

ФГБОУ ВО ИвГМА Минздрава России
кафедра биологии
дисциплина «Биология»

Лекция №1

**Структурно-функциональные
уровни организации
наследственного материала.
Молекулярные основы
наследственности.**

Термин «биология» впервые был предложен французским ученым Ж.Б. Ламарком в 1802 году. Этот термин состоит из двух слов греческого происхождения: **bios** – жизнь; **logos** – учение. Биология – наука о жизни.

Биология – наука, изучающая закономерности возникновения и развития жизни на Земле.

Фундаментальными свойствами жизни являются способность к **самообновлению, самовоспроизведению, саморегуляции.**

На этих трех свойствах основаны все *проявления жизни:*

- обмен веществ и энергии;
- упорядоченность биохимических реакций во времени и пространстве;
- структурированность живых объектов;

- **раздражимость** – способность давать ответную реакцию на действие факторов внешней среды;
- **гомеостаз**;
- **размножение**;
- **наследственность и изменчивость**;
- **индивидуальное и филогенетическое развитие**;
- **дискретность и целостность**.

Уровни организации жизни

Живая природа – целостная, но неоднородная система, которой свойственна иерархическая организация, элементы которой расположены в порядке от низшего к высшему.

Уровень организации живой материи это то функциональное место, которое данная биологическая структура занимает в общей системе организации мира.

Каждый уровень организации жизни характеризуется *специфическими элементарными структурами* и *элементарными явлениями*.

Выделяют 6 уровней организации жизни:

1. Молекулярно – генетический уровень

Элементарными структурами на данном уровне живого являются молекулы органических веществ.

Специфическое элементарное явление – самоудвоение молекулы ДНК, изменение строения молекулы ДНК (мутация), способность передачи информации с помощью матричного синтеза.

2. Клеточный уровень

Элементарной структурой является клетка, а элементарным явлением – реакции клеточного обмена веществ.

3. Онтогенетический уровень

Элементарной структурной единицей является отдельная особь (организм). Организм рассматривается в процессе индивидуального развития – онтогенеза. **Элементарное специфическое явление:** процесс реализации наследственной информации, закодированной в молекуле ДНК (реализация генотипа в фенотип).

4. Популяционно-видовой уровень

Элементарной единицей является популяция — совокупность особей одного вида, длительное время населяющих определенную территорию, свободно скрещивающихся и относительно изолированных от других особей данного вида. Популяция — форма существования любого вида.

Элементарными явлениями этого уровня являются изменения генофонда популяции (элементарные эволюционные явления), которые возникают в результате действия на популяцию эволюционных факторов.

5. Биогеоценотический уровень

Элементарной единицей является биогеоценоз — сообщество животных и растительных организмов, которые взаимодействуют с окружающей средой.

Элементарное явление — круговорот веществ и превращение энергии.

6. Биосферный уровень

Этот уровень объединяет все предыдущие уровни. **Элементарной единицей** является биосфера. Все круговороты веществ отдельных биогеоценозов составляют единый глобальный круговорот (**элементарное явление**).

**Молекулярно-генетический
уровень организации живых
систем**

В наследственной структуре клетки и организма в целом выделяют три уровня организации генетического материала:

- генный,**
- хромосомный,**
- геномный.**

Генный уровень

Наименьшей (элементарной) единицей наследственного материала является ген.

Ген – это часть молекулы ДНК, имеющая определенную последовательность нуклеотидов и представляющая собой единицу функционирования наследственного материала.

На генном уровне обеспечиваются индивидуальное наследование и индивидуальная изменчивость признаков.

Хромосомный уровень

Гены располагаются в хромосомах в линейном порядке. Каждая хромосома уникальна по набору входящих в нее генов.

Хромосомный уровень в эукариотических клетках обеспечивает характер функционирования отдельных генов, тип их наследования и регуляцию их активности, позволяет закономерно воспроизводить и передавать наследственную информацию в процессе деления клетки.

Геномный уровень

Геном – совокупность всех генов, находящихся в гаплоидном наборе хромосом.

* При оплодотворении два генома родительских гамет сливаются и образуют генотип.

Генотип – совокупность всех генов, заключенных в диплоидном наборе хромосом, или кариотипе.

Кариотип – полный набор хромосом, характеризующийся у каждого вида их строго определенным числом и строением.

Геномный уровень отличается высокой стабильностью. Он обеспечивает сложную систему взаимодействия генов. Результатом взаимодействия генов друг с другом и с факторами внешней среды является фенотип – совокупность всех признаков организма.

Генный уровень

Ген как элементарная единица наследственной информации выполняет определенные функции и обладает определенными свойствами.

Функции генов:

- **хранение наследственной информации;**
- **управление биосинтезом белка и других веществ в клетке;**
- **контроль за развитием и старением клетки.**

Свойства генов:

- **дискретность**: один ген контролирует один признак;
- **специфичность**: каждый ген отвечает строго за определенный признак;
- **стабильность структуры**: гены передаются из поколения в поколение не изменяясь;

- способность к мутированию (изменению структуры);
- дозированность действия: один ген определяет одну дозу фенотипического проявления признака;
- способность к репликации (самоудвоению);
- способность к рекомбинации (переходу из одной гомологичной хромосомы в другую).

Функциональная классификация генов

Выделяют три группы генов:

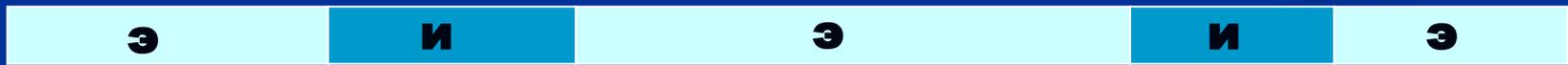
- **структурные** – контролируют развитие признаков путем синтеза соответствующих ферментов;
- **регуляторные** – управляют деятельностью структурных генов;
- **модуляторные** – смещают процесс проявления признаков в сторону его усиления или ослабления, вплоть до полной блокировки (*энхансеры и сайленсеры*).

Гены в клетках прокариот и эукариот имеют определенные особенности строения.

Принципиальное отличие: **у прокариот ген имеет непрерывную структуру и включает только экзоны (Э).**



У эукариот – прерывистую, он состоит из чередующихся участков – **информативных (экзонов) и неинформативных участков, или интронов.** Число интронов неодинаково у разных генов (от 1 до 50).



Зачем в геномах сохраняются неинформативные участки?

Экспрессия генов в биосинтезе белка

Биосинтез белка – процесс образования в живой клетке сложных молекул белков (полимеров) из аминокислот (мономеров) в соответствии с генетической информацией, которая записана с помощью генетического кода.

Генетический код – определенная последовательность нуклеотидов ДНК (РНК), которая определяет местоположение аминокислот в полипептиде.

Свойства генетического кода:

Триплетность: одну аминокислоту кодируют три нуклеотида ДНК (РНК), расположенные последовательно. Они образуют *триплет*, или *кодон*.

Избыточность (вырожденность): одну аминокислоту могут кодировать от 1 до 6 триплетов ДНК (РНК).

Специфичность: один триплет кодирует одну, строго определенную аминокислоту.

Неперекрываемость: один нуклеотид не может одновременно входить в состав двух триплетов.

Универсальность: в живой природе у всех организмов аминокислоты кодируются одинаковыми триплетами.

Однонаправленность считывания: построение иРНК в ходе транскрипции осуществляется только по одной из цепей ДНК (матричной).

В структуре и-РНК присутствуют стартовый кодон (АУГ) и стоп-кодоны (УАА, УАГ, УГА).

Непрерывность считывания: в ходе транскрипции информация с матричной ДНК считывается без пропусков и перескоков.

Таблица генетического кода

Первый нуклеотид	Второй нуклеотид				Третий нуклеотид
	У	Ц	А	Г	
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 - три	Г
Ц	ЦУУ – лей	ЦЦУ - про	ЦАУ - гис	ЦГУ - арг	У
	ЦУЦ – лей	ЦЦЦ - про	ЦАЦ - гис	ЦГЦ - арг	Ц
	ЦУА – лей	ЦЦА - про	ЦАА - глн	ЦГА - арг	А
	ЦУГ – лей	ЦЦГ - про	ЦАГ - глн	ЦГГ - арг	Г
А	АУУ – иле	АЦУ - тре	ААУ - асн	АГУ - сер	У
	АУЦ – иле	АЦЦ - тре	ААЦ - асн	АГЦ - сер	Ц
	АУА – иле	АЦА - тре	ААА - лиз	АГА - арг	А
	АУГ – мет	АЦГ - тре	ААГ - лиз	АГГ - арг	Г
Г	ГУУ – вал	ГЦУ - ала	ГАУ - асп	ГГУ - гли	У
	ГУЦ – вал	ГЦЦ - ала	ГАЦ - асп	ГГЦ - гли	Ц
	ГУА – вал	ГЦА - ала	ГАА - глу	ГГА - гли	А
	ГУГ – вал	ГЦГ - ала	ГАГ - глу	ГГГ - гли	Г

В процессе синтеза белка условно выделяют три этапа:

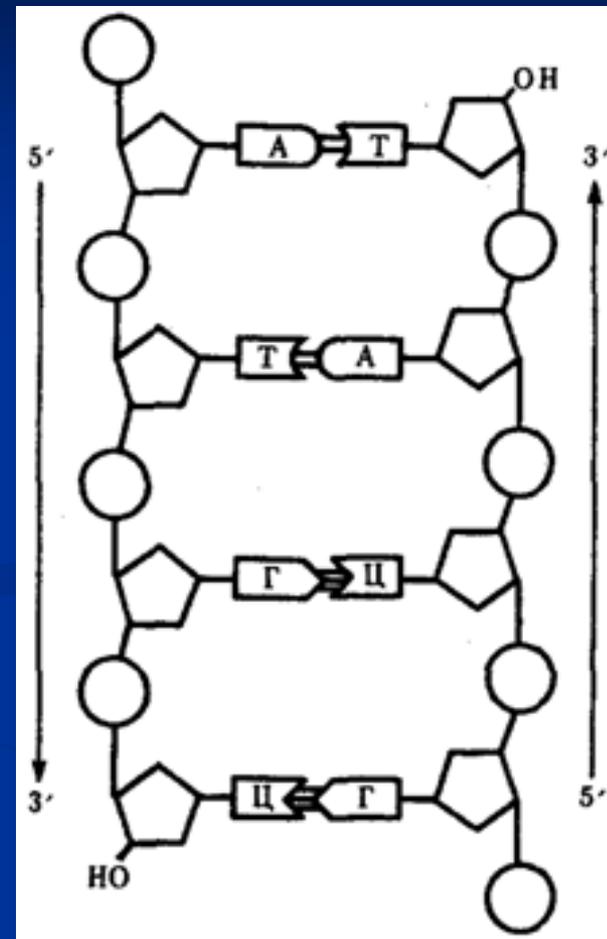
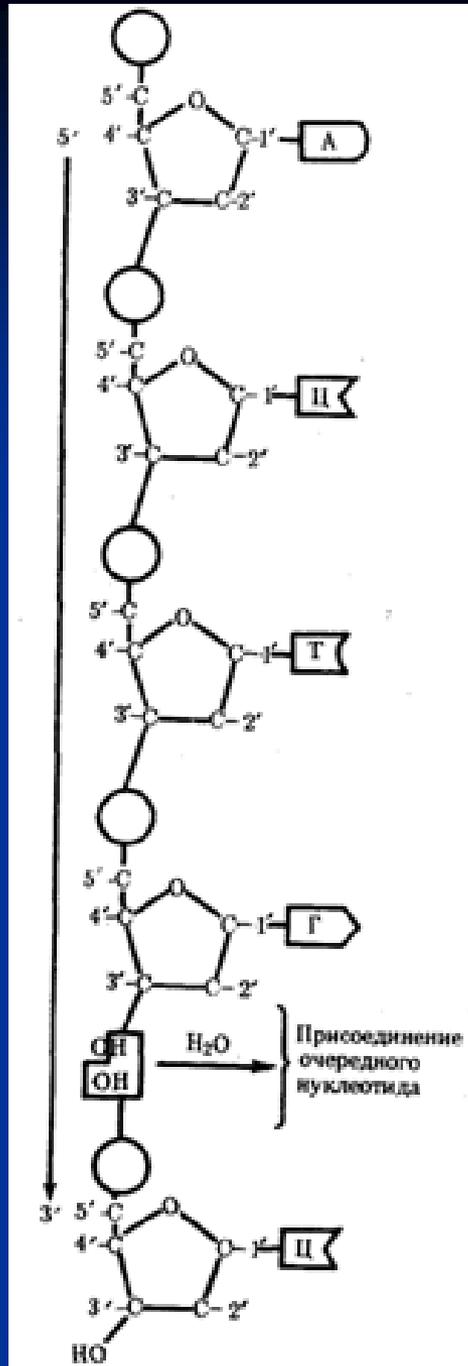
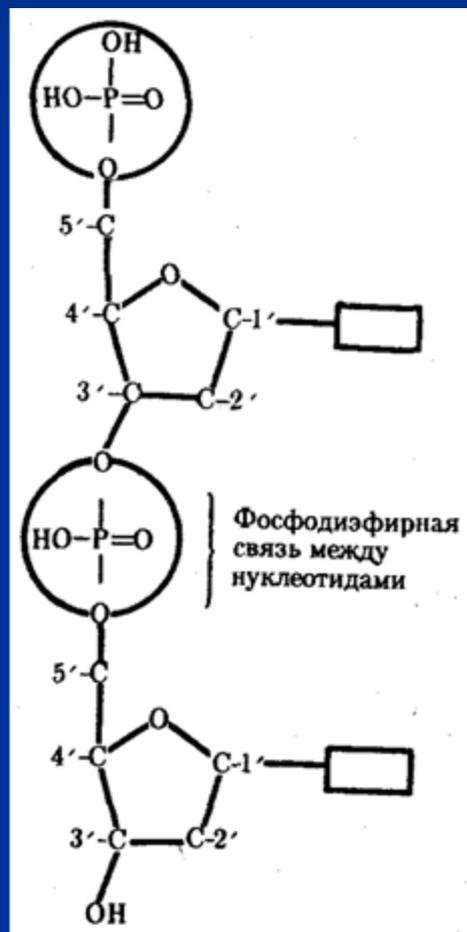
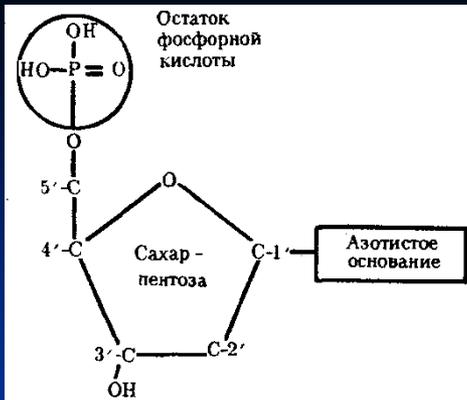
- **транскрипция** – перенос информации, записанной в генах ДНК на пре-иРНК;
- **процессинг** – преобразование пре-иРНК в зрелую иРНК;
- **трансляция** – перенос информации с иРНК в процессе сборки полипептидов на рибосомах.

После трансляции полипептиды
подвергаются **посттрансляционным**
изменениям, предусматривающим
«выбраковку» дефектных белков, транспорт
белков в соответствующие
внутриклеточные структуры и выведение их
из клетки, **фолдинг** – образование
вторичной, третичной или четвертичной
структуры.

Транскрипция

Биологической сущностью транскрипции является «переписывание» информации с молекулы ДНК на РНК, а химической – синтез молекулы и-РНК на участке ДНК по принципу комплементарности.

Синтез и-РНК в клетке всегда осуществляется от фосфатного конца к гидроксильному ($5' \rightarrow 3'$). Поэтому матрицей для транскрипции служит та цепь ДНК, которая обращена к синтезирующему ферменту своим гидроксильным ($3'$) концом. Она называется **матричной**. Вторая, комплементарная ей цепь, называется **кодогенной**.



Транскрипция делится
на три периода:

- 1) инициация,**
- 2) элонгация,**
- 3) терминация.**

Инициация транскрипции

Синтез и-РНК осуществляется при помощи фермента РНК-полимеразы. У прокариот имеется **только одна РНК-полимераза**. В стартовый мультибелковый ферментный комплекс входит диссоциируемая субъединица - фактор δ . Он находит последовательность ДНК — **промотор** и присоединяется к ней. Цепи ДНК расходятся, на матричной цепи строится короткий фрагмент иРНК (около 10 нуклеотидов), фактор δ покидает стартовый комплекс и начинается элонгация.

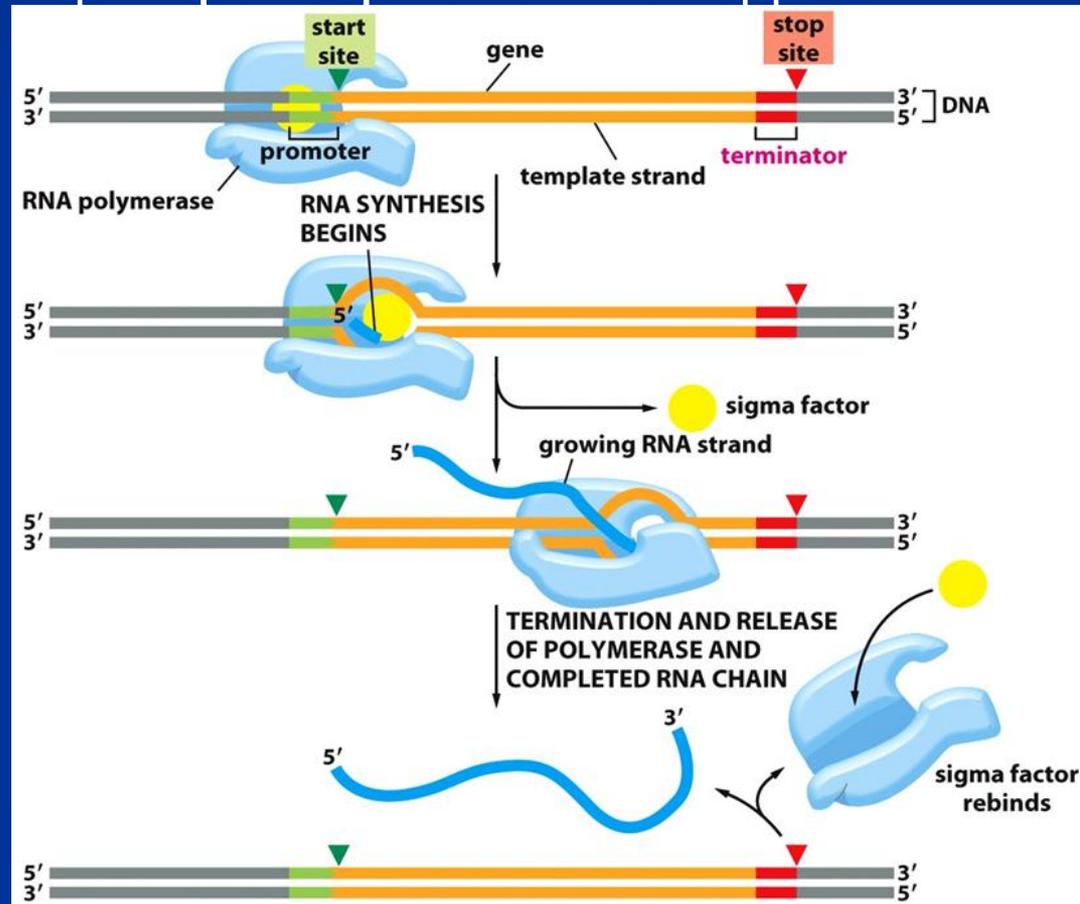


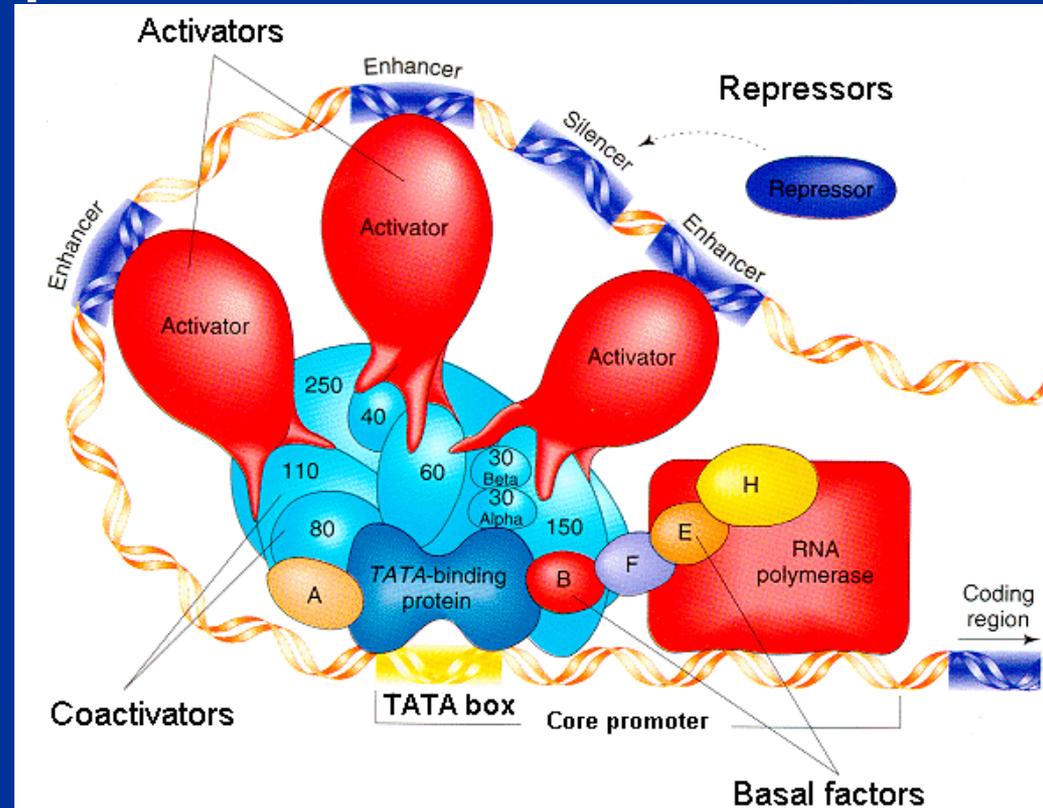
Figure 7-9 Essential Cell Biology 3/e (© Garland Science 2010)

Инициация транскрипции

В биосинтезе белков в ядрах эукариот задействованы 3 типа РНК-полимераз:

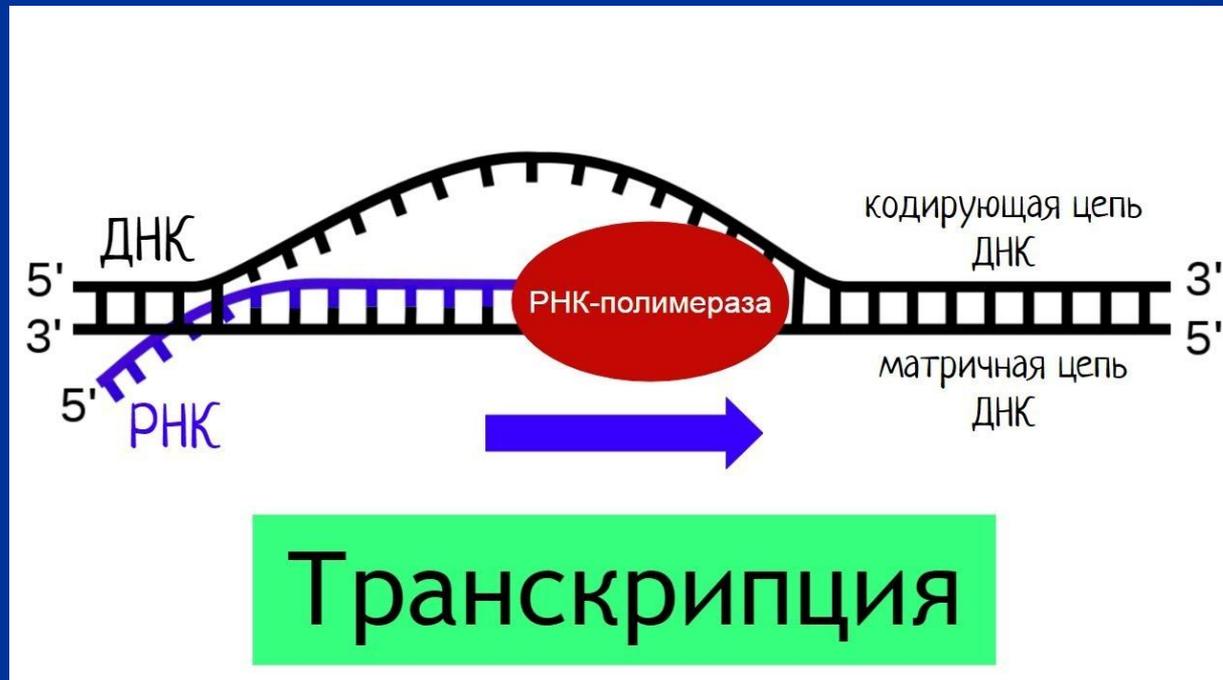
- РНК-полимераза I участвует в синтезе рРНК,
- РНК-полимераза II – в синтезе и-РНК, кодирующих аминокислотные последовательности белков,
- РНК-полимераза III – в транскрипции генов тРНК.

Фермент РНК-полимераза отыскивает в молекуле ДНК участок – **промотор** – и с помощью ряда белков – общих транскрипционных факторов – прикрепляется к нему. Это происходит в течение 15-20 секунд.



Элонгация

При участии фермента РНК-полимеразы происходит синтез молекулы РНК из свободных рибонуклеотидов, присоединившихся к матричной цепи ДНК по принципу комплементарности. Синтез пре-иРНК осуществляется от 5' к 3' концу.



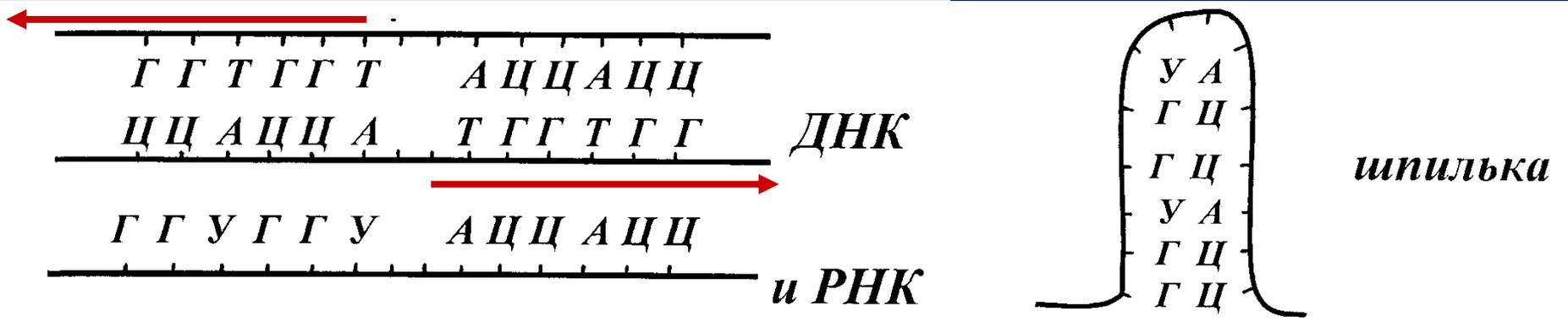
За 1 секунду между собой соединяются 50 нуклеотидов. Для клетки этой скорости недостаточно, поэтому инициация и синтез и-РНК происходит с нескольких участков. Образующиеся фрагменты, называемые **транскрип-тонами**, далее объединяются в и-РНК.

Терминация

Происходит тогда, когда РНК-полимераза достигает **терминатора** – участка ДНК, где прекращается синтез молекулы и-РНК.

В роли терминатора у прокариот выступают участки ДНК, имеющие «симметричное» строение, которые одинаково читаются в обе стороны, вправо и влево от центра.

Они называются **палиндромами**, тогда в и-РНК может получиться образование типа шпильки, не позволяющее РНК-полимеразе двигаться дальше.

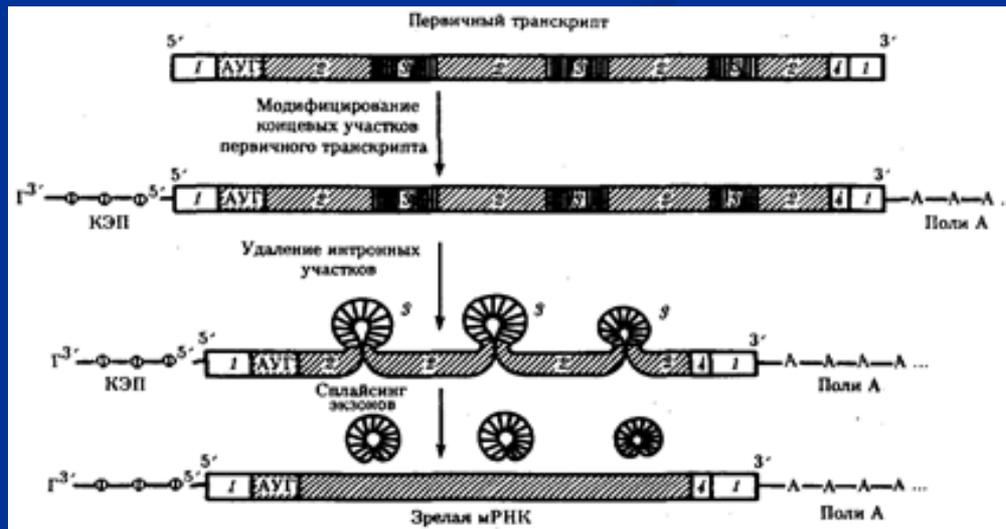


* У эукариот шпильки не образуются, и механизм терминации другой.

Процессинг

Процессинг включает целый ряд преобразований пре-иРНК, необходимых для ее нормального функционирования.

1. **Образование колпачка, или КЭПа,** на фосфатном конце цепи. Колпачок – это **трифосфонуклеозид**, содержащий **гуанин**. С помощью колпачка и-РНК будет отыскивать в цитоплазме малую субъединицу рибосомы.
2. **Метилирование азотистых оснований и-РНК.**



3. Удаление части нуклеотидов на гидроксильном конце.
4. Присоединение на гидроксильном конце образования *poli-A* из 100-200 остатков адениловой кислоты. Это образование выполняет стабилизирующую функцию (не дает больше присоединяться другим нуклеотидам) и обеспечивает транспорт и-РНК из ядра в цитоплазму.

5. Сплайсинг – процесс удаления интронов и соединения экзонов в молекулу РНК.

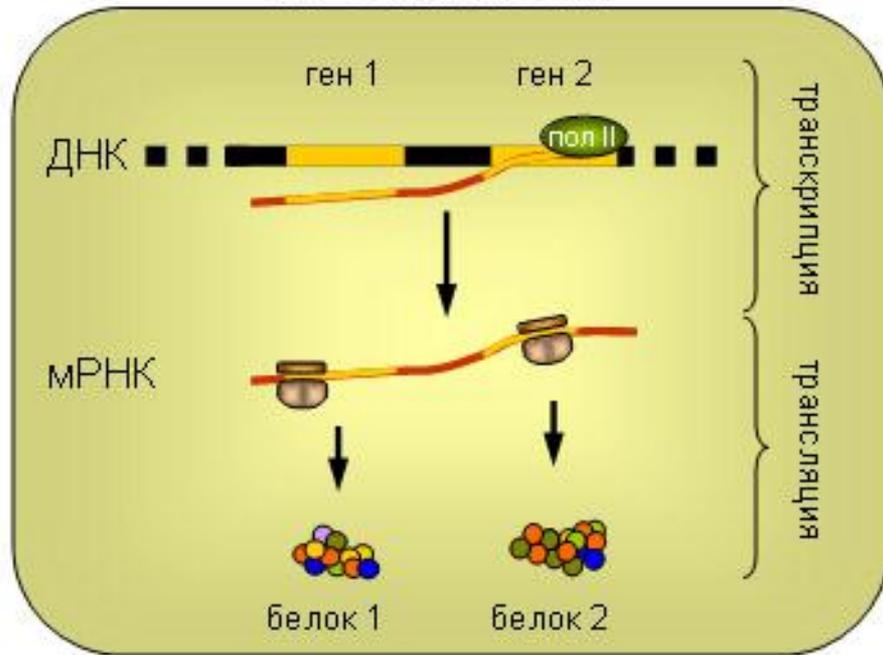
Ядерная пре-иРНК называется юной, или незрелой, а и-РНК после сплайсинга – зрелой.



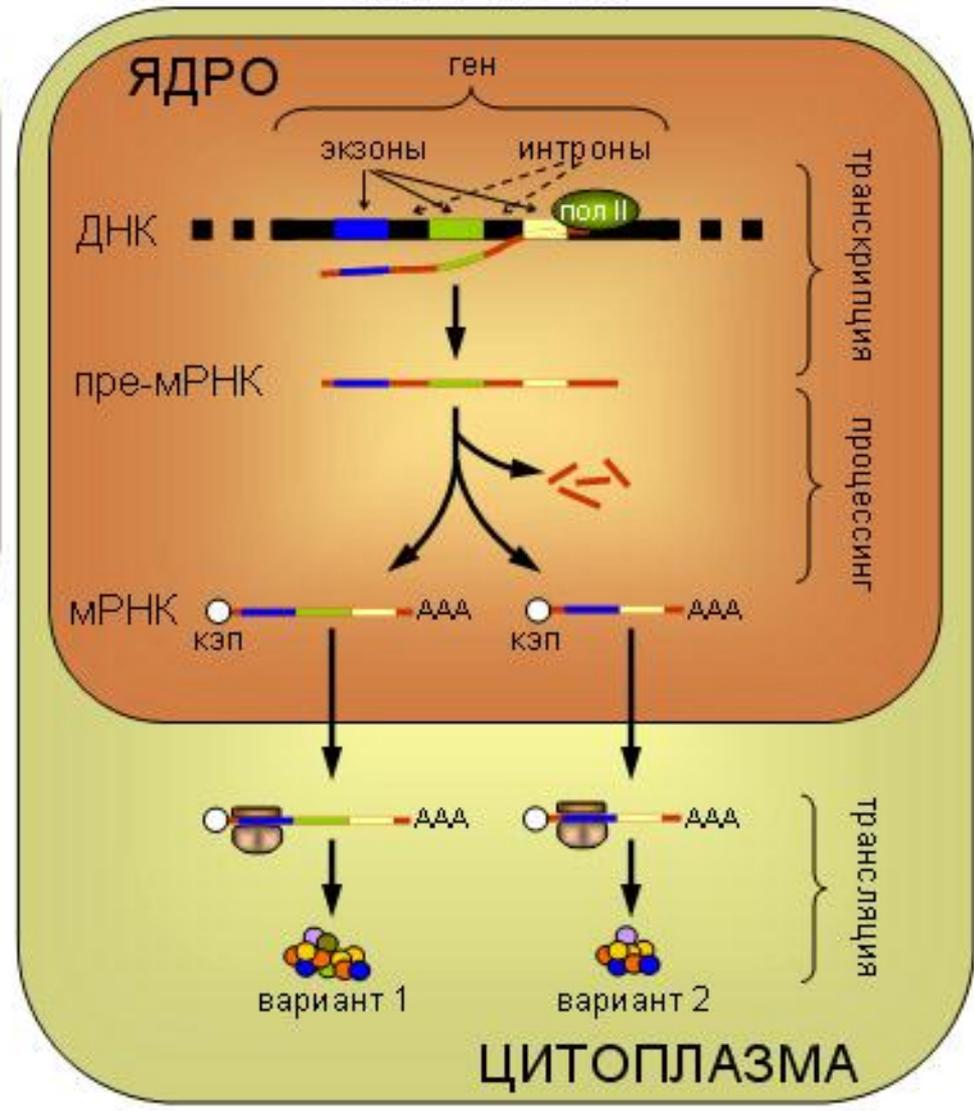
* Сплайсинг присущ только эукариотам.

* Возможен альтернативный сплайсинг: из одной и той же ядерной и-РНК (первичного транскрипта) вырезаются разные участки; в результате образуются разные зрелые и-РНК.

ПРОКАРИОТЫ



ЭУКАРИОТЫ



Зрелая и-РНК имеет вид:



1 – **лидирующий участок**; АУГ - стартовый кодон; 2 – экзоны (их может быть много); 3 – кодон-терминатор: **УАГ** или **УАА**, или **УГА**; 4 – **трейлер**.

Лидирующий участок и трейлер выполняют регуляторную функцию.

Такая и-РНК поступает из ядра в цитоплазму, где начинается **трансляция**.

Трансляция

Трансляция – это процесс синтеза полипептидных цепей, осуществляемый в рибосомах.

В ходе трансляции происходит считывание информации с молекулы и-РНК на молекулу белка. Подобно транскрипции, трансляция протекает в три стадии:

- **инициация,**
- **элонгация,**
- **терминация.**

Для осуществления процесса трансляции необходимо наличие в цитоплазме клеток рибосом, регуляторных белков, ферментов, набора необходимых аминокислот и тРНК.

Рибосома имеет несколько функциональных центров:

- **М-центр (связывания и(м)РНК);**
- **П-центр (пептидильный – связывания пептидил-тРНК);**
- **А-центр (аминоацильный – связывания аа-тРНК);**
- **ПТФ-центр (пептидилтрансферазный – катализирует перенос аминокислоты с аа-тРНК**

на пептидил-тРНК с образованием пептидной связи, участвует в транслокации пептидил-тРНК из А-центра в П-центр).



Транспортные РНК – это небольшие молекулы (не более 100 нуклеотидов), напоминающие в двухмерной модели лист клевера. «Стебли» и петли образуются благодаря внутреннему спариванию азотистых оснований. Центральная петля содержит **антикодон** – триплет нуклеотидов, взаимодействующий с кодоном иРНК. На 3' конце молекулы осуществляется присоединение соответствующей аминокислоты (акцепторный стебель, «гибкая рука»).

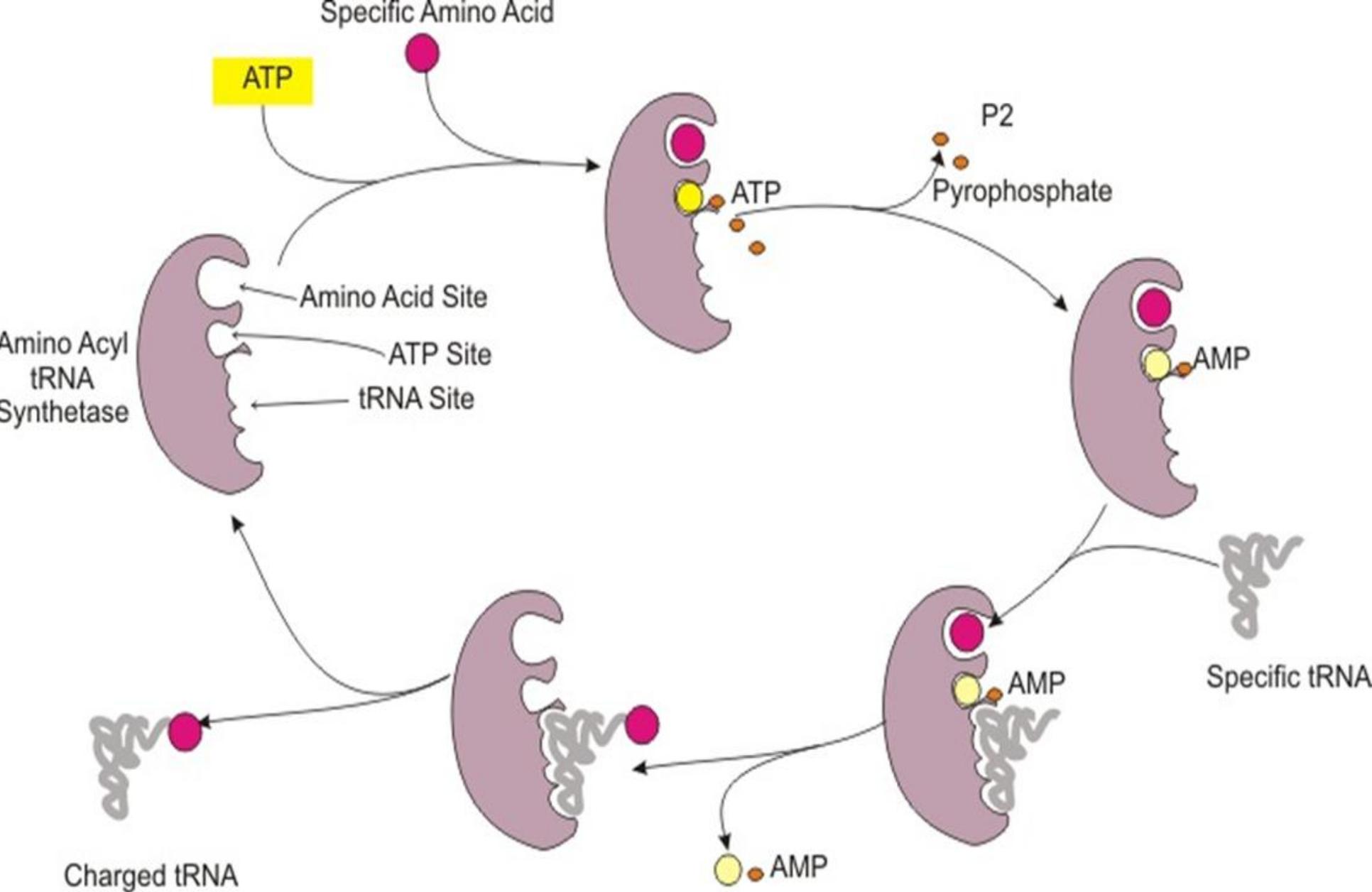


Специфическое соединение тРНК со «своей» аминокислотой происходит в два этапа:

1. Активация аминокислоты – взаимодействие аминокислоты с молекулой АТФ
2. Присоединение активированной аминокислоты к своей тРНК при помощи фермента аминоацил-тРНК-синтетазы.



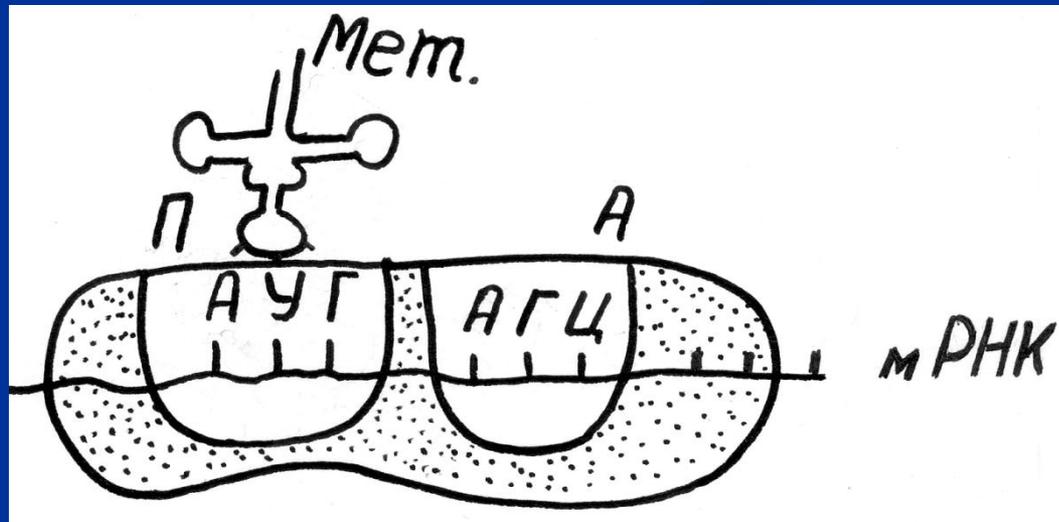
Фермент – аминоацил- тРНК – синтетаза (20 видов) имеет два центра узнавания и образования ковалентной связи между а.к. и тРНК ($\text{а.к.} + \text{АТФ} + \text{тРНК} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{а.а.-тРНК} + \text{АМФ} + 2\text{P}_i$)



Loading a tRNA molecule

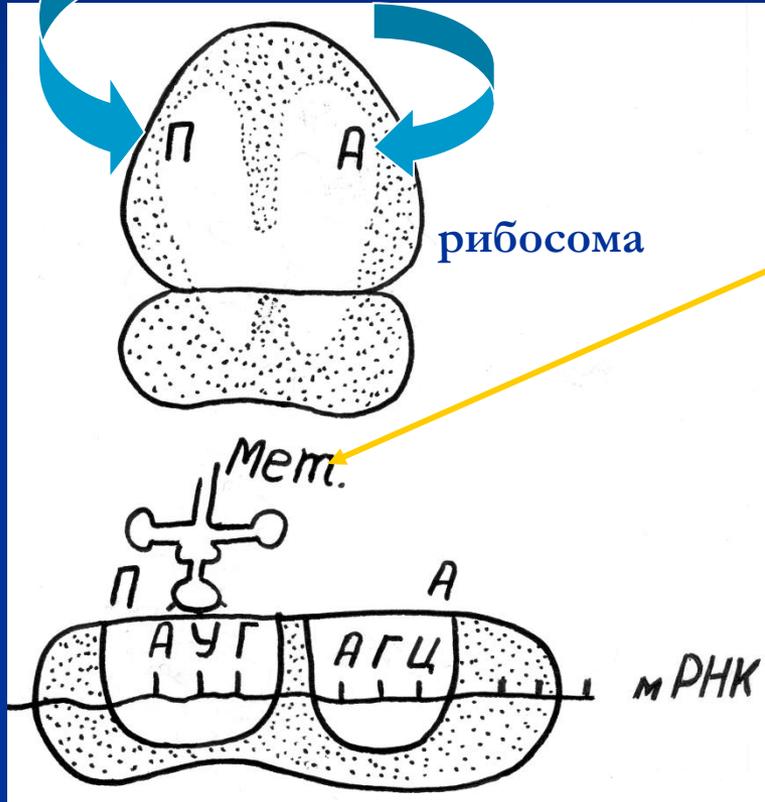
Инициация трансляции

и-РНК своим кэпированным (фосфатным) концом отыскивает малую субъединицу рибосомы. **Лидирующая последовательность соединяется с рибосомальной РНК.** При этом стартовый кодон АУГ попадает в недостроенный пептидный (П) участок рибосомы.



Инициация трансляции

Пептидильный (П) и
аминоацильный (А)
центры



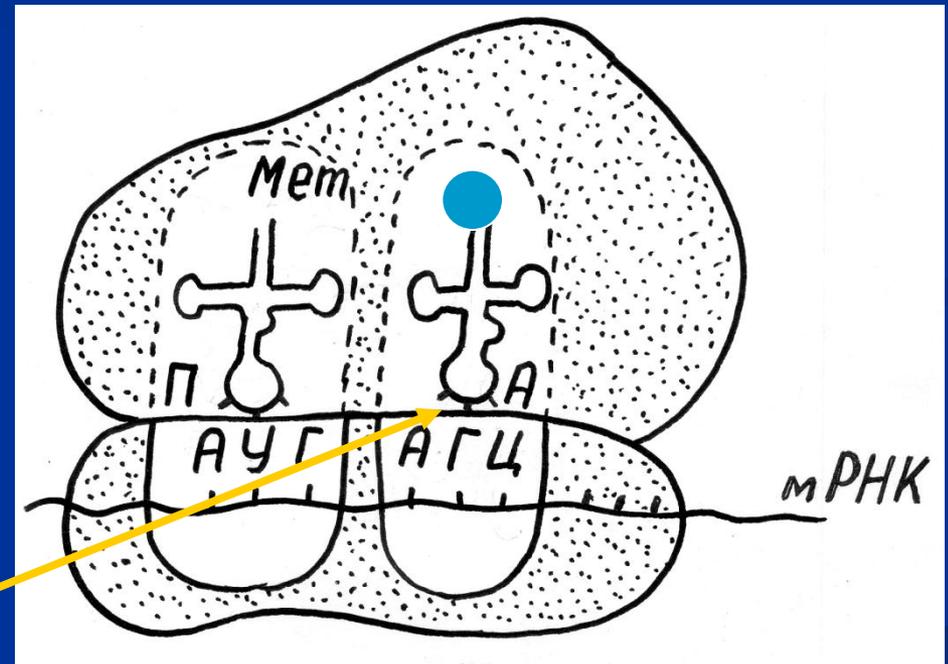
К стартовому кодону
присоединяется
т-РНК, несущая
аминокислоту
метионин.

Только после этого
субъединицы
рибосомы
объединяются.
Инициация
заканчивается.

Элонгация

Заключается в синтезе полипептида из аминокислот, которые доставляются в рибосому транспортными РНК.

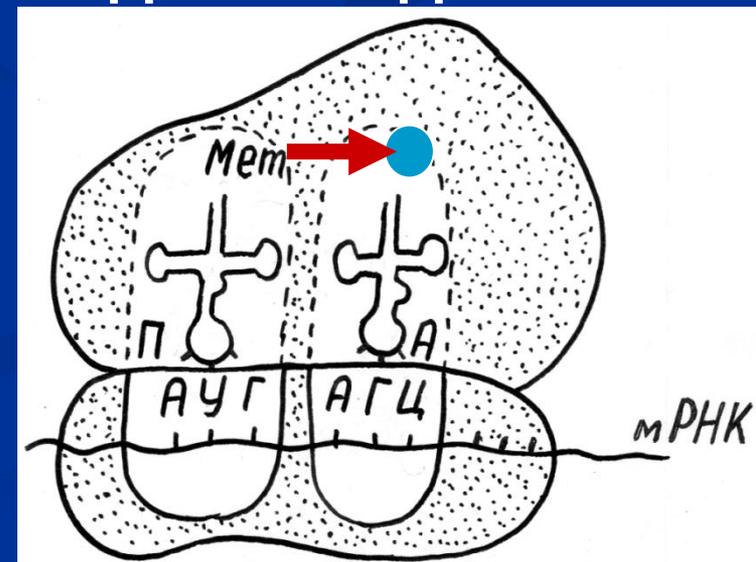
Сначала в аминоацильном центре рибосомы происходит узнавание аминокислот при взаимодействии кодона и-РНК и антикодона т-РНК по принципу комплементарности.

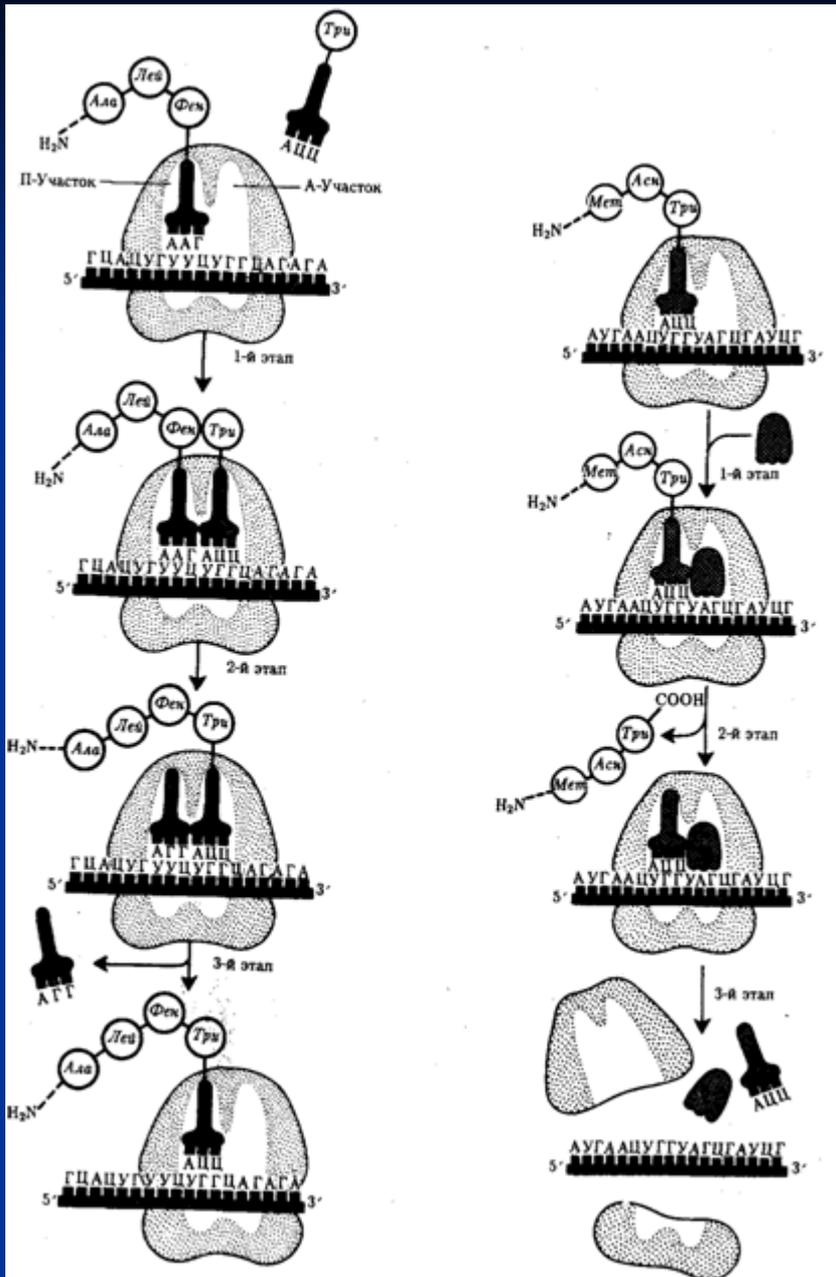


Затем аминокислоты, соединенные с тРНК, находящимися в аминоацильном и пептидильном центрах, оказываются в ПТФ-центре, где соединяются пептидной связью (без энергозатрат).

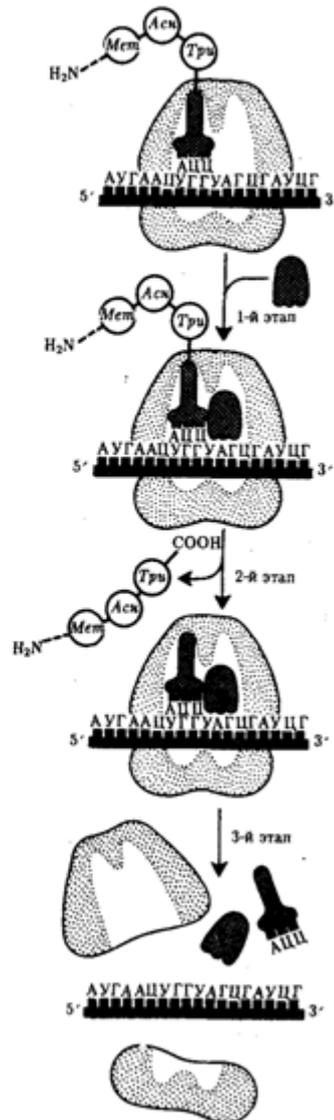
Строящийся пептид, увеличивший свою длину на одну аминокислоту, переносится из П-центра в А-центр – **пептидилтрансферазная реакция**. Первая аминокислота теряет связь со своей т-РНК, которая удаляется из П-центра в цитоплазму, а рибосома перемещается на один кодон по направлению к 3'-концу и-РНК.

** Скорость присоединения аминокислот у прокариот и эукариот разная: у эукариот за одну секунду соединяется две аминокислоты и 16-17 – у прокариот.*



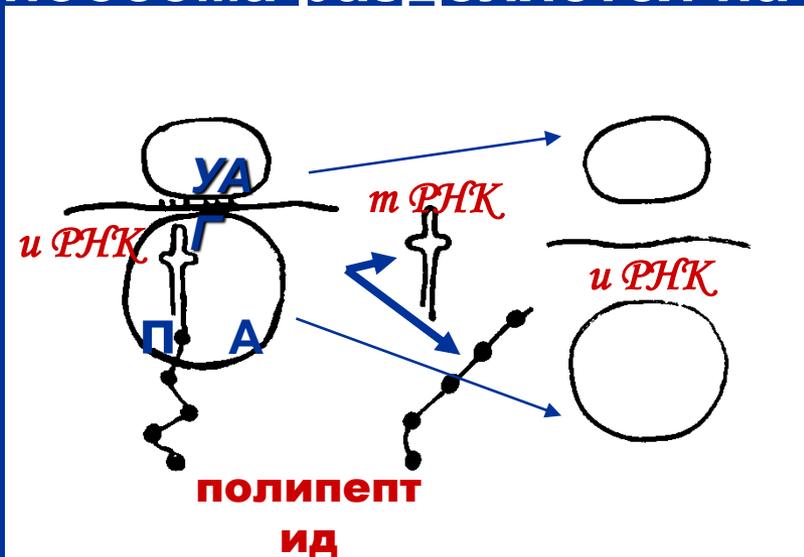


В результате вторая т-РНК и соединенный с ней дипептид оказываются в пептидном центре, а в аминокильный центр поступает следующий кодон и-РНК. Он будет «опознан» третьей т-РНК, которая разместит здесь свою аминокислоту и вся последовательность событий будет повторяться до тех пор, пока в А-центр не поступит кодон-терминатор.



Терминация

Терминация наступает тогда, когда в аминоацильный центр поступает один из трех кодонов-терминаторов – **УАА**, **УАГ**, **УГА**. Этим триплетам не соответствует ни одна аминокислота, поэтому они называются **стоп**, или **нонсенс-кодонами**. Эти кодоны узнаются белковыми факторами терминации. К последней аминокислоте присоединяется вода, и карбоксильный конец полипептидной цепочки отсоединяется от рибосомы. Рибосома разделяется на две субъединицы.



Биосинтез белка завершается и начинаются посттрансляционные преобразования полипептида (учебник).

Регуляция экспрессии генов

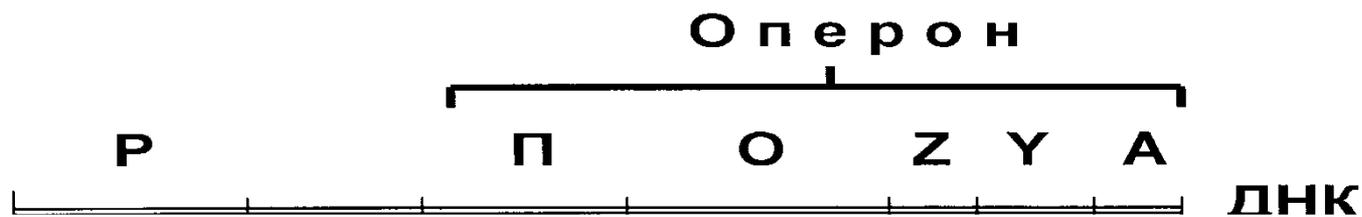
Регуляция генной активности в клетках может происходить на всех этапах экспрессии — от репликации ДНК до посттрансляционных процессов. Рассмотрим регуляцию на уровне транскрипции.

Впервые принцип регуляции на уровне транскрипции был установлен французскими учеными **Франсуа Жакобом и Жаком Моно в 1961 году**. Они проводили исследования на кишечной палочке.

Кишечная палочка при попадании в среду, содержащую молочный сахар **лактозу**, вырабатывает фермент **лактазу**. Если же лактозы нет, то фермент не вырабатывается.

Ответ на вопрос как клетка управляет процессом синтеза лактазы дает **модель оперона**, предложенная Жакобом и Моно.

Опероном называется функциональная система, состоящая из структурных и регуляторных генов.



Лас-оперон

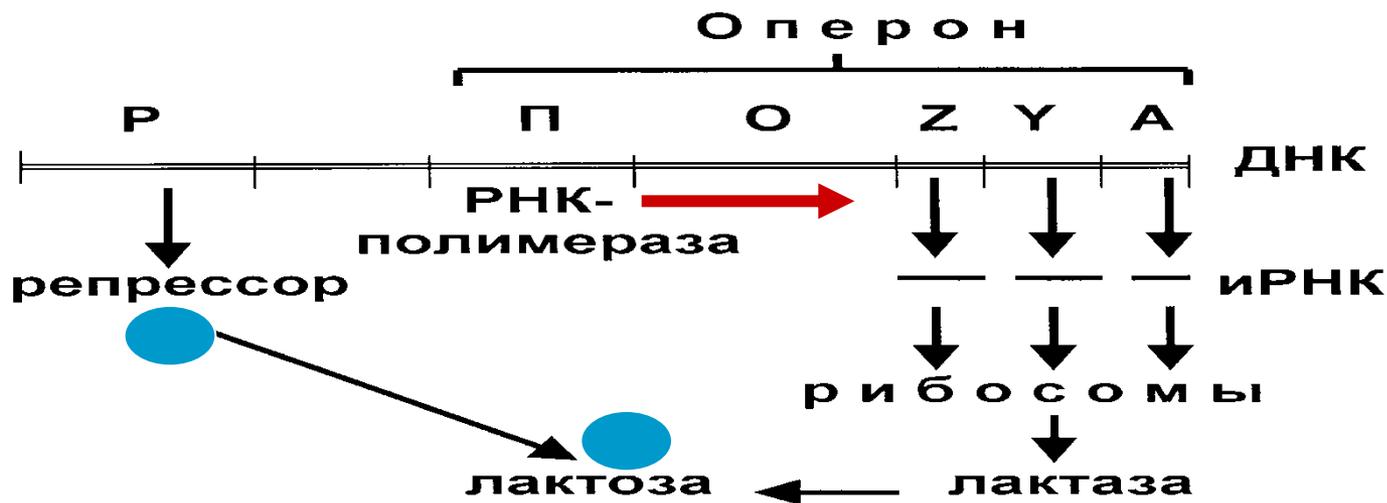
Схема *lac*-оперона. P – ген-регулятор; П – промотор; O – ген-оператор; Z, Y, A – структурные гены: ген Z отвечает за выработку фермента лактазы; ген Y кодирует фермент, осуществляющий активный транспорт лактозы в клетку; ген A к расщеплению лактозы никакого отношения не имеет.

Ген-регулятор кодирует синтез белка-репрессора, который в химическом отношении очень активен, в свободном состоянии не существует и обязательно с чем-нибудь связывается.

Если в окружающей среде нет лактозы, то репрессор связывается с геном-оператором и блокирует его. **В этом случае РНК-полимераза не может прикрепиться к промотору (ей мешает репрессор)**, синтез и-РНК на структурных генах не происходит, а на рибосомах не идет синтез фермента лактазы.



Когда в среде появляется лактоза, то репрессор связывается с ней, освобождая ген-оператор. РНК-полимераза присоединяется к промотору и на структурных генах синтезирует и-РНК. Далее и-РНК поступает на рибосомы, где образуется фермент лактаза, который расщепляет лактозу до тех пор, пока она не исчезнет в цитоплазме. После этого репрессор связывается с оператором и останавливает процесс синтеза фермента лактазы.



Этот принцип регуляции называется *принципом индукции*. Индуктором в данном случае является молочный сахар – лактоза, ее появление ведет к запуску синтеза фермента.

Возможен и другой принцип регуляции синтеза белка – *принцип репрессии*. В этом случае появление продуктов реакции не запускает, а тормозит процесс синтеза фермента.

По принципу репрессии у кишечной палочки функционируют два оперона:

- *his-оперон*, содержащий 9 структурных генов и регулирующий синтез аминокислоты **ГИСТИДИН**;
- *trp-оперон*, содержащий 5 структурных генов и регулирующий синтез аминокислоты **ТРИПТОФАН**.

Принцип репрессии

Исходно белок-репрессор находится в неактивной форме, поэтому он ни с чем не вступает в связь. **Оператор свободен, РНК-полимераза производит синтез и-РНК на структурных генах.** Далее и-РНК поступает на рибосомы, где синтезируются соответствующие ферменты. **Ферменты расщепляют субстрат до определенных продуктов.**

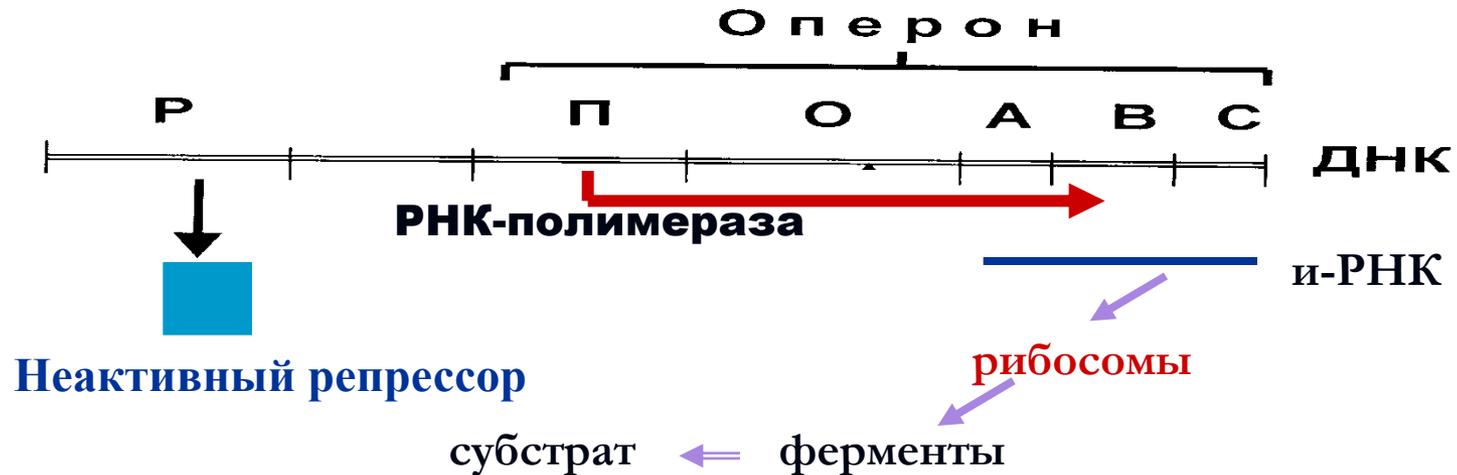


Схема триптофанового оперона

Активация репрессора происходит *только тогда, когда продуктов реакции накопится определенное количество (достаточно большое!)*. Нахождение репрессора в области оператора ведет к остановке процесса транскрипции на структурных генах и, соответственно, к прекращению синтеза ферментов на рибосомах.



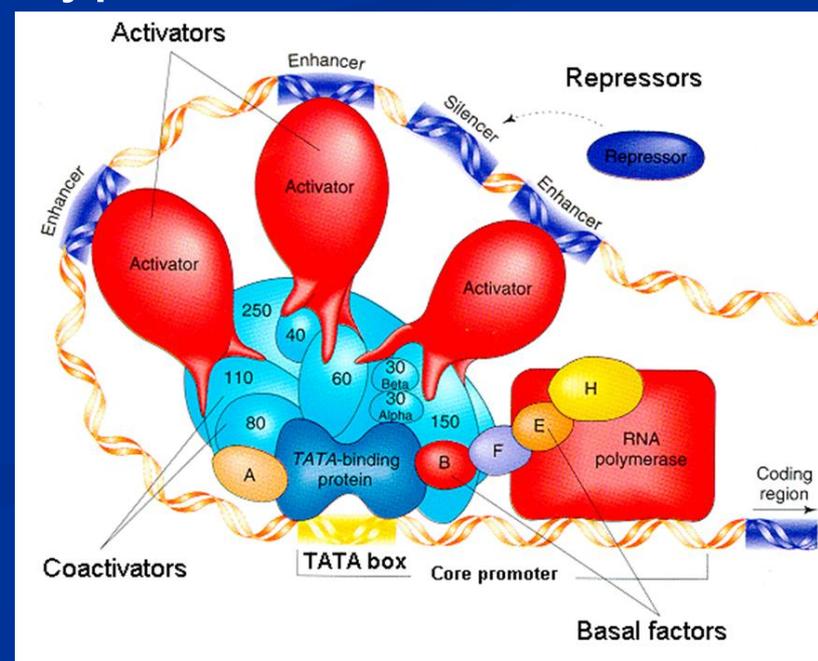
Схема триптофанового оперона

Особенности регуляции генной активности у эукариот

- У эукариот принцип оперонной регуляции не обнаружен.
- Активность каждого гена у эукариот регулируется несколькими генами-регуляторами, кодирующими, соответственно, несколько регуляторных белков. Система выработки регуляторных белков – «многоэтажная». Главные регуляторные белки отвечают за выработку второстепенных.
- Эти белки связываются с определенными участками в молекуле ДНК.

• Один из таких участков находится перед промотором и называется *препромоторным элементом*; другие области лежат вдали от промотора и носят названия *энхансеров* (усилителей) и *глушителей*. В результате связывания регуляторных белков с этими участками происходит включение и выключение структурных генов.

• В регуляции транскрипции участвуют гормоны (часто они являются индукторами транскрипции), а генной активности - гистоновые белки хромосом.



- Регуляция синтеза белка может происходить во время процессинга. Пре-иРНК содержит информативную и неинформативную части. Зрелая мРНК может различаться набором экзонов и служить матрицей для синтеза различных белков. Это называется альтернативным сплайсингом.
- Кроме того, белки могут подвергаться посттрансляционным преобразованиям.

Разновидности генов

Наряду с функциональной классификацией генов существуют и другие их разновидности: **псевдогены, онкогены и мобильные гены.**

- **Псевдогены (ложные гены)** – нуклеотидные последовательности в молекуле ДНК, сходные по строению с известными генами, но утратившие функциональную активность.
- **Онкогены** – нуклеотидные последовательности в молекуле ДНК, присутствующие в хромосомах нормальных клеток, способные активизироваться под влиянием факторов внешней среды и продуцировать белки, вызывающие рост опухолей.

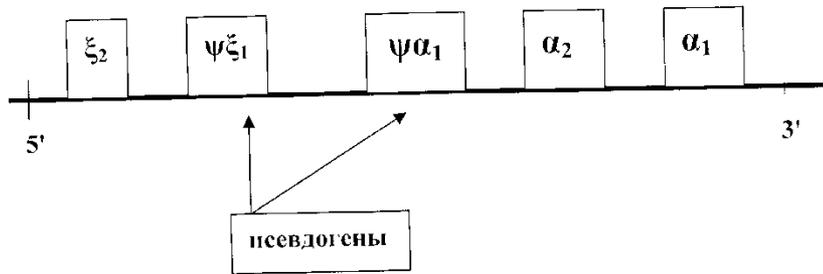
• **Мобильные (прыгающие) гены** – гены, не имеющие постоянной локализации не только в хромосоме, но и в пределах хромосомного набора клетки. Перемещения генов влияют на их экспрессию – ранее неактивные гены могут активизироваться и наоборот.

** Некоторые ученые считают, что эти гены играют важную роль в эволюции. В результате переноса информации от вида к виду, по-видимому, таким путем действительно возможно возникновение отдельных видов.*

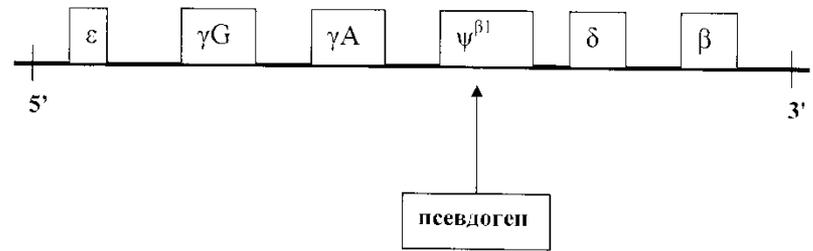
В последние десятилетия в генетике появилось еще одно новое понятие — **«семейство генов»**, или **«мультигенное семейство»**. Это группа генов, имеющих сходное строение, общее происхождение и выполняющих сходные функции. Число генов в разных семействах может колебаться от нескольких единиц до нескольких тысяч.

У человека имеются семейства генов, кодирующие

- **α - и β - глобиновые белки гемоглобина;**
- иммуноглобулины;
- **актины и миозины;**
- белки, определяющие тканевую несовместимость;
- **гистоновые белки.**



Кластер α -глобиновых генов
в 16-хромосоме человека



Кластер β -глобиновых генов
в 11-хромосоме человека.

Организация генов мультигенных семейств может быть разной. **Семейства актиновых и миозиновых генов разбросаны по всему геному.** Семейства генов, кодирующих α - и β -глобиновые белки, сосредоточены в одной хромосоме и образуют *генные кластеры* (так называют семейства генов, расположенных в одной хромосоме).

Генные кластеры возникли в результате дупликации (удвоения) отдельных генов. Таким образом, возникновение генных кластеров есть отражение эволюционного процесса.

Пройдите тестирование по данной ссылке:
<https://forms.gle/iLCo9i88VmtV6PKq7>

Благодарю за внимание