

# ТЕМА № 1: ВСТУП У МОЛЕКУЛЯРНУ БІОЛОГІЮ. БУДОВА ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ НУКЛЕЇНОВИХ КИСЛОТ. ОРГАНІЗАЦІЯ ДНК В ХРОМОСОМІ.

## ПЛАН

1. Предмет і задачі молекулярної біології.
2. Історія розвитку молекулярної біології.
3. Докази генетичної ролі нуклеїнових кислот.
4. Основні постулати молекулярної біології.
5. Хімічний склад нуклеїнових кислот. Поняття про мономери (нуклеотиди), які утворюють молекули ДНК і РНК.
6. Особливості будови ДНК та її функції.
7. Особливості будови РНК та її функції.
8. Генетичний код та його основні властивості
9. Будова хромосом
10. ДНК-зв'язувальні білки

### *1. ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ МОЛЕКУЛЯРНОЇ БІОЛОГІЇ.*

**Молекулярна біологія** - наука про механізми зберігання, відтворення, передачі і реалізації генетичної інформації, про структуру та функції нерегулярних біополімерів - нуклеїнових кислот і білків

**Мета:** пізнання молекулярних основ тих явищ, які класична біологія вивчає на рівні одноклітинних і багатоклітинних організмів. Вона вивчає структуру нуклеїнових кислот, білків, інших макромолекул, найважливіших клітинних компонентів - хромосом, рибосом, мембран, м'язових волокон - на атомно-молекулярному рівні з метою з'ясування механізму їх функціонування

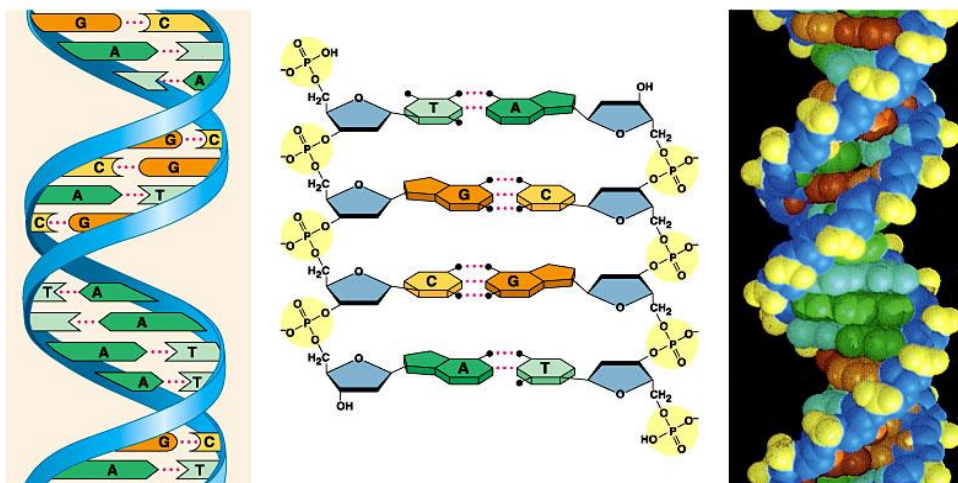
**Задачі:**

1. Розробка методів, які дозволяють розшифрувати структуру нуклеїнових кислот.
2. З'ясування молекулярних основ злорякисного росту.
3. Шляхи попередження та подолання спадкових захворювань – “молекулярних хвороб”.
4. Розшифровка молекулярних механізмів дії гормонів.
5. З'ясування молекулярних основ біологічного каталізу.
6. З'ясування деталей молекулярної будови та функціонування надмолекулярних структур (наприклад, біологічні мембрани)

Молекулярна біологія стала наукою в 1953 р. після з'ясування фізичної структури ДНК Уотсоном і Кріком. Термін "молекулярна біологія" належить Френсісу Кріку.



Дж. Уотсон и Ф. Крик



Модель будови молекули ДНК

## 2. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ МОЛЕКУЛЯРНОЇ БІОЛОГІЇ.

### Основні етапи розвитку молекулярної біології

#### 1. Романтичний період 1935-1944 рр.

Макс Дельбрюк і Сальвадор Лурія займалися вивченням репродукції фагів і вірусів, що представляють собою комплекси нуклеїнових кислот з білками. У 1940р. Джордж Білл і Едуард Татум сформулювали гіпотезу - «Один ген - один фермент».

#### 2. Другий романтичний період 1944-1953 рр.

Була доведена генетична роль ДНК. У 1953 р. з'явилася модель подвійної спіралі ДНК (Нобелівська премія).

#### 3. Догматичний період 1953-1962 рр.

Сформована центральна догма молекулярної біології: перенесення генетичної інформації йде в напрямку **ДНК** → **РНК** → **білок**  
У 1962 р. було розшифровано генетичний код.

#### 4. Академічний період з 1962 р. по теперішній час, в якому з 1974 року виділяють генно-інженерний підперіоди.

### Основні відкриття:

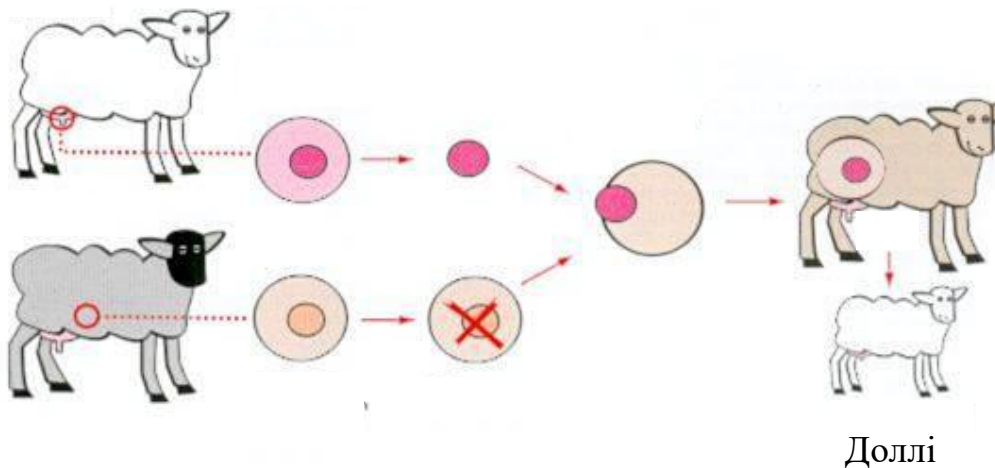
**1944р.** Доказ генетичної ролі ДНК. Освальд Ейвері, Колін Мак-Леод, Маклін Мак-Карті

**1953р. Встановлення структури ДНК.** Джеймс Уотсон, Френсіс Крік  
**1962р. Розшифровка генетичного коду.** Маршалл Нірнберг, Генріх Маттеї  
**1967р. Синтез in vitro біологічно активної ДНК.** Артур Корнберг (неформальний лідер молекулярної біології)  
**1970р. Хімічний синтез гена.** Гобінд Корану  
**1990р. Розпочато міжнародний проект "Геном людини».** Керівник Дж. Уотсон під егідою Національної організації охорони здоров'я США. Мета - визначити послідовність нуклеотидів, які складають ДНК і ідентифікувати 20000-25000 генів у людському геномі. У 2000 році була випущена робоча чернетка структури геному, повний геном - у 2003, але і сьогодні додатковий аналіз деяких ділянок ще не закінчений.

Одночасно з цим проектом стала розвиватися **генотерапія** – уведення нормальних копій пошкодженого гена людині зі спадковим дефектом.

## Клонування тварин

Клонування Доллі - першого ссавця, успішно клонованого з клітини іншої дорослої істоти (1996)



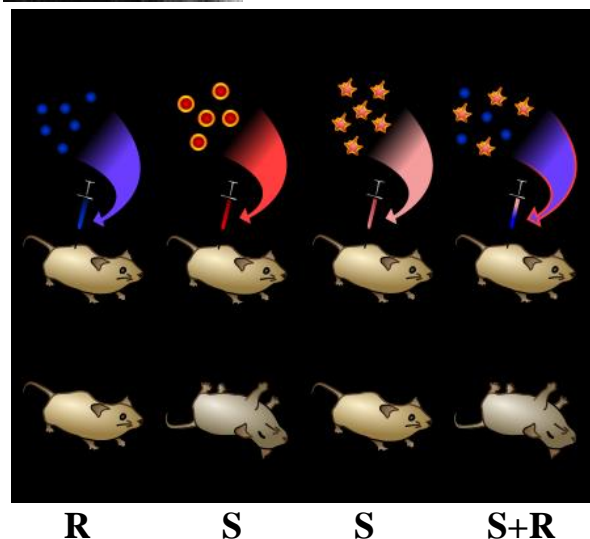
1970 - успішне клонування жаби, 1985 - клонування кісткових риб, 1996 – вівця Доллі, 1997 - перша миша, 1998 - перша корова, 1999 - перший козел, 2001 - перша кішка, 2002 - перший кролик, 2003 - перші бик, мул, олень, 2004 - перший досвід клонування з комерційними цілями (кішка), 2005 - перша собака (афганський хорт на прізвисько Снуппі), 2006 - перший тхір, 2007 - друга собака, 2008 - третя собака лабрадор за кличкою Чейс (Клонована за державним замовленням. Початок комерційного клонування собак), 2009 - перше успішне клонування верблюда. Також вперше на Близькому Сході (а саме в Ірані) була успішно клонована коза (попередні країни, яким це вдалося: США, Великобританія, Канада, Китай).

### 3. ДОКАЗИ ГЕНЕТИЧНОЇ РОЛІ НУКЛЕЇНОВИХ КИСЛОТ



#### А. 1928р. Досліди Фредеріка Гриффіта

1. Працював із пневмококами, що викликають пневмонію, двох штамів – капсульним (вірулентним, S) та безкапсульним (невірулентним, R). Інфікування мишей S приводило до їх загибелі.
2. Уведення мишам вбитих нагріванням капсульних S-пневмококів разом із живими безкапсульними невірулентними R-бактеріями приводило до загибелі тварин в результаті розмноження капсульних вірулентних S-форм. Це явище Гриффіт інтерпретував як **трансформацію**.



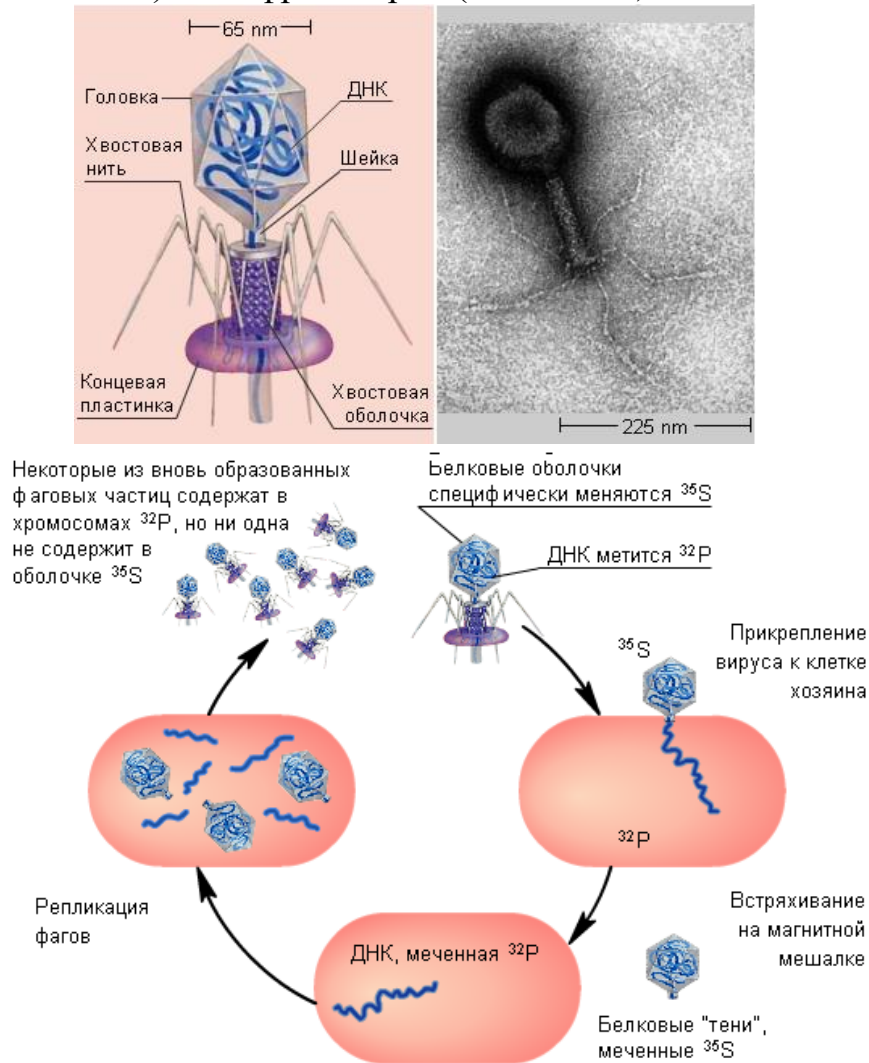
3. У 1944р. цей експеримент повторили Освальд Ейвері, Колін Мак-Леод і Маклін Мак-Карті у варіанті змішування безкапсульних пневмококів із взятих від капсульних: білків, полісахаридів або ДНК. У результаті цього експерименту була виявлена природа трансформуючого фактора – ДНК.

#### Б. 1952р. Дослід Альфреда Херші та Марти Чейз



Питання про те, що є носієм спадкових ознак - білки або ДНК - вирішувалося з кінця XIX по початок XX століття. У 1952 р. А. Херші і М. Чейз провели блискучий експеримент, довівши, що спадковим матеріалом бактеріофага T2 є ні що інше, як ДНК

Марта Чейз (1927–2003) і Альфред Херші (1908–1997)



**Суть досліду:** фаги, у яких білкова оболонка була мічена радіоактивною сіркою ( $^{35}\text{S}$ ), а ДНК - радіоактивним фосфором ( $^{32}\text{P}$ ), інкубували з бактеріями. Потім бактерії відмивали. У змивних водах не виявляли  $^{32}\text{P}$ , а в бактеріях -  $^{35}\text{S}$ . Отже, всередину потрапила тільки ДНК. Через кілька хвилин з бактерії виходили десятки повноцінних фагів, які містили і білкову оболонку, і ДНК.

**Висновок:** саме ДНК виконує генетичну функцію - несе інформацію як про створення нових копій ДНК, так і про синтез білків фагів.

**В. 1957г. Досліди Френкеля – Конрада**

штам 1    штамп 2



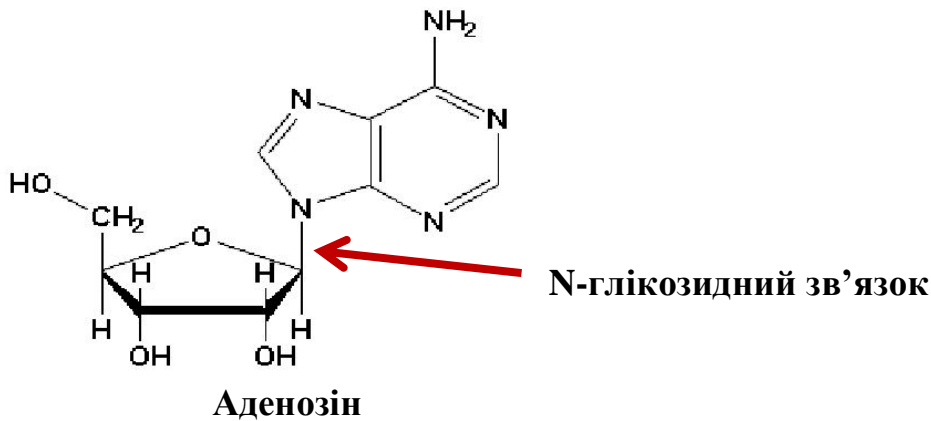
**Френкель-Конрад** працював з вірусом тютюнової мозаїки. У цьому вірусі міститься РНК, замість ДНК. Було відомо, що різні штами вірусу викликають різну картину поразки листа тютюну. Після зміни білкової оболонки "перевдягнені" віруси викликали картину поразки, характерну для того штаму, чия РНК була покрита чужим білком.

**Висновок:** не лише ДНК, але й РНК може служити носієм генетичної інформації



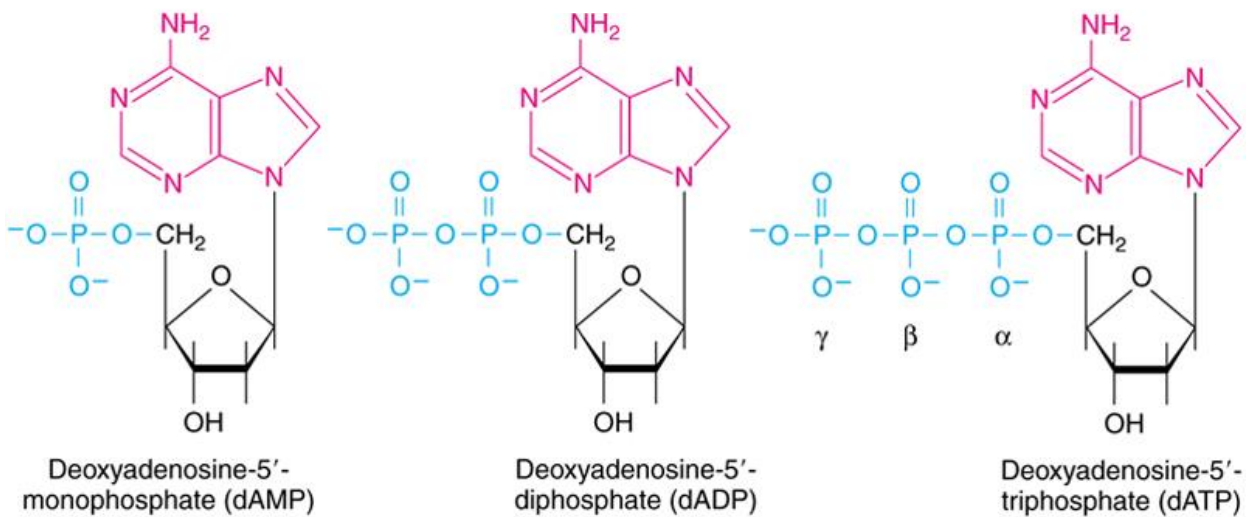


## АО + пентоза = НУКЛЕОЗИД



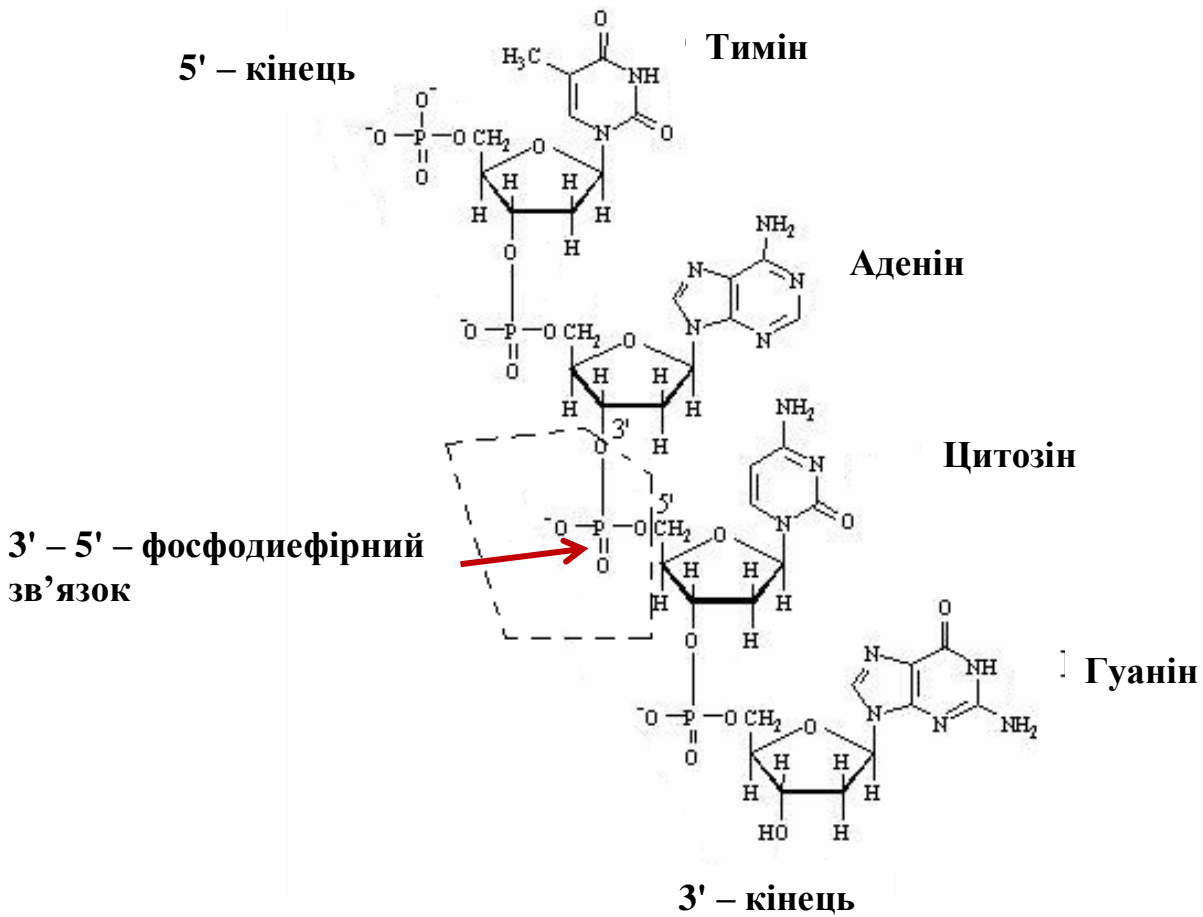
Нумерація атомів: в АО – 1, 2, 3..., у пентозі – 1', 2',

Нуклеотид = нуклеозид + 1-3 залишки  $\text{H}_3\text{PO}_4$

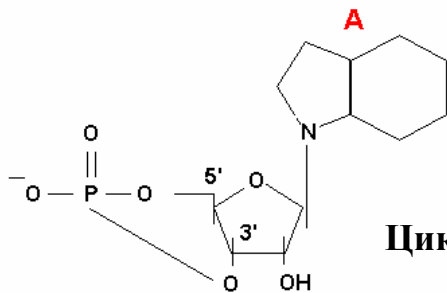


### Біологічна роль нуклеотидів

1. Універсальне джерело енергії в клітині (АТФ, ГТФ)
2. Мономери у складі нуклеїнових кислот

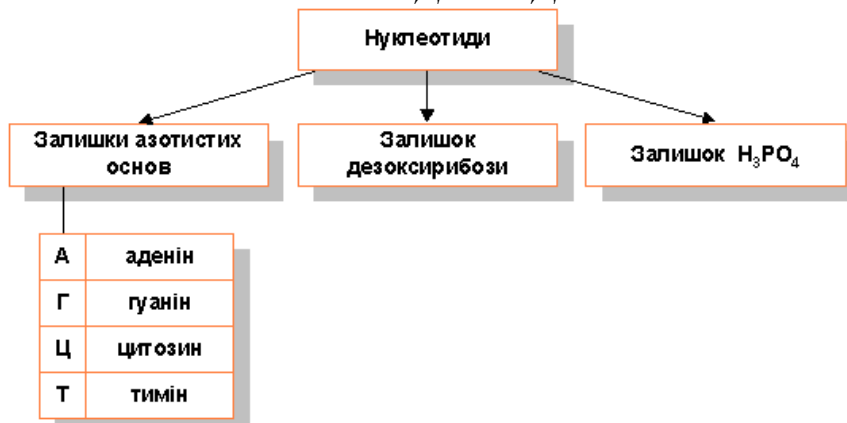


- Є активаторами і переносниками мономерів в клітині (УДФ-глюкоза)
- Є алостеричними регуляторами активності ферментів
- Входять до складу коферментів (НАД, НАДФ, ФАД, КоА-SH)
- Циклічні мононуклеотиди (цАМФ, цГМФ) є вторинними посередниками дії гормонів та інших сигналів на клітину:



Циклічний 3', 5' – АМФ або цАМФ

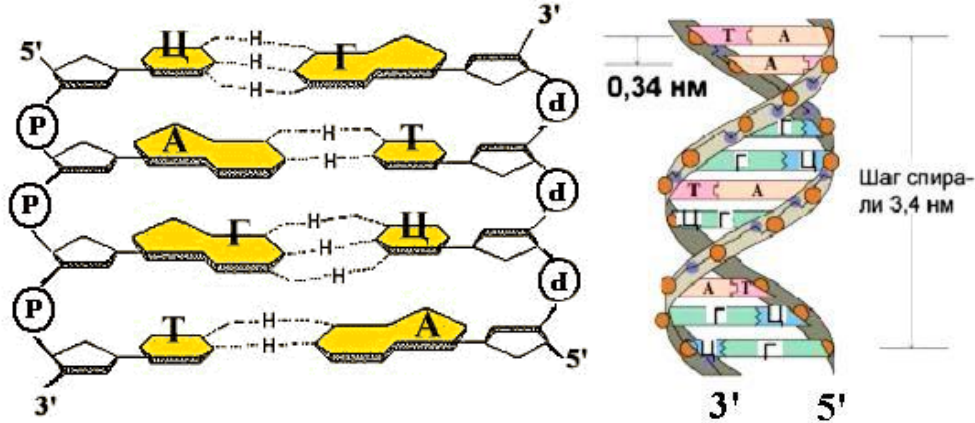
## 6. ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ДНК ТА ЇЇ ФУНКЦІЇ







### Вторинна структура ДНК



Для неї характерна:

1. *Нерегулярність*
2. *Антипаралельність*
3. *Комплементарність*
4. *Наявність регулярної вторинної структури*

### Правила Чаргафа

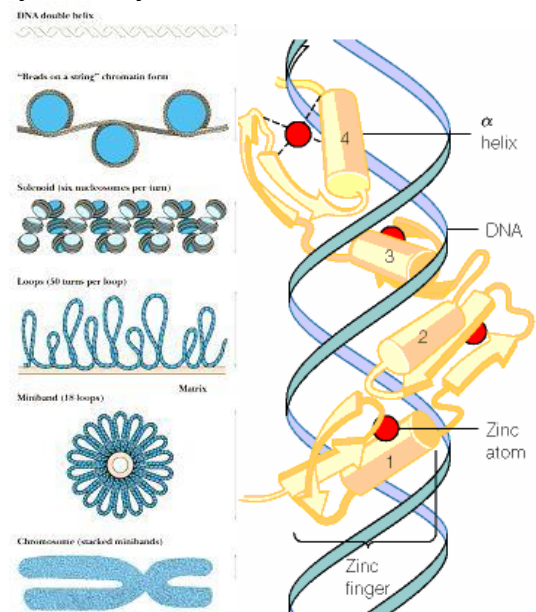
1. У всіх ДНК незалежно від походження кількість А = Т, а кількість Г = Ц.
2. Кількість пуринів = кількості піримідинів ( $G + A = C + T$ ).
3. Кількість азотистих основ з 6-аміногрупою = кількості азотистих основ з 6-кетогрупою ( $A + C = G + T$ ).
4. Різні види нуклеїнових кислот відрізняються між собою співвідношенням (А + Т): (G + С).

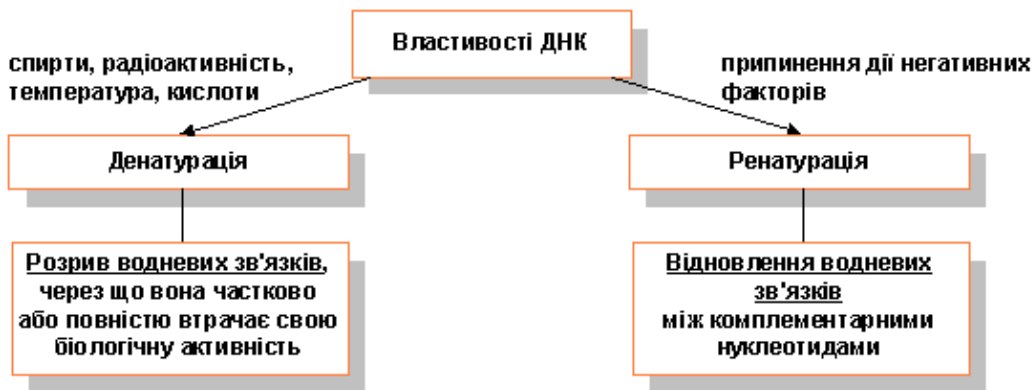
**Третинна структура ДНК** - формується тільки у зв'язку з білками

Білки, що входять до складу нуклеопротеїнів:

А. **гістонові**: багаті Арг і Ліз, мають «+» заряд (основні). Зв'язок з ДНК - іонний. 5 класів гістонів - Н1, Н2А, Н2В, Н3, Н4

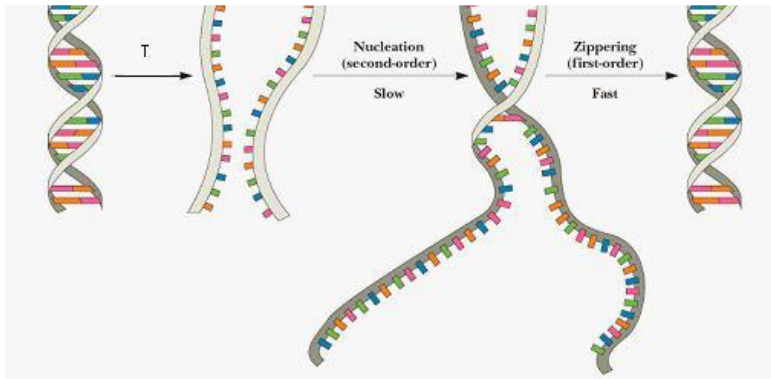
Б. **Негістонові**: ферменти та регулятори реплікації, репарації, транскрипції





## Денатурація ДНК

Нативна ДНК      Денатурована ДНК      Ренатурована ДНК



## Функції ДНК

1. ДНК є носієм генетичної інформації. Функція забезпечується фактом існування генетичного коду.
2. Відтворення та передача генетичної інформації у поколіннях клітин та організмів. Функція забезпечується процесом реплікації.
3. Реалізація генетичної інформації у вигляді білків, а також будь-яких інших сполук, що утворюються за допомогою білків-ферментів. Функція забезпечується процесами транскрипції та трансляції.

### **ФУНКЦІОНАЛЬНА РОЛЬ ЛАНЦЮГІВ ДНК**

Смисловий ланцюг ДНК      (5') – ТТЦ-АГЦ-ЦАГ-ГАЦ-ГАТ-АЦГ – (3')

Матричний ланцюг ДНК      (3') – ААГ-ТЦА-ГТЦ-ЦТГ-ЦТА-ТГЦ – (5')

### **транскрипція**

Матрична РНК      (5') – УУЦ-АГЦ-ЦАГ-ГАЦ-ГАУ-АЦГ – (3')

### **трансляція**

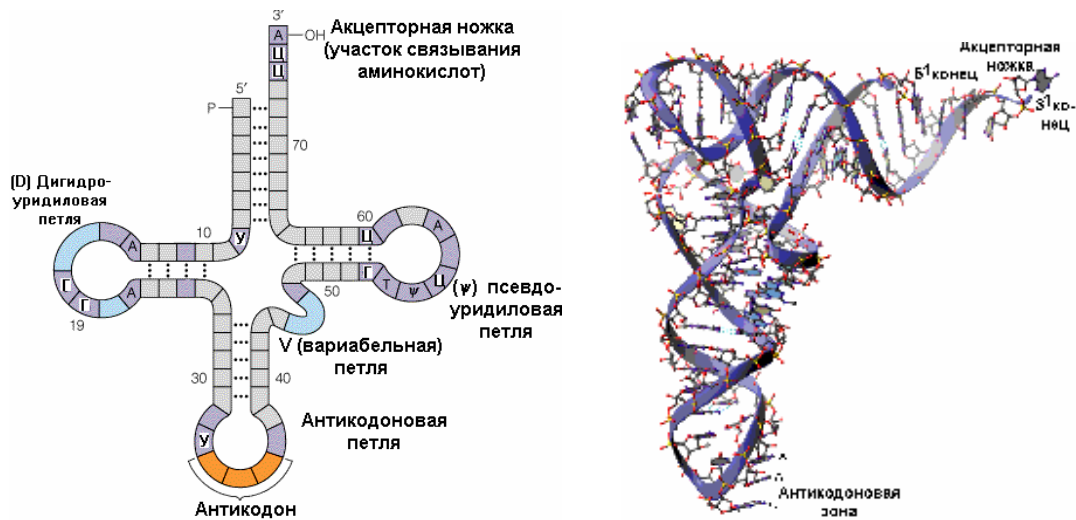
Пептидний ланцюг білка      (NH<sub>2</sub>-ФЕН-СЕР-ГЛН-АСП-АСП-ТРЕ-СООН)

## 7. ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ РНК ТА ЇЇ ФУНКЦІЇ.

### РНК та її відмінності від ДНК

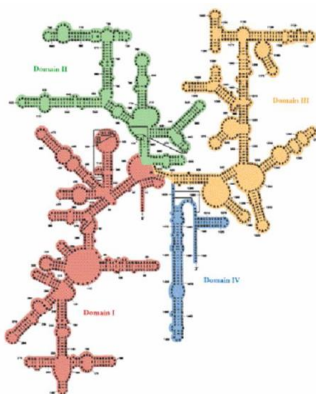
1. Азотисті основи - А У Г Ц
2. Цукор - **рибоза**
3. Присутні **мінорні** азотисті основи та нуклеозиди (псевдоурідин, дигідроурідин, ріботімідин)
4. Розмір молекули
5. Різновиди: **рРНК, тРНК, іРНК, гяРНК, мяРНК**
6. Одноланцюговість
7. Локалізація
8. Функції

### тРНК: вторинна и третинна структура



Доставляє амінокислоти до місця синтезу білка і визначає положення амінокислоти у білку.

### рРНК: вторинна и третинна структура



**рРНК + білки = рибосома**



**рРНК** входить до складу рибосом та бере участь у зв'язуванні рибосоми з тРНК

**Гетероядерні РНК (гяРНК)** – попередники мРНК. Їх менше 2 % всіх РНК (еукаріоти).

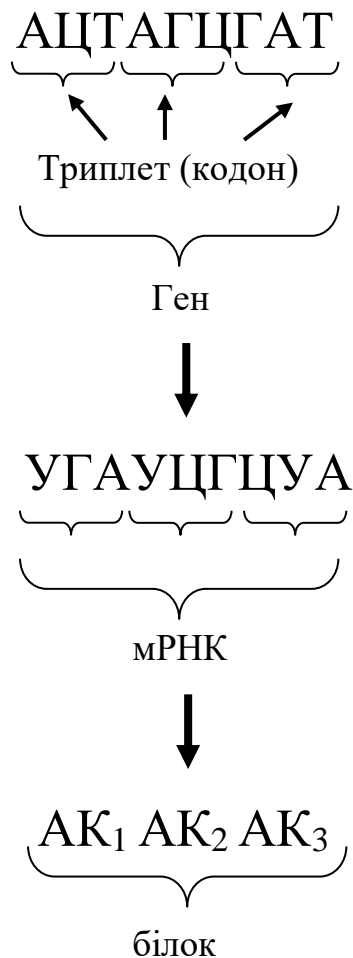
**Малі ядерні РНК (мяРНК)** – асоціюються з білками і формують малі ядерні рибонуклеопротейдні частки (мяРНП), які здійснюють сплайсинг РНК (еукаріоти).

**Матрична РНК (мРНК)** - є транскриптом певного фрагменту смислового ланцюга ДНК і синтезується в ході процесу транскрипції. мРНК - це програма (матриця), по якій будується білок, тобто служить посередником між ДНК і білком.

## 8. ГЕНЕТИЧНИЙ КОД ТА ЙОГО ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ

Розшифровка генетичного коду здійснена Ніренбергом і Кораною на початку 60-х років ХХ століття.

- Спадкова інформація записана в молекулах нуклеїнових кислот у вигляді послідовності нуклеотидів. Певні ділянки молекули ДНК і РНК (у вірусів і фагів) містять інформацію про первинну структуру одного білка і називаються генами.
- 1 ген = 1 молекула білка
- Спадкову інформацію, яку містять ДНК називають генетичною.



Властивості:

1. Генетичний код – триплетний, тобто одна амінокислота закодована трьома нуклеотидами. Послідовність з трьох нуклеотидів, носить назву **кодон**.
  - в ДНК 4 різні нуклеотиди (А, Г, Т, Ц), таким чином кількість можливих варіантів триплетів нуклеотидів дорівнює  $4 \times 4 \times 4 = 64$ .
  - 61 триплет кодують амінокислоти (один триплет - одну амінокислоту), а 3 триплети є сигналами припинення трансляції.
  - 2 кодони з 61 виконують дві функції: кодують амінокислоти і служать стартовими кодонами, з яких починається трансляція (АТГ (частіше) - для метіоніну і ГТГ (іноді) - для валіну).
2. Генетичний код – вироджений, тобто одна амінокислота може кодуватися більш ніж одним триплетом нуклеотидів
3. Генетичний код – універсальний. Будь-яка молекула мРНК при трансляції в клітині будь-якого організму призведе до синтезу поліпептиду з однаковою послідовністю амінокислот (виняток – у мітохондріях).
4. Специфічний
5. Лінійний (неперекриваємий, відсутні знаки пунктуації)
6. Односпрямований

## 9. БУДОВА ХРОМОСОМ

Хромосома - це велика молекулярна структура, де міститься близько 90 % ДНК клітини. Всі хромосоми містять дуже довгий безперервний полімеризований ланцюг ДНК, що містить гени, регуляторні елементи та проміжні нуклеотидні послідовності.

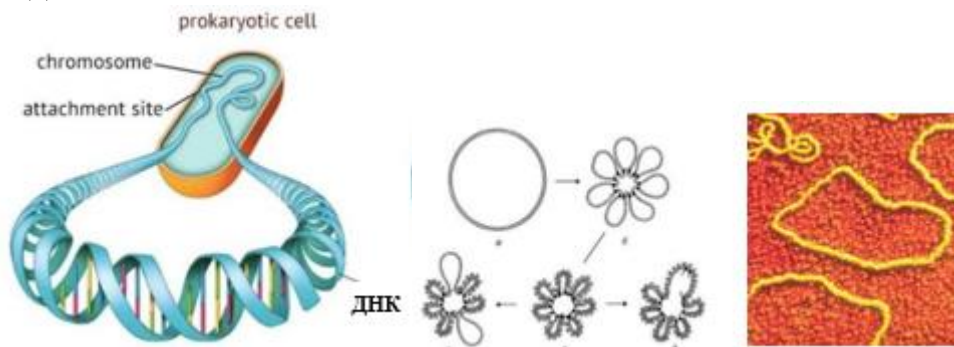
Хромосоми еукаріот складаються з лінійної макромолекули ДНК, що намотана на специфічні білки-гістони, формуючи матеріал під назвою «*хроматин*».

В клітинах прокаріот зазвичай міститься єдина хромосома, яка, на відміну від еукаріот, є кільцевою та позбавленою гістонів.

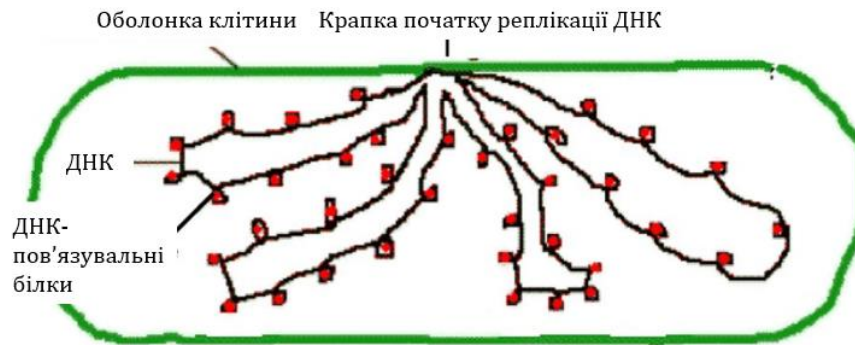
### *Нуклеоїд бактерій:*

**Нуклеоїд** – еквівалент ядра у бактерій, в якому відсутні ядерна мембрана, гістонові білки, нуклеосомна організація хроматину.

Нуклеоїд розташований в центральній зоні бактерій, має неправильну форму і не відмежовується від цитоплазми оболонкою, поєднується з цитоплазматичною мембраною і мезосомою у вигляді двохнитчастої ДНК, замкнутої в кільце і щільно покладеної на зразок клубка. Довжина цієї гігантської молекули може сягати до 1,5-3 мм, діаметр – до 2 нм.

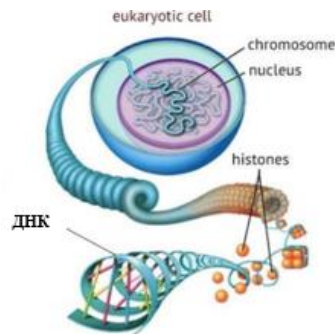


**Хромосома бактерій** – має невелику кількість білків



### Хромосома еукаріот:

Хроматин – нуклеопротейд, тобто комплекс із ДНК та білків. ДНК в ядрах клітин еукаріотів зазвичай знаходиться в тісній взаємодії з ядерними білками різних груп: основними (гістоновими) і кислими (негістоновими). Асоціюючись, ДНК та білки утворюють єдиний нуклеопротейдний комплекс – *дезоксирибонуклеопротейд* (ДНП).

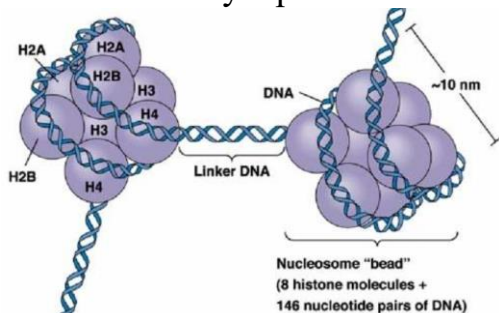


У процесі підготовки ядра клітини до поділу, в інтерфазі клітинного циклу, молекули ДНК асоціюються з білками і за їх участю починають «упаковуватися», тобто скручуватись до мінімальних розмірів. Процес пакування хроматину (ДНП) до стану розмірів хромосоми називають процесом **компактизації**. Провідна роль організації розташування ДНК, її компактизації і регулюванні функціональних навантажень належить вищеназваним білкам.

Розрізняють кілька структурних рівнів компактизації хроматину в ядрі клітин еукаріотів; від двоспіральної молекули ДНК до її суперзапакованого стану у хромосомі:

#### 1. Нуклеосомний рівень

**Нуклеосома** – основна структурна одиниця упаковки ДНК у еукаріотів, що складається з молекулярного комплексу ДНК-гістони

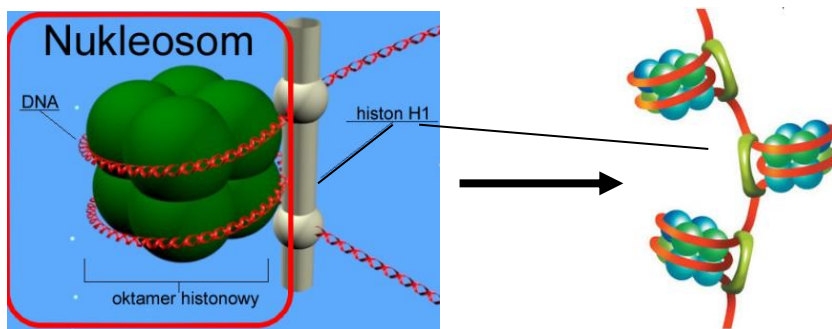




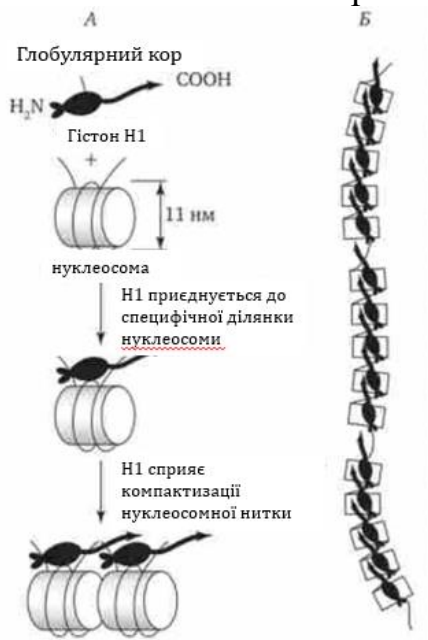
(за Gion Wendy, Adams David. Analysis of Matrix Attachment Region in an Experimental Vector, 2005).

Нуклеосоми - це ділянки нитки ДНК довжиною близько 200 пар основ, покладені на дископодібні частки гістону діаметром близько 10-11 нм. Вони являють собою октамер, або ядро, що складається з восьми молекул гістонів чотирьох типів (**H2A, H2B, H3 і H4 по дві молекули кожного**). Навколо гістонового октамера ділянка молекули ДНК завдовжки 140 пар нуклеотидів робить 1,75 витка. Діаметр сформованої в такий спосіб нуклеосоми досягає 10 нм.

П'ятий гістон, **H1**, не входить до складу нуклеосомного кора. Він контактує з ДНК в тих місцях, де подвійна спіраль входить і виходить з нуклеосомного кора. Це лінкерні ділянки ДНК, довжина яких варіює залежно від типу клітин від 40 до 50 нп. Молекули гістону (**H1**) забезпечують утворення високих рівнів упаковки ядерної ДНК:



Гістони можуть бути ацетильовані, метильовані, фосфорильовані, полі (АДФ) - рибозильовані. Гістони взаємодіють з ДНК в основному через іонні зв'язки, що утворюються між негативно зарядженими фосфатними групами ДНК і позитивно зарядженими лізиновими і аргініновими залишками гістонів.



А - з'єднання сусідніх нуклеосом за допомогою гістона H1;

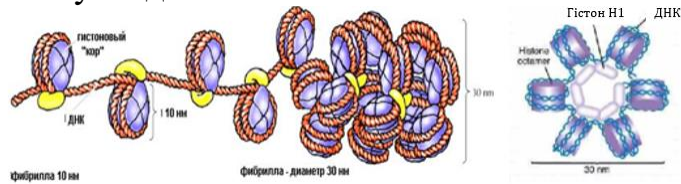
Б - ланцюжок, що утворюється нуклеосомами розділеними ділянками ДНК, вільними від білкових тіл.

## 2. Нуклеомерний рівень

Щільно упаковані нуклеосоми першого рівня утворюють рівномірну спіраль із кроком близько 10 нм. На один виток такої спіралі припадає приблизно шість нуклеосом і виникає фібрила, яка має центральну порожнину.

Вважається, що провідним фактором укладання нуклеосом є той гістон, який був відсутній на першому рівні. Це гістон H1, який забезпечує взаємодію з сусідніми нуклеосомами, як би зближуючи і притягаючи поруч розташовані нуклеосоми. Існує дві типи укладання нуклеосом:

А) соленоїдний тип укладання:



Б) нуклеомерний тип укладання:

Тут теж провідним є гістон H1, причому компактність нуклеомерів залежить від концентрації іонів магнію і групуються нуклеомери блочно по 6-8 штук. Між блоками існує довга лінкерна ділянка. Це укладання теж скорочує молекулу в 40 разів. У результаті утворюється хроматинове волокно діаметром 30 нм.



### 3. Хромомерний рівень укладання:

Пов'язаний з утворенням петлеподібних структур, які називаються хромомери. При цьому можливі два шляхи пакування ДНК за допомогою негістонових білків:

А) білки утворюють безперервний тяж, до якого кріпляться петлі нуклеомерної фібрили, Б) білки утворюють окремі центри, до яких кріпиться нуклеомерна фібрила



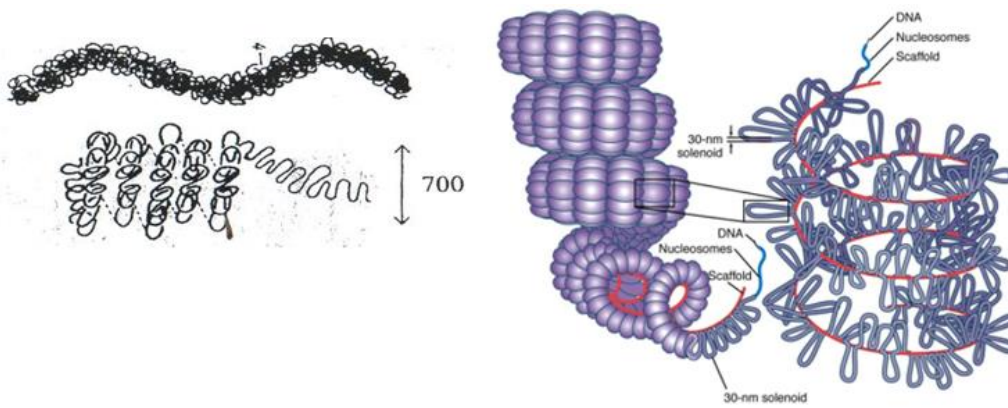
Білки утворюють безперервний тяж, до якого кріпляться петлі нуклеомерної фібрили



Білки утворюють окремі центри, до яких кріпиться нуклеомерна фібрила

### 4. Хромонемний рівень

Утворення більш великих петель із хромомерної фібрили. На поверхні упаковані молекули ДНК несуть безліч білків, які утворюють подібність чохла. Якщо видалити цей чохол, то під електронним мікроскопом можна побачити, що кожна хроматида побудована з хроматинових петель, що відходять від центральної осі.



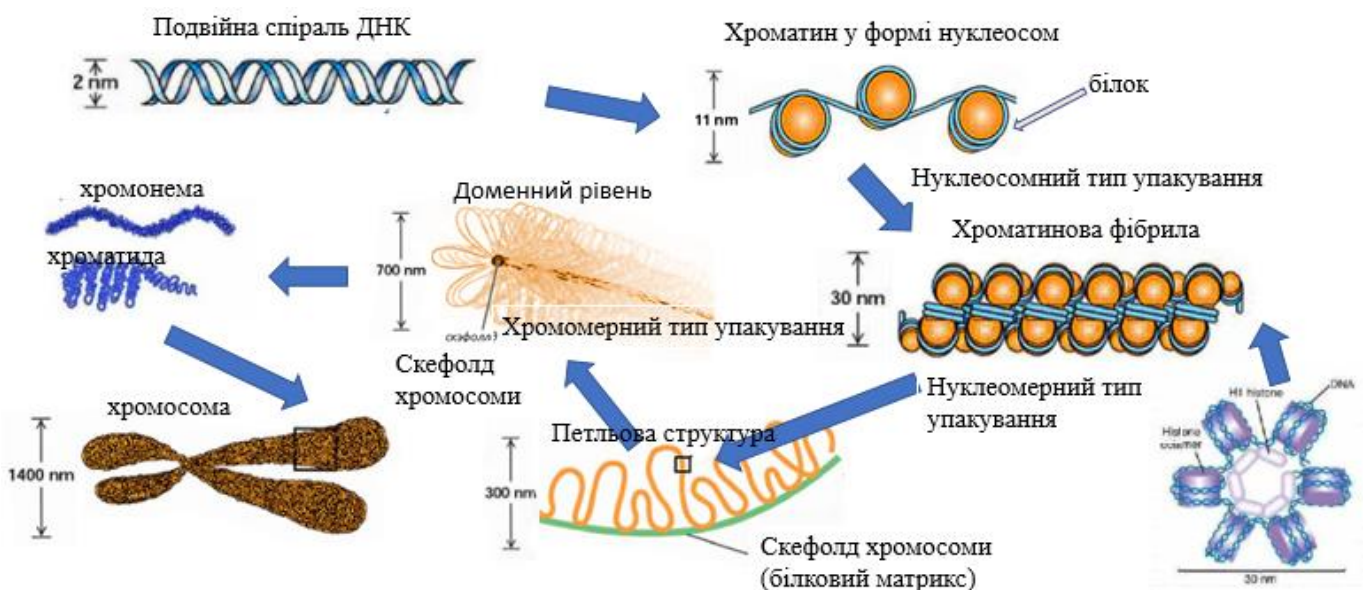
Де *Scaffold* – білковий каркас (остов, скаффолд)

Перед початком поділу ядра відбувається подвоєння хромонем, тобто їх реплікація та самовідтворення. При подвоєнні хромосомного апарату обидві сестринські хромонемі укладаються спіралью або петлеподібно разом, утворюючи хроматиду. У цьому випадку упакована хромосомна нитка досягає 700 нм завширшки.

### 5. Хромосомний рівень

Хромосома складена з двох хроматид, вона ущільнена, порівняно з молекулою ДНК, у 100-500 разів. Її товщина (ширина) сягає приблизно 1400 нм. Компактизація забезпечується петельним укладанням хромонемної нитки. На стадії метафази хромосоми вже видно світловий мікроскоп.

Наступна схема демонструє всі рівні компактизації хроматину у ядрі клітин еукаріотів:



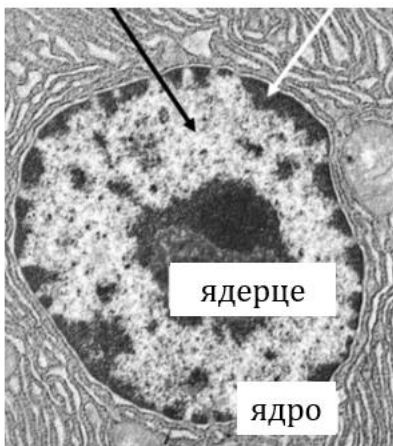
Транскрипційно-неактивний хроматин (гетерохроматин) щільно упакований і тому відповідні області інтенсивно забарвлюються. Ділянки транскрипційно-активного хроматину (еухроматину) мають більш слабке забарвлення.

Отже, хроматин - це комплекс білків з ядерною ДНК (нуклеопротейд).

Основна частина хроматину (90%) неактивна. Вона містить щільно упаковану, конденсовану ДНК - це гетерохроматин. Розрізняють конститутивний, генетично неактивний хроматин (сателітна ДНК) складається з ділянок, що не експресуються, і факультативний - неактивний в ряду поколінь, але при певних обставинах здатний

експресуватися. Активний хроматин (еухроматин) неконденсований, тобто упакований менш щільно. У різних клітинах його вміст становить від 2 до 11%. У клітинах головного мозку його найбільше - 10-11%, в клітинах печінки - 3-4 і нирок - 2-3%.

еухроматин гетерохроматин



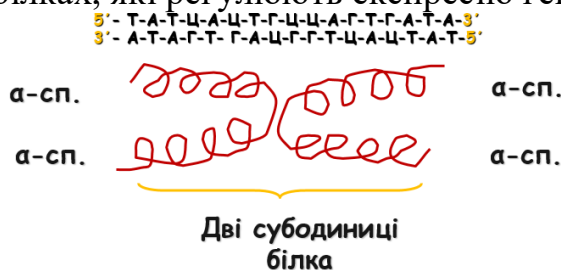
## 10. ДНК-ЗВ'ЯЗУВАЛЬНІ БІЛКИ

ДНК-зв'язувальні білки - це білки, які мають ДНК-зв'язувальні домени і, таким чином, мають специфічну або загальну спорідненість до одно- або дволанцюгової ДНК.

ДНК-зв'язувальні білки включають фактори транскрипції, які є генними модуляторами процесу транскрипції, різні полімерази, нуклеази які розрізають молекули ДНК, та гістони. ДНК-зв'язувальні білки можуть містити такі домени, як цинковий палець, «спіраль-поворот-спіраль», «лейцинова застібка» (одні з багатьох), що сприяють зв'язуванню молекули до нуклеотиду.

### *Білки, що містять мотив «спіраль-поворот-спіраль»*

Спіраль-поворот-спіраль є основним структурним мотивом, здатним зв'язувати ДНК. Кожен мономер містить дві  $\alpha$ -спіралі, з'єднані коротким ланцюгом амінокислот, які зв'язуються з основною борозенкою ДНК. Такий мотив зустрічається в багатьох білках, які регулюють експресію генів

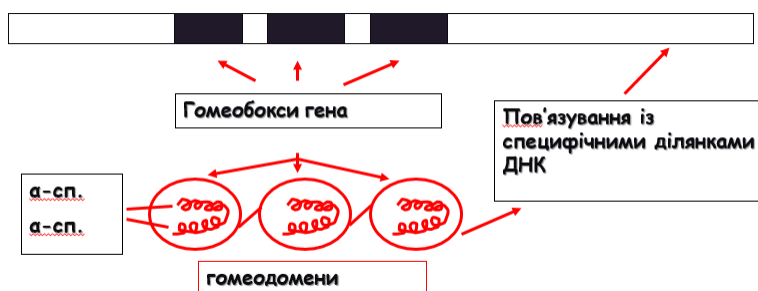


Впізнання та зв'язування забезпечується двома альфа-спіралями, одна з яких розміщується в N-кінці мотиву, друга - в C-кінці. Одна спіраль бере участь у впізнанні ДНК і найчастіше називається «пізнаюча спіраль». Вона зв'язується з великою борозенкою ДНК через серію водневих зв'язків та різних ван-дер-ваальсових взаємодій з основами. Друга  $\alpha$ -спіраль стабілізує взаємодію між білком та ДНК, але не відіграє особливо важливої ролі у її впізнанні.



### **Білки, які містять гомеодомен**

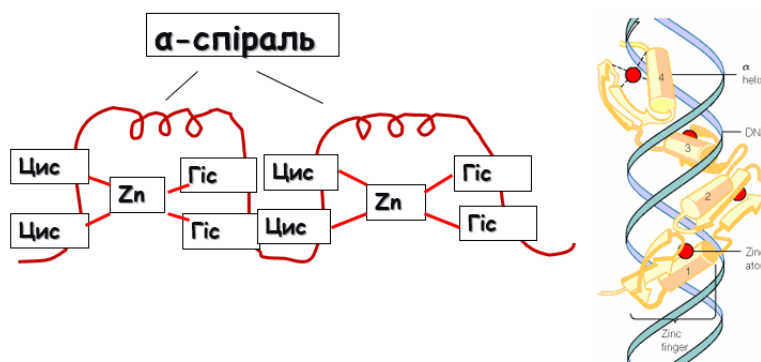
**Гомеодомен** - це структурний домен білків, що зв'язують ДНК або РНК, поширений серед факторів транскрипції. Він складається з 60 залишків амінокислот і утворює структуру спіраль-поворот-спіраль, в якій альфа-спіралі пов'язані короткими петльовими ділянками. Дві спіралі на N-кінці є антипаралельними, і довші за спіраль на С-кінці, яка перпендикулярна осям N-кінцевим петлям. Безпосередньо С-кінцева спіраль взаємодіє із ДНК. Укладання доменів білків за типом гомеодомена зустрічається виключно у еукаріотів. У еукаріотів гомеодомен індукують диференціювання клітин, запускаючи каскади генів, необхідних для утворення тканин та органів.



Послідовність амінокислот в гомеодоменах однакова. Кожний з них буде пов'язуватися з гомеобоксами гену, які мають однакову послідовність нуклеотидів.

### **Білки, які містять «цинкові пальці»**

Цинковий палець - невеликий структурний мотив білка, стабілізований одним або двома іонами цинку, пов'язаними з залишками амінокислот у складі білка. Як правило, цинковий палець включає близько 20 амінокислот та іон цинку, який пов'язує 2 гістидини та 2 цистеїни. "Цинкові пальці" взаємодіють із ДНК, РНК, іншими білками або невеликими молекулами. В основному це ДНК-зв'язувальні фактори транскрипції.



### **Білки, які містять лейцинову «застібку»**

Часто зустрічається в ДНК-зв'язуючих факторах транскрипції.

У лейциновій застібці амінокислота лейцин знаходиться приблизно в кожному 8-му положенні альфа-спіралі, в результаті чого лейцинові залишки виявляються на одній її стороні, утворюючи спіраль, в якій одна сторона має гідрофобні властивості. Лейцинова застібка утворює димерний білок завдяки зв'язуванню двох паралельних альфа-спіралей подібно до застібки-блискавки.



Комплекс лейцинової застібки (показаний синім кольором) з ДНК. Залишки лейцину, що забезпечують закріплення білкових спіралей, позначені червоним кольором.