі невелика. Збалансоване співвідношення різних видів забезпечує стабільність екосистеми.

А чи знаєте ви...

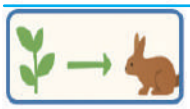
У тропічному лісі на 1 га може жити понад 1000 видів комах, десятки видів птахів і ссавців, а дерев — більше, ніж у деяких помірних лісах на площі 100 га. Така видова різноманітність створює стійкішу систему, здатну швидше відновлюватися після порушень.

Рівні організації та функціональні групи

У біоценозі всі види організмів не просто співіснують — вони виконують певні функції, утворюючи складну систему зв'язків. Щоб зрозуміти, як функціонує екосистема, важливо розглядати її рівні організації.

Видовий рівень
кожен вид має свою екологічну нішу та виконує певну роль (наприклад, дуб як продуцент, білка як консумент, гриб-трутовик як редуцент).

Популяційний рівень
особини одного виду, що мешкають на певній території, взаємодіють між собою й з іншими видами.



Трофічний рівень
групи організмів, об'єднані способом отримання енергії та речовин (продуценти, консументи, редуценти).

Просторовий рівень
організми в біоценозі розташовані у вертикальних (ярусність) та горизонтальних структурах (наприклад, світлолюбні трави зростають на узліссі, а тіньолюбні — під кронами дерев).

Функціональні групи організмів формуються залежно від того, яку роль вони виконують у колообігу речовин і потоці енергії.

Робота в парі

Ви вже вивчали ці терміни в молодших класах. Пригадайте, що вони означають та як взаємодіють між собою. Наведіть приклади простих трофічних ланцюгів.

- **Продуценти** — автотрофні організми (рослини, ціанобактерії, водорості), що створюють органічні речовини з неорганічних, використовуючи енергію сонця або хімічних реакцій.
- **Консументи** — гетеротрофні організми, які споживають готову органічну речовину. Вони поділяються на:
- **Консументи першого порядку** (травоїдні тварини, фітофаги) — споживають продуцентів;
- **Консументи другого порядку** (хижі тварини, комахоїдні) — живляться травоїдними;
- **Консументи вищих порядків** — великі хижаки, що перебувають на вершині харчових ланцюгів.

Редуценти (деструктори) — бактерії, гриби, деякі безхребетні, які розкладають рештки організмів до неорганічних сполук, повертаючи їх у колообіг речовин.

Всі ці групи організмів утворюють взаємопов'язані трофічні ланцюги та сітки, що забезпечують існування екосистеми.

Зв'язки, що виникають між організмами, та їх значення

В екосистемах між організмами існують різні типи взаємодій:

- трофічні — пов'язані з живленням;
- топічні — зміна умов існування одними організмами для інших;
- фабричні — використання організмів або їхніх частин як середовища життя;
- форичні — перенесення організмів одного виду іншими видами без живлення ними.

Серед трофічних взаємодій розрізняють хижацтво, паразитизм, коменсалізм, мутуалізм, конкуренцію.

Робота в групах

Пригадайте з курсу біології за 7-ий клас, що означають ці терміни, та наведіть приклади для кожного виду взаємодій і поясніть їх значення для екосистеми.

Зв'язки між організмами забезпечують цілісність екосистеми, підтримують рівновагу і сталість складу біоценозу. Вони впливають на розподіл енергії та колообіг речовин, про які ви дізнаєтеся в наступному параграфі.

1. Дайте визначення поняття «екосистема».
2. Назвіть два основних компоненти екосистеми та наведіть по одному прикладу кожного.
3. Що таке автотрофні організми? Який тип живлення вони використовують?
4. Поясніть, чому зменшення чисельності продуцентів у лісі вплине на всі інші рівні екосистеми.
5. Наведіть приклад біоценозу та опишіть його видовий склад. Вкажіть, чи він багатий чи бідний на види, та обґрунтуйте відповідь.
6. Чому в екосистемі важливо зберігати баланс між продуцентами, консументами та редуцентами?
7. Уявіть, що у вашому населеному пункті планують створити штучну екосистему в закритому просторі — теплицю з водоймою та різними видами живих організмів. Складіть план її структурної організації.

- Визначте, які абіотичні фактори потрібно контролювати.
- Якими автотрофними та гетеротрофними організмами можна заселити цю екосистему?
- Які є небезпеки для існування цієї екосистеми?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/KtJNUBIt і виконайте вправи.

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/FtwehssX і виконайте практичне завдання на тему: «Складання різних типів трофічних ланцюгів».

55 ПОТОКИ ЕНЕРГІЇ ТА КОЛООБІГ РЕЧОВИН В ЕКОСИСТЕМАХ

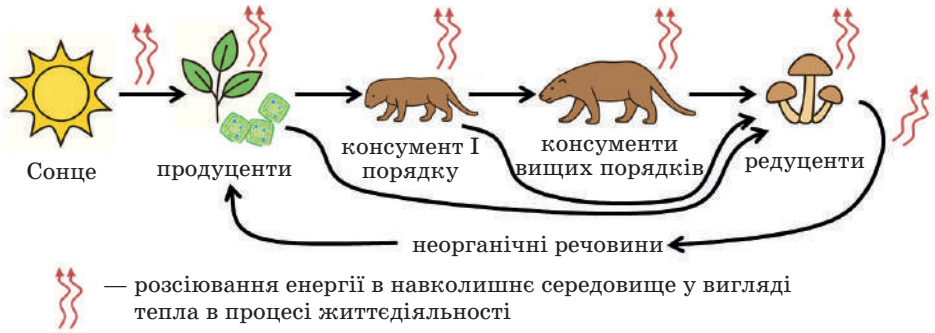
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- як енергія передається в екосистемах;
- що таке колообіг речовин і чому він є основою життя;
- які існують основні біогеохімічні цикли.

Пригадайте, як утворюється енергія в автотрофних і гетеротрофних організмах. Які хімічні елементи називають біогенними?

Потоки енергії в екосистемах

Будь-яка екосистема функціонує завдяки постійному притоку енергії. Головним джерелом енергії для більшості екосистем є Сонце. Рослини та деякі бактерії (продуценти) поглинають сонячну енергію і перетворюють її на хімічну енергію органічних речовин під час фотосинтезу. Частина цієї енергії передається консументам, коли вони споживають продуцентів або інших тварин. Редуценти повертають у середовище неорганічні речовини, але енергія при цьому розсіюється у вигляді тепла (мал. 55.1).



Мал. 55.1. Схема колообігу речовини та енергії

Рух енергії в екосистемі має односторонній напрямок — від Сонця до продуцентів, далі через ланцюги живлення до консументів і редуцентів і, зрештою, — у вигляді тепла в навколишнє середовище. Тому екосистеми потребують постійного поповнення енергії.

А чи знаєте ви...

Лише близько 1% сонячної енергії, що досягає Землі, використовується зеленими рослинами для фотосинтезу. Решта відбивається, поглинається або розсіюється в атмосфері.

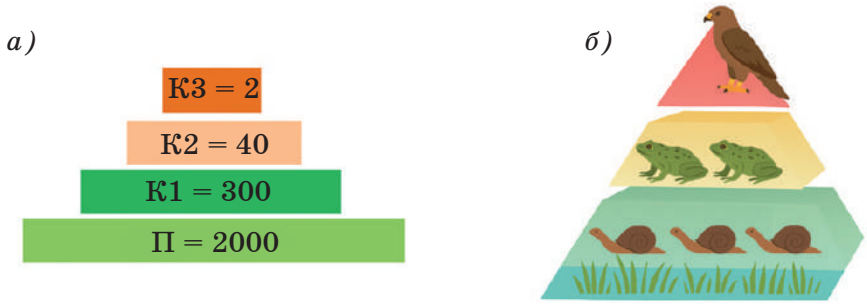
Екологічні піраміди

Щоб показати, як розподіляється енергія, біомаса чи кількість організмів між трофічними рівнями, використовують екологічні піраміди.

Існують три основних типи таких пірамід: піраміда чисел, піраміда біомаси та піраміда енергії.

Піраміда чисел — показує кількість особин на кожному трофічному рівні (мал. 55.2).

- У типовій екосистемі продуцентів найбільше (наприклад, тисячі травинок у степу).
- Консументів I порядку менше (наприклад, сотні травоїдних комах, молюсків чи гризунів).
- Консументів II порядку ще менше (декілька десятків хижаків).
- На вершині найменше особин (наприклад, 1–2 великі хижаки).

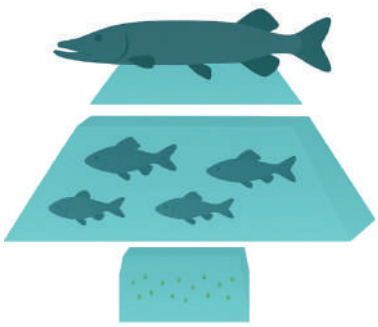


Мал. 55.2. Піраміда чисел: схематичне зображення з кількістю особин (а), графічне зображення (б)

Піраміда чисел може бути «перевернута». Тобто чисельна кількість продуцентів менша, ніж консументів. Поміркуйте, з чим це може бути пов'язано. Придумайте власний приклад «перевернутої» піраміди, намалюйте її та поясніть, як вона функціонує. Презентуйте свій проєкт однокласникам та однокласницям.

Якщо не можете придумати приклад, то розгадайте анаграму. Це вам допоможе зрозуміти суть «перевернутої» піраміди чисел.

ПЛОДАМИ СОТНІ ЯБЛУНЯ КОМАХ АЛЕ ЩО ХАРЧУЮТЬСЯ ОДНА ЇЇ



Мал. 55.3. Піраміда біомаси

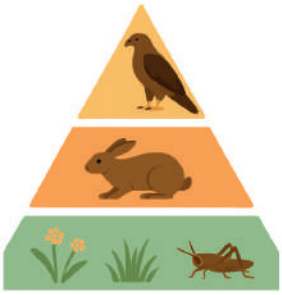
Піраміда біомаси — відображає масу живої речовини на кожному рівні.

- У лісі чи степу найбільша біомаса — в рослин.
- Травоїдних тварин набагато менше за масою.
- Хижаків — ще менше.

Особливість: у водоймах іноді піраміда біомаси виглядає перевернутою, бо маса фітопланктону в будь-який момент часу менша за масу рачків чи риб. Але швидке відтворення планктону забезпечує стабільність системи (мал. 55.3).

Робота в групах

Стандартною одиницею біомаси при таких екологічних розрахунках є г/м^2. При цьому враховується маса всього організму тварини. Розрахунки майже завжди показують перебільшені результати на трофічному рівні. Поміркуйте та обговоріть у класі, з чим пов'язані такі неточності.



Мал. 55.4. Піраміда енергії

Піраміда енергії — відображає рух енергії. Вона є найбільш наочною, та, відповідно, найчастіше використовується екологами (мал. 55.4).

- На нижньому рівні — найбільша кількість енергії у продуцентів.
- На кожному наступному рівні енергія зменшується приблизно в 10 разів.
- Піраміда енергії завжди має правильну форму (звужується догори) і не буває перевернутою, бо енергія втрачається у вигляді тепла.

Закон Ліндемана (правило 10%): З одного трофічного рівня екологічної піраміди переходить на інший його рівень у середньому не більше 10% енергії.

Закон односпрямованості потоку енергії: енергія в екосистемі рухається лише в одному напрямку — від Сонця до продуцентів, далі до консументів і редуцентів з втратою на кожному трофічному рівні внаслідок життєдіяльності організмів.

Зворотний потік енергії від редуцентів до продуцентів майже відсутній (менше 0,25% від початкової кількості). Тому говорити про «колообіг енергії» неправильно: енергія не повертається, а поступово розсіюється у вигляді тепла.

Робота в групах

Розв'яжіть усно або письмово в зошиті задачі для закріплення розуміння правила 10%.

- На полі 10 000 кДж енергії накопичили рослини. Скільки приблизно енергії отримає консумент I порядку?
- Якщо травоїдна тварина отримала 500 кДж енергії, то скільки енергії вона спожила з продуцентів?
- В екосистемі накопичено 100 кДж на рівні хижаків (II порядку). Скільки кДж приблизно було у продуцентів?
- На лузі трава накопичила 30 000 кДж енергії. Обчисліть енергію, яка буде доступна травоїдним комахам, жабам, а потім лелекам.

Колообіг речовин у природі

Колообіг речовин — це безперервний обмін хімічними елементами між живими організмами та навколишнім середовищем. Він відбува-

ється завдяки біогеохімічним циклам, у яких беруть участь і живі істоти (біотичні компоненти), і неживе середовище (абіотичні компоненти). Завдяки цьому життя на Землі зберігається як єдина система.

Найважливіші біогеохімічні цикли:

Водний цикл

Вода випаровується з поверхні океанів, морів, річок і ґрунту, утворює хмари й повертається у вигляді дощу чи снігу. Вона бере участь у транспірації рослин, диханні та живленні живих організмів. Завдяки цьому вода постійно переміщується між атмосферою, гідросферою і літосферою, підтримуючи життя на планеті.

Кисневий цикл

Під час фотосинтезу зелені рослини виділяють кисень, який потрібен для дихання тварин, людей і самих рослин. У процесі дихання кисень знову перетворюється на вуглекислий газ, який використовується у фотосинтезі. Таким чином зберігається баланс між киснем та вуглекислим газом в атмосфері.

Карбоновий цикл

Карбон переходить з атмосфери у вигляді CO_2 до рослин, де використовується для утворення органічних речовин. Далі він рухається по харчових ланцюгах, переходячи до тварин і людини. При диханні, гнитті, горінні Карбон знову потрапляє в атмосферу у вигляді CO_2. Важливу роль відіграють океани, які поглинають значну частину вуглекислого газу.

Цикл Нітрогену

Нітроген становить основну частину атмосфери, але в такій формі він недоступний для більшості живих істот. Його «включають» у колообіг ґрунтові бактерії, здатні фіксувати атмосферний азот і перетворювати його на сполуки, придатні для рослин. Далі азот переходить до тварин і людини. Після відмирання організмів спеціальні бактерії знову повертають його у ґрунт або в атмосферу. Це забезпечує безперервний цикл білкового обміну в біосфері.

Фосфорний цикл

Фосфор — один з основних елементів живих організмів. У природі він циркулює повільніше, ніж Нітроген чи Карбон. Основним джерелом є гірські породи, з яких фосфати вимиваються у ґрунт і воду. Рослини засвоюють їх корінням, передають тваринам, а редуценти після відмирання організмів повертають фосфати в ґрунт або воду. Частина фосфору назавжди осідає у донних відкладах океанів.

Отже, завдяки біогеохімічним циклам усі живі організми пов'язані між собою і з навколишнім середовищем. Порушення хоча б одного з них призводить до серйозних екологічних проблем.

Робота в парі

Розділіться на пари та оберіть один з біогеохімічних циклів. Намалюйте схему цього циклу та позначте, які організми чи процеси беруть у ньому участь.

Презентуйте свою роботу в класі та поясніть, чому без цього циклу життя на Землі було б неможливим.

1. Що є головним джерелом енергії для більшості екосистем?
2. Яке правило описує передачу енергії між трофічними рівнями?
3. Назвіть три основні типи екологічних пірамід.
4. Чому енергія в екосистемі рухається лише в одному напрямку?
5. Наведіть приклад колообігу речовин, поясніть його значення.
6. Розгляньте мал. 55.4. Поміркуйте, як вплине на ефективність використання енергії вилучення з харчового ланцюга змії.
7. Уявіть, що ви — еколог. Створіть план заходів для збереження стабільності одного з біогеохімічних циклів у вашому регіоні.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/9tJNIWXa і виконайте вправи.

Розв'яжіть задачі.

- Якщо хижак, що харчується травоїдними тваринами, отримав 500 кДж енергії, скільки енергії він спожив з продуцентів?
- У водоймі на рівні фітопланктону — 120 000 кДж енергії. Скільки енергії потрапить до ракоподібних, риб, а далі до чапель?
- У продуцентів пустелі зосереджено 20 000 кДж енергії. Якщо енергія передається з ефективністю 10%, скільки енергії отримає орел на вершині ланцюга (3-й консумент)?
- У ставку енергія на рівні фітопланктону становить 40 000 кДж. Обчисліть, яку кількість риби можна прогодувати, якщо на 1 кг риби потрібно 2000 кДж енергії.
- Ланцюг живлення: трава → заєць → лисиця → вовк. Якщо трава накопичила 100 000 кДж, розрахуйте енергію кожного рівня. Визначте, чи зможе існувати вовк у цій екосистемі, якщо йому потрібно щонайменше 500 кДж на добу.

56 ФОРМУВАННЯ ТРОФІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ТА ТРОФІЧНОЇ СІТКИ (МЕРЕЖІ). ПРИЧИНИ ПОРУШЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЕКОСИСТЕМ ТА ЇХ НАСЛІДКИ

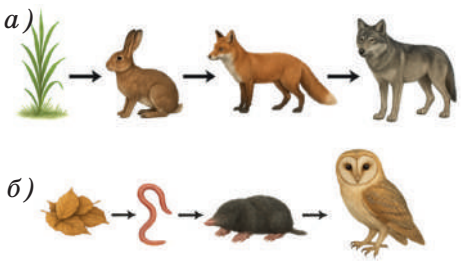
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- ✓ що таке трофічна сітка та чим вона відрізняється від трофічного ланцюга;
- ✓ як зникнення одного виду впливає на всю екосистему;
- ✓ які причини порушення стабільності екосистем і які наслідки це має для природи та людини.

Які існують трофічні рівні? Складіть приклад трофічного ланцюга з 3–4 ланок.

Типи трофічних ланцюгів

Усі трофічні ланцюги поділяють на два типи (мал. 56.1):



Мал. 56.1. Пасовищний (а) і детритний (б) ланцюги живлення

Пасовищні ланцюги — починаються з живих зелених рослин. Це класичний варіант, який ви вже добре знаєте: *трава → заєць → лисиця → вовк*.

Вони характерні для більшості наземних екосистем та забезпечують рух енергії від продуцентів до консументів.

Детритні ланцюги — починаються не з живих рослин, а з органічних решток — листя, гілок, трупів тварин (детриту). Такі ланцюги особливо поширені в ґрунті та водоймах. Наприклад: *опале листя → дощові черви → кріт → сова*. Вони відіграють дуже важливу роль, бо повертають речовини в колообіг.

А чи знаєте ви...

У тропічних лісах до 70% енергії передається саме через детритні ланцюги, бо рясна рослинність швидко відмирає і розкладається. Це пояснює, чому там такий багатий ґрунтовий мікросвіт.

Робота в парі

Наведіть приклади пасовищного і детритного ланцюгів для вашої місцевості. Порівняйте їх: який тип переважає в лісі, на луках, у водоймах?

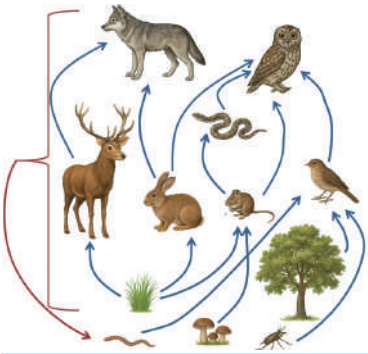
Як ви зрозуміли, головна різниця між двома типами ланцюгів полягає в джерелі енергії та речовини: у пасовищному ланцюзі це жива зелена рослина, а в детритному — мертві органічні рештки.

Таким чином, обидва ланцюги є частинами одного *колообігу речовин* і доповнюють один одного. Пасовищні ланцюги забезпечують їжу для травоїдних тварин, які, зі свого боку, є джерелом живлення для м'ясоїдних. Детритні ланцюги допомагають очищати ґрунт і воду, перетворюючи відмерлі рештки на поживні речовини. Завдяки ним ґрунт стає родючим та забезпечує потрібними речовинами рослини. Тому, наприклад, діяльність дощових червів, грибів і бактерій має величезне практичне значення.

Робота в парі

Якщо порушується один тип ланцюгів, це відразу впливає на інший. Поміркуйте, як впливає на обидва типи ланцюгів знищення ділянки лісу внаслідок зсуву ґрунту.

Трофічні сітки (мережі)



Мал. 56.2. Приклад трофічної сітки

Досі ви розглядали трофічні ланцюги — прості лінійні послідовності живлення. Але в природі організми рідко обмежуються лише одним видом їжі. Заєць може їсти траву, кору й гілки, лисиця — і зайців, і птахів, і мишей; зайця їсть і лисиця, і вовк, і яструб. Тому в реальних умовах усі ланцюги переплітаються, утворюючи *трофічну сітку* або *мережу* (мал. 56.2).

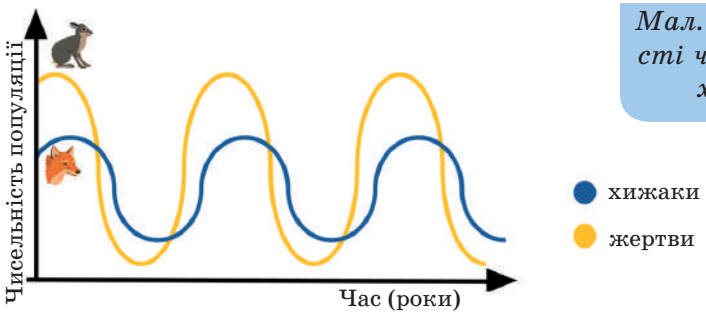
А чи знаєте ви...

У національному парку Єллоустоун (США) після повернення вовків нормалізувалася популяція оленів, з'явилися бобри та багато інших видів тварин, зросла чисельність птахів. Крім того, це вплинуло на ландшафт — річки стали менш заболоченими. Це приклад того, як один хижак впливає на цілу трофічну сітку.

Отже, екосистема, в якій формуються трофічні сітки, — це не просто сукупність організмів і середовища, а цілісна система, яка має певні властивості:

- *цілісність* — усі компоненти екосистеми взаємопов'язані;
- *стійкість* — здатність протистояти змінам;
- *здатність до самовідтворення* — підтримання популяцій організмів;
- *здатність до саморегуляції* — відновлення порушеної рівноваги.

Екосистемам властива *рівновага* — баланс між популяціями різних видів. Яскравий приклад — співвідношення хижак–жертва. Чисельність хижаків залежить від кількості жертв: коли жертв стає більше, збільшується й кількість хижаків, що ними харчуються. А коли жертв стає мало — кількість хижаків також зменшується. Це природний механізм регуляції, який можна зобразити графіком (мал. 56.3).



Мал. 56.3. Графік залежності чисельності популяцій хижаків і жертви

Чим складніша сітка, тим стійкіша екосистема. Якщо один вид зникає, інші можуть частково замінити його роль. У бідних на види системах (наприклад, в *агроценозах*) зникнення навіть одного виду може мати відчутні наслідки для всієї екосистеми.

Агроценози — це створені людиною штучні екосистеми (поля, сади, плантації). Вони значно бідніші на види, ніж природні екосистеми, тому менш стійкі.

Екосистеми постійно змінюються, тому говорять про їх *динамічну рівновагу*.

- *Динамічно стійкі екосистеми* здатні відновлюватися після змін (наприклад, ліс після пожежі).
- *Динамічно нестійкі екосистеми* не відновлюються самостійно або змінюються дуже сильно (наприклад, вирубаний тропічний ліс).

Таким чином трофічна сітка наочно показує взаємозалежність усіх організмів у біоценозі.

Робота в групах

Пристосувавшись до існування в екосистемах, усі живі організми розвинули різні стратегії розмноження, основними з яких є:

- R-стратегія: види з великою кількістю нащадків, але без турботи про них (комахи, жаби, рослини);
- K-стратегія: види з малою кількістю нащадків, але з інтенсивною турботою (слони, вовки, людина).

Розділіться на дві групи. Одна група готує приклади R-стратегів, інша — K-стратегів. Поміркуйте, які переваги й недоліки має кожна стратегія.

Причини та наслідки порушення стабільності екосистем

Стабільність екосистем залежить від біорізноманіття, збалансованості трофічних зв'язків і здатності екосистеми до відновлення. Порушення можуть мати природні й антропогенні причини.

Природні причини:

- зміни клімату;
- стихійні лиха (повені, пожежі, виверження вулканів);
- поширення нових хвороб;
- природні міграції видів;
- вибух чисельності комах-шкідників, інше.

Антропогенні причини:

- вирубування лісів;
- забруднення водойм і ґрунтів;
- урбанізація;
- надмірний вилов тварин і риби;
- випалювання степів;
- введення чужорідних видів, інше.

Робота в парі

Наведіть приклади порушення стабільності екосистем із реальних новин чи спостережень. Обговоріть, що стало причиною змін.

Наслідки порушення стабільності екосистем можуть проявлятися на різних рівнях:

- зменшення біорізноманіття (зникнення деяких видів);
- руйнування трофічних сіток (втрата ключових ланок);
- деградація ґрунтів, опустелювання, заболочення;
- зміна колообігу речовин і потоків енергії;
- погіршення умов життя людей (менше чистої води, врожаїв, більше шкідників і хвороб).

Іноді порушення одного елемента викликає «ефект доміно». Наприклад, зникнення запилювачів зменшує врожайність рослин, це впливає на травоїдних тварин, а потім і на хижаків.

А чи знаєте ви...

У морських екосистемах вилов хижих риб (тунець, акули) може призвести до надмірного зростання дрібних риб і ракоподібних, що, у свою чергу, знижує чисельність планктону. Це впливає навіть на глобальний цикл кисню, адже планктон виробляє майже половину всього кисню планети.

1. Чим відрізняється трофічна сітка від трофічного ланцюга?
2. Поясніть поняття «динамічно стійка екосистема».
3. Хто такі редуценти? Яку роль вони виконують у колообігу речовин?
4. Наведіть приклади природних та антропогенних факторів, що порушують стабільність екосистем.
5. Чому агроценози є менш стійкими, ніж природні екосистеми?
6. Поміркуйте, як вплине на всі інші організми трофічного ланцюга лісу різке зменшення кількості зайців.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/4tJNI47j і виконайте вправи.

Деякі тварини живляться переважно або виключно одним видом їжі. За допомогою додаткових джерел відшукайте інформацію про таких тварин. Дослідіть:

- який саме тип їжі споживає ця тварина;
- які особливості її організму допомагають харчуватися саме такою їжею (будова зубів, шлунка, поведінка тощо);
- які ризики виникають для виду, якщо основне джерело їжі зникає або зменшується;
- яке місце ця тварина займає у трофічному ланцюзі та які зв'язки формує в екосистемі.

Підготуйте коротку презентацію чи доповідь з ілюстраціями або схемами та презентуйте її своїм однокласницям та однокласникам.

57 ВЧЕННЯ В. ВЕРНАДСЬКОГО ПРО БІОСФЕРУ ТА НООСФЕРУ ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОДОЛАННЯ ГЛОБАЛЬНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ КРИЗИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- у чому полягає внесок В. Вернадського у вивчення біосфери;
- що таке ноосфера та чому її поява є новим етапом розвитку планети;
- яке значення ідеї Вернадського мають для запобігання глобальній екологічній кризі.

У попередніх параграфах ви вже вивчали поняття біосфери як глобальної екосистеми. Згадайте, які її компоненти виділяють і чому жива речовина розглядається як геологічна сила.

Біосфера у вченні В. Вернадського

Вернадський розширив і поглибив класичне уявлення про біосферу, зосередивши увагу на її активній ролі як системи, а не просто «оболонки життя». Він вважав, що живі організми — від мікроорганізмів до людей — постійно змінюють середовище: перетворюють склад атмосфери, ґрунтів, вод і навіть породжують нові мінерали.

Жива речовина, за Вернадським, — не просто пасивний компонент природи: вона стає **геологічною силою**, яка впливає на геохімічні процеси. Наприклад, рослини через фотосинтез споживають вуглекислий газ і викидають кисень, бактерії беруть участь у кругообігу Нітрогену, а корені рослин впливають на структуру ґрунтів.

Вернадський підкреслював, що біосфера має цілісність та самоорганізуючий характер: всі її компоненти — атмосфера, гідросфера, літосфера і жива речовина — перебувають у тісному зв'язку. Взаємодія цих систем проявляється у потоках енергії та колообігах речовин.

Мал. 57.1. Аверс (а) та реверс (б) ювілейної монети НБУ номіналом 2 гривні, присвячений Володимиру Вернадському

Крім того, Вернадський передбачав, що людство може стати новим чинником у цій системі: вже з початку XX ст. він говорив про те, що людина своїми діями змінює біосферу, і ці зміни можуть бути руйнівними, якщо не діяти відповідально.

Робота в парі

Розділіться на групи, розгляньте зображення монети (мал. 57.1) та обговоріть такі питання:

- Що символізує зображення Землі на монеті в контексті вчення про біосферу?
- Який зв'язок між образом Землі і портретом Вернадського на монеті?

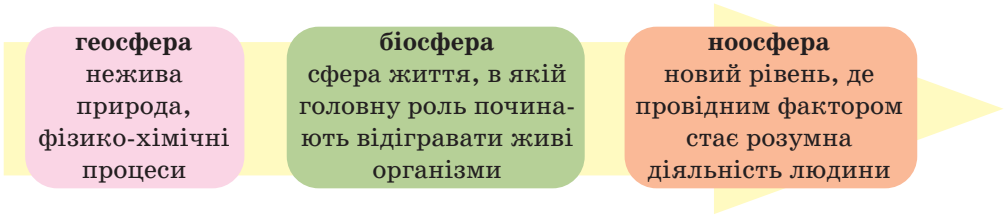
- Як монета як символічний об'єкт підкреслює ідеї Вернадського про активну роль живого у глобальних процесах?

Підготуйте коротку усну промову (1–2 хв), де кожна група презентує свою інтерпретацію.

Ноосфера — нова стадія розвитку планети

Поняття ноосфери (сфера розуму) уперше ввели французькі науковці Едуар Ле Руа та П'єр Тейяр де Шарден після знайомства з ученням Вернадського про біосферу.

Ноосфера у вченні Вернадського — це не лише абстрактна «сфера розуму», а цілком закономірний етап у розвитку Землі. Її можна розглядати як третю послідовну стадію (мал. 57.2).



Мал. 57.2. Етапи розвитку Землі, за вченням Вернадського

Вернадський розвинув поняття ноосфери, підкреслюючи, що розумна людська діяльність, тобто наукова думка, об'єднана із суспільною діяльністю, визначає майбутнє біосфери.

Ноосфера — це новий етап розвитку біосфери, в якому визначальним фактором стає розумна діяльність людини, спрямована на гармонійний розвиток природи й суспільства.

Ноосфера формується тоді, коли:

- людство усвідомлює свою єдність із природою та відповідальність перед нею;
- наука і техніка розвиваються настільки, що дозволяють керувати багатьма природними процесами;
- суспільство починає діяти узгоджено на глобальному рівні для збереження планети.

А чи знаєте ви...

У 1980–1990-х роках ідеї ноосфери активно використовувалися при створенні програм сталого розвитку ООН. Саме завдяки цьому поняття ноосфери вважають «передвісником» сучасних глобальних екологічних стратегій.

Значення ідей Вернадського для подолання екологічної кризи

У наш час людство опинилося перед серйозними викликами: зміна клімату, забруднення океанів, скорочення біорізноманіття, виснажен-

ня ґрунтів. Володимир Вернадський попереджав у своїх працях, що діяльність людини з кожним роком має все сильніший вплив і тому може мати як позитивні, так і негативні наслідки.

Головний висновок науковця полягає в тому, що виживання цивілізації залежить від гармонійної взаємодії людини з природою. Лише відповідальне використання знань і технічних можливостей дозволить уникнути екологічної катастрофи.

Робота в групах

Поділіться на дві групи.

Група 1 («Оптимісти»): доведіть, що ідеї Вернадського можуть реально допомогти людству подолати екологічну кризу. Наведіть приклади сучасних рішень (відновлювана енергетика, міжнародні угоди, «зелена» наука).

Група 2 («Скептики»): обґрунтуйте, чому навіть за наявності ідей Вернадського людство не завжди може уникнути негативних наслідків. Згадайте про проблеми глобальної політики, економічні інтереси, складність змін на планетарному рівні.

Проведіть дебати, а потім спільно сформулюйте висновок: чи достатньо лише ідей і знань, щоб уникнути екологічної кризи? Які ще умови є необхідними?

1. Хто такий Володимир Вернадський і який його основний внесок у науку?
2. Дайте визначення понять «біосфера» та «ноосфера».
3. Чому жива речовина, за Вернадським, є геологічною силою?
4. Наведіть приклади проявів ноосфери у сучасному світі.
5. Чому ідеї Вернадського важливі для подолання глобальної екологічної кризи?
6. Прочитайте та перекладіть уривок наукової статті, в якій автор використовує вчення Вернадського:
   «Between the living and inert matter of the biosphere, there is a single, continuous material and energetic connection, which is continuously maintained during the processes of respiration, feeding, and reproduction of living matter, and is necessary for its survival: the biogenic migration of atoms of the chemical elements, from the inert bodies of the biosphere into the living natural bodies and back again».
   Проаналізуйте та запишіть відповіді:
   1) що означає «continuous material and energetic connection» між живим і неживим?
   2) як цей зв'язок підтримується через процеси дихання, живлення, відтворення?
   3) що таке «biogenic migration of atoms» і чому Вернадський вважав це необхідним для виживання біосфери?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/utJNOjS8 і виконайте вправи.

За допомогою додаткових джерел знайдіть інформацію про Володимира Вернадського. Підготуйте есе на тему: «*В. Вернадський — видатний український науковець*», в якому, окрім загальної інформації, наведіть якомога цікавіші дані, що стосуються цього науковця.

58 АНТРОПОГЕННИЙ (АНТРОПІЧНИЙ) ВПЛИВ НА БІОСФЕРУ. ВИДИ ЗАБРУДНЕННЯ, ЇХ НАСЛІДКИ ДЛЯ БІОСФЕРИ. ПОНЯТТЯ ПРО ЯКІСТЬ ДОВКІЛЛЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які існують основні види антропогенного впливу на біосферу;
- що таке забруднення довкілля та які його наслідки для живої природи;
- що означає поняття «якість довкілля» та як воно пов'язане зі станом біосфери.

Ви вже знаєте, що біосфера — це глобальна екосистема, яка забезпечує колообіг речовин і потік енергії. Поміркуйте та обговоріть, яким чином діяльність людини може впливати на ці процеси.

Антропогенний вплив на біосферу

Мал. 58.1. Вплив людини на біосферу

Людина — частина біосфери, але, водночас, є найпотужнішою геологічною силою, що впливає на перебіг природних процесів. Відтоді, як люди почали активно використовувати вогонь, вирощувати рослини та будувати поселення, вони впливали на природні процеси. Проте справжнього глобального масштабу цей вплив набув у XX–XXI століттях, коли людська діяльність стала порівнюваною з природними геологічними процесами.

Антропогенний (або **антропічний**) **вплив** — це сукупність усіх змін у природному середовищі, спричинених діяльністю людини.

Робота в парі

Розгляньте малюнок 58.1. Назвіть усі приклади антропічного впливу та поясніть причини їх виникнення.

Антропічний вплив можна поділити на два *типи*:

- *прямий вплив* — безпосереднє втручання людини у природні про-

цеси, яке відбувається в результаті господарської чи технологічної діяльності. Наприклад: вирубування лісів, осушення боліт, розорювання земель, будівництво доріг, видобування корисних копалин, забруднення вод і повітря;

- *непрямий вплив* — зміни у природі, які виникають як побічний результат діяльності людини, часто з відкладеним ефектом у часі чи просторі. Наприклад, зміна клімату через парниковий ефект, зменшення озонового шару, порушення міграцій тварин, кислотні дощі.

Основні напрямки антропогенного впливу на біосферу:

- *перетворення природних ландшафтів.* Близько 75% суходолу вже зазнали суттєвих змін через сільське господарство, урбанізацію та транспорт;
- *виснаження природних ресурсів.* Надмірне використання води, ґрунтів, лісів і мінералів призводить до порушення природного колообігу речовин;
- *забруднення довкілля.* Викиди промислових підприємств, автомобільний транспорт, сміття та пестициди змінюють склад атмосфери, вод і ґрунтів;
- *зміна біосфери внаслідок кліматичних змін.* Підвищення середньої температури, танення льодовиків, зсуви кліматичних зон — усе це наслідок діяльності людини.

Робота в групах

Обговоріть приклади антропогенного впливу у вашій місцевості. Які з них є прямими, а які — непрямими? Які з них мають найбільший вплив на природу? Які наслідки можуть проявитися лише через кілька десятиліть? Як можна зменшити цей вплив?

Види забруднення та їх наслідки

Біосфера функціонує завдяки колообігу речовин і потоку енергії. Проте надмірна діяльність людини порушує ці процеси, спричинюючи забруднення — потрапляння у природне середовище речовин або енергії, які змінюють його природні властивості.

Забруднення — це надходження у довкілля речовин або енергії в кількостях, які порушують рівновагу екосистем.

А чи знаєте ви...

У 1952 році в Лондоні стався «Великий смог», коли поєднання диму та туману призвело до загибелі понад 4 тисяч людей протягом кількох днів. Ця подія змусила уряд ухвалити перші закони з контролю за якістю повітря.

Класифікують види забруднення за багатьма критеріями:

- *за походженням*: природні та антропогенні;
- *за сферою поширення*: атмосферні, водні, ґрунтові, космічні тощо;

- *за тривалістю дії*: тимчасові, довготривалі, постійні;
- *за масштабом впливу*: локальні, регіональні, глобальні;
- *за характером впливу*: фізичне, хімічне, біологічне та механічне забруднення.

Основною з них є класифікація за характером впливу, яка проілюстрована на мал. 58.2.

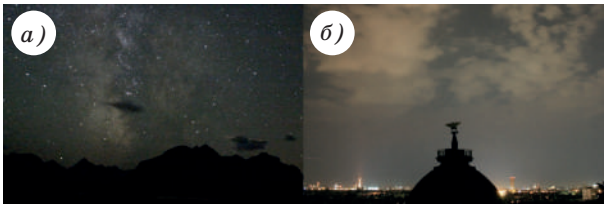
Мал. 58.2. Види забруднення та їх наслідки

А чи знаєте ви...

Світлове забруднення — це не просто «зайве світло» (мал. 58.3). У великих містах штучне освітлення настільки потужне, що змінює природний добовий ритм тварин і людей. Деякі птахи плутають час міграцій, рослини цвітуть раніше, а в людей частіше виникають порушення сну.

У поєднанні з фізичним забрудненням (шум, вібрація, електромагнітне випромінювання) це створює постійний стрес для живих організмів.

У мегаполісах Китаю, таких як Пекін, Шанхай і Гуанчжоу, через густий смог і світлове забруднення деякі мешканці, що не покидали місто, ніколи не бачили зоряного неба.



Мал. 58.3. Чисте зоряне небо (а) та небо зі світловим забрудненням (б)

Поняття якості довкілля

Якість довкілля — це показник, який відображає стан природного середовища та його здатність підтримувати життя людей, тварин і рослин.

Вона визначається ступенем чистоти повітря, води, ґрунтів, а також рівнем шуму, освітлення й радіаційного фону. Іншими словами, якість довкілля — це наскільки навколишнє середовище придатне для безпечного існування живих організмів. Основні критерії оцінки якості довкілля показані в табл. 58.1.

Таблиця 58.1

Основні критерії оцінки якості довкілля

Якість атмосферного повітря	Вимірюють за вмістом шкідливих речовин (оксидів Сульфуру, Нітрогену, Карбону, пилу тощо). Високий рівень забруднення повітря може викликати алергії, серцево-судинні та легеневі захворювання.
Якість води	Оцінюють за вмістом розчиненого кисню, токсичних речовин, нітратів, мікроорганізмів. Вода доброї якості — основа здоров'я людини й функціонування екосистем.
Стан ґрунтів	Враховують вміст гумусу, солей важких металів, пестицидів. Зниження родючості та накопичення токсинів погіршують якість сільськогосподарської продукції.
Рівень фізичних впливів	Сюди належать шум, вібрація, світлове та електромагнітне забруднення. Вони впливають не лише на людей, а й на поведінку тварин, стан рослин і мікроорганізмів.

А чи знаєте ви...

У столиці Ісландії — Рейк'явіку — рівень забруднення повітря в кілька разів нижчий, ніж у більшості європейських міст. Це результат використання геотермальної енергії, електротранспорту й активного озеленення.

Рейк'явік часто називають «найчистішим містом планети».

У багатьох країнах розраховують індекси екологічної якості (Environmental Quality Index, EQI). Вони узагальнюють дані про стан повітря, води, ґрунтів і рівень забруднення, щоб порівняти різні регіони між собою.

В Україні подібні показники відображають в індексі екологічної безпеки та системі моніторингу довкілля, яку ведуть державні служби.

1. Що таке антропогенний (антропічний) вплив?
2. Назвіть основні напрямки антропогенного впливу на біосферу.
3. Які основні види забруднення виділяють за характером впливу?
4. Наведіть приклади прямого та непрямого антропогенного впливу у вашій місцевості.

5. Поясніть, чому хімічне забруднення може призводити до порушення харчових ланцюгів.
6. Проаналізуйте, як фізичне забруднення впливає на поведінку тварин і людей у містах.
7. Поміркуйте над твердженням: «*Людина не може повністю усунути свій вплив на природу, але може зробити його розумним*». Напишіть коротке пояснення, як ви його розумієте.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/TtJNO9mV і виконайте вправи.

Оберіть один компонент довкілля — повітря, воду або ґрунт.
Знайдіть у відкритих джерелах інформації (або з показників шкільної екологічної станції за її наявності) дані про його стан у вашій місцевості.
Порівняйте їх із нормами (ГДК — гранично допустимі концентрації).
Зробіть висновок: чи можна вважати довкілля вашої місцевості якісним і безпечним?
Оформте дослідження у вигляді проєкту та презентуйте вашим однокласницям та однокласникам.

59 СУЧАСНІ ГЛОБАЛЬНІ ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ, ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В УКРАЇНІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які екологічні проблеми вважають глобальними і чому;
- які основні причини виникнення екологічних криз у світі;
- які екологічні проблеми є найактуальнішими для України;
- як людство може долати сучасні екологічні виклики.

Які види забруднення біосфери ви знаєте? Чим антропогенний вплив відрізняється від природних факторів? Які наслідки для природи можуть мати глобальний масштаб?

Глобальні екологічні проблеми

Мал. 59.1. Ілюстрація, виконана ШІ, на тему: «Людський слід на планеті»

У XXI столітті людство зіткнулося з масштабними викликами, які охоплюють усю планету. Екологічні проблеми набули глобального характеру, адже жодна країна не може залишатися осторонь наслідків зміни клімату, виснаження ресурсів чи забруднення середовища. Вони впливають не лише на природу, а й на здоров'я, економіку, продовольчу безпеку та навіть політичну стабільність.

Глобальні екологічні проблеми — це порушення рівноваги в біосфері, які охоплюють великі території Землі й впливають на життя всього людства. Вони виходять за межі однієї країни й потребують міжнародного співробітництва для вирішення.

Робота в парі

Розгляньте малюнок 59.1, створений ШІ, на тему: «Людський слід на планеті». Поміркуйте, які деталі зображення символізують негативний вплив людини на природу та який головний меседж хотів передати ШІ цим зображенням. Проведіть дебати на тему: «Який слід залишаю на планеті я?».

Для за покликанням https://cutt.ly/DtTzGzTt або за QR-кодом, щоб переглянути головні глобальні екологічні проблеми.

Екологічні проблеми в Україні

Україна — велика й різноманітна за природними умовами країна: від карпатських лісів до степів Півдня, від річкових долин до морських узбереж. Проте діяльність людини — промисловість, транспорт, сільське господарство — часто призводить до порушення рівноваги в природі.

До екологічних проблем належать забруднення повітря і вод, зниження родючості ґрунтів, зменшення лісів, накопичення відходів. Сьогодні на стан довкілля в Україні впливають і наслідки війни: руйнування промислових об'єктів, пожежі, мінування територій.

Водночас, тисячі людей по всій країні долучаються до *екологічного волонтерства, відновлення зелених зон і моніторингу стану природи*.

Тому головне завдання сучасного покоління — зрозуміти, як можна зберегти та відновити довкілля навіть у складних умовах.

Робота в парі

Пригадайте, які екологічні проблеми існують у вашій місцевості. Це може бути забруднення води, повітря, сміття в парках, вирубування лісосмуг тощо. Позначте їх на карті громади або створіть короткий список із прикладами.

Розділіться на пари та напишіть короткий проєкт з пропозицією вирішення для кожної проблеми (наприклад: створення станцій сортування, озеленення шкільного подвір'я, інформаційна кампанія). Презентуйте свої короткі проєкти та поясніть їх користь для покращення екологічного стану регіону.

Навіть якщо здається, що екологічні проблеми надто великі, щоб окрема людина могла щось змінити, це не так. Кожен наш щоденний вибір — як ми добираємося до школи, які продукти купуємо, як поводимось із водою чи сміттям — впливає на екологічний стан нашого міста, країни й усієї планети.

Ми всі залишаємо **екологічний слід** — тобто кількість природних ре-

сурсів, які споживаємо, і обсяг відходів, які створюємо.

Він може бути вуглецевим (кількість парникових газів, що утворюються внаслідок наших дій), водним (скільки води витрачаємо) або навіть пластиковим (скільки відходів із пластику продукуємо).

Щоб змінити ситуацію, спочатку потрібно її усвідомити.

Практичне завдання
«Дослідження власного екологічного сліду»

Обчисліть свій екологічний (вуглецевий або водний) слід.

Для цього скористайтесь онлайн-калькулятором або таблицею, яку надає вчитель.

Проаналізуйте результати: які ваші звички чи покупки найбільше впливають на довкілля?

Складіть короткий план змін для себе чи своєї родини:

— як можна зменшити споживання води та енергії;

— як зменшити кількість відходів;

— як зробити свій спосіб життя більш екологічним.

Оформте результати у вигляді презентації, інфографіки або постера «Мій шлях до екологічної рівноваги».

Порівняйте результати у класі, обговоріть, які дії кожен може здійснити вже сьогодні. Поміркуйте, як зміна поведінки однієї людини впливає на всю громаду.

Шляхи подолання екологічних проблем

Розв'язання екологічних проблем можливе лише за умови міжнародної співпраці, наукових інновацій та екологічної свідомості кожної людини. Серед основних напрямків:

- перехід до відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової, біоенергетики);
- розвиток системи перероблення відходів і «зеленої» економіки;
- впровадження екологічної освіти та виховання;
- участь громад у природоохоронних ініціативах;
- контроль за промисловими викидами та моніторинг якості довкілля.

Україна бере участь у міжнародних природоохоронних програмах і впроваджує національні стратегії сталого розвитку, які передбачають збереження біосфери для майбутніх поколінь.

Сучасна екологічна освіта навчає бачити взаємозв'язки між побутом, економікою і довкіллям, формує екологічні звички: сортування сміття, ощадливе використання води, вибір екологічно сертифікованих товарів.

Практичне завдання
«Розпізнавання екологічного маркування на предметах побуту та продуктах харчування»

Дослідіть, які позначки екологічного маркування ви можете знайти на упаковках товарів удома чи в магазині (наприклад, EU Ecolabel, FSC,

Organic Standard, Green Crane, Leaf of Life).

З'ясуйте, що означає кожен знак: хто його надає, які вимоги має пройти товар, щоб його отримати. Створіть фотоколаж, таблицю або мініпрезентацію із прикладами маркування й короткими поясненнями.

Визначте, які товари можна вважати більш екологічними, і підготуйте поради для своєї родини або школи, як купувати відповідально.

1. Що таке глобальні екологічні проблеми?
2. Які ресурси належать до невідновних?
3. Що таке екологічний слід людини?
4. Поясніть, чому деградація ґрунтів і втрата біорізноманіття є взаємопов'язаними проблемами.
6. Як щоденні звички людини впливають на вуглецевий і водний слід?
7. Наведіть приклади екологічних проблем, характерних для вашої місцевості, та запропонуйте шляхи їх розв'язання.
8. Уявіть, що ви — консультант територіальної громади. Які три кроки ви запропонували б для покращення екологічного стану вашого населеного пункту?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/TtJNPLBF і виконайте вправи.

Знайдіть у місцевих новинах або на сайті вашої громади повідомлення про природоохоронні ініціативи. Визначте:

- хто їх проводить (громада, учні, волонтери, лісники тощо);
- у чому полягає мета (очищення водойм, висадження дерев, прибирання сміття);
- як ви могли б до цього долучитися.

60 ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ЯК НЕОБХІДНА УМОВА СТАБІЛЬНОСТІ БІОСФЕРИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- що таке біорізноманіття та чому його збереження є надзвичайно важливим;
- які чинники загрожують біорізноманіттю;
- які існують способи його охорони в Україні та світі.

Що таке екосистема? Як зміна одного виду може вплинути на інші? Які приклади взаємозв'язків між організмами ви знаєте?

Поняття біорізноманіття та його значення

Біорізноманіття — це різноманітність усіх живих організмів на Землі, їхніх видів, екосистем і форм спадкової мінливості.

Біорізноманіття є результатом мільярдів років еволюції та основою стабільності біосфери. Саме завдяки біорізноманіттю життя зберігає рівновагу, навіть коли умови середовища змінюються.

Виділяють три рівні біорізноманіття (мал. 60.1).

Генетичне

це різноманіття генів усередині одного виду. Воно зумовлює відмінності між особинами (наприклад, колір шерсті у вовків чи стійкість сортів пшениці до засухи). Завдяки генетичній мінливості популяції мають змогу пристосовуватися до змін середовища.

Видове

це різноманіття всіх видів живих організмів, які населяють певну територію чи всю планету. На Землі описано понад 2 мільйони видів, але вчені припускають, що насправді їх може бути понад 10 мільйонів.

Екосистемне

це різноманіття природних середовищ існування і спільнот живих організмів: лісів, степів, боліт, озер, морів, пустель тощо. Кожна екосистема має власну структуру, умови існування й види, пристосовані саме до них.

Мал. 60.1. Рівні біорізноманіття

А чи знаєте ви...

У тропічних лісах Амазонії живе близько 10% усіх видів планети, тоді як у пустелях — менше 1%. Утім, навіть невелика кількість видів у пустелі утворює стійку екосистему, адаптовану до екстремальних умов, де більшість інших організмів не вижила б.

Отже, важливе не лише число видів, а й їхня роль у підтриманні балансу.

Робота в парі

Розгляньте ілюстрацію. Які емоції вона у вас викликає? Дайте назву цій картині.

Життя на нашій планеті змінювалося безліч разів: з'являлися нові види, а старі зникали. Саме завдяки біорізноманіттю життя ніколи повністю не припинялося, навіть після глобальних катастроф.

Протягом історії Землі відбулося п'ять великих масових вимирань, під час яких зникало багато видів живих істот. Наприклад, наприкінці пермського періоду зникло близько 90% морських видів; під час мезозойської ери — динозаври та безліч інших організмів.

Однак життя відроджувалося знову й знову — на основі тих видів, що вижили, та їх генетичного різноманіття. І з кожним вимиранням живі організми ставали стійкіші до нових умов, а їх біорізноманіття —

ширше. Тому біорізноманіття можна порівняти з «резервом міцності» живої природи: чим воно багатше, тим більша ймовірність, що життя витримає будь-які випробування.

Практичне завдання «Життя не здається!»

Об'єднайтесь у групи по 3–4 учні та учениці. Кожна група отримує від учителя одну з історичних катастроф (вимирання) — наприклад: ордовицько-силурійське, девонське, пермсько-тріасове, тріасово-юрське чи крейдове.

Дослідіть за допомогою додаткових джерел інформації:

- коли відбулося вимирання та які його ймовірні причини;
- які види зникли, а які вижили;
- які нові групи організмів з'явилися після цього.

Представте результати вашим однокласникам та однокласницям у вигляді міні-проєкту. Обговоріть у класі, чому біорізноманіття — найкраща «страховка» життя на планеті.

Роль біорізноманіття у функціонуванні та продуктивності екосистем

Біорізноманіття визначає ефективність роботи екосистем. Кожен вид робить свій внесок у колообіг речовин, енергетичні потоки та відновлення природних ресурсів.

Продуктивність екосистеми — це кількість органічної речовини (біомаси), утвореної організмами за певний час. Вона залежить від клімату, кількості сонячної енергії, вологості, складу ґрунту та, головне, рівня біорізноманіття.

Розрізняють первинну та вторинну продуктивність екосистема (мал. 60.2):

Мал. 60.2. Структура продуктивності екосистеми

Саме ЧПП показує, скільки енергії переходить до споживачів. Ве-

личина вторинної продуктивності залежить від ефективності засвоєння їжі, чисельності популяцій і трофічного рівня. Загалом, чим багатше біорізноманіття, тим продуктивніше працює екосистема — енергія розподіляється між великою кількістю видів, що забезпечує стійкість біосфери.

А чи знаєте ви...

У тропічних лісах Амазонії на 1 гектар може припадати понад 500 видів дерев, які разом утворюють найщільнішу біомасу на планеті.

У холодних морях, де кількість видів менша, вторинна продуктивність (через планктон і риб) часто перевищує первинну — завдяки швидкому відновленню популяцій.

Чинники, що впливають на зменшення біорізноманіття

Біорізноманіття нашої планети постійно змінюється, проте в сучасну епоху темпи втрати видів значно перевищують природні. Людина стала головним фактором цих змін. Деякі науковці та екоактивісти інколи навіть називають сучасність шостим масовим вимиранням.

Основні чинники зменшення біорізноманіття:

Знищення природних місць існування. Вирубування лісів, осушення боліт, розорювання степів, забудова територій — усе це зменшує площі, придатні для життя багатьох видів.

Забруднення довкілля. Потрапляння у воду, ґрунт і повітря промислових викидів, пестицидів, важких металів і пластику порушує обмін речовин у живих організмах і ланцюгах живлення.

Зміна клімату. Підвищення середньорічних температур, засухи, танення льодовиків призводять до зміни ареалів видів і зникнення екосистем, пристосованих до холоду.

Надмірне використання природних ресурсів. Масове полювання, рибальство, вирубування цінних порід дерев призводять до виснаження популяцій, які не встигають відновлюватися.

Інвазійні види. Нові види, випадково або навмисно занесені людиною, витісняють місцеві — наприклад, сон-трава заміщується амброзією, а у водоймах з'являються чужорідні риби чи молюски.

Генетична одноманітність у сільському господарстві. Використання невеликої кількості сортів і порід підвищує врожайність, але знижує стійкість до шкідників і змін клімату.

Однією з головних причин зменшення природного біорізноманіття стало перетворення природних екосистем на агроекосистеми — поля, сади, пасовища, плантації.

Агроекосистеми — штучні системи з високою продуктивністю і низьким біорізноманіттям.

Вони мають високу біопродуктивність, але потребують постійного втручання людини. У природній екосистемі тисячі видів взаємодіють між собою й підтримують рівновагу самостійно. А в агроекосистемі часто переважає лише один вид (*монокультура*), тому людина змушена регулювати все: від родючості ґрунту до кількості шкідників. Без підживлення, зрошення чи захисту врожай швидко знижується.

Тож агроекосистеми демонструють, як зменшення біорізноманіття підвищує залежність життя від людини.

1. Що таке біорізноманіття?
2. Назвіть три рівні біорізноманіття та наведіть приклади кожного.
3. Що розуміють під валовою і чистою первинною продуктивністю?
4. Поясніть, чому екосистеми з високим біорізноманіттям є більш стійкими до змін середовища.
5. Порівняйте продуктивність тропічного лісу та пустелі. Як це пов'язано з кліматом і кількістю видів?
6. Обґрунтуйте, чому агроекосистеми вважають прикладом антропогенного впливу на біорізноманіття.
7. Запропонуйте способи, як можна підвищити біорізноманіття у вашій місцевості, не знижуючи продуктивності сільського господарства.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/3tJND9hu і виконайте вправи.

Розгляньте орієнтовні дані продуктивності деяких екосистем та зобразіть за цими даними стовпчикову діаграму.

Екосистема	ВПП (кг/м² · рік)	ЧПП (кг/м² · рік)
Тропічний ліс	2,6	2,2
Помірний ліс	1,6	1,1
Відкритий океан	0,25	0,27
Пустеля	0,10	0,06

Визначте, в яких екосистемах різниця між ВПП і ЧПП найменша. Де вторинна продуктивність найвища?

Поміркуйте та обговоріть у класі, як це пов'язано з рівнем біорізноманіття.

61 СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ОХОРОНИ ПРИРОДИ. КОНЦЕПЦІЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ПРИНЦИПИ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- які міжнародні угоди спрямовані на охорону природи та збереження біосфери;
- як Україна реалізує природоохоронні заходи та впроваджує принципи сталого розвитку;
- що таке раціональне природокористування і чому воно є основою безпечного майбутнього людства.

Що таке біорізноманіття і яку роль воно відіграє у стабільності біосфери? Які чинники зменшують біорізноманіття в сучасному світі? Як діяльність людини впливає на екосистеми та продуктивність природи?

Сучасні напрями охорони природи у світі та Україні

Мал. 61.1. Логотип United Nations Environment Programme

Людство усвідомило, що без збереження природних ресурсів і стабільності біосфери подальший розвиток цивілізації неможливий. Тому в сучасному світі сформувалися глобальні підходи до охорони природи, раціонального природокористування та *сталого розвитку* — такого, що задовольняє потреби нинішнього покоління, не позбавляючи майбутні покоління можливості жити в безпечному середовищі.

Світова спільнота вже кілька десятиліть реалізує комплексні програми охорони довкілля. Основу цих зусиль становлять міжнародні угоди, конвенції та організації, спрямовані на збереження біосфери.

Серед найважливіших міжнародних ініціатив:

Конвенція про охорону біологічного різноманіття (1992 р.) — визначає зобов'язання держав зі збереження видів, екосистем і генетичних ресурсів.

Кіотський протокол (1997 р.) і **Паризька кліматична угода** (2015 р.) — передбачають зменшення викидів парникових газів і спільну боротьбу зі зміною клімату.

Програма ООН з навколишнього середовища (UNEP) — координує глобальні дії з охорони природи, моніторинг стану атмосфери, океанів і земель (мал. 61.1).

ЮНЕСКО реалізує програму «Людина і біосфера», створюючи мережу біосферних резерватів, у яких гармонійно поєднуються природоохоронна діяльність і традиційне господарювання людей.

Практичне завдання «Міжнародні екологічні ініціативи»

Об'єднайтесь у пари та оберіть одну з міжнародних ініціатив або організацій, що займається охороною природи (наприклад, ЮНЕП, ЮНЕСКО,

WWF, «Грінпіс», Конвенція про біорізноманіття, Паризька кліматична угода тощо). Скориставшись додатковими лдерелами інформації, дослідіть:

- коли і з якою метою створено цю ініціативу;
- які проблеми природи вона вирішує;
- які результати вже досягнуто або які проєкти реалізовано.

Створіть лепбук або ментальну карту, в якій відобразіть основні відомості, символіку, цілі та цікаві факти про обрану вами ініціативу чи організацію. Презентуйте свою роботу однокласникам та однокласницям.

Обговоріть у класі ваші дослідження та зробіть висновок про те, які спільні риси об'єднують міжнародні природоохоронні ініціативи; чому для охорони природи потрібні зусилля всіх країн світу.

Найважливішим практичним механізмом охорони природи є створення природоохоронних територій — національних парків, заповідників, заказників, біосферних резерватів, морських охоронних зон. Такі території відіграють ключову роль у збереженні рідкісних і зникаючих видів, підтриманні природних процесів та екологічного балансу на планеті.

Нині природоохоронні території охоплюють понад 15% суходолу та близько 8% акваторій Світового океану. За міжнародною класифікацією (IUCN — Міжнародний союз охорони природи), розрізняють кілька типів охоронних об'єктів (мал. 61.2).

Природні заповідники — ділянки природи, що повністю вилучені з господарського використання, де охороняються всі природні процеси.

Національні парки — поєднують охорону природи з регульованим туризмом та екологічною освітою населення.

Резервати дикої природи (wildlife sanctuaries) — охороняють окремі види тварин або рослин.

Біосферні резервати (біосферні заповідники) — території, де гармонійно співіснують охоронна зона, буферна зона наукових досліджень і зона сталого використання.

Природні пам'ятки та заказники — охороняють окремі об'єкти природи: водоспади, печери, старовікові дерева, місця гніздування тощо.

Морські охоронні зони — запроваджуються для захисту коралових рифів, морських ссавців, екосистем прибережних вод.

Мал. 61.2. Основні типи природоохоронних об'єктів

А чи знаєте ви...

Найбільший у світі заповідник — Національний парк «Гренландський» (площа понад 970 тис. км^2).

Найстаріший — Єллоустонський національний парк у США, заснований ще 1872 року.

Україна є активним учасником світового екологічного руху. Вона приєдналася до більшості міжнародних природоохоронних угод і програм. Крім того, в Україні діє Закон «Про природно-заповідний фонд України», який визначає категорії охоронних територій та порядок їхнього функціонування, а також встановлює правила їхнього використання та відновлення. На сьогодні природно-заповідний фонд нашої держави охоплює близько 6,5% території країни.

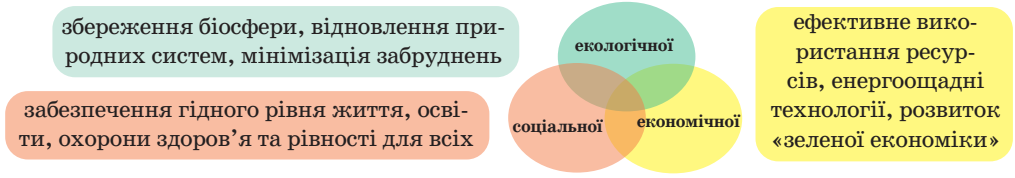
Важливу роль у збереженні природи відіграють також громадські екологічні організації: Національний екологічний центр України, Всесвітній фонд природи WWF-Україна, «Екодія», «Грінпіс Україна» тощо. Вони проводять природоохоронні акції, просвітницькі кампанії, ініціюють створення нових заповідних територій та контроль за їх збереженням.

Концепція сталого розвитку та основні принципи раціонального природокористування

Тривалий час люди використовували природні ресурси без урахування екологічних обмежень, що призвело до виснаження ґрунтів, забруднення води й повітря, вирубування лісів, глобального потепління. Тому у другій половині XX століття в науці, політиці та суспільстві сформувалася нова модель розвитку — *сталий розвиток*.

Сталий (збалансований) розвиток — це розвиток суспільства, який задовольняє потреби нинішнього покоління, не ставлячи під загрозу можливості майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби.

Термін уперше офіційно використано в доповіді Комісії ООН із навколишнього середовища та розвитку (1987 р.) «Наше спільне майбутнє». Суть сталого розвитку полягає в гармонійному поєднанні трьох складових (мал. 61.3).



Мал. 61.3 Концепція сталого розвитку

У 2015 році ООН ухвалила *Цілі сталого розвитку (Sustainable Development Goals — SDGs)* — 17 глобальних цілей до 2030 року. Серед них — боротьба зі зміною клімату, збереження морських і наземних екосистем, чиста енергія, відповідальне споживання, скорочення бідності й забезпечення миру.

Однак самі лише декларації сталого розвитку не принесуть результатів без практичних дій. Одним із таких реальних кроків є запровадження системи *раціонального природокористування*.

Раціональне природокористування — це система господарської діяльності людини, що забезпечує екологічно безпечне, економічно ефективне й соціально справедливе використання природних ресурсів.

Робота в групах

Поділіться на дві команди. Кожна створює проєкт екологічно, соціально та економічно збалансованого міста майбутнього. Продумайте:

— як організовано енергопостачання, транспорт, поводження з відходами та зелені зони;

— як забезпечено рівність, освіту та безпечне середовище для мешканців;

— які технології допомагають берегти довкілля.

Представте свої проєкти класу у вигляді презентації або постера. Проведіть дебати: обговоріть, яке місто є більш реалістичним, збалансованим і дружнім до природи.

1. Що таке сталий розвиток?
2. Назвіть три складові сталого розвитку.
3. Які основні категорії природоохоронних територій існують у світі та в Україні?
4. Поясніть, як міжнародні природоохоронні угоди сприяють збереженню біосфери.
5. Які напрямки природоохоронної діяльності реалізуються в Україні?
6. Як принципи раціонального природокористування допомагають досягати цілей сталого розвитку?
7. Поміркуйте: чи можливий сталий розвиток без міжнародного співробітництва? Аргументуйте відповідь.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/etJNFA4t і виконайте вправи.

Оберіть один із запропонованих напрямків проєктної діяльності — інформаційно-пошуковий або творчий. Результати представте у вигляді есе, постера, лепбука або презентації.

Інформаційно-пошукові проєкти (постер, лепбук чи презентація):

- «Біосферні заповідники України» (історія створення, природні особливості та значення);
- «Екологічні катастрофи на території України, їхні наслідки» (причини, перебіг і вплив однієї з екологічних катастроф).

Творчі проєкти (есе, лепбук чи презентація):

- «Мої кроки на шляху до сталого розвитку» (як ви особисто можете сприяти збереженню природи);
- «Урбанізація та її наслідки для довкілля» (екологічні проблеми сучасних міст і можливі рішення);
- лепбук «Природоохоронні території України».

«Людина і біосфера»

1. Який учений уперше ввів поняття «біосфера» в сучасному розумінні?
   а) Ч. Дарвін *б)* Е. Зюсс
   в) В. Вернадський *г)* Ж.-Б. Ламарк
2. Який компонент **не** належить до абіотичних факторів середовища?
   а) температура *б)* паразит
   б) світло *г)* тиск
3. Головною відмінністю природної екосистеми від агроекосистеми є:
   а) наявність фотосинтезу *б)* участь людини у функціонуванні
   б) стабільність і саморегуляція *г)* обмін речовин та енергії
4. Який тип біорізноманіття характеризує різноманітність генів усередині виду?
   а) видовий *б)* екосистемний
   в) генетичний *г)* морфологічний
5. До якого рівня продуктивності належить енергія, накопичена автотрофами у вигляді органічних речовин?
   а) вторинної продуктивності *б)* чистої первинної продуктивності
   в) валової первинної продуктивності *г)* вторинної валової продуктивності
6. Який чинник є **антропогенним** у зменшенні біорізноманіття?
   а) природні катаклізми
   б) урбанізація та забруднення
   в) зміна клімату внаслідок орбітальних коливань
   г) еволюційні процеси
7. Установіть відповідність між природоохоронною категорією та її характеристикою:

а) національний парк	*1)* збереження унікальних природних процесів, заборона господарської діяльності
б) біосферний заповідник	*2)* поєднання охорони природи з рекреаційним використанням
в) заказник	*3)* охорона окремих видів або природних комплексів
г) природний заповідник	*4)* охорона територій, що мають культурне значення
ґ) зоопарк	

8. Знайдіть відповідність між термінами та їх визначеннями:

а) біотичний фактор	*1)* дія вітру на рослини
б) абіотичний фактор	*2)* конкуренція між видами
в) антропогенний фактор	*3)* осушення боліт
г) екологічна ніша	*4)* життєвий простір виду в системі екосистеми
	5) ланцюг живлення

ТЕМА 7

ЕВОЛЮЦІЯ ОРГАНІЧНОГО СВІТУ

62 ЕВОЛЮЦІЯ — ЗАКОНОМІРНИЙ ПРОЦЕС РОЗВИТКУ БІОСФЕРИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- чому науковці задумалися над існуванням еволюції;
- різницю між словом «теорія» в науці і побутовій мові;
- які факти підтверджують реальність еволюції.

Питання, що призвело до відкриття теорії еволюції

З давніх-давен люди знаходили рештки давніх організмів, що відрізняються від сучасних істот. Однак ніхто не проводив організовані розкопки, знахідки були нечисельними, до того ж зберігалися в окремих колекціонерів, згодом розпорошувалися по інших колекціях або взагалі губилися. Розрізнені знахідки підживлювали легенди про дивовижних створінь давнини та не спричиняли появи складніших запитань.

У другій половині XVIII століття з'явилася геологія — наука, що вивчає склад Землі. Розпочався цілеспрямований пошук, систематичний опис знахідок та умов їхнього залягання в земній корі. Поміж них були скам'янілі рештки доісторичних істот. Знахідки дедалі частіше потрапляли до наукових установ, де зберігалися. З часом колекції викопних решток почали налічували тисячі, а то й сотні тисяч експонатів. Дослідження вказували: в минулому жило чимало істот, що відрізнялися від сучасних. Цей факт вражав, але його можна було прийняти в межах світосприйняття освіченої людини, що жила на порубіжжі XVIII–XIX століть. Однак геологічні дослідження виявили більш шокуючий факт: *у різні епохи видове різноманіття відрізнялося від того, що було раніше чи пізніше*.

Наприклад, стало очевидним, що були часи, коли в морях жили дивні членистоногі — трилобіти. А також були часи водоплавних рептилій іхтіозаврів. Однак ці тварини ніколи не співіснували в часі між собою та не бачились із сучасними китами (мал. 62.1). У геологічному пласті, де знайдено напівскам'янілі рештки китів, можна знайти кістки моржів, альбатросів та інших сучасних тварин, та ніколи не було виявлено іхтіозаврів і трилобітів. У пласті із кістками іхтіозаврів знаходять прекрасні мушлі головоногих молюсків, але ніколи не виявлено трилобітів чи китів. Поруч із відбитками трилобітів можна знайти чимало давніх створінь, але не іхтіозаврів чи китів. А головне: якщо в одному місці знайдено декілька пластів із викопними рештками, то пласт із трилобітами завжди буде нижче від пласта з кістками іхтіозаврів, а той буде нижче шару з рештками китів. Отже, трилобіти існували до появи іхтіозаврів.

Так вчені прийшли до висновку: в минулому різноманіття живих істот неодноразово змінювалося. Виникало два питання. Перше: куди зникли організми, яких сьогодні немає? Друге, складніше: як з'явилися сучасні види? У пошуку відповіді з'явилися теорії, які сьогодні називаємо теоріями еволюції (власне термін «еволюція» з'явиться пізні-

ше). Згідно з еволюційними поглядами, сучасні види з'явилися шляхом зміни видів, що існували раніше, а ті, в свою чергу, також мали попередників і т. д. *Еволюція — це процес зміни видів, у результаті якого з'являються нові види.*

Мал. 62.1. Кольорами виділено решітки: напівскам'янілий череп зубатого кита (жовтий), скам'янілий череп іхтіозавра (червоний), скам'янілий трилобіт (синій). Палеонтологічні дослідження вказують, що ці тварини жили в різні часи

Теорія еволюції з'явилася для вирішення таємниці появи різноманіття видів, тобто суто наукового питання. Формулювання теорії еволюції не має на меті довести або спростувати будь-яку релігію.

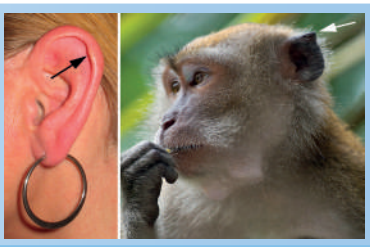
Теорія еволюції в системі біологічних знань

Слово «теорія» багатозначне. Воно є в побутовій мові і має легковажний зміст. Так, Леся Українка писала матері: «Хоч він сам часто любить говорити, що лікар мусить професіонально відноситись до своїх слабих, але у нього самого се тільки теорія, а на практиці...». Однак у науці слово «теорія» має інше значення. Ним називають упорядковане вчення, побудоване на основі численних фактів і логічних висновків. Прикладами є теорія відносності, атомна теорія, теорія дрейфу континентів або теорія еволюції. Справжні наукові теорії не лише дають відповідь на запитання, заради якого їх розроблено, але дають можливість відповісти на інші запитання, які спершу не передбачалися. Завдяки теорії еволюції стають зрозумілими явища, які неможливо логічно пояснити в інший спосіб.

У першій половині XIX століття припущення, що сучасні види з'явились шляхом зміни інших видів, допомогло пояснити факти в анатомії. Часом у різних видів відмічали появу органів, не типових їхньому виду, але звичайних в інших видів. Наприклад: у людей буває ряд сосків

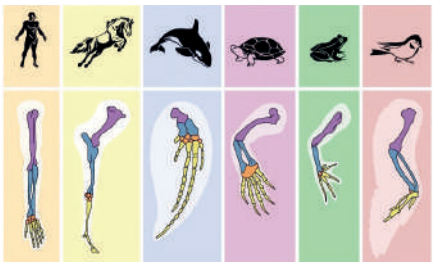
уздовж тулуба або обличчя, заросле волоссям, у дельфінів інколи відомі задні кінцівки. Ці приклади спантеличували, однак завдяки еволюційному вченню стало зрозуміло: це прояви ознак, що були у предків. Такі випадки повторної появи ознак предків назвали *атавізмами*.

Зазвичай атавізми рідкісні, та не всі. Горбик вушної раковини є атавізмом загостреного вушка приматів (мал. 62.2). Поміж жителів Іспанії ця ознака наявна щонайменше в 10%. У Швеції вона зустрічається значно частіше — її мають більш ніж 55% шведських школярів. А скільки учнів та учениць у вашому класі має горбик вушної раковини?



Мал. 62.2. Горбик вушної раковини (вказано стрілкою)

Одночасно із терміном «атавізм», з'явилося поняття про рудименти — органи, що наявні в усіх представників виду, але їхня функція незначна порівняно зі схожими органами інших видів. Прикладом є сліпа кишка в людини. Подібні органи є в багатьох хребетних тварин (корів, зайців та ін.). У людей сліпа кишка корисна складова імунної системи, але вони суттєво не впливає на життя. Тому сліпу кишку людини вважають рудиментом, а сліпу кишку корови чи зайця — ні. Згідно із теорією еволюції, рудименти є залишками органів, що виконували важливе значення у предків, та згодом їх призначення стало більш простим.



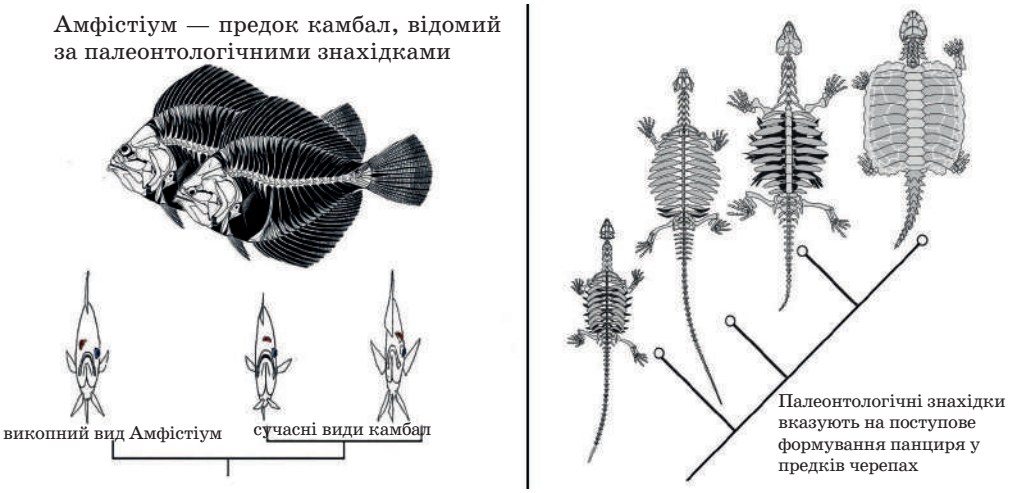
Мал. 62.3. Гомологічні органи на прикладі передньої кінцівки хребетних тварин. Однакові елементи позначено кольором

Анатоми здавна помітили, що деякі органи мають схожу будову. Наприклад, передні кінцівки хребетних тварин влаштовані за однаковим принципом: одна довга кістка в плечовому відділі, дві довгих кістки в передпліччі, багато дрібних кісток та фаланги пальців у кисті. Описана схема характеризує руку людини, крило птаха, ласт кита (мал. 62.3). Не всім така конструкція зручна, у жаб закладається дві кістки передпліччя, які потім зростають в одну, в ембріогенезі птахів зростаються кісточки кисті. Чому таким різним на вигляд тваринам притаманний однаковий план будови? Теорія еволюції пропонує пояснення: тому що вони — нащадки одного виду, в якого передня кінцівка мала описану будову.

Органи, що мають однакове походження, назвали *гомологічними органами*. Відомо чимало прикладів: кінцівки хребетних тварин, ротові органи комах, видозміни листків або стебла в рослин і багато інших. Слід розрізняти *аналогічні органи* — органи, що мають різне походжен-

ня, але схожі, оскільки виконують схожі функції. Наприклад: колючки кактуса (видозміна листка) і колючки глоду (видозміна стебла), крило комахи і птаха.

Згідно з еволюційним підходом, частина видів, відомих у викопному стані, є предками сучасних видів. Поміж них мають бути перехідні форми, тобто види, що суміщають у собі ознаки далеких предків і, водночас, прояв поступових еволюційних змін. У XIX столітті перехідні форми були радше припущенням, що мало підтвердити теорію еволюції, сьогодні відомі конкретні приклади. Зокрема, предки камбал. У сучасних камбал обидва ока розташовано на одній стороні тіла (правій або лівій, залежно від виду). Палеонтологічні дослідження виявили риб, що мали очі, які остаточно ще не зайняли положення на одному боці (мал. 62.4). Показові палеонтологічні знахідки предків черепах, на яких помітно поступове утворення панциря.



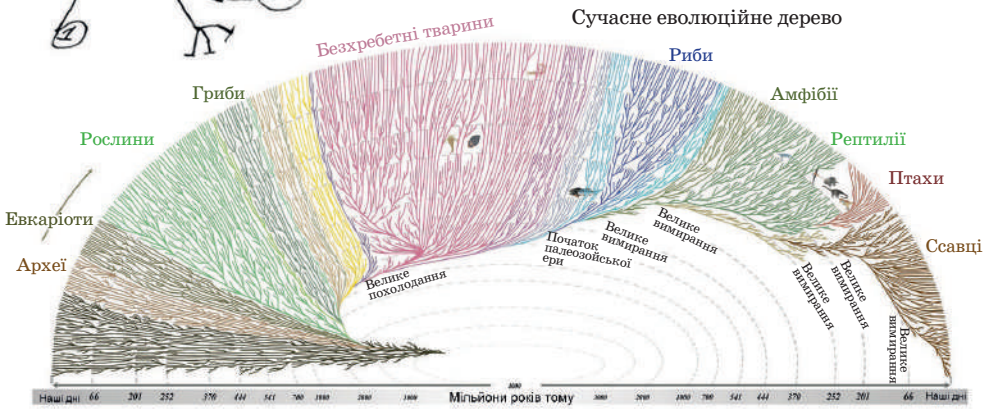
Мал. 62.4. Перехідні форми на прикладі викопних решток предка камбал та предків черепах. У камбал праве та ліве око позначено синім та червоним кольором, зверніть увагу на поступове переміщення очей у предка

У XX столітті, із розвитком молекулярних досліджень з'явилося чимало фактів, що підтверджують теорію еволюції. Як ви знаєте, всі живі організми містять білки, що складаються з одних і тих же 20 амінокислот. Чому саме 20, хоч відомо сотні амінокислот, що не увійшли до складу білків? Згідно із теорією еволюції, саме стільки амінокислот було в білках предка всіх живих істот. Послідовність амінокислот закодовано в генетичному коді, який однаковий для всіх організмів і завжди передбачає використання комбінації із чотирьох різновидів нуклеотидів, зібраних у трійки. Якби організми з'явилися незалежно один від одного, синтез білків також міг бути інакшим — дехто використовував РНК, або ДНК із більшим або меншим різновидом нуклеотидів. Але на молекулярному рівні живі істоти мають чимало схожого, що вказує на єдність походження.

Сьогодні молекулярні дослідження є основним методом дослідження еволюційного процесу. Схожість геномів різних видів вказує на їх спорідненість, відмінності, навпаки, є ознакою віддаленості. Поступово вчені вибудовують філогенетичне дерево живої природи (мал. 62.5).

Схема еволюційного дерева, яку Чарльз Дарвін намалював у нотатнику

https://cutt.ly/PtTzSBWD



Мал. 62.5. 1 — Перше еволюційне дерево було лише схемою, яку зобразив Чарльз Дарвін у своєму нотатнику. 2 — Сучасне еволюційне дерево складне. Перейшовши за QR-кодом можете проглянути еволюційне дерево у подробицях

1. Що таке гомологічні органи?
2. Яка різниця між рудиментами та атавізмами?
3. Наведіть приклади перехідних форм.
4. Яке питання призвело до відкриття теорії еволюції?
5. Як молекулярні дослідження підтверджують теорію еволюції?
6. Теорія еволюції має практичне застосування, зокрема для вироблення більш ефективних методів лікування хвороб. Поміркуйте, в яких ситуаціях теорія еволюції може бути корисна для медицини.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/stJNGphw і виконайте вправи.

63 РОЗВИТОК ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПОГЛЯДІВ. ЕВОЛЮЦІЙНА ТЕОРІЯ Ч. ДАРВІНА, СУЧАСНІ ЕВОЛЮЦІЙНІ ПОГЛЯДИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про еволюційні погляди до Дарвіна;
- чому виникли сумніви в дарвінізмі;
- про еволюційну теорію, співавтором якої був українець.

Теорії еволюції до Чарльза Дарвіна

На початку XIX століття наука наблизилася до розуміння, що сучасні види з'явилися шляхом зміни видів, які існували в минулому. Виникало запитання: що обумовило зміни? Було запропоновано декілька теорій, поміж них найкраще розроблена теорія Жана Батиста Ламарка (1744 – 1829), яку згодом назвуть ламаркізмом.

Ламарк вважав, що основою змін є внутрішнє прагнення видів до вдосконалення. Сьогодні ламаркізм зазвичай ілюструють прикладом, який сам Ламарк згадав один раз, — видовженням шиї жирафів. Довга шия, писав Ламарк, з'явилася тому, що предки жирафа тягнулися до листя. Набуті зміни передавалися наступним поколінням. Трансформацію організму та успадкування набутих ознак було пояснено на основі «теорії чотирьох рідин» — вчення, що панувало в науці декілька століть тому. Сьогодні її спростовано, отже засади ламаркізму також втратили актуальність. Окрім того, численні дослідження вказують, що ознаки, набуті впродовж життя, не успадковуються нащадками. Попри це, ламаркізм мав велике значення для розвитку біології. Як на рівень розвитку науки першої половини XIX століття, аргументи Ламарка були переконливі, а проблемні місця спонукали до нових пошуків.

Окремо згадаємо теорію Кюв'є, яку також називають *катастрофізмом*. Жорж Кюв'є (1769 – 1832) заперечував можливість суттєвих змін одного виду в інший, тобто його теорія не є еволюційною. Однак він був чудовим знавцем палеонтології і бачив, що в минулому існувало чимало організмів, яких немає сьогодні. Зникнення видів Кюв'є пояснював великими катастрофічними явищами. Сучасні види, на його думку, співіснували із вимерлими, але були менш чисельні. На запитання, чому ми ніколи не знаходимо разом кісток слонів і динозаврів, Кюв'є відповідав: «Тому що поки що не знайшли, колись знайдемо». З тих пір минуло два століття, але численні знахідки вказують, що в цьому Кюв'є помилявся. У чому цінність його робіт для науки? Як і Ламарк, Кюв'є був справжнім ученим. Подекуди він помилявся, але не вигадував і завжди намагався запропонувати аргументоване пояснення. Теорія катастрофізму опиралася на численні факти, які переконливо показали: умови на планеті в минулому суттєво відрізнялися від сучасних. Сьогодні таке твердження видається очевидним, однак у XIX столітті це було неочікуваним. Біосфера неодноразово змінювалася — цим відкриттям наука завдячує Жоржу Кюв'є.

Теорія Чарльза Дарвіна

До середини XIX століття позиції ламаркізму похитнулись, інші теорії були поверхневими. Справжньою сенсацією стала публікація в 1859 році книги Чарльза Дарвіна «Походження видів». Перш ніж представити свою теорію (її згодом назвуть *дарвінізмом*), Дарвін упродовж 28 років збирав та опрацьовував факти. Три роки він провів у навколосвітній подорожі, досліджуючи сучасне видове різноманіття різних континентів та шукаючи викопні рештки.

Як пов'язані будова дзьобів птахів зі способом живлення?

Мал. 63.1. Зяблики на Галапагоських островах представлені різними видами нащадків зграйки предкового виду, що прилетіла з Південної Америки. Пристосовуючись до живлення різними кормами, вони змінилися в різні види. Результат еволюції помітний по різниці у формі дзьоба. На схемі показано місце пошуку їжі: дерева, на землі, кактуси

Поміж спостережень, що вплинули на Дарвіна, показовий приклад зябликів із Галапагоських островів. Попри те, що острови розташовані відносно близько один до одного, наземні екосистеми відрізняються. Було виявлено відмінності в різноманітті місцевих зябликів: вони належали до різних видів, кожен з яких мав особливу будову дзьоба, прилаштовану до споживання певної їжі (мал. 63.1). Кожен вид жив лише на Галапагоських островах. Водночас була очевидною подібність усіх видів між собою та їхня спорідненість із зябликами Південної Америки. Дарвін зробив висновок, що різноманіття видів виникло завдяки тому, що зграйка птахів колись залетіла на Галапагоські острови. Поширюючись островами та пристосовуючись до нових умов, нащадки набули змін, які відрізняють їх від предкового виду та один від одного.

На відкриття Дарвіна вплинув його інтерес до селекції домашніх тварин і рослин. Науковець запропонував, що в природі існує добір, який створює різноманіття видів, подібно до того, як люди створили різноманіття порід і сортів. Селекціонери самостійно встановлюють, які ознаки вважати корисними чи шкідливими. Наприклад, зникнення маскувального забарвлення поросят — корисна ознака свиней, адже їх колись випасали на волі. Натомість підвищену агресивність тварин люди вважають шкідливою ознакою, яку намагаються прибрати. У природі також існує добір, але значення ознаки визначається тим, як вона впливає на здатність виду виживати і розмножуватися.

Повернувшись із подорожі, Дарвін продовжив роботу, вивчаючи природу своєї Батьківщини — Англії та читаючи наукові праці інших біологів. Узагальнення великої кількості даних дало можливість сформулювати основні засади дарвінізму:

- у природі завжди існує боротьба за існування;
- внаслідок боротьби за існування виникає природний добір, тобто виживання більш пристосованих організмів;
- природний добір сприяє виживанню найбільш пристосованих організмів (зверніть увагу: на думку Дарвіна, природний добір може діяти на організмовому рівні організації);
- різноманіття видів виникає внаслідок зміни предкового виду;
- еволюція відбувається шляхом повільного накопичення незначних змін.

Чарльз Дарвін навів на користь своєї теорії багато фактів. Однак, як справжній науковець він відмітив недоліки у власних судженнях. Поміж них складне питання: як з'являються нові ознаки? Можна припустити, що предок галапагоських зябликів мав здатність утворювати дзьоби різної форми. Але колись існував спільний предок птахів і ссавців. Абсурдно припускати, що ця тварина мала крила птаха, хобот слона, роги буйвола та голки дикобраза. За життя Дарвіна не знали про роль ДНК у формуванні ознак. Тому відповідь вдалось отримати пізніше, з появою і розвитком генетики. Хоча спершу здавалося, що генетика суперечить дарвінізму.

Криза дарвінізму та еволюційні теорії в XX столітті

Грегор Мендель опублікував роботу про закони спадковості в 1866 році. Однак відкриття Менделя було маловідомим біологам до початку XX століття. Повторне відкриття дало поштовх появі і розвитку генетики. Знання про рецесивні алелі стало суттєвим зауваженням проти дарвінізму. Якщо ознака передається у рецесивному стані, то як природний добір її знищить? Адже гетерозиготні організми зберігатимуть алель від дії добору. Внаслідок цих та деяких інших суджень чимало біологів першої половини XX сумнівались у реальності природного добору. На противагу дарвінізму, з'являлись інші теорії, наприклад, нові варіанти ламаркізму зі спробою пояснити еволюційні зміни не зовнішніми чинниками (природним добором), а внутрішніми.

Вихід із кризи стався в другій половині XX століття. Зусиллями різних учених, зокрема українця Феодосія Добржанського, вдалося досягнути синтезу (тобто об'єднання із якісними змінами) дарвінізму та генетики. Нову теорію назвали *синтетичною теорією еволюції* (скорочено СТЕ). Згідно з нею, мінімальною одиницею, на яку діє природний добір, є не організм, а популяція. Було знайдено відповідь на питання появи нових ознак. Вони з'являються завдяки мутаціям. Отже, спільному предку птахів та ссавців не потрібно було суміщати крила і роги, ці ознаки з'явилися пізніше внаслідок мутацій.

	Дарвінізм	Синтетична теорія еволюції	Теорія переривчастої рівноваги
Час появи	1859 рік	Друга половина XX століття	1972 рік
Рушійна сила змін організмів	Природний добір, який виникає внаслідок боротьби за існування		
Джерело появи нових ознак	достеменно не відоме	мутації генів	
Рівень на який діє природний добір	організмовий	популяційний	
Швидкість еволюції	повільна, але неперервна		швидка, але впродовж коротких періодів

Мал. 63.2. Порівняння дарвінізму, синтетичної теорії еволюції та теорії переривчастої рівноваги

Сьогодні СТЕ є основною еволюційною теорією, визнаною більшістю біологів. Є інші альтернативні думки, наприклад *теорія переривчастої рівноваги*. Її основна відмінність в поглядах на темп еволюційних змін. Згідно із теорією переривчастої рівноваги, еволюція відбувається у відносно короткочасні періоди швидких змін, після чого наступають тривалі періоди без змін (мал. 63.2). Кожна теорія має факти, що підтверджують її постулати, остаточне вирішення питання темпів еволюції є справою науки майбутнього.

1. У чому заслуга Жоржа Кюв'є для теорії еволюції?
2. Що є основною причиною появи природного добору?
3. Які еволюційні теорії з'явились у XX столітті?
4. Назвіть основні твердження дарвінізму.
5. Назвіть основні твердження синтетичної теорії еволюції.
6. Синтетична теорія еволюції підтверджена численними фактами. Проте існують факти, що не узгоджуються із СТЕ, принаймні в її сучасному вигляді. Одним із таких є еволюція слонів. У цих тварин дуже повільне розмноження, але надзвичайно швидкі темпи еволюції — впродовж 40 мільйонів років з'явилось і зникло понад 100 видів. Поясніть, чому повільне розмноження і швидкі темпи еволюції суперечать твердженням СТЕ.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/qtJNGXGe і виконайте вправи.

Виконайте **інформаційно-пошукові проєкти**: «Ж.-Б. Ламарк — автор першої еволюційної теорії» або «Ч. Дарвін (на вибір): життя і наукова діяльність».

64 ВИДОУТВОРЕННЯ ТА ЙОГО ФОРМИ. ПОНЯТТЯ ПРО МІКРО- ТА МАКРОЕВОЛЮЦІЮ. ВЗАЄМОВІДНОСИНИ МІЖ ЕВОЛЮЦІЄЮ РІЗНИХ ВИДІВ

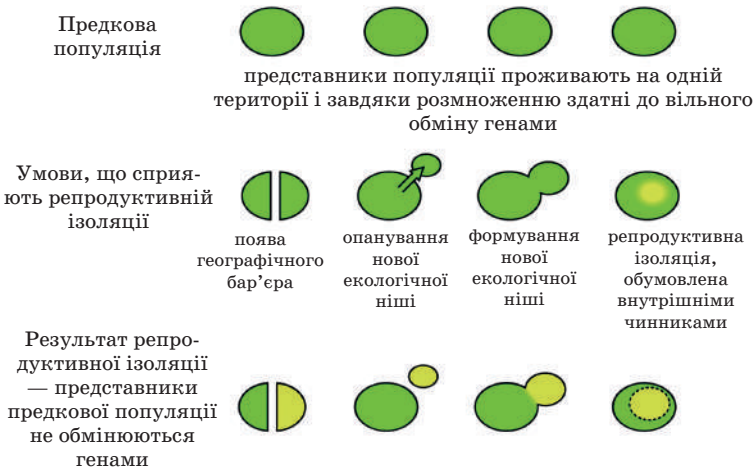
У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про умови, що сприяють еволюційному процесу;
- про різноманіття природного добору;
- причини появи в різних видів подібних ознак.

Видоутворення

Розроблено декілька теорій еволюції, які радикально відрізняються за окремими питаннями (наприклад, темпами еволюційних змін). Однак всі еволюційні теорії, як давні, так і сучасні, одностайні в головному: у природі існує процес зміни видів, внаслідок якого вони змінюються у нові види. Узагальнено цей процес називають еволюцією, а конкретні прояви можна назвати як еволюцією, так і *видоутворенням*. Наприклад: формування ссавців зі звірозубих ящерів є еволюцією, а поява зайця білого і зайця сірого від спільного предка є не лише еволюцією, але також видоутворенням.

Згідно із сучасними еволюційними теоріями видоутворення починається на рівні популяції і відбувається одним із чотирьох шляхів (мал. 64.1). Перший: розділення популяції на нові популяції, які не контактують між собою, оскільки розмежовані географічними бар'єрами. Для багатьох нелітаючих видів такими бар'єрами може бути річка, гори, пустеля тощо. Навіть для птахів розселення по океанічних островах є чинником, що розділяє популяцію.



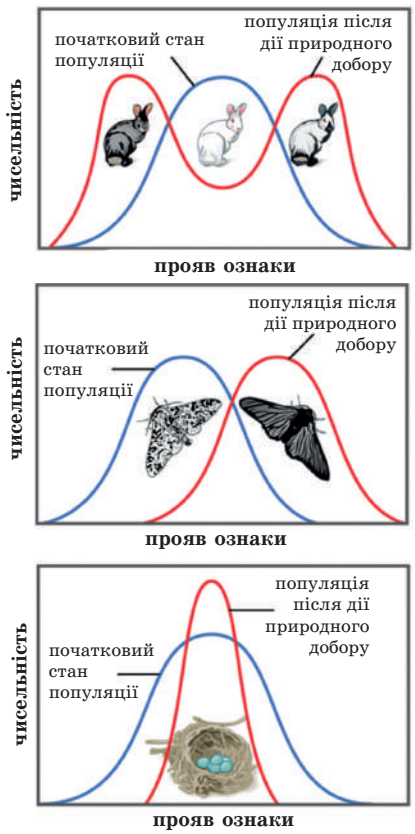
Мал. 64.1. Схема можливих варіантів видоутворення популяцій різних видів із однієї предкової популяції

Ще два шляхи видоутворення реалізуються при появі нової екологічної ніші, до якої пристосовуються деякі представники популяції. Це може бути обумовлено як зовнішніми обставинами (з'являється екологічна ніша, представники виду опановують її), так і внутрішніми (представники виду формують нову екологічну нішу).

Причини видоутворення можуть бути суто внутрішніми, коли територія популяції залишається без змін, але популяція розділяється на групи, що не спроможні до вільного обміну генами. Наприклад, диплоїдні і поліплоїдні організми зазвичай не схрещуються.

Незалежно від того, які обставини сприяли видоутворенню, завжди важлива *репродуктивна ізоляція*, тобто обмеження обміну генами між представниками предкової популяції.

У процесі видоутворення природний добір може сприяти змінам різного спрямування. Розрізняють три форми добору: дизруптивний, рушійний та стабілізуючий (мал. 64.2). *Дизруптивний добір* сприяє виживанню особин, у яких ознака набуває крайнього прояву. При *рушійному доборі* найбільше виживання в особин, що мають один із крайніх проявів ознаки. *Стабілізуючий добір* сприяє виживанню особин із проявом ознаки.



Дизруптивний добір
Особини з одним із двох крайніх проявів ознаки мають більше шансів на виживання.
У даному випадку: виживають чорні та строкаті кролі. Білі кролі мають менше шансів на виживання.

Рушійний добір
Особини з одним крайнім проявом ознаки мають більше шансів на виживання.
У даному випадку: виживають переважно чорні метелики.

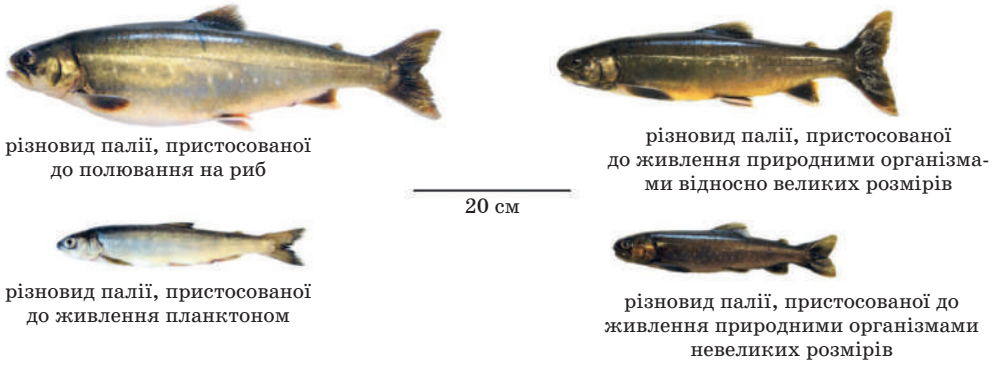
Стабілізуючий добір
Особини із середнім проявом ознаки мають більше шансів на виживання.
У даному випадку: птахи, що відкладають однотонні яйця, мають більшу успішність виживання кладки.

Мал. 64.2. Напрямок змін при різних формах природного добору (продовження)

Мікро- та макроеволюція

Генетичні та палеонтологічні дослідження виявляють численні факти еволюційних змін, щоправда в різному масштабі. Завдяки генетиці помітні перш за все невеликі зміни, результатом яких є поява

нових видів або родів. Цей процес називають *мікроеволюцією*. Палеонтологічні знахідки вказують на факт великих змін, внаслідок яких з'являються види, які розглядають як представників нової родини, ряду, класу або навіть типу. Такі зміни називають *макроеволюцією*.



Мал. 64.3. Мікроеволюційні перетворення з паліями в ісландському озері Тінгвалаватн відбулися швидко, вік озера менше 10 тисяч років. Птахи занесли на лапках ікру палії і риби утворили декілька різновидів, відсутні в інших частинах світу. Поки що їх розглядають як один вид, але очевидна дивергенція, результатом якої стане поява декількох видів

Спершу мікро- та макроеволюцію розглядали як два окремі процеси сьогодні немає такої впевненості. Згідно із СТЕ, між мікро- та макроеволюцією немає різниці. Мікроеволюційні перетворення поступово накопичуються, макроеволюція є наслідком мікроеволюції впродовж тривалого часу. У світлі теорії переривчастої рівноваги допускається розглядати мікро- та макроеволюцію як процеси, що відбуваються незалежно один від одного.

Питання співвідношення мікро- та макроеволюції ще потрібно встановити. Можливо, виявиться, що макроеволюції як окремого процесу не існує. Але в будь-якому випадку є доведеною реальність мікроеволюції. Відомі випадки, коли мікроеволюційні зміни відбуваються впродовж відносно короткого часу (мал. 64.3).

Взаємовідносини між еволюцією різних видів

У ході мікроеволюції вид-предок утворює популяції, що відрізняються від нього та між собою. Якщо набуття відмінностей триває певну кількість поколінь, то з'являються нові види. Розходження ознак у процесі еволюції називають *дивергенцією*. Зазвичай її зображують як процес утворення двох нових видів із одного предкового. Втім, це ще потребує уточнення: можна припустити еволюційну трансформацію предкового виду в новий вид, або утворення одного-двох нових видів із одного предкового. Швидкі дивергенції з утворенням великої кількості видів за відносно короткий період називають *еволюційною раді-*

ацією. Прикладом є описана раніше еволюція галапагоських зябликів (мал. 63.1). Слово «радіус» означає промінь, термін «радіація» в даному випадку вказує на розходження багатьох еволюційних ліній від предка, як променів від джерела світла.

У процесі еволюції можливий *паралелізм* — незалежна поява схожих ознак у близьких видів. Наприклад на островах різні види птахів набувають однакової ознаки — в них редуковані крила. Ймовірно, паралелізм — доволі часте явище, проте його важко виявити, особливо якщо види дуже близькі. Пристосування до схожих умов може сприяти появі подібних ознак у видів, що віддалені між собою. Це явище називають *конвергенцією*. На відміну від паралелізму, конвергенція може виникати не лише в гомологічних органах, але також аналогічних. Прикладами конвергенції є схожа форма тіла акул і дельфінів, крила кажанів і птерозаврів, колючки в американських кактусів та африканських молочаїв (пристосування до зменшення випаровування) та багато інших.

Цікаве явище *коеволюції* — поява ознак, що обумовлені співіснуванням двох видів. Особливо багато прикладів коеволюції помітно поміж квіткових рослин і комах — опилювачів, коли форма квітки полегшує доступ комахи до пилку і, водночас, ротовий апарат комахи набуває будови, щоб легше отримувати пилок для їжі, а тіло пристосоване до перенесення пилку на інші квіти. Коеволюція наявна поміж видів, що перебувають не лише в мутуалістичних відносинах, але також у відносинах хижак–жертва. Розвиток швидкості антилоп спричинений еволюцією хижих котячих, зокрема гепарда. Хижаки також еволюціонували, вдосконалюючи швидкість, щоб наздогнати здобич.

1. Назвіть різницю між мікроеволюцією та макроеволюцією.
2. Дайте визначення термінам «дивергенція» та «еволюційна радіація».
3. Назвіть різницю між конвергенцією та паралелізмом.
4. За яких умов починається видоутворення?
5. Які існують різновиди природного добору?
6. Еволюційні зміни в малих популяціях відбуваються більш швидко, ніж у великих. Це є однією з причин того, що на островах виникає високе різноманіття видів. Поясніть, що є причиною швидкого закріплення корисних мутацій у популяціях із невисокою чисельністю.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/NtJNHdQq і виконайте вправи.

Виконайте **творчий проєкт:** «Дивергенція, конвергенція та паралелізм на прикладі сучасних видів рослин і тварин України (Європи, світу)».

65 ПОГЛЯДИ НА ВИНИКНЕННЯ ЖИТТЯ НА ЗЕМЛІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- наукові факти про походження життя;
- про різноманіття поглядів на походження життя;
- про принципову різницю між ідеями абіогенезу та креаціонізму.

Наукові погляди на появу життя

Усі теорії еволюції (від Ламарка до СТЕ та теорії перерваної рівноваги) пропонують відповідь щодо процесу урізноманітнення життя, але безпосередньо не розглядають питання появи життя. Однак еволюційне вчення підводить до декількох висновків щодо походження життя.

Перший висновок: життя на планеті з'явилось один раз і всі сучасні організми мають спільного предка. На користь цього твердження вказують численні подібності живих істот на молекулярному рівні організації. Погляди, згідно з якими життя на планеті неодноразово зникало і з'являлося, суперечать науковим даним.

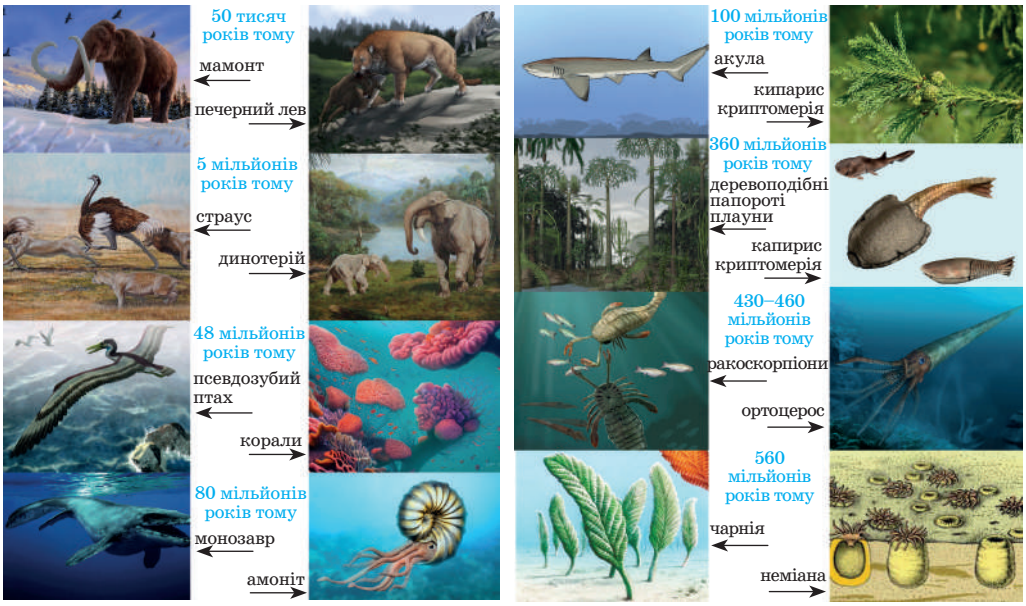
Другий висновок: життя з'явилось на планеті декілька мільярдів років тому. Згідно із сучасними даними, це сталось у проміжку 3,5–4,4 мільярда років тому. Точний вік у подальшому може бути переглянуто, зокрема за межами вказаного діапазону. Втім, це будуть саме мільярди років, а не мільйони чи тисячі. Відомі «теорії молодої Землі», згідно з якими вік планети нараховує менше мільйона років. У науці наявні альтернативні теорії, що по-різному пояснюють одне явище.

Однак «теорія молодої Землі» є не альтернативною науковою точкою зору, а псевдонауковим судженням, оскільки призводить до плутанини у фактах. Палеонтологічні дані вказують на різноманітні організми, які існували в різний час: тиранозаври жили задовго після стегозаврів, а ті жили пізніше трилобітів. І таких прикладів багато. Якщо прийняти, що вік Землі менше мільйона років, природнича історія виглядає шаленим калейдоскопом із суцільних вимирань, які не мають пояснення (мал. 65.1). Окрім того, факт єдності походження всіх живих істот неможливо логічно пояснити за умови, що планеті менше мільярда років.

Прихильники «теорії молодої Землі» наполягають, що їхні погляди потрібно розглядати для всебічного висвітлення питання. Але особливість псевдонаукових теорій у тому, що їх можна примножувати у великій кількості. У такому разі курс біології перетвориться в огляд десятків альтернативних припущень, з яких кожній людині буде до вподоби щонайбільше одне-два. Наприклад, існує «теорія староземельного креаціонізму», згідно з якою сучасні живі істоти (зокрема люди) з'явилися багато мільйонів років тому і з тих пір не еволюціонували. Також існують релігійно-філософські системи, згідно з якими життя існує вічно. Названі приклади — «теорія молодої Землі», «староземельний креаціонізм» та ідея вічності життя — суперечать одне одному. Їхня єдина

спільна ознака — вони псевдонаукові.

Окремо знаходиться припущення деяких релігійних чи філософських систем, що життя і Всесвіт загалом є ілюзією. Такі погляди не є ні науковими, ні псевдонауковими, оскільки їх неможливо довести чи спростувати.



Мал. 65.1. Реконструкція вигляду істот, рештки яких знайдено на території України. Згідно із науковими даними, вони жили в різні часи. Враховуючи, що Землі декілька тисяч років, незрозуміло, як ці створіння могли жити разом

Висновки про вік Землі в декілька мільярдів років та спільне походження всіх живих організмів є науковими, оскільки дають можливість вибудовувати логічну, несуперечливу картину світобудови. Ці висновки не мають на меті спростувати чи підтвердити релігійні системи. Поміж еволюціоністів є як атеїсти, так і представники різних релігій. Зокрема, раніше згадані видатні українці еволюціоніст Феодосій Добржанський та цитолог Борис Балінський були віруючими християнами.

Різноманіття поглядів на походження життя

Наукові дослідження дають відповідь на питання коли з'явилося життя на Землі, і вказують, що це сталося лише один раз. Проте існують різні припущення щодо того, як з'явилося життя. Їх прийнято поділяти на декілька груп: *абіогенез*, *креаціонізм*, *ненаправлену панспермію* та *направлену панспермію*.

Назва *абіогенез* походить від грецьких слів «а-» — заперечення, «біос» — життя та «генезіс» — походження. Разом — походження від

неживого. Згідно з ідеєю абіогенезу, жива матерія сформувалась із неживої. У межах цього підходу наявно багато різновидів, зокрема: самозародження життя в гарячих термальних джерелах на дні океану; самозародження життя у невеликих водно-ліпідних водоймах; самозародження життя в неглибоких водоймах із високим вмістом глинистих мінералів та інші.

Креаціонізм названо від латинського слова creatio — «творити». Це погляди, згідно з якими життя з'явилося внаслідок творіння Вищою силою. Креаціоністами називають себе прихильники «теорії молодої Землі» та «староземельного креаціонізму», однак креаціонізм — ширше поняття. Вища сила уявляється як цілковитий Абсолют, що не потребує нічого для свого існування, навіть часу. Відповідно питання «Де була Вища сила до створення Всесвіту?» або «Хто створив Вищу силу?» в системі поглядів креаціонізму позбавлені сенсу, оскільки використано дієслова в певному часі — «була» та «створив». У деяких релігіях Вищу силу описують як особистість (таким є Бог згідно із християнством, іудаїзмом, ісламом) або енергію, позбавлену ознак особистості (в деяких релігіях Східної Азії). Існування чи відсутність Вищої сили є питанням віри, а не наукових досліджень, оскільки наука вивчає лише ті об'єкти, що мають масу, лінійні розміри та існують у часі.

Словом «панспермія» називають дві різних групи поглядів, які об'єднані лише тим, що вбачають появу життя за межами Землі. Щоб розрізняти, їх назвали «*ненаправленою панспермією*» та «*направленою панспермією*».

Назва *панспермія* утворена грецькими словами «пан» — скрізь та «спермос» — «насіння». Це ідея, що в Космосі скрізь наявні «насінини життя» — скупчення молекул, які, потрапивши на планету, зі сприятливими обставинами спроможні давати початок живим істотам. Такої точки зору притримуються прихильники *ненаправленої панспермії*. Дослідження вказують на існування в Космосі органічних молекул, але занадто простих. Невідомі навіть окремі полімери (ДНК, білки тощо) позаземного походження.

Згідно із *направленою панспермією*, життя також з'явилося на планеті із Космосу. Але це був не випадковий процес, а результат цілеспрямованого поширення живих організмів розумними іншопланетними істотами. Припускається, що вони могли це зробити без особистого відвідування Землі, наприклад, надіславши зонд із бактеріями. Довести чи спростувати ці погляди на сьогодні неможливо.

На бажання, можна примножувати припущення, комбінуючи перелічені ідеї. Наприклад, абіогенез можна поєднати з будь-якими іншими поглядами: «жива матерія з'явилась із неживої за велінням Вищої сили», «жива матерія з'явилась із неживої в Космосі і випадково потрапила на Землю», «жива матерія з'явилась із неживої на іншій планеті, еволюціонувала і розумні істоти поширили живу матерію на Землю». Також можливі подібні дії із креаціонізмом: «згустки живої матерії в

Космосі створені Вищою силою», «Вища сила створила іншопланетян, які поширили живу матерію». При бажанні, поєднуються всі погляди: «Вища сила створила в Космосі із неживої матерії живу, яка потрапила на придатну планету, еволюціонувала з утворенням розумних іншопланетян, що принесли життя на Землю». Подібні розумові вправи далекі від науки, але вказують, що питання походження життя складніше, ніж здається прихильникам тих чи тих поглядів.

Важлива відмінність між абіогенезом та креаціонізмом не в тому, як з'явилося життя, а в значенні цієї події. Вища сила, в існування якої вірять креаціоністи, могла створити життя в будь-який спосіб, зокрема хімічними реакціями, описаними прихильниками певної теорії абіогенезу. Однак, згідно з абіогенезом, це був випадковий процес, що не має осмисленої мети. Креаціоністи вважають, що поява життя є результатом творчого акту Вищої сили, відповідно життя від початку має призначення. Випадковість чи цілеспрямовані дії? Це питання розмежовує абіогенез та креаціонізм. Невідомо, чи вдасться коли-небудь отримати однозначну відповідь, схоже, це завжди буде питанням особистої віри.

Ідеї панспермії (як направленої, так і ненаправленої) пропонують пояснення появи життя на нашій планеті, але не пояснюють, як саме з'явилося життя.

1. Коли, згідно із науковими даними, на Землі з'явилися живі істоти?
2. Які факти вказують, що життя з'явилося на Землі лише один раз?
3. Згідно з якими поглядами, життя на планеті з'явилось із Космосу?
4. Наведіть приклади поєднання різних поглядів на питання походження життя.
5. Назвіть основні засади абіогенезу та креаціонізму та вкажіть головну відмінність між ними.
6. У минулому були події, які справді трапились, але наука не може їх ні довести, ні спростувати. Наприклад, уявімо, що 1 вересня 900 року князь Олег з'їв яблуко. Це може бути правдою, але якщо так, то факт жодним чином не встановити науковими методами. В нього можна лише повірити або не повірити. Тобто реальність події не означає, що її завжди можна підтвердити науковими методами. Подібна ситуація можлива із більш значимими фактами.
   По черзі розгляньте чотири варіанти: життя самозародилося; життя створила Вища сила; життя наявне в Космосі і випадково потрапило на Землю; життя на Землю було цілеспрямовано принесене інопланетянами. Кожного разу припускаємо, що обране твердження правильне і життя дійсно з'явилося так. Поміркуйте, чи існує ймовірність, що наука остаточно підтвердить подію, яка в даному випадку розглядається як реальна.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/jtJNHS54 і виконайте вправи.

66 КЛЮЧОВІ ЕТАПИ ЕВОЛЮЦІЇ ЖИТТЯ НА ЗЕМЛІ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- хто був першим: ДНК чи РНК?
- про найбільше вимирання в історії планети;
- про унікальні властивості покритонасінних рослин.

Природничу історії Землі прийнято поділяти на еони — великі проміжки часу, тривалістю щонайменше в пів мільярда років. Еони поділяють на ери, ери на періоди і т. д. (послідовність і коротка характеристика еонів, ер і періодів зображена на другому форзаці підручника). Межа між різними етапами визначається за змінами в біосфері. Радикальна перебудова екосистем по всій планеті дає підстави розділити минуле Землі на еони. Глобальні зміни трохи меншого масштабу відображені в поділі на ери, ще менші — в поділі на періоди, які поділяють на епохи.

Схема із геологічними еонами, ерами, періодами та епохами вказує на послідовність змін видового різноманіття та структури екосистем.

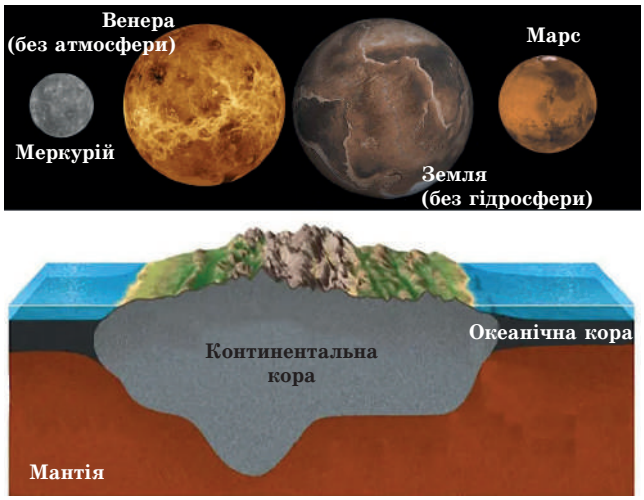
Упродовж існування планети змінилося три еони: архейський еон (4 млрд — 2,5 млрд років тому), протерозойський еон (2,5 млрд — 539 млн років тому) та фанерозойський еон (почався 539 млн років тому, триває дотепер).

Поява і розвиток життя в архейському еоні

Приблизно 4 мільярди років тому на Землі з'явилися живі організми. Ймовірно, цьому передувала стадія, яку назвали «РНК-світ». Як ви знаєте, властивості живих організмів визначаються білками, а структура білків закодована в ДНК. Але якби появі життя передувало ДНК, то воно не могло утворити білки, навіть за наявності амінокислот. Синтез білків починається із реплікації ДНК, для цього потрібні ферменти, які також є білками. Гіпотеза «РНК-світу» позбавлена цієї дилеми. Встановлено, що РНК може бути не лише тимчасовим посередником у синтезі, але й самостійним носієм інформації, подібним до ДНК. Понад те, виявлено *рибензими*, тобто РНК із ферментативною активністю, які спроможні замінити білки-ферменти. РНК достатньо для простих біохімічних реакцій самовідтворення, і тому припускають, що появі життя передував «РНК-світ».

Перші живі організми були прокаріотичними автотрофними істотами. Безперечно, більшість належало до хемотрофних бактерій. Їхня діяльність докорінно змінила планету. На відміну від Меркурія, Венери та Марса, кора Землі поділяється на два різновиди: океанічну та континентальну. Різниця між ними не в наявності води на поверхні, а щільності. Континентальна кора менш щільна, тому при зіткненні з океанічною завжди йде вгору, формуючи континенти (мал. 66.1). Пони-

жена щільність континентальної кори є результатом діяльності хемосинтезуючих бактерій, яка триває досі. Ці крихітні організми не видні людському оку, але вони створили континенти!



Мал. 66.1. Завдяки діяльності хемотрофних бактерій, на Землі з'явився особливий тип кори — континентальна кора, яка вирізняється меншою щільністю. Склад Меркурія, Венери та Марса в загальних рисах схожий, але кора однорідна

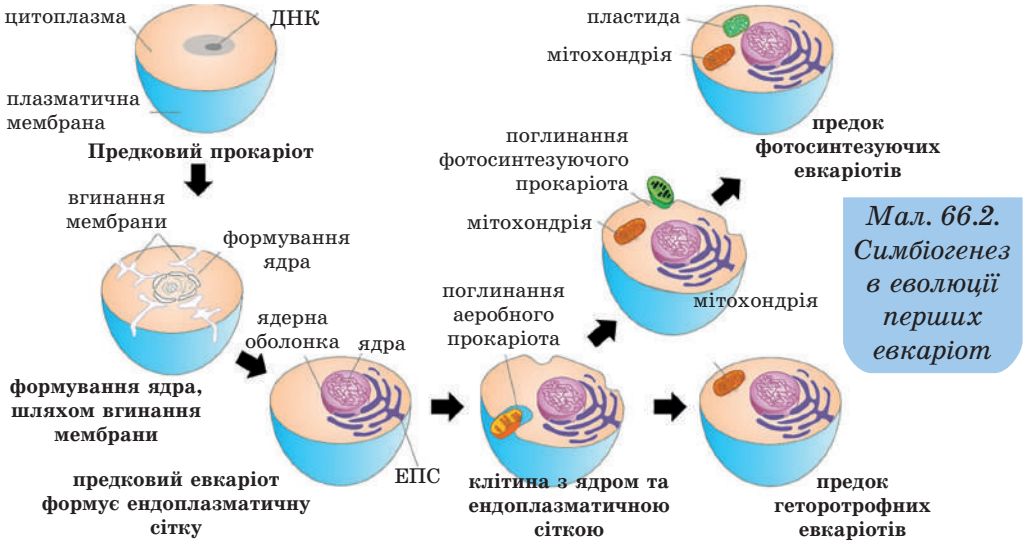
На початку архейського еону з'явилися фотосинтезуючі прокаріоти, зокрема ціанобактерії. На ранніх етапах природничої історії атмосфера не мала кисню, відповідно не було озону й ультрафіолетові промені безперешкодно досягали поверхні планети. Бактерії вразливі до дії ультрафіолету, тому мешкали на глибинах більше 10 метрів — вода слугувала захистом. Можливо, фотосинтез виник як спроба нейтралізувати дію променів і опанувати верхню товщу океану.

Розвиток життя в протерозойському еоні

Завдяки діяльності фотосинтезуючих організмів на планеті почала зростати кількість кисню. Спершу він окислював гірські породи океанічного дна. Завдяки цьому на початку протерозойського еону з'явилися великі поклади залізних руд, які через 2,5 мільярда років стануть джерелом заліза для людської цивілізації. Далі кисень почав накопичуватися в атмосфері та океані. Більшість живих істот тих часів були облігатними анаеробними організмами. Поява і підвищення вмісту кисню 2,4–2,0 мільярди років тому призвела до *Кисневої катастрофи* — масового вимирання, найбільшого в історії біосфери. Вижили прокаріоти, які навчились існувати в кисневому середовищі і навіть використовувати кисень для підвищення ефективності енергетичного обміну. Це дало змогу утворити складніші форми життя, зокрема перших евкаріотичних істот, що з'явилися приблизно 1,7 мільярда років тому. Еволюція евкаріот відбувалася завдяки *симбіогенезу* — поєднанню декількох прокаріотичних організмів в одноклітинний евкаріотичний (мал. 66.2). Тому двошарову мембрану має не лише клітина, але також органели із власною ДНК (мітохондрії та пластиди). У минулому їхні попередники були окремими прокаріотичними істотами.

Протерозойський еон — час появи основних еволюційних ліній евкаріот, у другій половині еону вже існували багатоклітинні рослини, гриби, тварини. Але життя, як і раніше, залишалося виключно в океані. Суходіл був пустельним, за відсутності рослинності, що укріплює береги, прісні водойми швидко зникали.

Багатоклітинні тварини протерозойського еону досягали розмірів до 2 метрів. Однак у трофічній піраміді зазвичай займали місце консументів 1-го порядку або редуцентів. Консументи 2-го і вищих порядків були нечисельними. Слабкому протистоянню хижаків і жертв сприяла відсутність у тварин тих часів скелетних утворів. Тому рештки істот протерозойського еону рідко зберігаються у викопному стані. На території Хмельницької області знаходять скам'янілості тих часів, втім подібних місць на планеті небагато.



Мал. 66.2. Симбіогенез в еволюції перших евкаріот

Розвиток життя в палеозойську еру

Близько 540 мільйонів років тому тварини розвинули здатність утворювати тверді скелетні утвори, цю подію назвали *Скелетною революцією*. Вона позначає перехід від протерозойського еону до фанерозойського. Скелети збільшують можливості для нападу, захисту та швидкості пересування. Тому зросло різноманіття консументів 2-го і вищих порядків, екосистеми стали складнішими. Протистояння хижаків і жертв прискорило природний добір і, відповідно, сприяло еволюційній радіації. З'явилися представники майже всіх відомих типів тварин: Молюски, Членистоногі, Хордові, Кільчасті Черви та багато інших. Беручи до уваги ускладнення в різноманітті та структурі екосистем, фанерозойський еон розглянемо на прикладі окремих ер у його складі: палеозойської (539–252 мільйони років тому), мезозойської (252–66 мільйонів років тому) та кайнозойської (66 мільйонів років тому — дотепер).

На початку палеозойської ери, в кембрійському періоді було мало

фільтраторів і бентосних організмів. Тому в океані було багато гниючих решток, що часто призводило до руйнування екосистем. У зв'язку із цим тварини були невеликих розмірів (до 1,5 метра), суттєво не відрізнялися між собою за розмірним класом. Розподіл на хижаків і жертв був нечіткий, одні і ті ж самі види могли бути як хижаками, так і жертвами, що посилювало боротьбу за виживання. У різних груп тварин з'явились органи зору, почала ускладнюватися нервова система. Цим періодом датовані найдавніші приклади маскувальних структур, поява соціальності та турботи про нащадків.

У наступному, ордовицькому періоді збільшилось різноманіття фільтраторів, а головне, бентосних організмів, що переробляли мертву органіку на дні. Океан став прозорим, із більшим вмістом кисню. З'явиласяможливість збільшувати розміри, в екосистемах сформувався розподіл трофічних рівнів, схожий на сучасний, коли кожна група істот займає певні рівні.

Упродовж силурійського та девонського періодів відбувалось опанування суходолу різними групами організмів. Ймовірно, безхребетні тварини пристосовувалися до життя поміж водоростей, викинутих на узбережжя, і поступово сформували перші ґрунти. З'явилися перші наземні рослини, гриби та тварини. Поява наземної рослинності укріпила береги і зробила можливим формування довготривалих прісних водойм. У девонському періоді деякі представники кистеперих риб перейшли до життя на суходолі, давши початок першим амфібіям.

Пригадайте, що таке мікориза. Ознаки цих утворів відомі на скам'янілих рештках силурійського періоду, тобто мікориза присутня впродовж всієї природничої історії наземних рослин і вкрай важлива для них.

У кам'яновугільному періоді на планеті були представники всіх відділів рослин, окрім Покритонасінних. Не лише Голонасінні, але й папороті, плауни та хвощі досягали великих розмірів. У цей період з'явилися комахи, але вони споживали лише листки та генеративні органи рослин, а не гризли деревину. Тож давні дерева не мали погризів і були добре захищені від дії грибів і бактерій. Відмерла рослинність не перероблялась у повному обсязі, її поклади з часом сформували кам'яне вугілля. У цей період з'явилося декілька еволюційних ліній первинноназемних хребетних — рептилій. Поміж них — звірозубі ящери — предки ссавців.

У пермському періоді сталося масштабне вимирання, в результаті якого зникло понад 75% різноманіття. Велике вимирання та відновлення біосфери знаменує завершення палеозойської ери.

Розвиток життя в мезозойську та кайнозойську ери

На перший погляд, мезозойська та кайнозойська ери суттєво відрізняються між собою хоча б тим, що в мезозої існували динозаври велетенських розмірів. Та насправді біосфера змінилася не так радикально,

як упродовж палеозойської ери. Трофічні мережі мезозою та кайнозою подібні — добре розвинуті не лише морські, але й наземні та прісноводні екосистеми. Різниця більше у видовому складі, навіть динозаври сьогодні представлені більш ніж 10 тисячами видів — це птахи.

У тріасовому періоді, з якого починається мезозойська ера, збільшилося різноманіття амніот — з'явилися черепахи, крокодили, динозаври та інші. Деякі рептилії (птерозаври) опанували політ. До них, упродовж 170 мільйонів років літали лише комахи. Також у тріасовому періоді з'явилися ссавці. Поміж унікальних особливостей звірів — будова щелепового апарата, завдяки чому вони спроможні жувати. Здатність жувати дала змогу опанувати екологічні ніші, неможливі для рептилій, ті, які сьогодні займають гризуни, копитні, кити, що проціджують планктон. Однак, еволюційна радіація ссавців почнеться лише наприкінці мезозойської — початку кайнозойської ер. Більшу частину мезозою це були невеликі нічні всеїдні звірки.

Більшість птерозаврів ловили рибу, а екскременти залишали на суходолі. Завдяки цьому в колообігу Фосфору з'явилася ланка повернення елемента з океану на суходіл. Якби не поява птерозаврів, до сьогодні Фосфору в колообігу було б значно менше. Поміркуйте, для яких сполук живим організмам потрібен Фосфор.

В юрському періоді в межах групи динозаври сформувалась еволюційна група птахів. У крейдяному періоді з'явилися перші покритонасінні рослини. Завдяки швидкому розмноженню квіткові потіснили голонасінних і змінили біоми планети. Багато видів покритонасінних еволюціонували з утворенням одно-дворічних рослин із мичкуватою кореневою системою. Вони утримують верхній шар ґрунту, ослабивши його вимивання в океан, і цим самим змінили хімічний склад гідросфери. Окрім того, покритонасінні вирізняються високою здатністю утворювати отрути для захисту. Багато рослиноїдних рептилій не могли пристосуватися до змін, оскільки просто заковтували їжу. Краще пристосовані ссавці, які спершу подрібнюють їжу, деякі мають складний шлунок із симбіотичними бактеріями. Розвиток покритонасінних і ссавців посприяв глобальній перебудові в біосфері і, можливо, був однією із причин вимирання істот мезозойської ери. Наприкінці ери, 66 мільйонів років тому Земля зіткнулась із астероїдом, що посилило кризу. Вихід із неї знаменував початок кайнозойської ери, біосфера дедалі більше набувала сучасного вигляду. Поміж подій кайнозойської ери особливо відмітимо еволюцію однієї із груп мавп, результатом якої стала поява нашого виду.

1. Назвіть групи організмів, що з'явились у протерозойському еоні.
2. Назвіть групи організмів, що з'явились у палеозойську еру.
3. Назвіть групи організмів, що з'явились у мезозойську еру.
4. Коли і як з'явились евкаріотичні організми?

5. Як рослини змінювали екосистеми палеозойської та мезозойської ер?
6. Упродовж природничої історії біосфери відбувалися події, без яких неможлива Промислова революція та сучасний науково-технічний прогрес. Назвіть ці події та вкажіть їхню роль в історії людства.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/vtJNJbJT і виконайте вправи.

67 ЕВОЛЮЦІЯ ЛЮДИНИ ТА ЇЇ ОСНОВНІ ЕТАПИ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про унікальні особливості приматів, що посприяли появі людей;
- про дивергенцію роду Людина;
- чи зупинилась еволюція людини.

Згідно із теорією еволюції, всі сучасні істоти виникли завдяки зміні видів, що існували в минулому. Це стосується і виду *Homo sapiens* (Людина розумна), до якого належимо ми. Порівняльно-анатомічні та молекулярні дослідження вказують, що люди належить до групи Людиноподібні мавпи з ряду Примати.

Важливо розуміти, що слово «людина» може мати різні значення, залежно від позиції, з якої розглядається. Природничі науки, зокрема біологія, розглядають людей виключно як фізичне тіло, що складається із молекул, клітин, тканин та органів. На цьому рівні людина і шимпанзе мають більше спільних ознак, ніж шимпанзе і кіт. Оскільки шимпанзе і кіт є тваринами, то людина також тварина. У природничих науках неможливе питання «Як людина пішла від мавп?», адже *Homo sapiens* є одним із видів мавп. На рівні особистісних відносин, а також для гуманітарних наук (культурології, політології, юриспруденції та інших) людина також є фізичним тілом, водночас розглядається з точок зору, де очевидна відмінність людей від тварин. У такому випадку питання появи людей складне і допоки що без однозначної відповіді. Зауважте, що біологічна складова людини важлива для гуманітарних наук, хоч і не є вичерпною. Отже, знайомство із *антропогенезом* — біологічною еволюцією людини цінне для всіх дисциплін.

Ранні етапи антропогенезу та унікальні ознаки предків людей

Ряд Примати відокремився від інших ссавців у першій половині кайнозойської ери, приблизно 55 мільйонів років тому. Ці тварини були пристосовані до життя у верховітті тропічного лісу, де поміж запаху квітів, фруктів та опалого листя нюх неефективний. Тому в предків приматів ослабло хімічне чуття, натомість розвинувся кольоровий бінокулярний зір, що корисно для пошуку їжі і пересування поміж гілок.

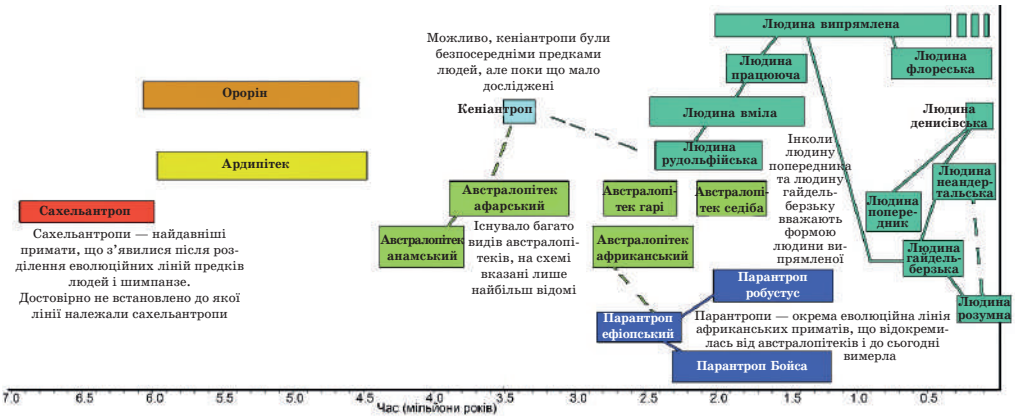
Лобні долі кори головного мозку, які відповідають за обробку нюхової інформації, стали в пригоді для розвитку мислення — примати напрочуд кмітливі. До того ж вони проявляють інтерес до навколишнього світу більше, ніж інші тварини. Це ризикована стратегія, часом острах корисний. Але мавпи успішно перетворили зацікавленість в основу виживання, що стало однією із передумов появи людей.

Близько 25 мільйонів років тому в тропічних лісах Азії сформувалась еволюційна гілка людиноподібних мавп, нащадками якої є орангутани, горили, шимпанзе та люди. Вони еволюціонували зі збільшенням розмірів та поступовим переходом до життя в нижньому ярусі лісу. У приматів, що живуть на деревах різниця між кистю та стопою незначна, верхню та нижню кінцівку використовують для пересування та захоплення предметів. У людиноподібних мавп більш помітна різниця між кистю та стопою. Розділення функцій в подальшому дало змогу предкам людей сформувати вмілі руки і виготовляти знаряддя праці.

У ході антропогенезу неодноразово відбувалася дивергенція, в результаті чого з'явилося багато видів споріднених з нами, але не наших предків. Людина розумна — єдиний сучасний представник групи, видове різноманіття якої в минулому було більшим.

Приблизно 7 мільйонів років тому предки шимпанзе та людей жили в тропічних лісах Африки, далі їхні еволюційні шляхи розійшлися (мал. 67.1). Від цього часу починається антропогенез — етап еволюції людей, відокремлений від інших сучасних приматів. Одним із найдавніших видів в антропогенезі є *ороріни* — мавпи із розміром мозку, близьким до шимпанзе, але здатні до прямоходіння. 5 мільйонів років тому вони еволюціонували в *ардипітеків*, які ще більше вдосконалили прямоходіння. Ймовірно, тоді почала формуватись екологічна особливість нашої еволюційної гілки від інших людиноподібних мавп — послаблення К-стратегії. Більшість людиноподібних мавп мають вкрай низьку народжуваність і низьку смертність. Це ризикований шлях для видів, що живуть у дикій природі. При раптових змінах середовища чисельність знижується і не завжди вдається її відновити. Сьогодні низька чисельність горил, шимпанзе та орангутанів обумовлена перш за все діяльністю людини — браконьєрством та вирубкою лісів. Але в минулі віки чисельність згаданих приматів була невисокою, а поширення обмежувалося тропічним лісом. Вони завжди балансували на межі вимирання, оскільки занадто розвинули К-стратегію. У предків людей помітна еволюція в напрямку послаблення К-стратегії. Навіть у людини розумної ще 2–3 століття тому народжуваність і смертність була вищою, ніж у інших людиноподібних мавп. Це збільшило можливості пристосовуватися до змін середовища і поширитись по всіх біомах. Цікаво, що сьогодні нашому виду притаманні надзвичайно низькі народжуваність і смертність. Упродовж декількох поколінь, не змінившись біологічно,

ми відмовилися від однієї з екологічних особливостей, яку розвивали щонайменше 6 мільйонів років.



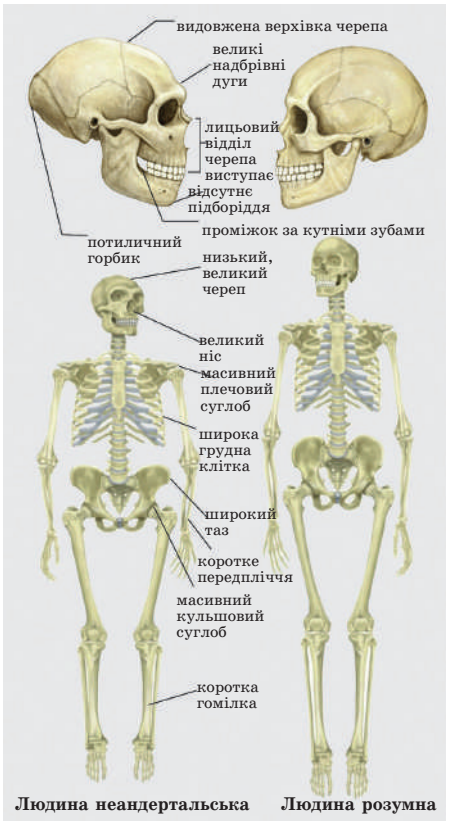
Мал. 67.1. Схема антропогенезу (кольором позначено представників різних родів)

Збільшення народжуваності можливе за умови, якщо самець допомагатиме самці турбуватися про молодь. Ймовірно, наші предки були більш моногамними, ніж інші людиноподібні мавпи. Цю поведінкову особливість не виявити по викопних рештках, є опосередковані докази — зменшення різниці між самцями і самицями. Сьогодні різниця між чоловіками і жінками виражена менше, ніж в інших людиноподібних мавп, де самець вирізняється великими іклами і вдвічі крупніший за самицю. У багатьох видів мавп у зграї чітка ієрархія з домінуванням одного або декількох самців. Внутрішні конфлікти жорстко присікаються вожаком. Він є батьком більшості дитинчат. У предків людей розподіл на шлюбні пари сприяв зменшенню агресивності, що вплинуло на зовнішній вигляд — ми маємо невеликі ікла та чіткі білки очей. В інших звірів білків не помітно, приховування поглядів зменшує ймовірність агресії з боку вожака. Люди, навпаки, дивляться у вічі, без остраху спровокувати гнів лідера. Зменшення агресивності покращило здатність домовлятися, діяти злагоджено і цим самим підвищило вміння пристосовуватись.

Вихід у савану і подальше поширення за межі Африки

Близько 4 мільйонів років тому, під впливом кліматичних змін, наші предки покинули ліси і вийшли в африканську савану. Там сформувались *австралопітеки* — різноманітна група людиноподібних мавп, у більшості видів об'єм мозку був понад 400 см^3. Вони почали послуговуватися простими знаряддями, постопово зросла частка м'яса в живленні.

2,4 мільйона років тому від якогось із видів австралопітеків сформувалася *людина вміла*. Чітка межа між давніми людьми та австралопітеками на сьогодні невідома, деякі дослідники розглядають людину вмілу як австралопітека. Для біологічної еволюції це питання несуттєве. Але



Мал. 67.2. Анатомічні відмінності між людиною розумною та людиною неандертальською

відсутність межі вказує, що культурології, філософії та іншим дисциплінам варто виробити власні означення слова «людина», а не орієнтуватися на назви біологічних видів.

У представників людина вміла об'єм мозку становив понад 600 см^3 і в подальшому збільшувався. З часом виникло декілька видів роду Людина, особливо важлива в антропогенезі роль *людини випрямленої*. Цей вид з'явився в Африці 1,8 мільйона років тому, мав великий мозок (900 см^3) та доволі складну мову. Відомо, що на цьому етапі люди вже проявляли турботу про старих або хворих членів колективу. Різні популяції людини випрямленої неодноразово виходили за межі Африки і поширились по Євразії, давши початок декільком видам, що співіснували в часі. Так 500 тисяч років тому в Європі з'явилася *людина неандертальська* (мал. 67.2). Вони ма ли великий мозок (1500 см^3), були розумними і вправними хижаками.

Приблизно 300 тисяч років тому в Африці з'явився наш вид — людина розумна, яка в подальшому поширилася за межі Африки. Подекуди види людина розумна та неандертальська схрещувалися між собою, тому всі сучасні люди, окрім деяких племен Африки, мають невелику частку генів неандертальців. Та все ж здебільшого відносини між різними видами людей були конкурентними. Розумові здібності наших предків та неандертальців більш-менш однакові, виживанню людини розумної сприяли культурні відмінності. Генетичні дослідження викопних решток вказують на високий рівень інбридингу поміж неандертальців, що призводило до прояву генетичних захворювань. Людина розумна частіше практикувала шлюбні союзи між представниками різних племен, уникаючи близькоспорідненого схрещування. Важлива зменшена внутрішньовидова агресія наших предків. Кісткові рештки неандертальців часто мають сліди травм отриманих від поєдинку з людьми.

Були й інші види роду Людина. 100 тисяч років тому на планеті співіснувало щонайменше 5 видів: неандертальці в Євразії, людина розумна в Африці та Азії, людина денисівська в Азії, невеликі популяції людини випрямленої на островах Індонезії і людина флореська на острові Флорес (Індонезія). Останні цікаві невеликим зростом (близько 1 м) та

маленьким об'ємом мозку (400 см^3). Однак вони були людьми із певною культурою, хоч і не такою складною, як в інших представників роду. Це вказує, що об'єм мозку не є достовірною ознакою.

Зникнення інших видів людей обумовлене різними чинниками: конкурентною боротьбою, несприятливими змінами середовища та розчиненням у популяціях людини розумної. Тому сучасні люди, що походять з Європи, Азії та Північної Африки, мають декілька відсотків генів, успадкованих від неандертальців. Люди, що походять зі Східної Азії та островів між Індійським і Тихим океанами, успадкували декілька відсотків генів людини денисівської.

Люди продовжують змінюватися. Помітні пристосування до швидшого бігу — зменшується мала гомілкова кістка, що робить стопу менш рухливою, але запобігає травмуванню. Дедалі частіше в колінному суглобі з'являються маленькі (менше 1 см) кісточки, що збільшують рухливість. Інший напрямок еволюції — зменшується різниця в будові скелетів чоловіків і жінок. Щонайменше одна особливість була відсутня у ранніх людей розумних і з'явилася декілька тисячоліть тому. Це — суцільний довгий сон, тоді як у наших предків упродовж доби було декілька коротких снів. Наведені дані вказують, що еволюція людини триває.

1. Коли і де відбулося розділення еволюційних ліній людей та інших людиноподібних мавп?
2. Хто такі австралопітеки?
3. Які види роду Людина співіснували в часі?
4. Поясніть, як еволюційні надбання ряду Примати посприяли появі людини розумної — виду, який спроможний заснувати цивілізацію.
5. Охарактеризуйте види роду Людина, що мешкали за межами Африки.
6. Ймовірно, зменшення агресивності, покращення уміння домовлятися та діяти колективно з'явилися ще тоді, коли предки людей жили в тропічному лісі Африки. Але перехід до савани значно прискорив еволюцію в цих напрямках. Поясніть, чому зміна біотопу сприяла розвитку вказаних особливостей.

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/4tJNJ3qN і виконайте вправи.

Виконайте **творчий проєкт** — написання есе: «Можливі напрямки еволюції виду Homo sapiens у майбутньому».

68 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

У цьому параграфі ви дізнаєтеся:

- про властивості, що поєднують живі системи всіх рівнів організації.

У сьомому класі ви розпочали курс біології знайомством із різними групами живих істот: бактеріями, рослинами, грибами і тваринами. У восьмому класі зосередилися на одному виді — людині розумній, розширивши біологічні знання та практичні навички з охорони здоров'я. Цього навчального року розглянули природу, дізнавшись про фундаментальні властивості живих систем: цілісність, самоорганізацію, саморегуляція (гомеостаз), відкритість, відтворення, спадковість та мінливість, еволюційність.

Цілісність

Будь-яка система (не лише жива) є сукупністю компонентів, пов'язаних між собою зв'язками, завдяки чому з'являються властивості системи більші, ніж сума властивостей компонентів. В основі живої матерії незначна кількість елементів — переважно C, H, O, N, P, S та ще деякі. Але поєднання складових створює велике розмаїття біомолекул на найнижчому рівні організації живої природи і є основою різноманіття вищих рівнів. Властивості молекул залежать не лише від хімічного складу, а й від зв'язків між ними. Цілісність, що реалізується через взаємодію компонентів обов'язкова для систем на вищих рівнях організації.

Самоорганізація та саморегуляція

Одна із властивостей, що з'являється в системах внаслідок взаємодії складових, це здатність до самоорганізації. У неживій природі вона також наявна — обриси хмар, форма гір, будова сніжинок не є випадковостями, а результатом самоорганізації. Проте це пасивна самоорганізація, що виникає під впливом чинників навколишнього середовища на систему з певними характеристиками. Живі системи здатні до активної самоорганізації, часом підтримуючи її всупереч дії зовнішніх впливів. Це стає можливим завдяки саморегуляції, тобто підтримці гомеостазу. Саморегуляція властива живим системам усіх рівнів організації, але з кожним вищим рівнем вдосконалюється. Для молекул можуть виявитися критичними зникнення навіть невеликої складової (одного атома в амінокислоті, однієї амінокислоти в білку тощо). Органи можуть виконувати свою функцію при певних пошкодженнях, організм зберігає життєздатність без окремих органів. Здатність популяцій та екосистем до саморегуляції ще вища. Найкраще саморегулюється біосфера, завдяки чому життя безперервно існує впродовж 4 мільярдів років.

Відкритість

Самоорганізація та саморегуляція живих систем вражає, якщо зауважити, що вони існують не ізольовано від навколишнього середовища, а інтегровані в нього. Понад те — неживі системи спроможні безкінечно довго існувати без взаємодії із навколишнім світом. Для живих систем обмін речовиною та потік енергії ззовні є обов'язковими. Завдяки обміну речовиною межа між неживою і живою природою не така чітка, як спершу здається. Дрібні, але численні хемотрофні організми

залучають до трофічних ланцюгів неорганічну речовину. Продуценти збільшують масу не лише завдяки фотосинтезу, але й використанню відмерлих організмів, повертаючи їх у живу природу.

Відтворення

Надходження речовини ззовні не може тривати безкінечно. Досягнувши певного рівня, жива система припиняє своє існування. Це добре помітно на нижчих рівнях і менш помітно на вищих. Остаточне зникнення всіх живих систем зробило б неможливим їх існування, тому відбувається заміна — системи відтворюють себе. Відновлення молекул відбувається дуже швидко, клітин і тканин — повільніше (окремі клітини в тілі людини існують упродовж життя). Відновлення органів у багатьох тварин ускладнено, але для рослин та грибів це звичайний процес. Відтворення організмів потребує більше часу, ще складніше відтворення популяцій та екосистем. Біосферний рівень організації вирізняється тим, що не відтворює себе.

Спадковість, мінливість, еволюційність

Навколишній світ дивовижно суміщає стабільність і трансформацію. Кожен день схожий на попередні і, водночас, новий. Зміни накопичуються, і з плином часу довкілля дедалі більше відрізняється від того, що було роки, сотні, тисячі або й мільйони років тому. Ця особливість Всесвіту вплинула на відтворення живих систем. Вони повинні успадковувати від попередників властивості, що підвищують шанси на виживання. Але ідеального пристосування ніколи не буде хоча б тому, що довкілля змінюється і адаптація, що була ефективною, стає зайвою. Поява і поширення нових властивостей досягається завдяки мінливості, яка разом зі спадковістю є неодмінною супутницею процесу відтворення. Зміни із покоління в покоління становлять основу еволюції.

1. Що таке система?
2. Назвіть фундаментальні властивості живих систем.
3. Яка з фундаментальних властивостей живих систем відсутня на біосферному рівні організації?
4. Чи відрізняється здатність до самоорганізації та саморегуляції на різних рівнях організації живих систем?
5. Поясніть значення еволюційності як фундаментальної властивості.
6. Порівняйте фундаментальні властивості живих систем із властивостями такого ж спрямування в неживій природі. За результатами аналізу зробіть висновок: чи можливо провести чітку межу між живою і неживою природою?

Перевір себе

Перейдіть на сайт за QR-кодом або за покликанням https://cutt.ly/UtJNKn2j і виконайте вправи.

«Еволюція органічного світу»

1. Пошук відповіді на яке питання призвів до появи еволюційного вчення?
   а) чому зникли доісторичні істоти?
   б) як з'явилися люди?
   в) як з'явилося життя?
   г) як з'явилося сучасне видове різноманіття?
2. Яка теорія визнає дане твердження правильним: «Довга шия жирафів сформувалася внаслідок того, що в популяції предків жирафів з'явилася відповідна мутація, а природний добір посприяв поширенню мутації в популяції»?
   а) синтетична теорія еволюції *б)* теорія Дарвіна
   в) теорія Ламарка *г)* всі варіанти правильні
3. Як називають погляди, згідно з якими в космосі наявні молекули, що, потрапивши у відповідні умови, можуть дати початок живим істотам?
   а) абіогенезом *б)* креаціонізмом
   в) направленою панспермією *г)* ненаправленою панспермією
4. Якщо в популяції певного виду комах найменше виживання особин із середнім показником довжини крил, то це ознака дії:
   а) дизруптивного добору *б)* рушійного добору
   в) стабілізуючого добору *г)* всі відповіді правильні
5. Що є прикладом аналогічних органів?
   а) атавізми людини *б)* крило птаха і крило комахи
   б) крило птаха і рука людини *г)* рудименти людини
6. Появу подібних ознак у видів, що віддалені між собою, але пристосувалися до схожих умов, називають:
   а) дивергенцією *б)* конвергенцією *а)* паралелізмом *г)* радіацією
7. Розташуйте послідовність подій в історії біосфери, починаючи від найдавніших:
   а) вимирання наприкінці пермського періоду
   б) вихід хребетних на суходіл
   в) від динозаврів сформувалися птахи
   г) поява евкаріотичних організмів
   ґ) поява організмів із твердим скелетом
   д) поява ссавців
   е) поява фотосинтезуючих організмів
   є) РНК-світ
8. Установіть відповідність між рівнем організації життя та наведеними тезами про еволюційний процес:

а) на цьому рівні, згідно із теорією Дарвіна, здійснюється еволюційний процес	*1)* біосферний
б) на цьому рівні, згідно із синтетичною теорією	*2)* клітинний
в) еволюції, здійснюється еволюційний процес	*3)* молекулярний
г) на цьому рівні відбуваються мутаційні зміни	*4)* організмовий
д) теорія симбіогенезу описує зміни, що відбулися на цьому рівні	*5)* популяційно-видовий

ЗМІСТ

ВСТУП **4**
1. Властивості живої матерії 5
2. Біологія як комплексна наука. Місце біології серед інших наук 7
3. Методи біологічних досліджень 11

ТЕМА 1. ХІМІЧНИЙ СКЛАД КЛІТИНИ **14**
4. Класифікація хімічних елементів за їхнім вмістом в організмі 15
5. Неорганічні сполуки: вода, мінеральні солі та кислоти 17
6. Органічні речовини, їх функції в живих організмах. Поняття про біологічні макромолекули — біополімери 21
7. Вуглеводи та ліпіди 23
8. Амінокислоти. Білки: рівні їхньої структурної організації (конформації) 29
9. Функції та властивості білків. Ферменти (ензими), їхня роль у процесах метаболізму 33
10. Нуклеїнові кислоти і їх роль як носія спадкової інформації. ДНК: будова та властивості 39
11. РНК: будова, основні типи та їхні функції. АТФ 43
12. Біологічно активні речовини (БАР) 47
13. Неклітинні форми життя: особливості їхньої організації та функціонування 52
14. Взаємодія вірусів із клітиною-хазяїном. Роль вірусів у житті людини та в природі 56

«Хімічний склад клітини» *61*

ТЕМА 2. КЛІТИНА — СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА ОДИНИЦЯ ОРГАНІЗМУ **62**
15. Методи дослідження клітин. Типи мікроскопії 63
16. Структура евкаріотичної клітини. Ядро 66
17. Хромосоми. Поняття про каріотип 72
18. Надмембранні та підмембранні комплекси евкаріотичної клітини ... 75
19. Особливості організації прокаріотичної клітини 79
20. Транспорт речовин через плазматичну мембрану 83
21. Обмін речовин та енергії у клітині. Автотрофний і гетеротрофний типи живлення. Міксотрофні організми 86
22. Процеси фотосинтезу та хемосинтезу. Значення фотосинтезу для існування біосфери 89
23. Розщеплення речовин в організмі: безкисневе і кисневе. Етапи енергетичного обміну 93
24. Клітинна теорія. Клітинний цикл 97
25. Процеси мітозу 101
26. Процеси мейозу 104

«Клітина — структурно-функціональна одиниця організмів» *108*

ТЕМА 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ СПАДКОВОСТІ ТА МІНЛИВОСТІ ОРГАНІЗМІВ **109**
27. Гени та геноми. Будова генів про- та евкаріотів. Гени алельні та неалельні 110
28. Генетичний код та його властивості. Реалізація спадкової інформації в клітині: біосинтез білкових молекул та його етапи (процеси транскрипції та трансляції) 114

29. Формування фенотипу організмів як результат взаємодії геному з умовами навколишнього середовища 120
30. Методи генетичних досліджень: класичні та сучасні 123
31. Закони спадковості Менделя та їхні цитологічні основи 127
32. Явище зчепленого успадкування. Хромосомна теорія спадковості ..131
33. Генетика статі; успадкування, зчеплене зі статтю. Визначення статі у різних груп організмів 135
34. Геном як цілісна інтегрована система. Варіанти взаємодії алельних та неалельних генів, множинна дія генів 140
35. Ознаки, які визначаються взаємодією алелів одного (моногенні) та різних (полігенні) генів. Плейотропія. Метод родоводів 143
36. Явище цитоплазматичної (позаядерної) спадковості. Регуляція активності генів 148
37. Мінливість спадкова та неспадкова. Форми спадкової мінливості: мутаційна та комбінативна. Джерела комбінативної мінливості 153
38. Види мутацій та їх причини. Значення мутацій в еволюції органічного світу. Застосування мутаційної мінливості людиною ...155
39. Модифікаційна (неспадкова) мінливість. Норма реакції. Варіаційний ряд та варіаційна крива. Адаптивний характер модифікаційних змін. Епігенетичне успадкування 160
40. Генетика людини. Особливості генома людини. Спадкові захворювання і вади людини, захворювання людини зі спадковою схильністю, їхні причини. Медико-генетичне консультування 163
«Закономірності спадковості та мінливості організмів» *168*
ТЕМА 4. РОЗМНОЖЕННЯ ТА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ РОЗВИТОК ОРГАНІЗМІВ 169
41. Здатність до репродукції — універсальна властивість організмів. Способи розмноження організмів: статеве та нестатеве 170
42. Основні форми нестатевого розмноження організмів (за участю однієї клітини та вегетативне)....174
43. Статеве розмноження: із заплідненням та без запліднення (партеногенез) ... 178
44. Індивідуальний розвиток організму (онтогенез). Зародковий (ембріональний) розвиток (на прикладі хордових тварин). Поняття про поліембріонію....183
45. Взаємодія частин зародка, що розвивається 187
46. Поняття про стовбурові клітини та диференціацію клітин 192
47. Постембріональний розвиток у тварин та його типи. Поняття про життєвий цикл 196
«Розмноження та індивідуальний розвиток організмів» *200*
ТЕМА 5. БІОЛОГІЯ ЯК ОСНОВА СЕЛЕКЦІЇ, БІОТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНИ 201
48. Основні методи і завдання сучасної селекції. Штучний добір (індивідуальний та масовий) 202
49. Споріднене (інбридинг) та неспоріднене (аутбридинг) схрещування, їхні генетичні та біологічні наслідки. Міжвидова гібридизація 206
50. Методи селекції рослин, тварин та мікроорганізмів. Споріднене (інбридинг) та неспоріднене (аутбридинг) схрещування, їхні генетичні та біологічні наслідки. Міжвидова гібридизація....212

51. Біотехнологія. Застосування методів генетичної та клітинної інженерії в селекції, біотехнології та медицині 218
52. Генетично модифіковані організми (ГМО). Клонування організмів . 225
«Біологія як основа селекції, біотехнології та медицини» *231*
ТЕМА 6. ЛЮДИНА І БІОСФЕРА **232**
53. Біосфера як глобальна екосистема нашої планети 233
54. Структура та функціонування екосистем. Зв'язки, що виникають між організмами в екосистемах 236
55. Потоки енергії та колообіг речовин в екосистемах 241
56. Формування трофічних ланцюгів та трофічної сітки (мережі). Причини порушення стабільності екосистем та їх наслідки 245
57. Вчення В. Вернадського про біосферу та ноосферу та його значення для подолання глобальної екологічної кризи 250
58. Антропогенний (антропічний) вплив на біосферу. Види забруднення, їх наслідки для біосфери. Поняття про якість довкілля 253
59. Сучасні глобальні екологічні проблеми, екологічні проблеми в Україні 257
60. Збереження біорізноманіття як необхідна умова стабільності біосфери 260
61. Сучасні напрямки охорони природи. Концепція сталого розвитку та принципи раціонального природокористування 265
«Людина і біосфера» *269*
ТЕМА 7. ЕВОЛЮЦІЯ ОРГАНІЧНОГО СВІТУ **270**
62. Еволюція — закономірний процес розвитку біосфери 271
63. Розвиток еволюційних поглядів. Еволюційна теорія Ч. Дарвіна, сучасні еволюційні погляди 276
64. Видоутворення та його форми. Поняття про мікро- та макроеволюцію. Взаємовідносини між еволюцією різних видів 280
65. Погляди на виникнення життя на Землі 284
66. Ключові етапи еволюції життя на Землі 288
67. Еволюція людини та її основні етапи 293
68. Фундаментальні властивості біологічних систем 297
«Еволюція органічного світу» *300*

Покликання на словник термінів
https://cutt.ly/Zr5tnUzy

Покликання на список використаної та рекомендованої літератури
https://cutt.ly/Fr5tmb2q

Покликання на джерела використаного ілюстративного матеріалу
https://cutt.ly/Cr5tQTWq

Навчальне видання

ГОРОБЕЦЬ Леонід Вікторович
КРАВЕЦЬ Іван Володимирович
ЛОЙОШ Галина Павлівна
АБРАТ Олександра Богданівна
МЕРДУХ Іван Іванович

Біологія

Підручник для 9 класу
закладів загальної середньої освіти

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено

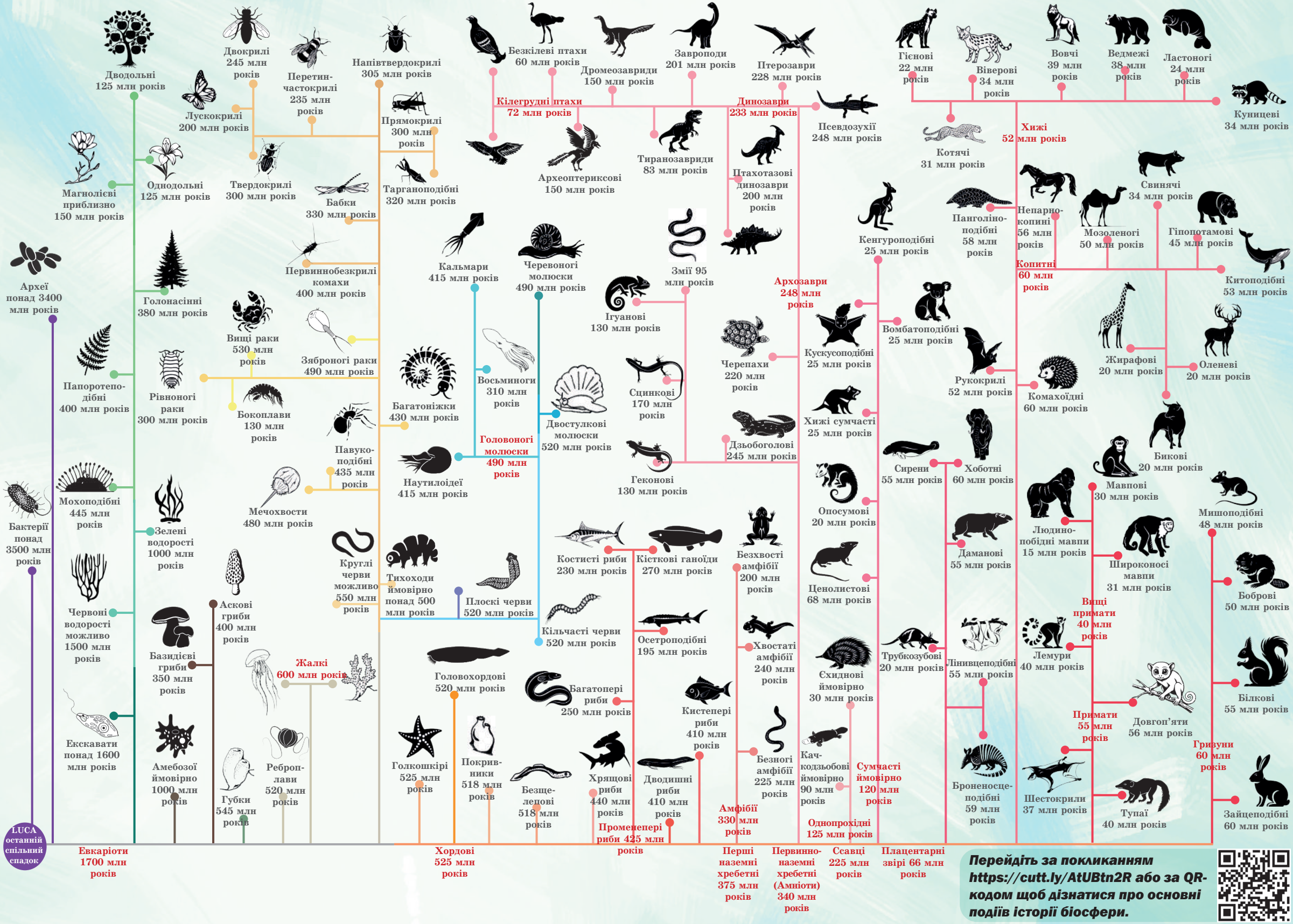
Підручник відповідає Державним санітарним нормам і правилам «Гігієнічні вимоги до друкованої продукції для дітей»

Головний редактор *Іван Білах*
Літературний редактор *Ігор Миколів*
Комп'ютерна верстка *Дарії Янік*
Обкладинка *Тетяни Волошин*
Художнє оформлення *Тетяни Волошин*

У виданні використано матеріали з інтернет-джерел, розміщених у вільному доступі

Формат 70×100/16.
Умовно-друк. арк. 24,7. Обл.-вид. арк. 17,5. Наклад 12228 прим.

ТзОВ «Видавництво Астон», 46006, м. Тернопіль, вул. Гайова, 8
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ТР №28 від 09.06.2005 р.
www.aston.te.ua, e-mail: tovaston@gmail.com



Перейдіть за покликанням https://cutt.ly/AtUBtn2R або за QR-кодом щоб дізнатися про основні події історії біосфери.