

The background features a collection of light blue line-art illustrations. On the left, there is a DNA double helix, a round-bottom flask on a stand, and a petri dish. On the right, there are various pieces of laboratory glassware including a round-bottom flask, a flask with a stopper, a graduated cylinder, and a beaker. In the center, there are several microorganisms, including a bacterium with flagella and a cell with internal organelles. At the top right, a chemical structure of a benzamide derivative is shown.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

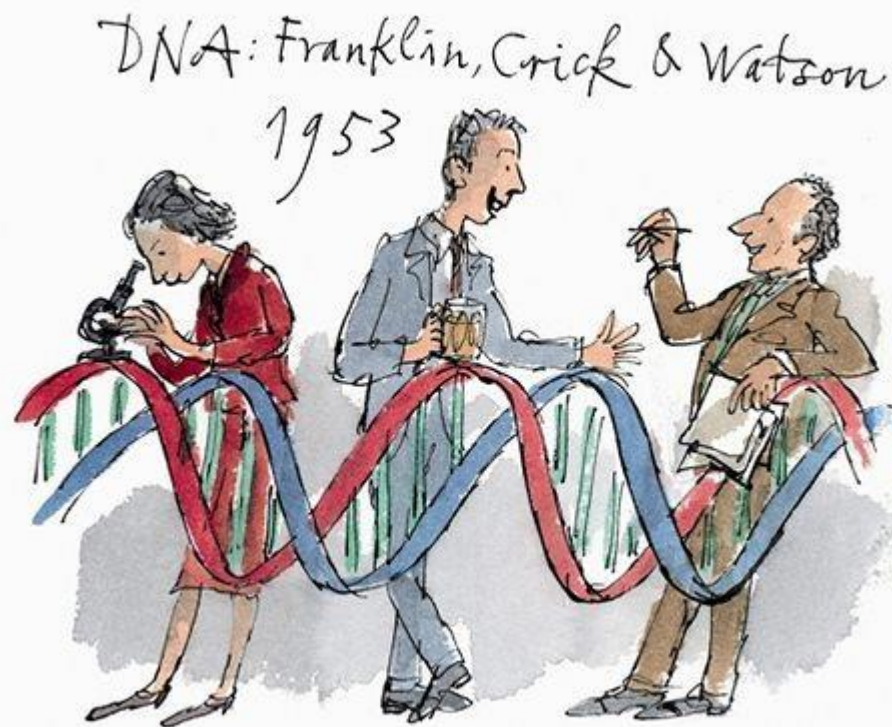
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Химико-биологический факультет
Кафедра биохимии и микробиологии
Школа «Юный биохимик и микробиолог»

История исследований ДНК

Лектор канд. биол. наук, доцент
Давыдова Ольга Константиновна

25 апреля – Международный день ДНК (DNA Day),
праздник, установленный в честь того дня в 1953 году, когда в журнале
«Nature» вышли три статьи, посвящённых открытию молекулярной
структуры ДНК, авторства Джеймса Уотсона, Фрэнсиса Крика, Мориса
Уилкинса, Розалинд Франклин и их коллег



Поиски вещества наследственности

- **V в. до н.э. Гиппократ**

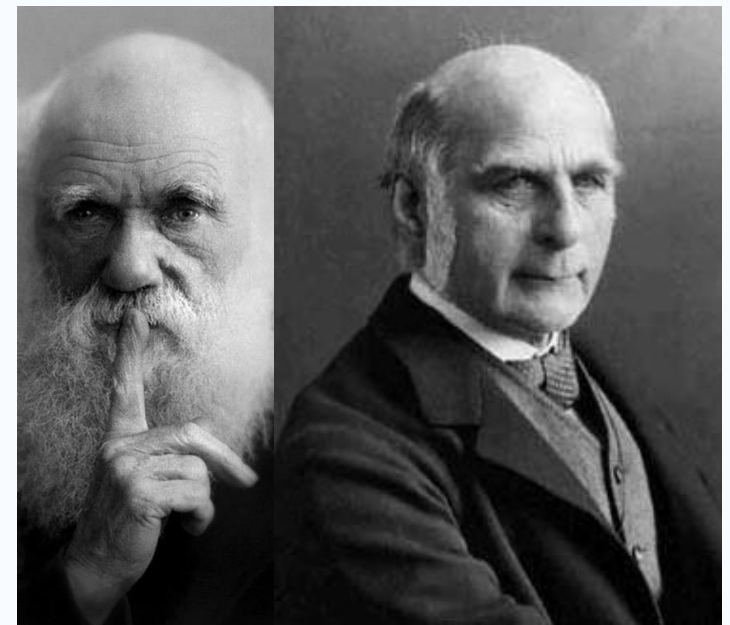
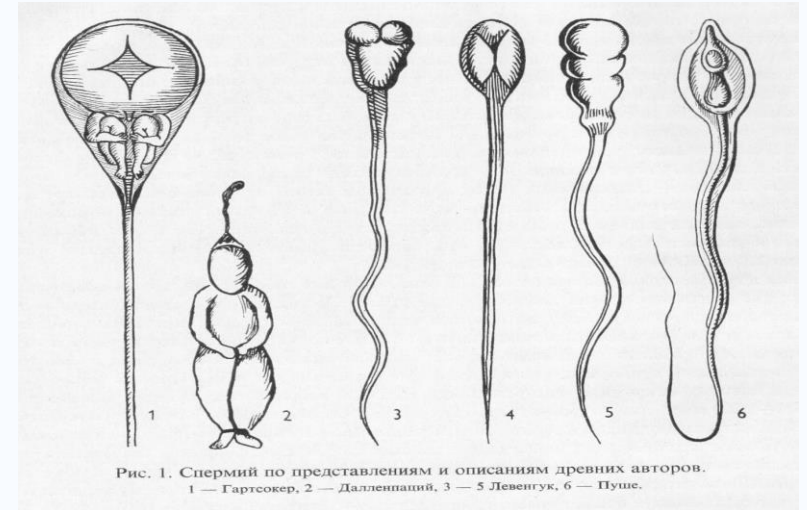
- Половые задатки (т.е. в нашем понимании яйцеклетки и сперматозоиды) формируются из клеток всех органов, в результате чего признаки родителей непосредственно передаются ПОТОМКАМ.

- **1868 г. Теория пангенеза Ч. Дарвина**

- От всех клеток отделяются мельчайшие частицы – «геммулы», которые циркулируют с током крови по сосудистой системе организма, достигая половых клеток. После их слияния в ходе развития организма следующего поколения геммулы превращаются в клетки того типа, из которого произошли.
- Выражения «голубая кровь», «полукровка» и т.д.

- **1871 г. Ф. Гальтон (Голтон)**

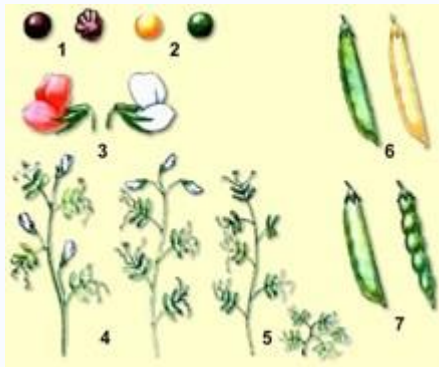
- Двоюродный брат Дарвина в эксперименте с белыми кроликами опроверг эту теорию.
- Основатель науки евгеники



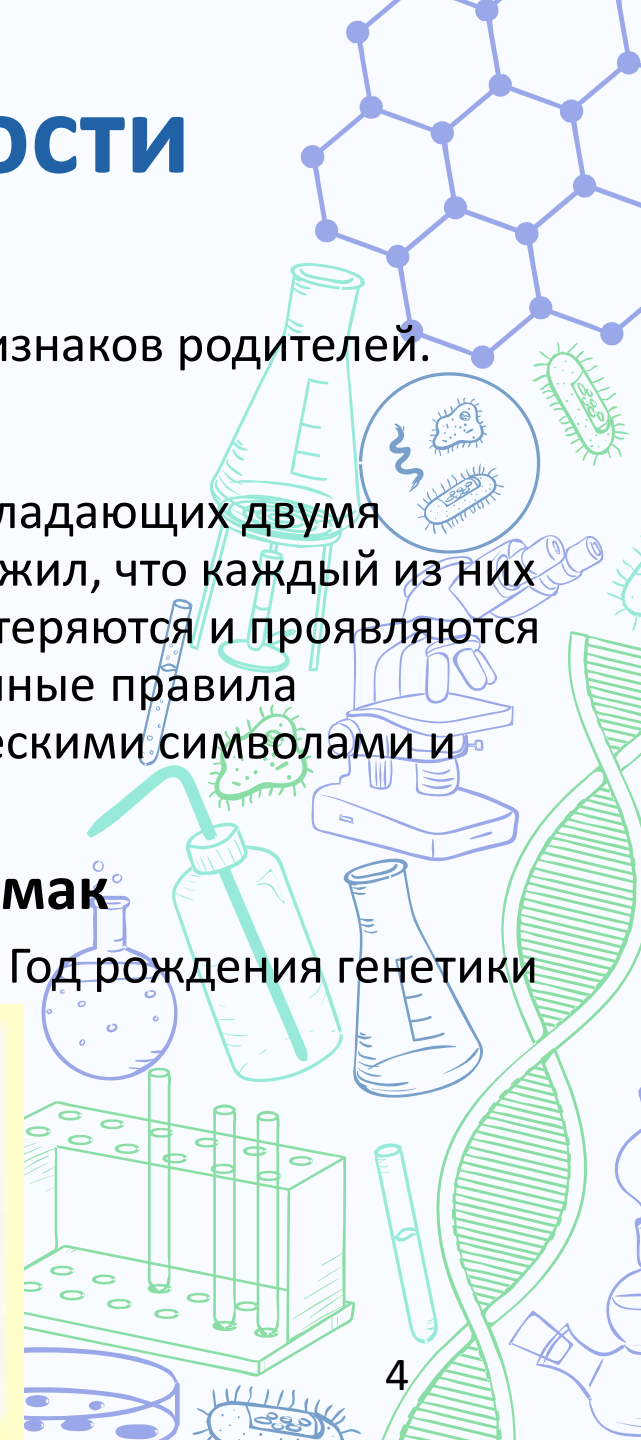
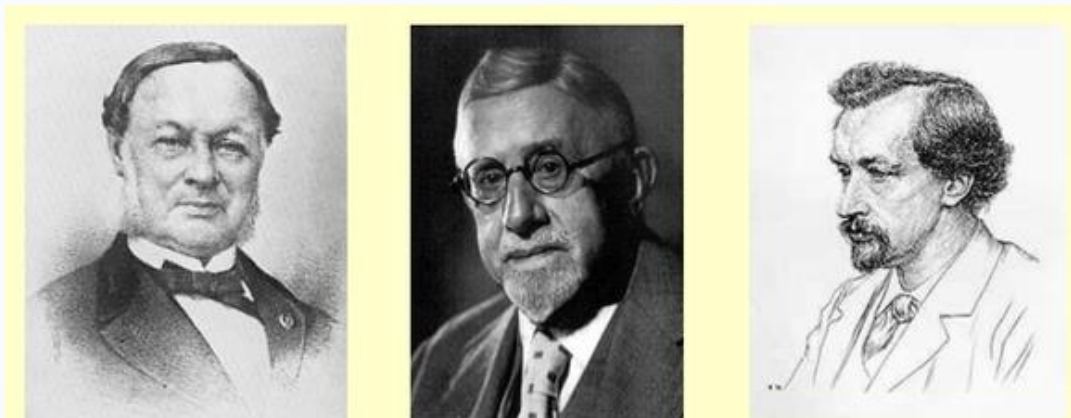
Поиски вещества наследственности



Мендель Грегор Иоганн



- **Конец XVIII начало XIX вв.**
 - Выводы о наследовании потомками признаков родителей.
- **1865 г. Законы Г.Менделя**
 - В результате скрещивания растений, обладающих двумя парами контрастных признаков, обнаружил, что каждый из них наследуется независимо от другого, не теряются и проявляются в последующих поколениях. Обнаруженные правила наследования описываются математическими символами и схемами.
- **1900 г. Г. де Фриз, К. Корренс, Э. Чермак**
 - Вторичное открытие законов Менделя. Год рождения генетики



Случайный биохимик



Фридрих Мишер

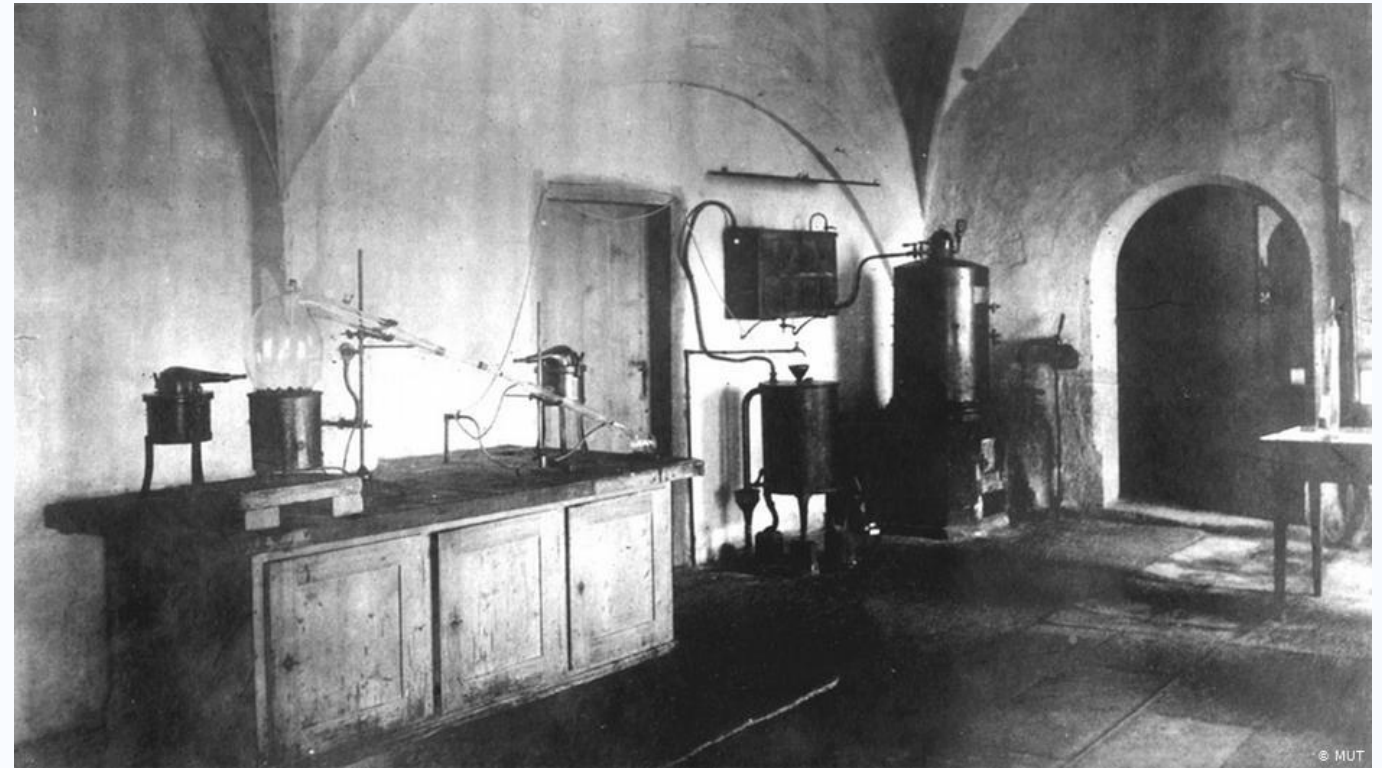
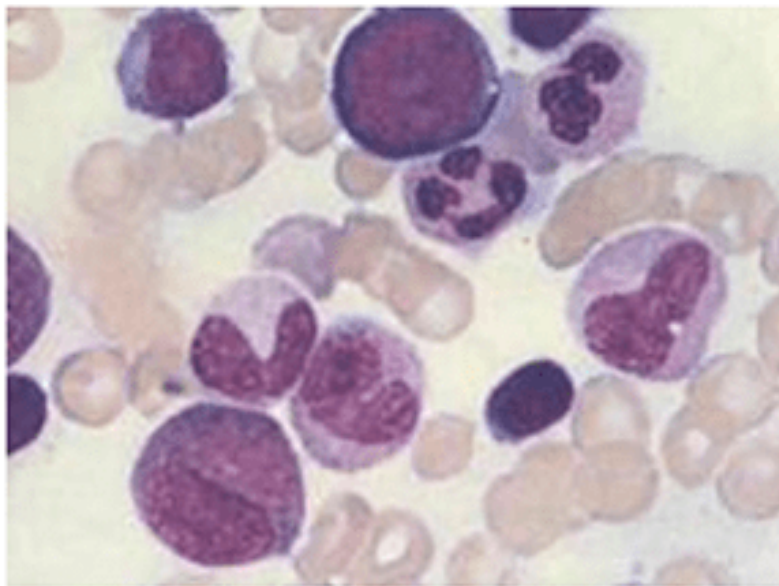


Фото 1879 г. биохимической лаборатории в замке г.Тюбинген – колыбель биохимии

Оригинальная пробирка с надписью "нуклеин" и первая статья Мишера 1871 г. «О химическом составе клеток гноя», вышедшая в журнале Гоппе-Зейлера «Медико-химические исследования» вместе с двумя статьями его учителя

Выделение нуклеина



гноя

однородная популяция лейкоцитов

раствор

ЩЕЛОЧЬ

нуклеин

КИСЛОТА

осадок

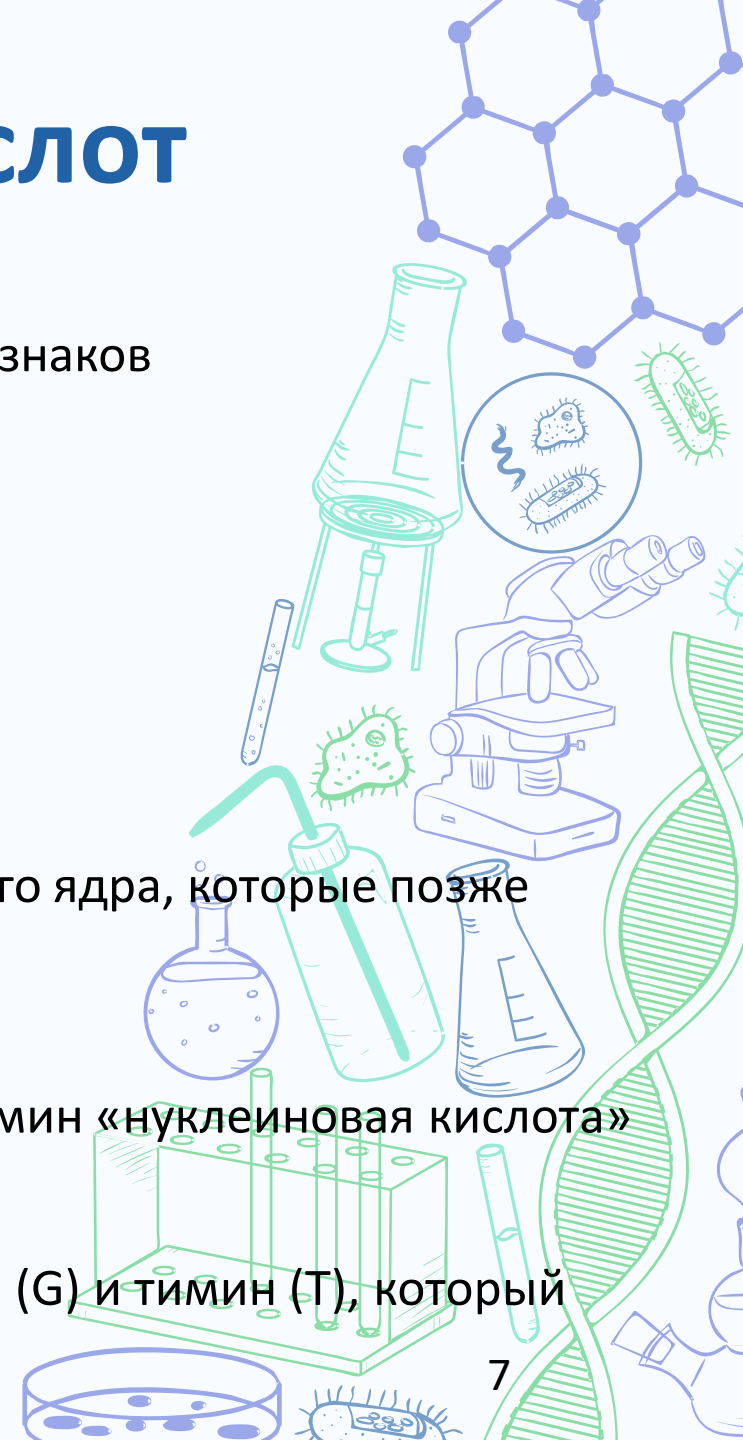


Ядерный материал лейкоцитов (ДНК и белки) окрашен красителем, вокруг лейкоцитов лежат лишенные ядра эритроциты. Как можно видеть, ДНК в гное очень много

Поведение «нуклеина», комплекса ДНК и белков, в растворах кислоты (выпадение в осадок) и щелочи (растворение)

Исследование нуклеиновых кислот

- **1866 г. Э. Геккель**
 - предположил, что ядро отвечает за передачу наследственных признаков
- **1868 г. Ф. Мишер**
 - выделяет нуклеин из лейкоцитов
- **1879 г. А. Коссель**
 - начал изучение нуклеина из дрожжей
- **1882 г. В. Флеминг**
 - обнаруживает и описывает «хроматин», часть структуры клеточного ядра, которые позже назвали хромосомами, исследует митоз
- **1889 г. Р. Альтман**
 - Нуклеин разделен на нуклеиновую кислоту и белок. Появился термин «нуклеиновая кислота»
- **1900 г.**
 - Все азотистые основания описаны: аденин (A), цитозин (C), гуанин (G) и тимин (T), который заменяется урацилом (U) в РНК



Выделение ДНК

- 54 кг вилочковой железы телят смолоть в
- 52-х литрах физраствора,
- отделить ДНК 200 л метанола и
- получится 1,7 кг ДНК!!



Цитос - по-латыни "клетка", т.е. цитозин это Клеточное Вещество

Тимин получил название от слова "thymus", или "вилочковая железа", т.к. его изолировали в первый раз из тимуса телят

Аденин был выделен из надпочечников тех же телят, от "adeno" - "железа"

Гуанин выделили из гуано летучих мышей

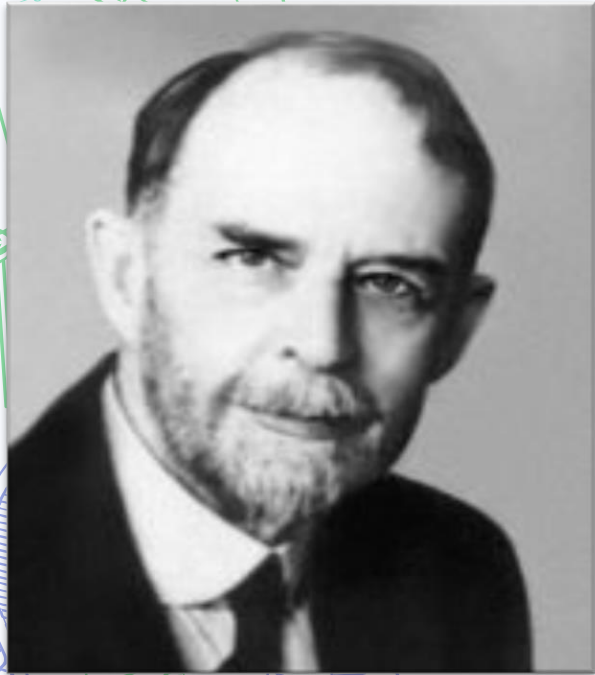
Структура НК и отличия РНК от ДНК

- **1909 г.**
 - Изучал строение рибозы
- **1922-1925 гг.**
 - установил, что ДНК состоит из дезоксирибозы, азотистых оснований и фосфатной группы, пришёл к верному выводу о том, что молекула ДНК построена из структурных единиц (нуклеотидов), собранных из комбинаций трёх этих компонентов
- **1929 г.**
 - открыл химическую формулу дезоксирибозы
- **До середины 1930-х годов считалось, что ДНК содержится только в животных, а РНК – в растениях**



Фебус Аарон Теодор Левин (1869 - 1940)

Поиски вещества наследственности



Морган Томас Хант

- **1903 г. Т. Бовери и У. Сэттон**
 - предположили, что гены должны располагаться в хромосомах
- **1906 г. У. Бэтсон**
 - предложил термин «генетика»
- **1910-1927 гг. Т. Морган и его ученики**
 - сформулировал современную концепцию о линейном расположении генов в хромосомах, построил первую карту гена (А. Стёртевант), доказал взаимосвязь между конкретными генами и конкретными хромосомами (К. Бриджес), обнаружил, что можно искусственно вызывать изменения генов (Г. Мёллер)
- **1925-1928 гг.**
 - доказана возможность вызывать мутации под действием ионизирующего (Надсон и Филлипов), рентгеновского (Мёллер) и ультрафиолетового (Стадлер) излучений

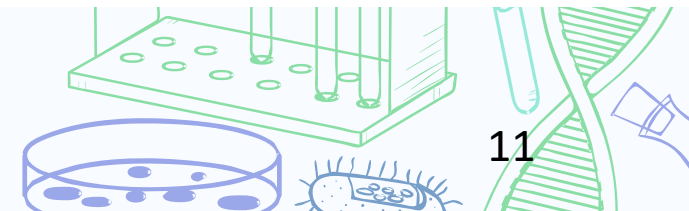
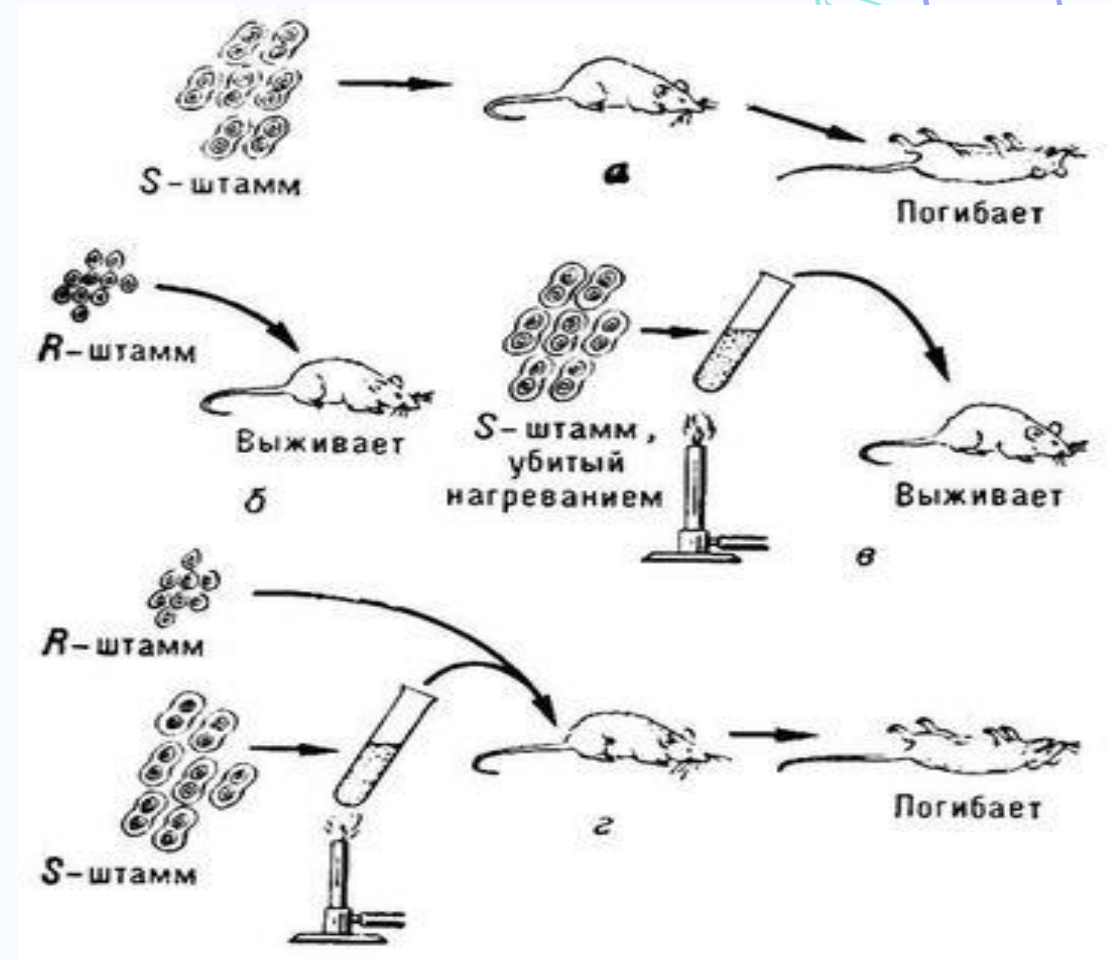
Жёлтое тело Белые глаза Красные глаза Минниатюрное крыло Рудиментарное крыло



Доказательство генетической роли ДНК

- **1928г. опыты Фредерика Гриффита**

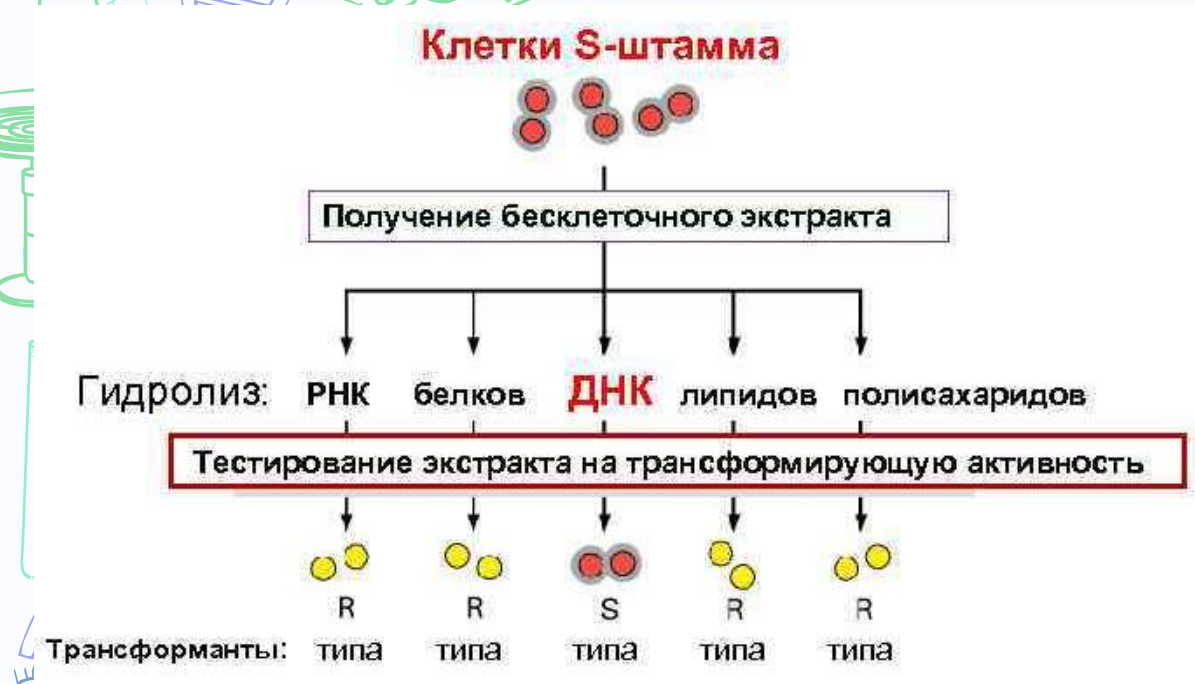
- два штамма пневмококков: капсульный и бескапсульный. Капсульный - патогенный (вирулентный), при инфицировании таким штаммом мыши погибают, бескапсульный - непатогенный. При введении мышам смеси убитых нагреванием (и, следовательно, потерявших вирулентность) капсульных пневмококков и живых бескапсульных невирулентных бактерий, животные погибали в результате размножения капсульных вирулентных форм. Обнаруженное явление Гриффит интерпретировал как трансформацию.



Доказательство генетической роли ДНК

- 1944г. Эксперимент Освальда Эйвери, Колина Мак-Леод и Маклина Мак-Карти

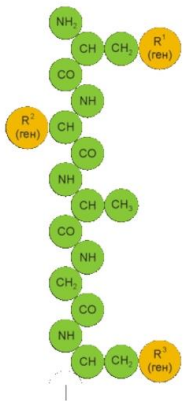
- Эксперимент Гриффита был повторен в варианте смешивания бескапсульных пневмококков с взятыми от капсульных белками, полисахаридами или ДНК. В результате этого эксперимента была выявлена природа трансформирующего фактора, которым оказалась ДНК



Поиски вещества наследственности



Эрвин Рудольф Йозеф Александр Шрёдингер



Модель белковой хромосомы, предложенная Н.К. Кольцовым (1927 г.)

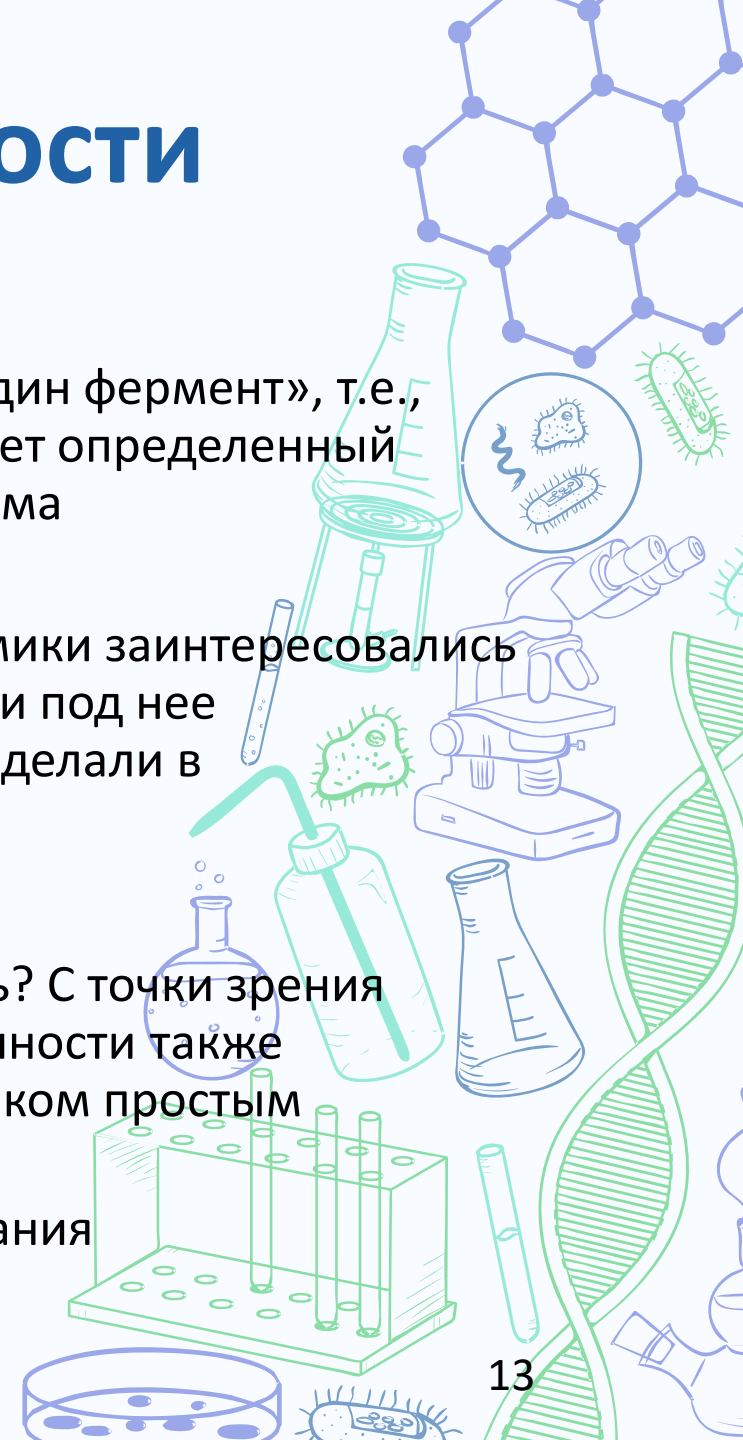
• 1941 г. Дж.Бидл и Э.Тейтем

- разработали гипотезу «один ген – один фермент», т.е., каждый нормальный ген продуцирует определенный фермент, необходимый для организма

- В 30-х годах известные физики и химики заинтересовались биологией и стали пытаться подвести под нее теоретическую базу так, как они это делали в теоретической физике

• 1944 г. Э. Шрёдингер

- опубликовал книгу «Что такое жизнь? С точки зрения физика». Роль носителя наследственности также приписывал белку, считая ДНК слишком простым органическим соединением
- вел понятие генетического кодирования



Поиски вещества наследственности

• 1946 Дж. Ледерберг и Э.Тейтем

- продемонстрировали, что может происходить обмен генетической информацией и возникать новые генетические комбинации.

• 1947 г. Б. Мак-Клинток

- открытие подвижных генетических элементов

• Дж. Гулланд

- установил, что в ДНК есть водородные связи между группами N-H и C=O

• 1950 г. Э. Чаргафф

- пришел к выводу, что в ДНК общее количество аденина равно общему количеству тимина (A=T), а количество гуанина – количеству цитозина (Г=Ц).

• 1952 г. Дж.Ледерберг

- Ввел название «плазмида».

• У. Хейс

- Обнаружил эффект конъюгации – однонаправленный перенос ДНК из одной контактирующей бактериальной клетки в другую.

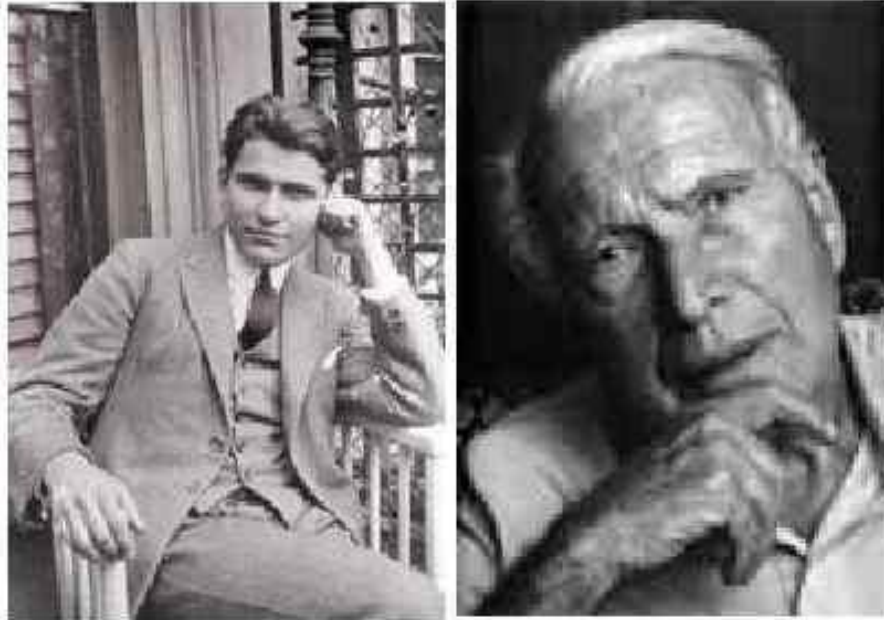
Поиски вещества наследственности

- **1929 г. Ф. Левин**
 - впервые обнаружил дезоксирибозу.
- **1934 г. Д.Бернал**
 - показал, что белки могут быть исследованы с помощью рентгеноструктурного анализа.
- **1935 г. Н.Кольцов**
 - выдвинул гипотезы о молекулярной организации и матричном синтезе гена. Материалом хромосомы считал белок с различными радикалами – различные гены.
- **1935-1939 гг. А Белозерский**
 - выделил чистую ДНК, доказал наличие ДНК и РНК в бактериях.
- **1939 г. У. Астбюри, Ф. Белл**
 - Рентгеноструктурный анализ показал, что расстояние между нуклеотидами в ДНК $3,4 \text{ \AA}$, а азотистые основания уложены стопками.
 - Введение термина «молекулярная биология».



Никто из ученых не знает, что такое жизнь

Эрвин Чаргафф
1950-1953 г.

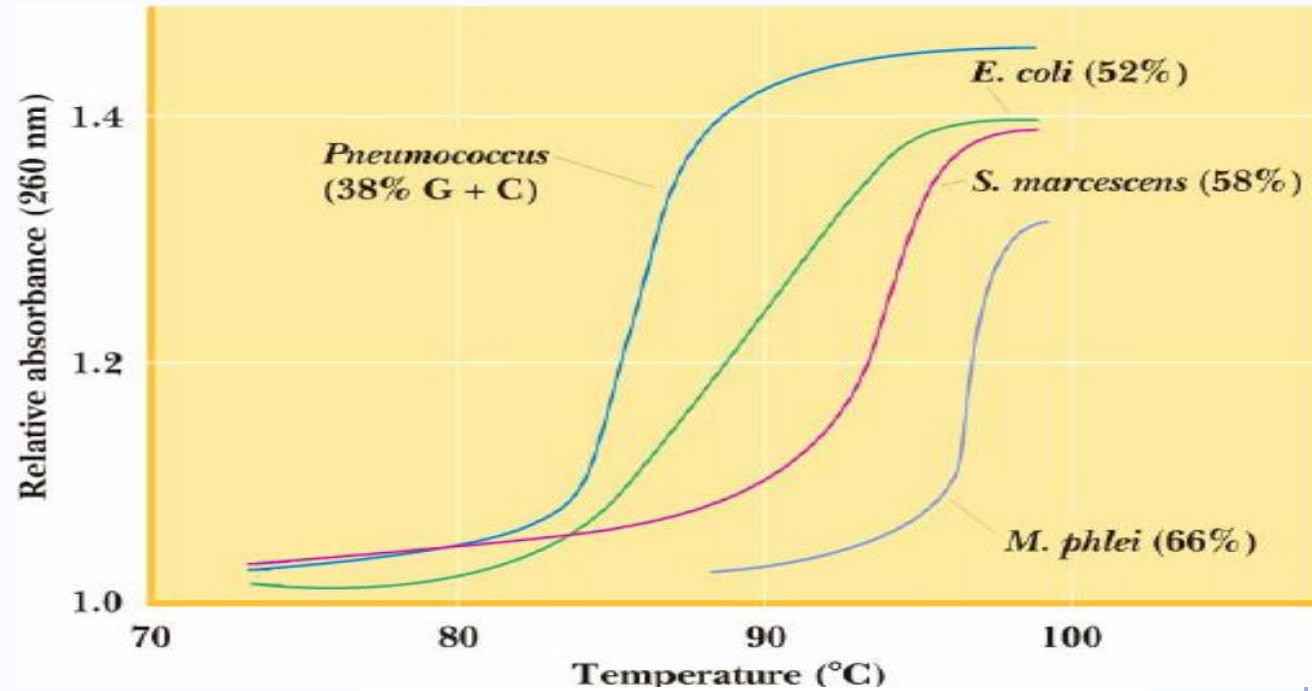
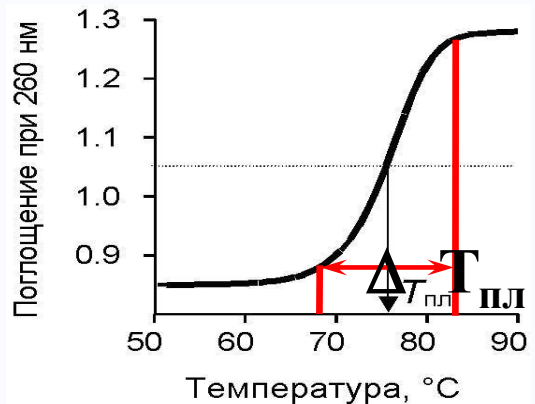
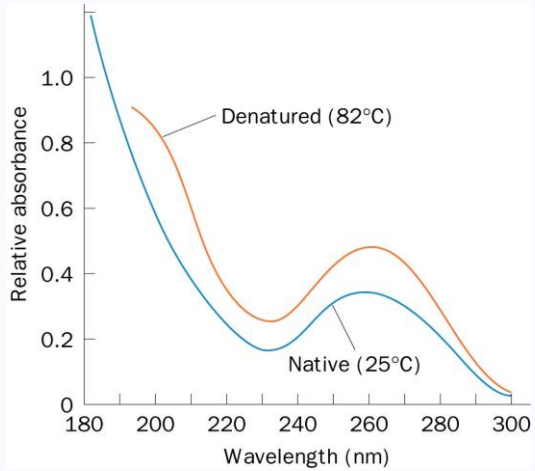


Правила Чаргаффа:

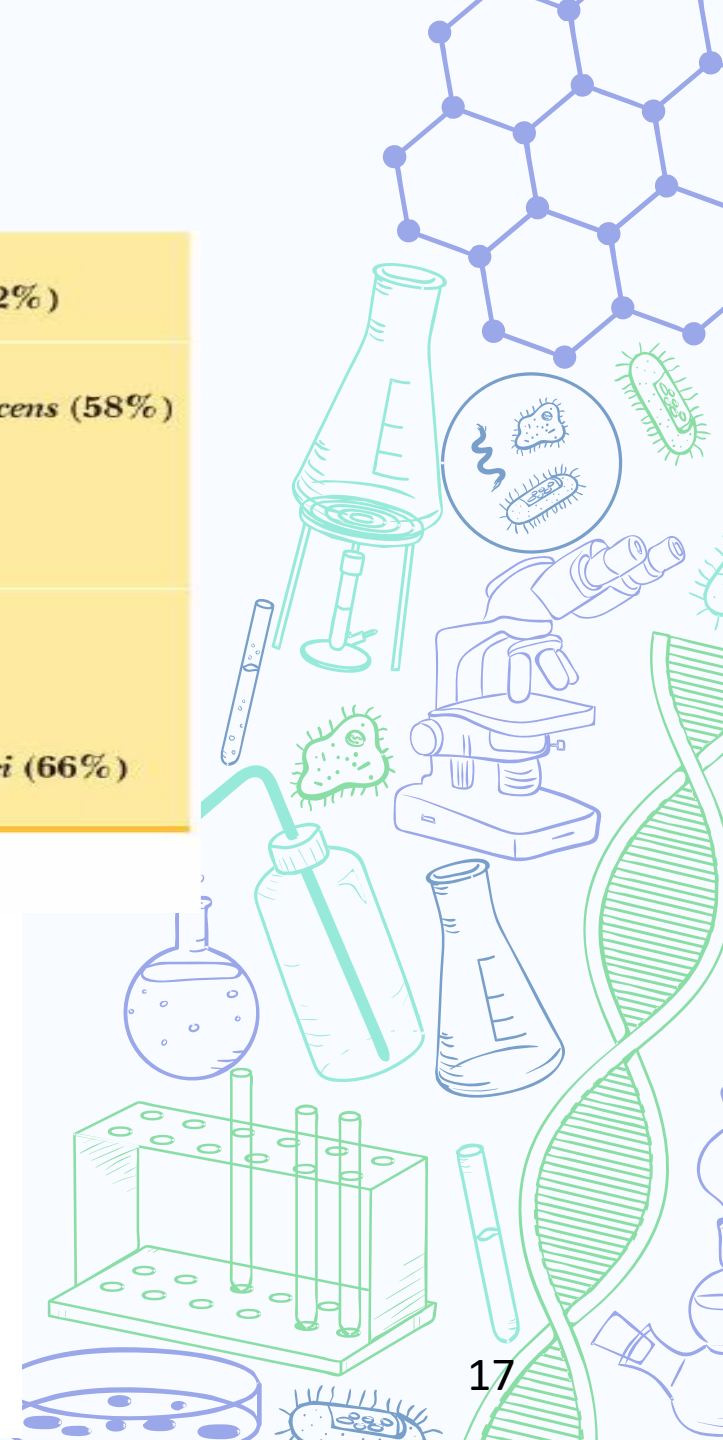
1. $A=T$; $G=C$
2. $(A+G)/(C+T)=1$
3. Количество оснований с аминогруппами в положении 6 равно количеству оснований с кетогруппами в положении 6: $A+C = G+T$.
4. Соотношение $G+C/A+T$ (коэффициент специфичности) отличается для ДНК разных организмов.



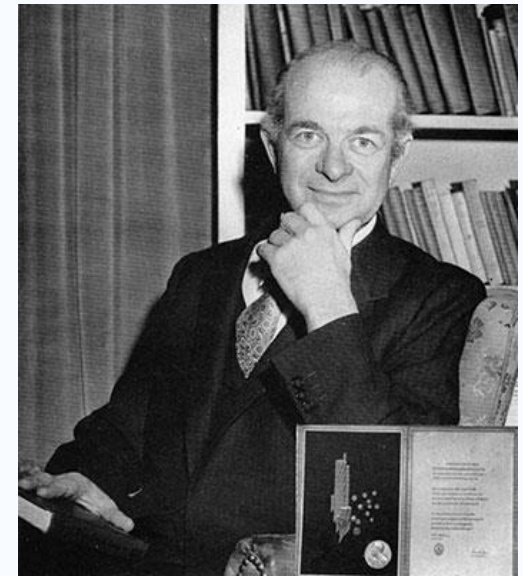
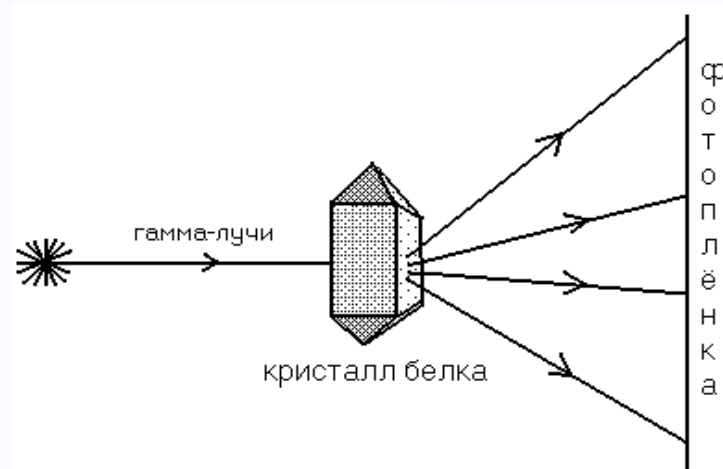
Коэффициент специфичности



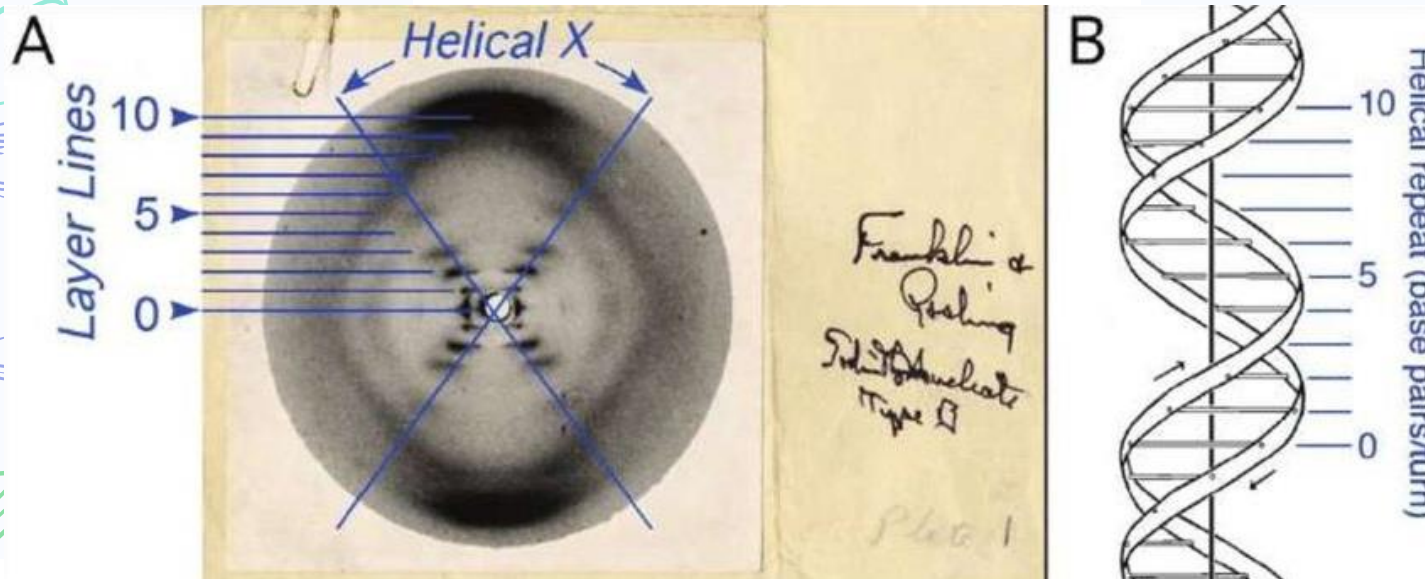
Организм	% ГЦ
<i>Homo sapiens</i>	39.7 %
Овца	42.4 %
Курица	42.0 %
Черепаха	43.3 %
Семга	41.2 %
Морской еж	35.0 %
<i>E. coli</i>	51.7 %
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	68.0 %
<i>Mycobacterium phlei</i>	73.0%



Неизвестные герои ДНК



Лайнус Полинг

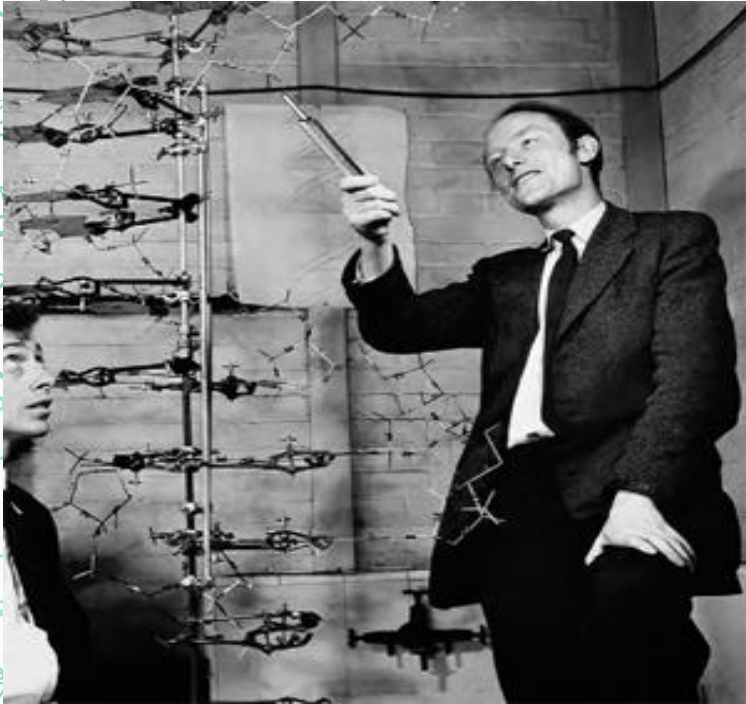


Фотография 51 – рентгенограмма волокон натриевой соли тимусной ДНК в В-форме, полученная Розалин Франклин. Эта рентгенограмма послужила главным толчком к открытию двуспиральности ДНК



Розалинд Франклин

А мы только что открыли секрет жизни!



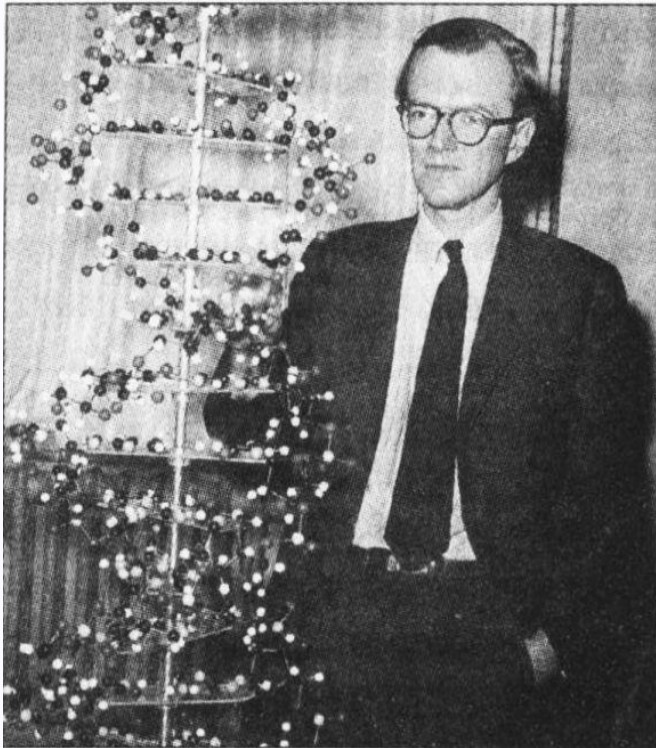
Фрэнсис Крик указывает Джеймсу Уотсону на металлическую модель ДНК, которую они собрали 7 марта 1953 года в комнате 103 в Кавендишской лаборатории, Кембридж

Публикация в журнале Nature статьи Уотсона и Крика «Молекулярная структура нуклеиновых кислот»



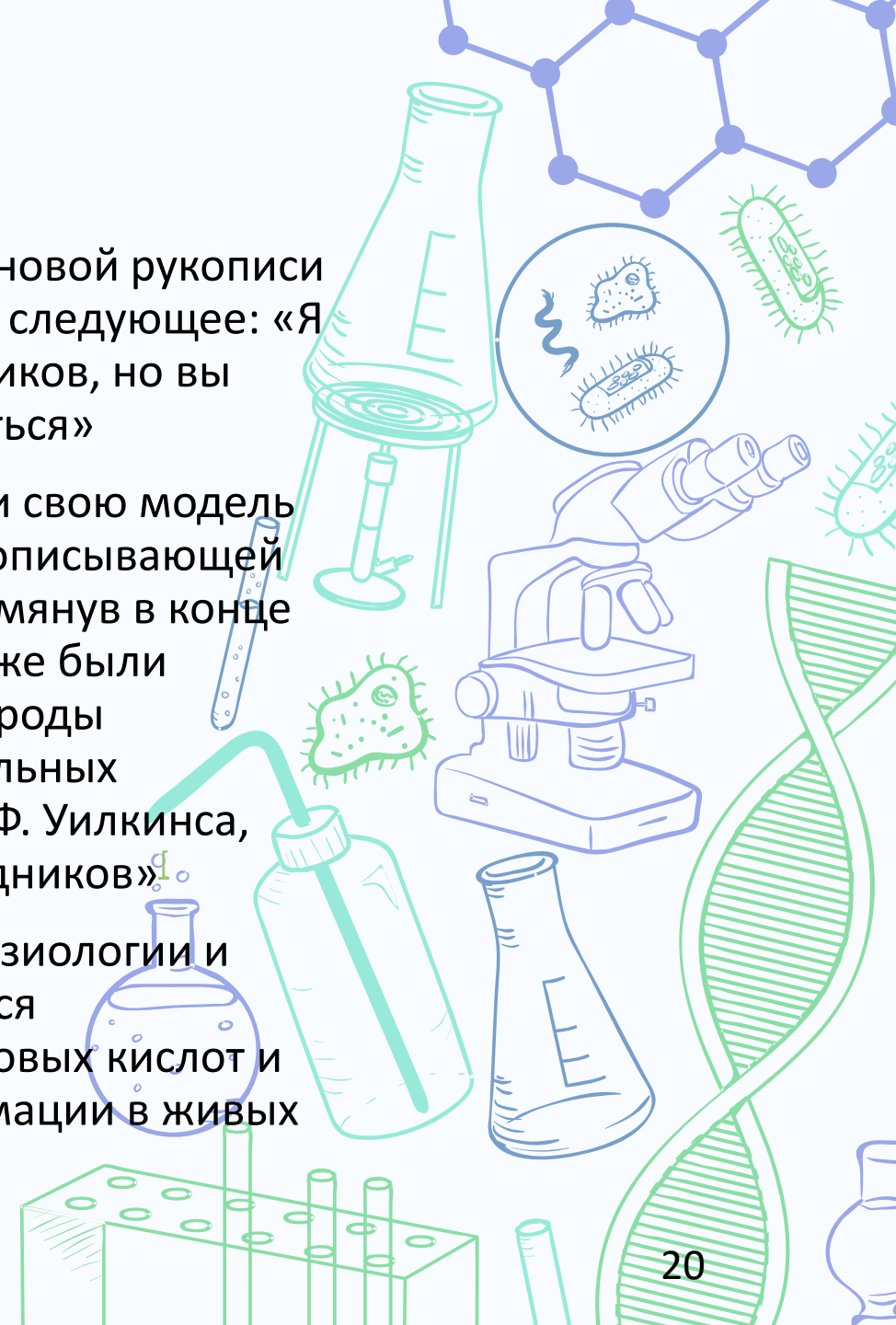
- 1953 г. Модель Уотсона-Крика
- Ф. Крик и Дж. Уотсон, опираясь на результаты опытов генетиков и биохимиков и на данные рентгеноструктурного анализа, создали структурную модель ДНК в форме двойной спирали, указав, что информация, необходимая для репликации ДНК заключена в самой её структуре, т.к. основания комплементарны.
- Дата рождения молекулярной биологии.

Победитель получает всё



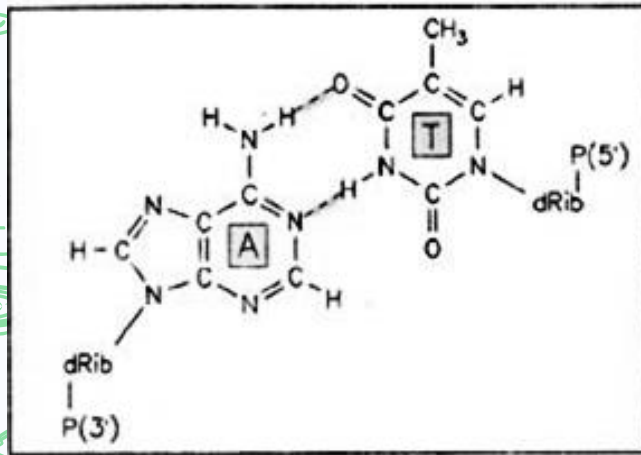
Морис Уилкинс

- 8 марта, в ответ на получение черновой рукописи Крика и Уотсона, Уилкинс написал следующее: «Я думаю, что вы — пара старых жуликов, но вы вполне можете чего-нибудь добиться»
- Крик и Уотсон затем опубликовали свою модель в Nature 25 апреля 1953 в статье, описывающей форму двойной спирали ДНК, упомянув в конце статьи одной фразой, что «мы также были вдохновлены знанием общей природы неопубликованных экспериментальных результатов и идей доктора М. Х. Ф. Уилкинса, доктора Р. Е. Франклин и их сотрудников»
- Нобелевская премия 1962 г. по физиологии и медицине за открытие, касающееся молекулярной структуры нуклеиновых кислот и их значения для передачи информации в живых системах

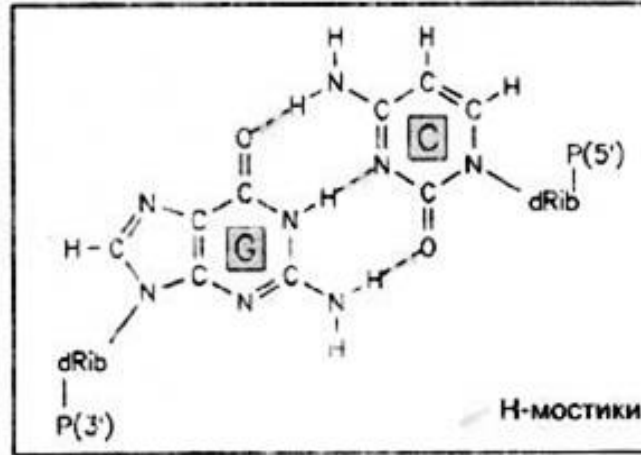


Структура нуклеиновых кислот

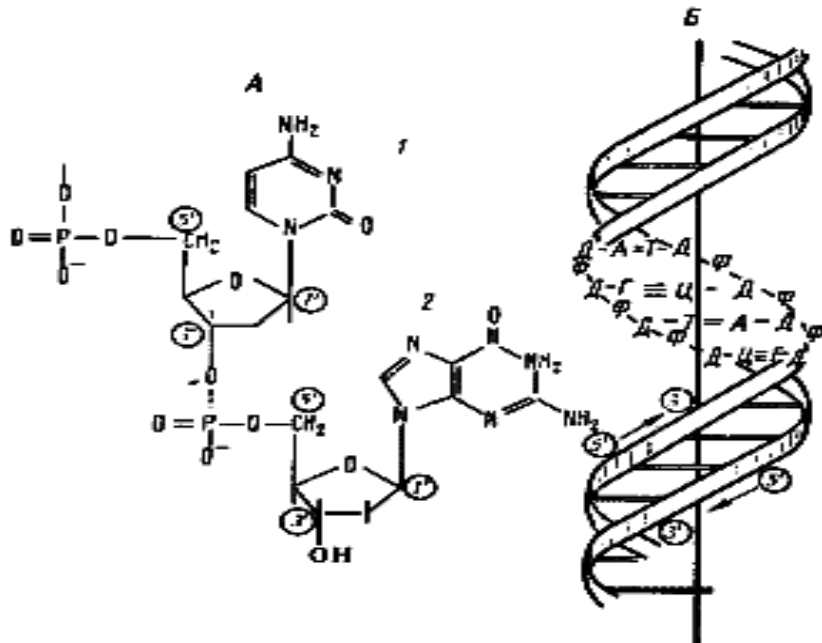
1. A/T-спаривание



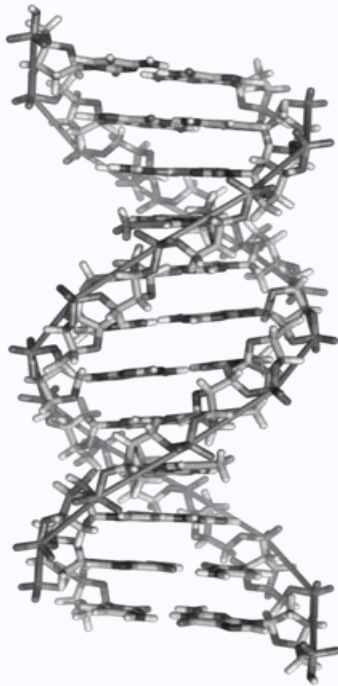
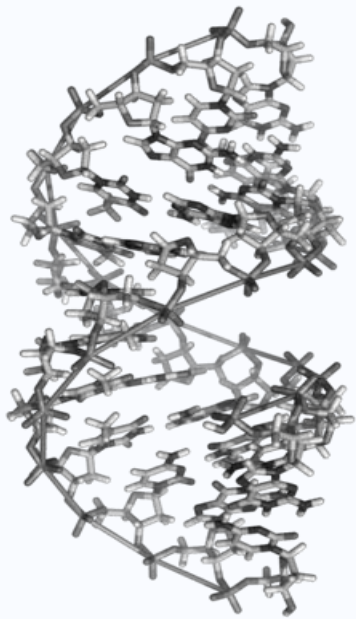
2. G/C-спаривание



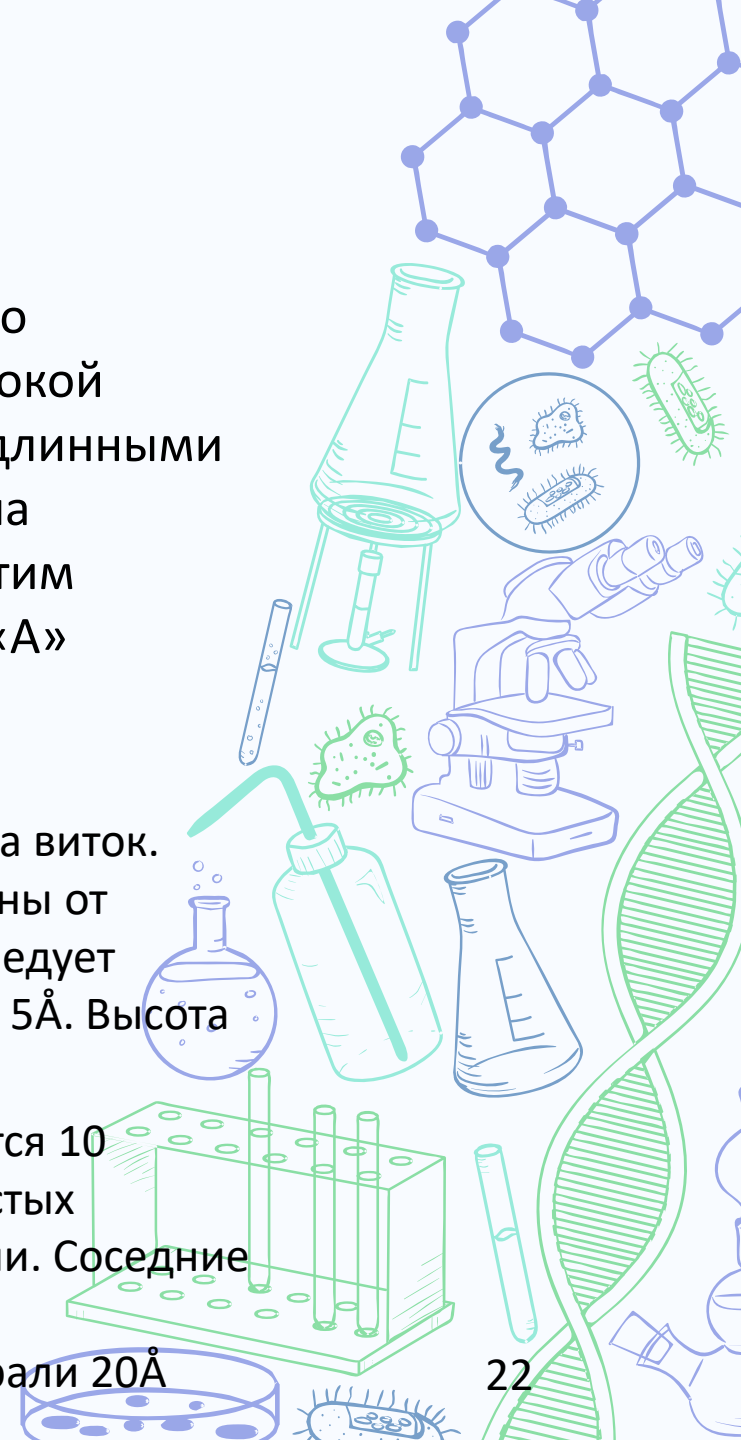
- Молекула ДНК представляет собой чрезвычайно длинный неразветвленный линейный полимер, состоящий только из четырех типов нуклеотидов
- Спаривание оснований в ДНК
 - Каждое основание одной цепи связано с **комплементарным** ему основанием другой цепи водородными мостиками
- **Первичная структура нуклеиновых кислот**
Формирующиеся между нуклеотидами фосфодиэфирные связи обеспечивают образование нити, в которой принято выделять 5'-конец, оканчивающийся фосфатом, и 3'-конец, оканчивающийся пентозой. Целая же молекула ДНК состоит сразу из двух антипараллельных цепей (3' → 5' и 5' → 3' соответственно)



Структура нуклеиновых кислот



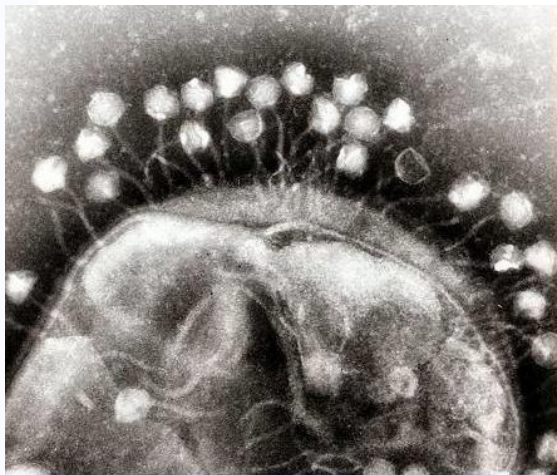
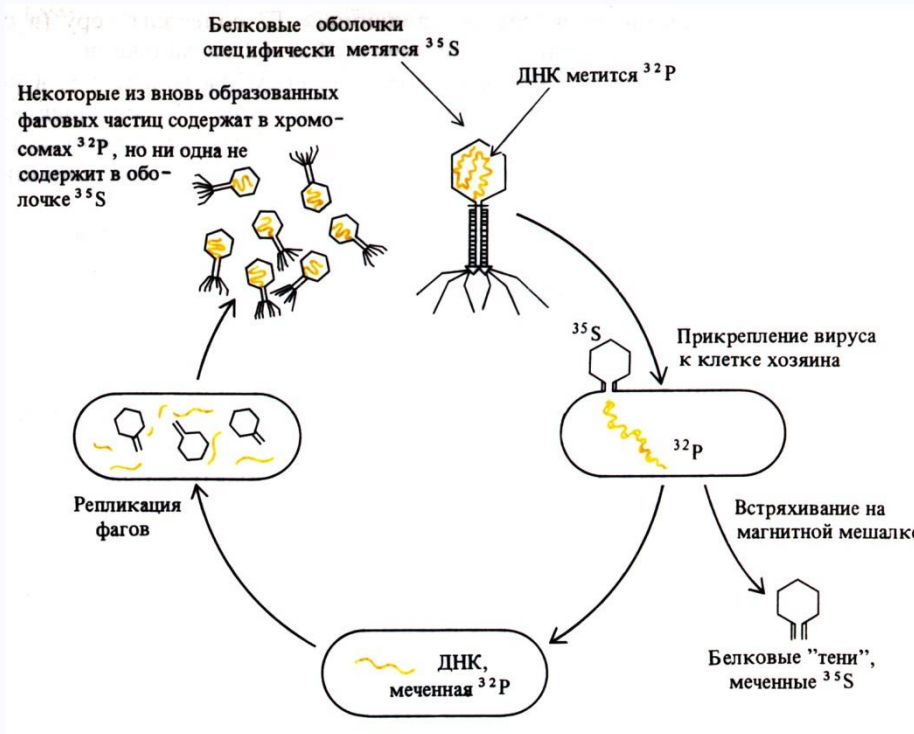
- **Р. Франклин** и **Р. Гослинг** открыли, что существует две формы ДНК: при высокой влажности волокна ДНК становятся длинными и тонкими; при высушивании волокна становятся короткими и толстыми. Этим формам были даны названия «В» и «А» соответственно
- **А-форма** - 11 пар азотистых оснований на виток. Плоскости азотистых оснований отклонены от нормали к оси спирали на 20° . Отсюда следует наличие внутренней пустоты диаметром 5\AA . Высота витка 28\AA
- В основной - **В-форме** на виток приходится 10 комплементарных пар. Плоскости азотистых оснований перпендикулярны оси спирали. Соседние комплементарные пары повернуты друг относительно друга на 36° . Диаметр спирали 20\AA



Крах протеиновой теории

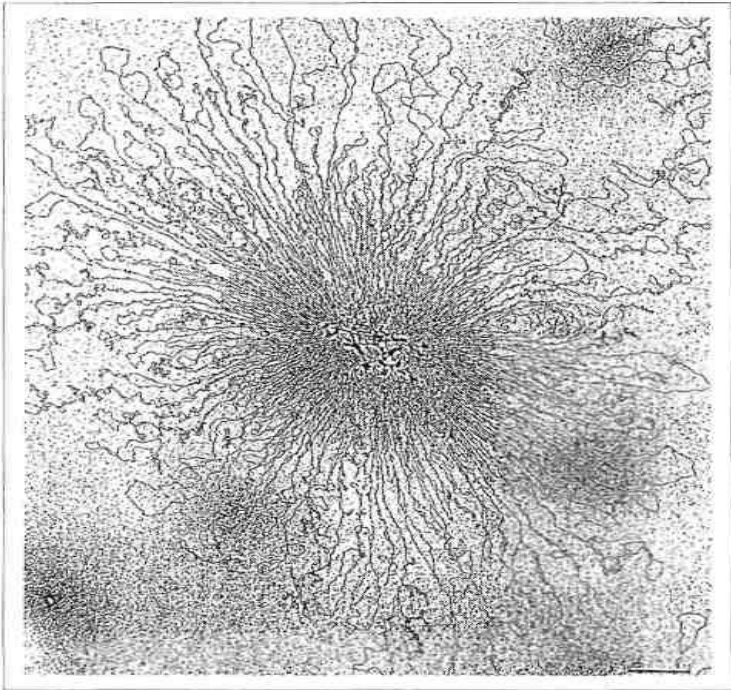
- **1952г. Эксперимент Альфреда Херши и Марты Чейз**

- фаги, у которых белковая оболочка была мечена радиоактивной серой (S^{35}), а ДНК - радиоактивным фосфором (P^{32}), инкубировали с бактериями. Затем бактерии отмывали. В смывных водах не обнаруживали P^{32} , а в бактериях - S^{35} . Следовательно, внутрь попала только ДНК. Через несколько минут из бактерии выходили десятки полноценных фагов, содержащих и белковую оболочку, и ДНК.

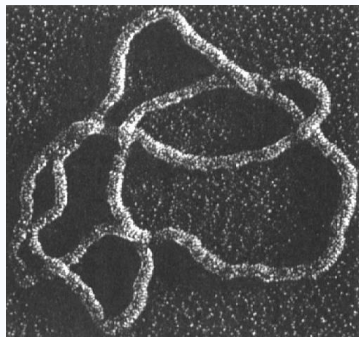


Прикрепление бактериофагов к поверхности бактериальной клетки. Фотография сделана с помощью трансмиссионной электронной микроскопии. Увеличение примерно в 200 тысяч раз

Организация генома прокариот

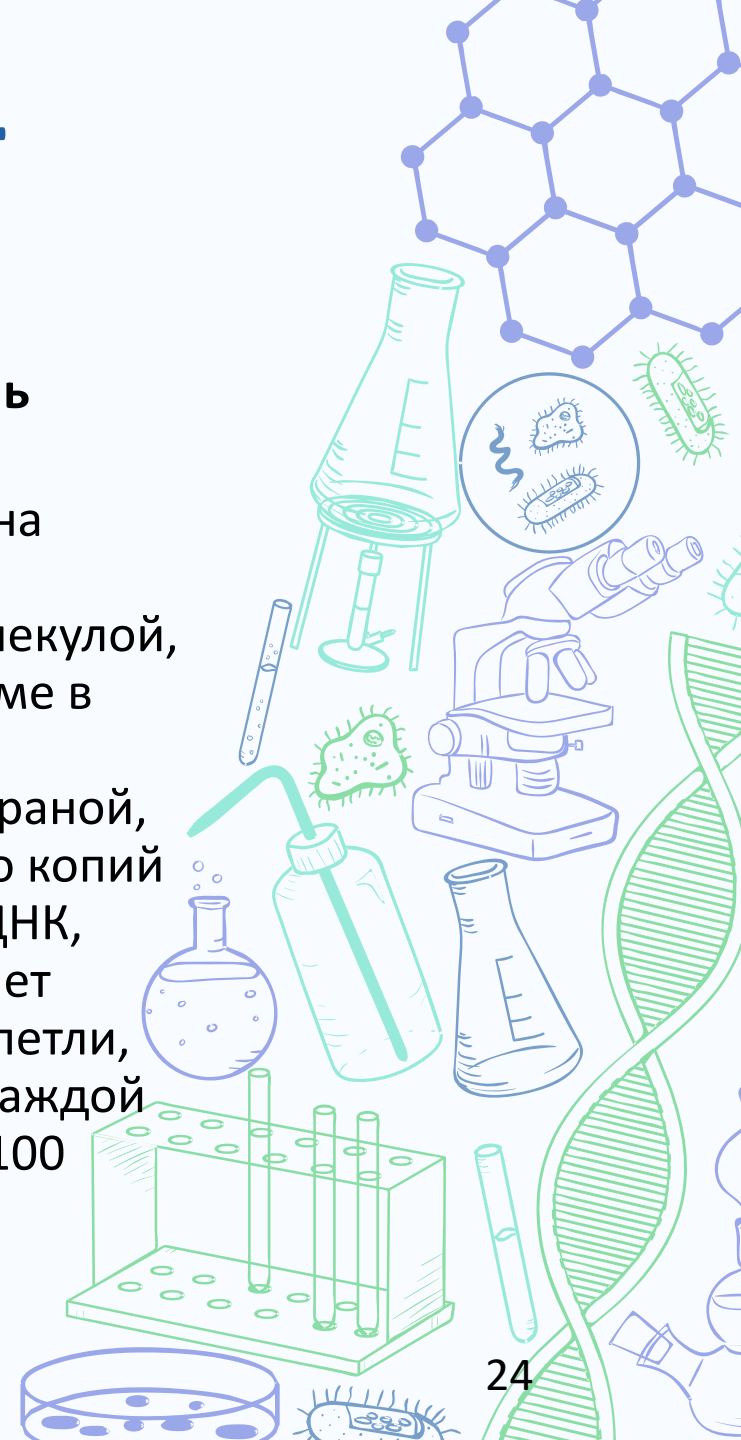


Изолированный нуклеоид *E.coli*

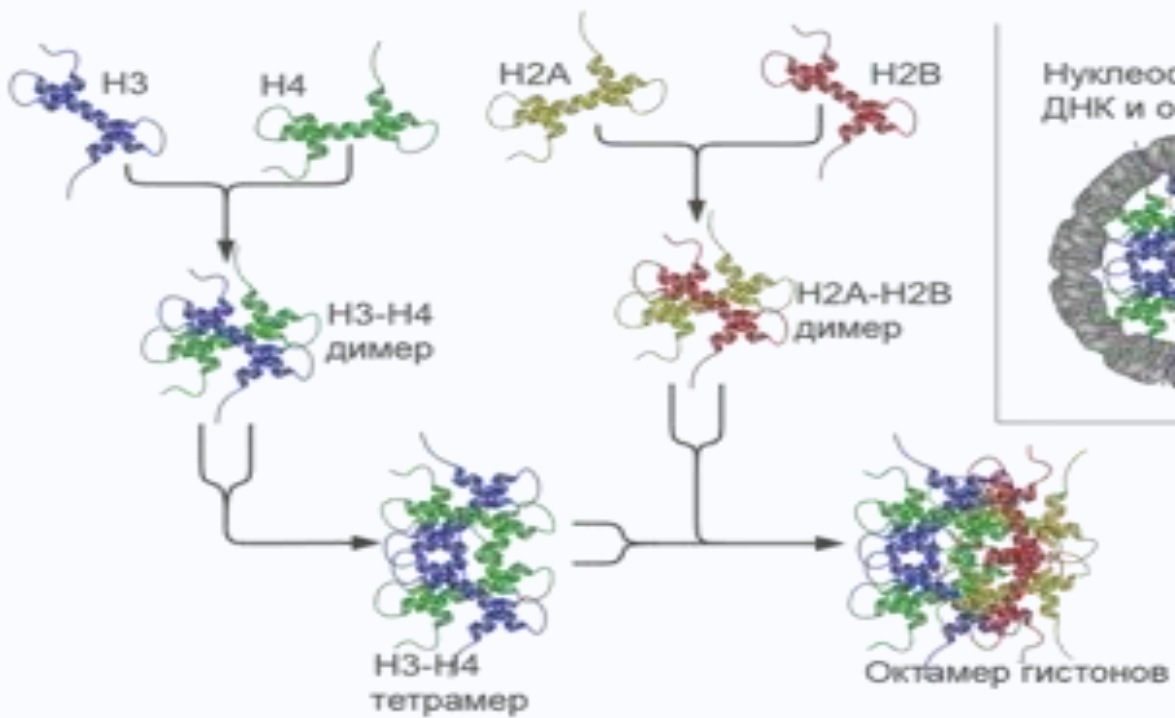


Плазмидная ДНК под электронным

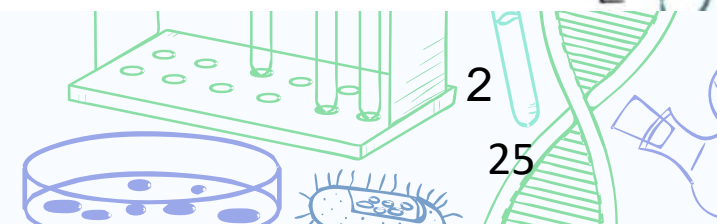
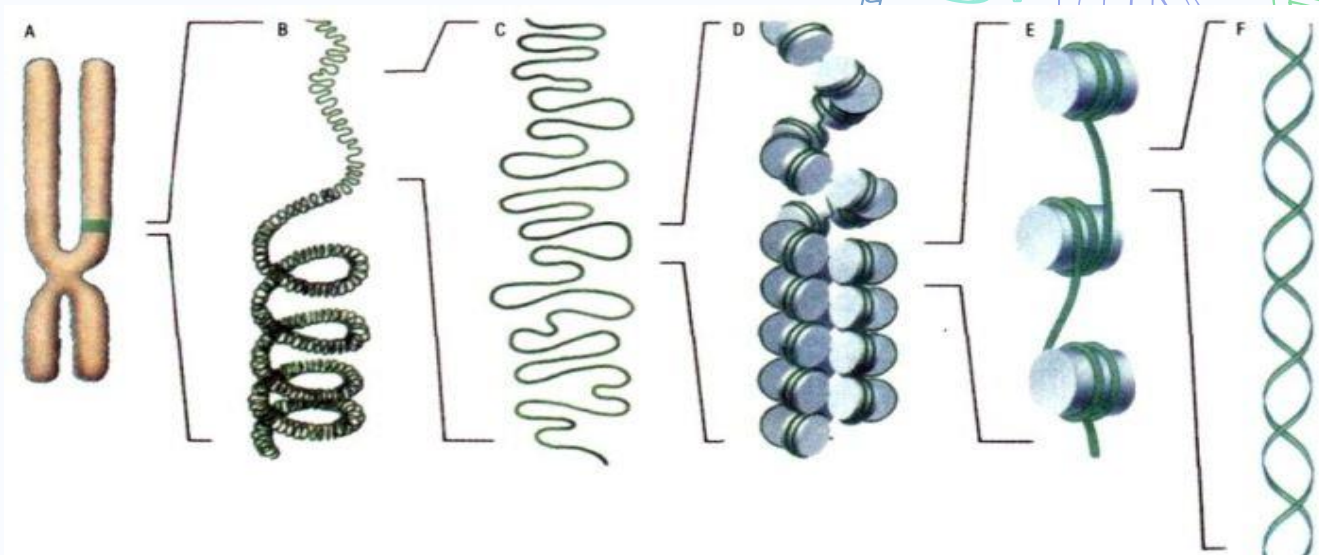
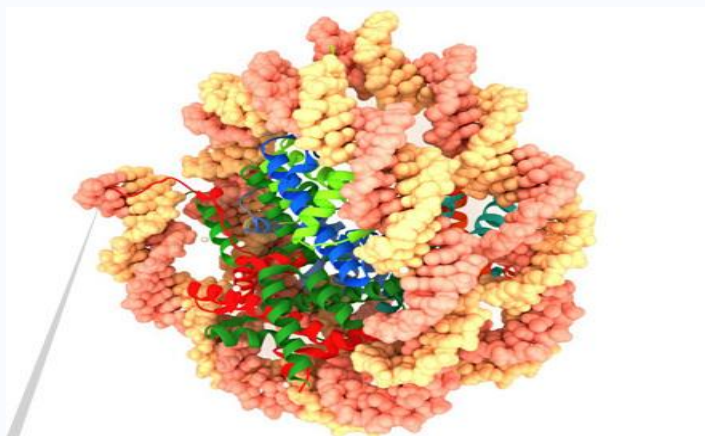
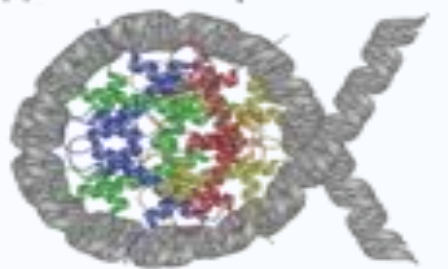
- 1956 г. Ф.Жакоб и Е.Вильман предложили кольцевую модель бактериальной хромосомы
 - ДНК прокариот представлена кольцевой двуцепочечной суперспирализованной молекулой, расположенной в цитоплазме в виде клубка - **нуклеоида**. Нуклеоид не отделён мембраной, может содержать несколько копий ДНК. Нуклеоид состоит из ДНК, белков и РНК. ДНК составляет около 80%. Она свёрнута в петли, примерно по 40 тыс.н.п. в каждой петле. В геноме примерно 100 таких петель.



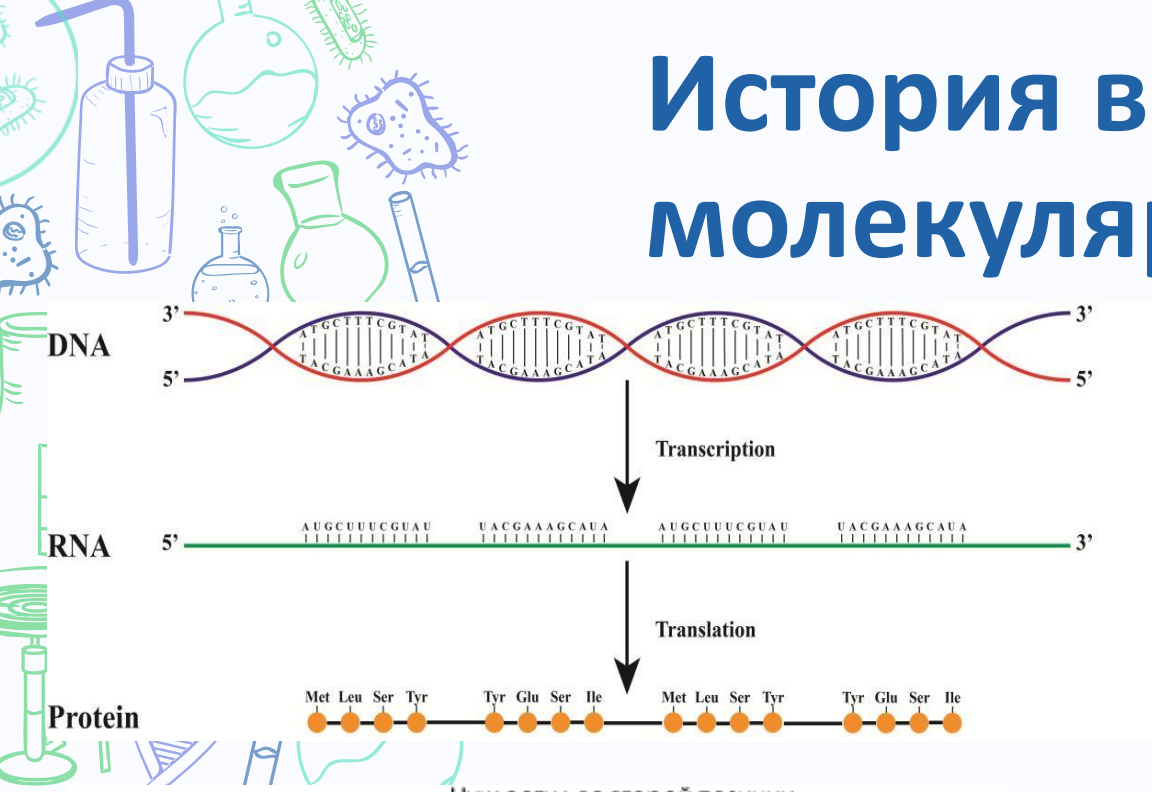
Структура нуклеиновых кислот



Нуклеосома: комплекс ДНК и октамера гистонов



История возникновения молекулярной биологии



- **1957-1958 гг. Ф. Крик и Дж. Гамов**
 - предложили концепцию «центральной догмы» молекулярной биологии о передаче генетической информации: ДНК – мРНК – белок.
- **М. Мезельсон и Ф. Сталь**
 - продемонстрировали полуконсервативный механизм репликации ДНК.
- **1961 г. Ф. Жакоб и Ж. Моно**
 - открыли оперонный принцип организации генов и регуляции генной активности у прокариот.
- **1963-66гг. М.Ниренберг, Г.Маттэй**
 - расшифровали генетический код и продемонстрировали, что каждую из 20 аминокислот в молекуле мРНК (кодон) кодируют три смежных нуклеотида.

Нуклеотид в первой позиции

	U	C	A	G
U	UUU Фенилаланин UUC Фенилаланин UUA Лейцин UUG Лейцин	UCU Серин UCC Серин UCA Серин UCG Серин	UAU Тирозин UAC Тирозин UAA СТОП UAG СТОП	UGU Цистеин UGC Цистеин UGA СТОП UGG Триптофан
C	CUU Лейцин CUC Лейцин CUA Лейцин CUG Лейцин	CCU Пролин CCC Пролин CCA Пролин CCG Пролин	CAU Гистидин CAC Гистидин CAA Глутамин CAG Глутамин	CGU Аргинин CGC Аргинин CGA Аргинин CGG Аргинин
A	AUU Изолейцин AUC Изолейцин AUA Изолейцин AUG Метионин	ACU Треонин ACC Треонин ACA Треонин ACG Треонин	AAU Аспарагин AAC Аспарагин AAA Лизин AAG Лизин	AGU Серин AGC Серин AGA Аргинин AGG Аргинин
G	GUU Валин GUC Валин GUA Валин GUG Валин	GCU Аланин GCC Аланин GCA Аланин GCG Аланин	GAU Аспарагиновая кислота GAC Аспарагиновая кислота GAA Глутаминовая кислота GAG Глутаминовая кислота	GGU Глицин GGC Глицин GGA Глицин GGG Глицин

Нуклеотид во второй позиции

История развития генной инженерии



Пол Наим Берг и его «вирусная» хонда



Лаборатория Р4 — ультразащищенный комплекс, в котором в конце 1970-х работали ученые, исследовавшие человеческую ДНК методами генной инженерии

- **1971г. С.Коэн и Г.Бойер**

независимо разработали стратегию переноса функциональной единицы наследственности (гена) из одного организма в другой.

- **1972г. П.Берг**

сконструировал и получил биологически активную гибридную плазмиду путем обработки рестриктазой двух плазмид с последующей их сшивкой ДНК-лигазой.

- **1972г. дата рождения генетической инженерии**

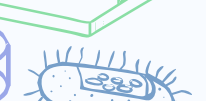
П. Берг, С. Коэн, Х. Бойер с сотрудниками создали первую рекомбинантную ДНК, объединившую в своем составе генетический материал из трех источников:

- полный геном онкогенного вируса обезьян SV40,
- часть генома умеренного бактериофага λ ,
- гены галактозного оперона *E. coli*.

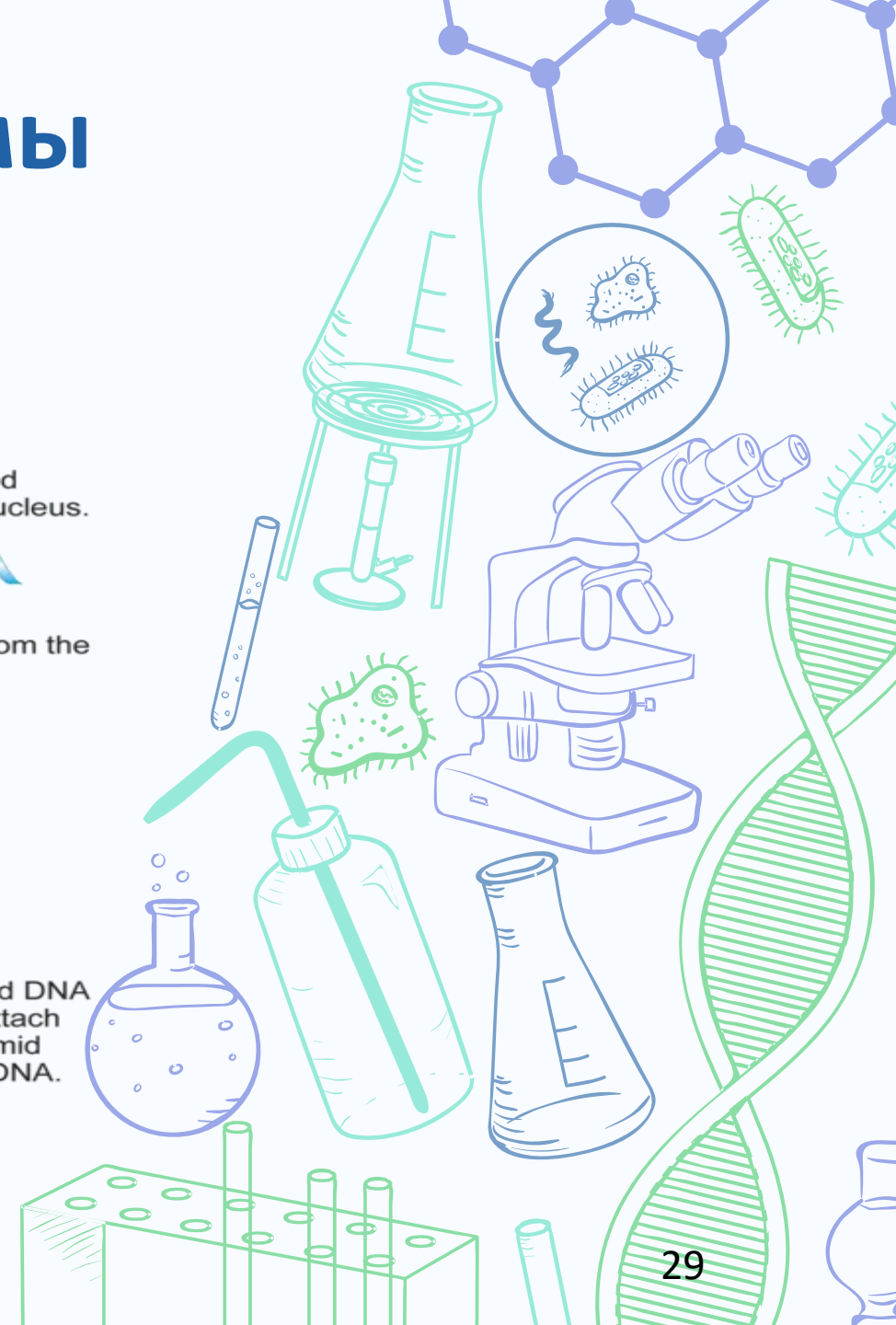
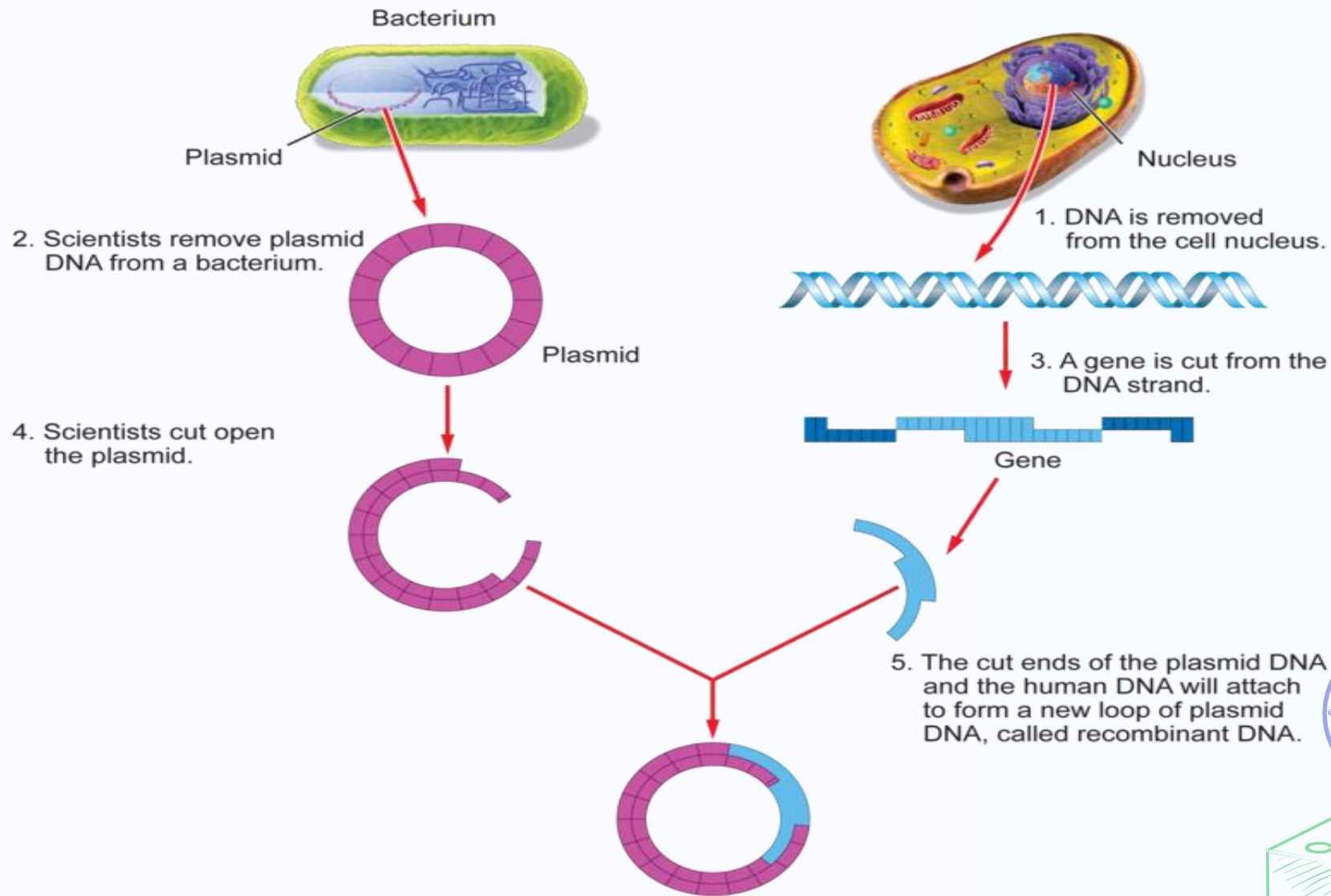
История развития генной инженерии

- **1974г.**
Открытое письмо П.Берга и других ученых, мораторий на проведение генно-инженерных работ.
- **1975-1980г.**
Организуются первые биотехнологические компании.
- **1977г. У.Джилберт и А.Максам**
разработали быстрый метод химического анализа ДНК.
- **1978г.**
пересажен ген млекопитающего в ДНК бактерии.
- **1979г. В.Бендер и Д.Хогнесс**
разработали метод клонирования ДНК, позволивший выделить и клонировать тысячи различных генов.

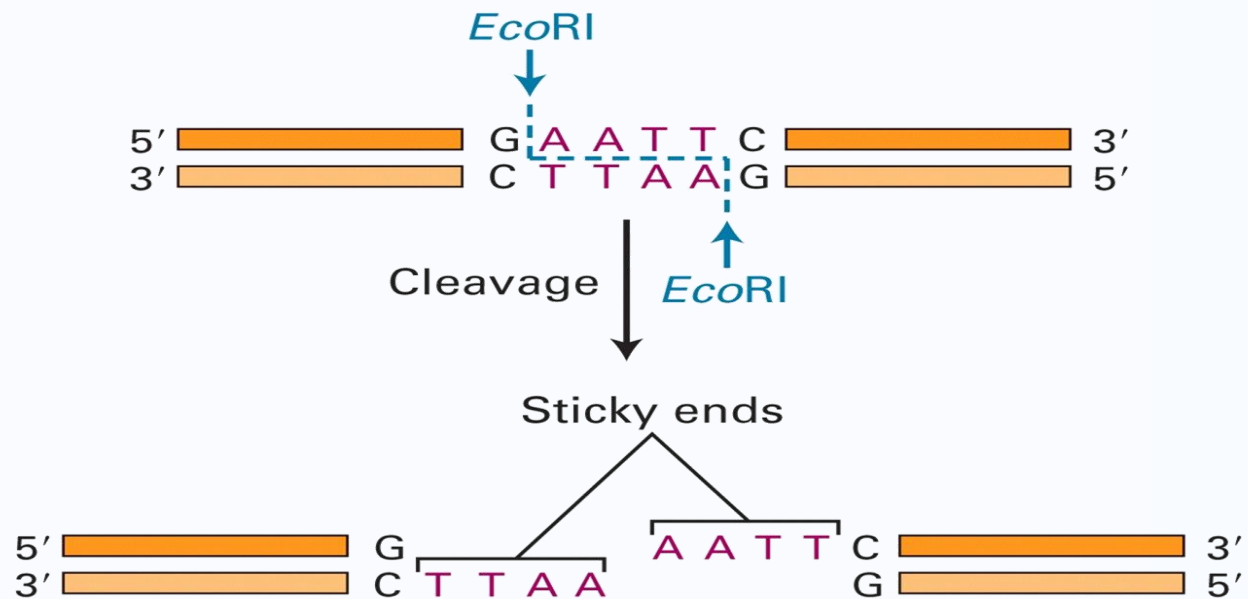
Слушания в Кембридже, штат Массачусетс. В результате этого процесса в городе были полностью запрещены исследования рекомбинантной ДНК



Рекомбинантные организмы



Рестриктазы = ножницы



AluI



HaeIII



BamHI



HindIII



EcoRI



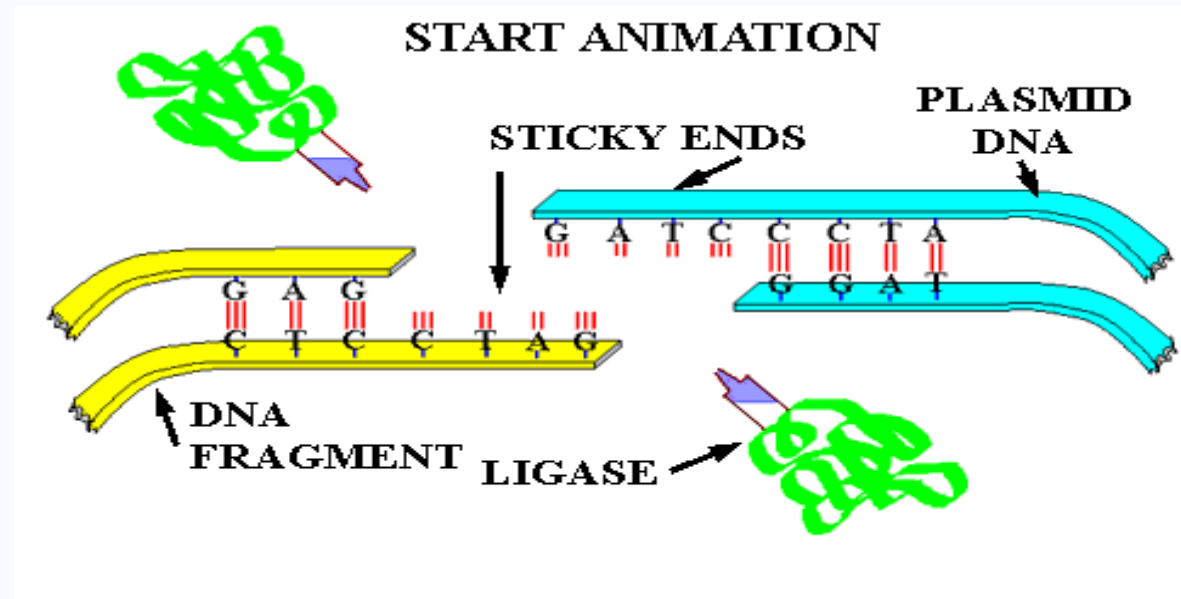
AluI and **HaeIII** produce blunt ends

BamHI **HindIII** and **EcoRI** produce "sticky" ends

Более половины из известных рестриктаз узнают четырех-, шести- и восьминуклеотидные последовательности, являющиеся палиндромами – обращенными повторами

ДНК-лигаза = нитки или клей

ДНК-лигазы сшивают рядом расположенные нуклеотиды, образуя связь между остатками сахаров. ДНК-лигазы абсолютно необходимы в процессах репарации ДНК, в процессах репликации - при удвоении цепи ДНК

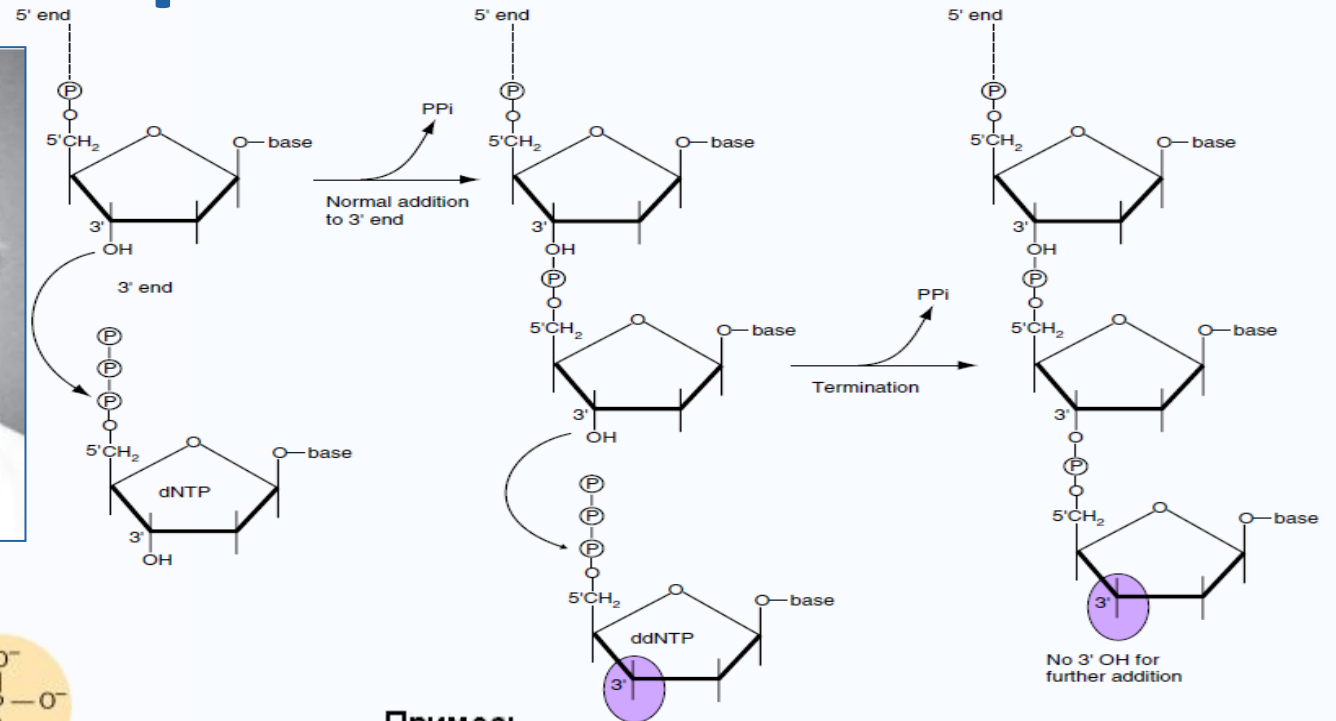
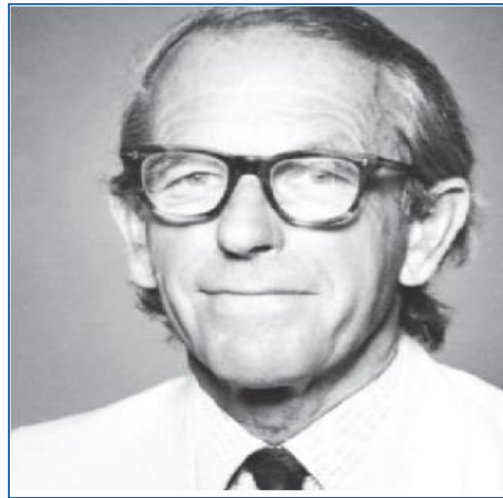


История развития генной инженерии

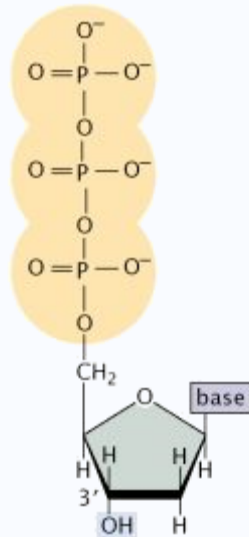
- Компания «Дженентек» и Национальный медицинский центр г. Хоуп, Калифорния, объявили об успешном синтезе гена соматостатина и инсулина с помощью технологии рекомбинантной ДНК. Так впервые была продемонстрирована **экспрессия гена человека в бактериальных клетках**
- **1980г.** Верховный суд США создал прецедент по **патентованию рекомбинантных микроорганизмов**
- **1982г.** Начало эры **трансгенных растений**
- В **1985** году была опубликована первая полная последовательность ДНК живого организма - **бактерии *Haemophilus influenzae***
- **1988г.** Генетики Ф.Ледер и Т.Стюарт запатентовали первое животное, полученное с помощью методов генетической инженерии, – трансгенную мышь с повышенной частотой возникновения опухолей



Метод Сэнгера 1977г.

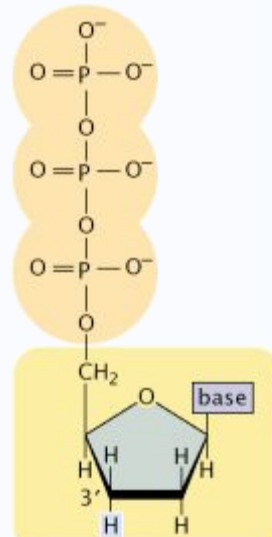


(a)



Deoxyribonucleoside triphosphate (dNTP)

(b)



Dideoxynucleoside triphosphate (ddNTP)

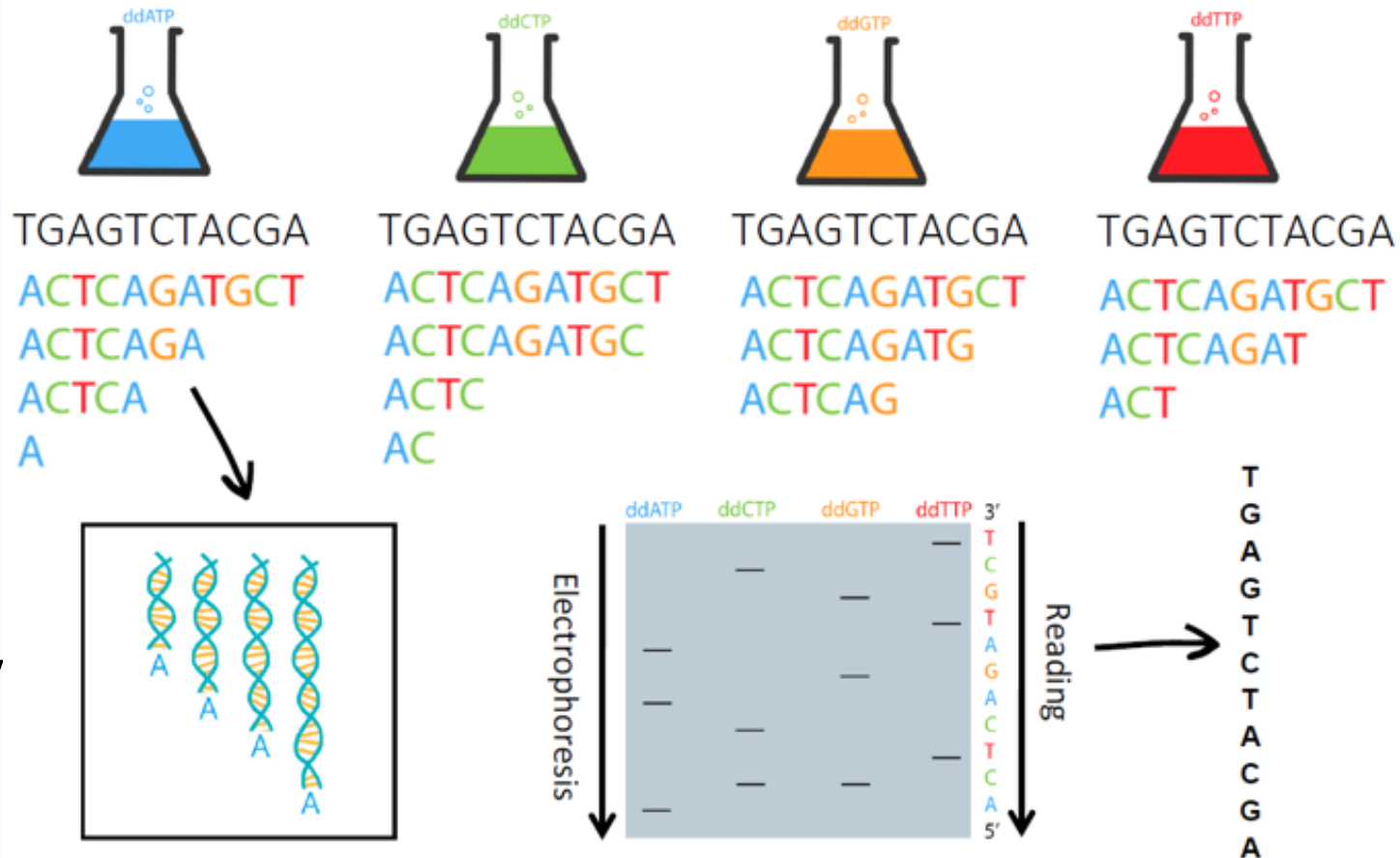
Примесь дидезоксинуклеотида в (справа, нет OH-группы у 3'-атома углерода) к дезоксинуклеотидам (слева) при синтезе ДНК *in vitro* приводит к прекращению синтеза цепи в позиции, в которой ставился ddNTP

Секвенирование ДНК

Расшифровка генома дрожжей заняла 20 лет (12 млн пар оснований)
72 лаборатории сотрудничали в проекте, сотни часов биологов, химиков, инженеров и программистов

Сейчас, можно секвенировать 1 дрожжевой геном в минуту

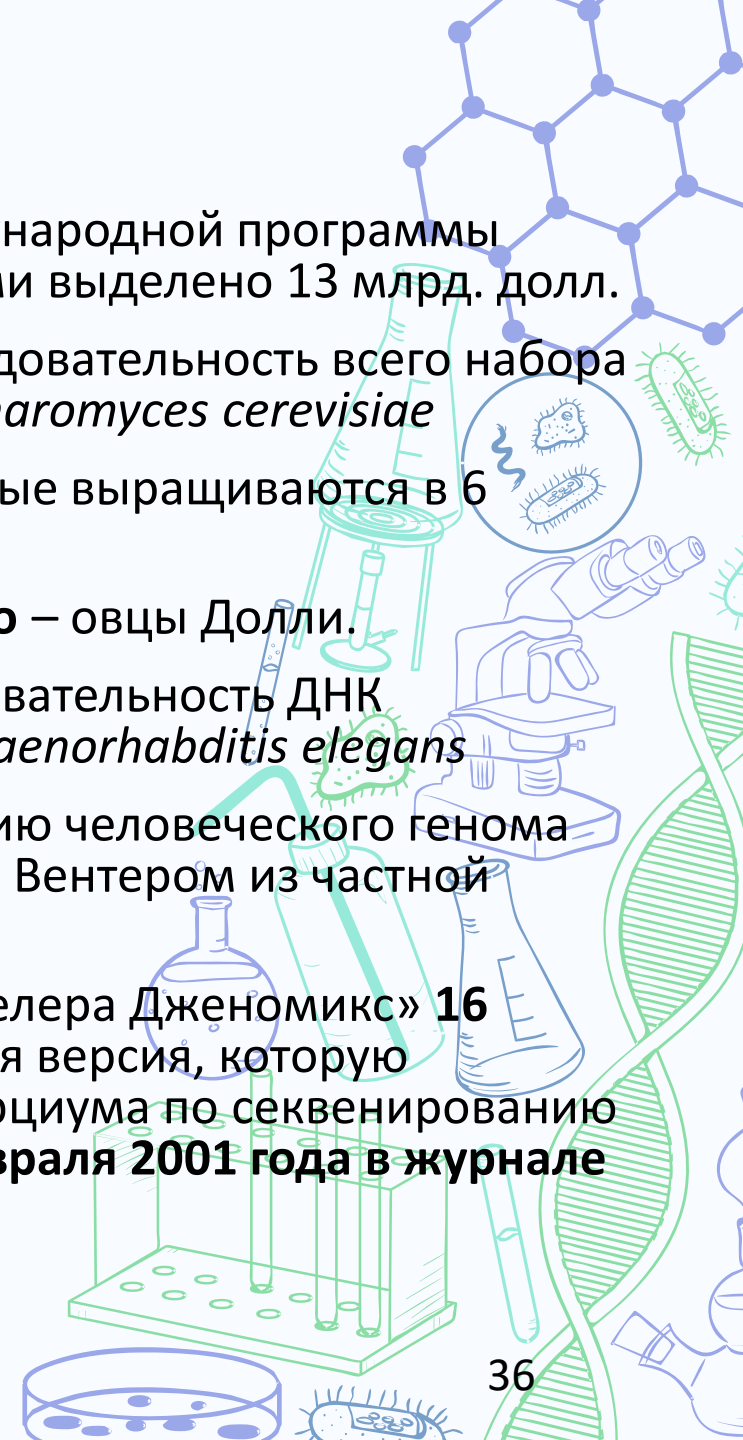
Результаты реакции обрыва цепи



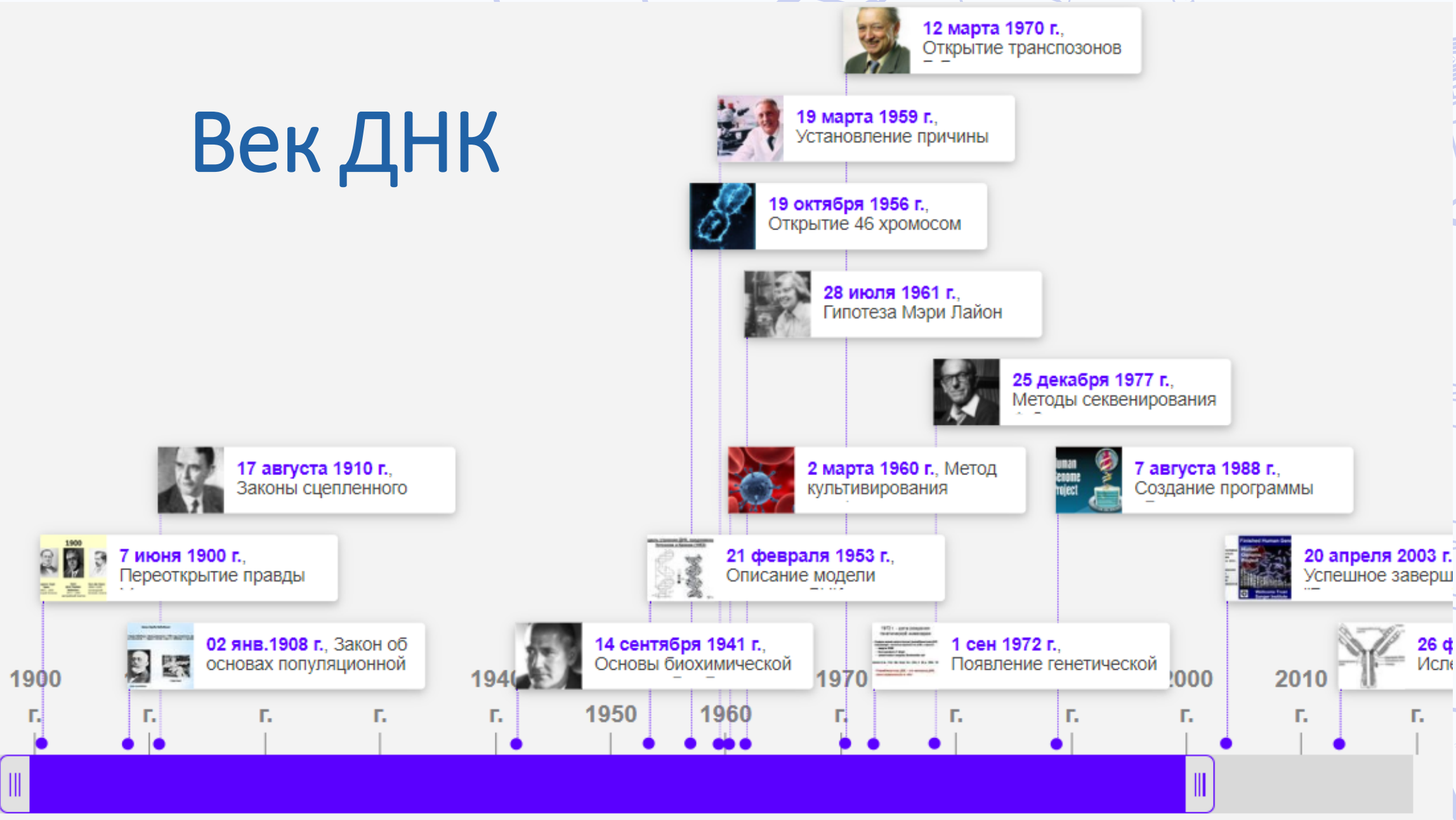
Геномные проекты



- **1990г.**-Официальное начало реализации международной программы «Геном человека» в США. Странами-участницами выделено 13 млрд. долл.
- **1996г.** Определена полная нуклеотидная последовательность всего набора хромосом – пивных (пекарских) **дрожжей** *Saccharomyces cerevisiae*
- Первый год культивирования ГМ-культур, которые выращиваются в 6 странах на общей площади 1,7 млн.га.
- **1997г.** Клонирование первого млекопитающего – овцы Долли.
- В **1998** году была опубликована первая последовательность ДНК многоклеточного организма - **плоского червя** *Caenorhabditis elegans*
- В **1990-х** годах был начат проект по исследованию человеческого генома группой исследователей во главе с Дж. Крэйгом Вентером из частной лаборатории «Селера Дженомикс»
- В 2001 г. был опубликован результат работы «Селера Дженомикс» **16 февраля 2001 года в журнале «Science»**. Другая версия, которую представила группа из Международного консорциума по секвенированию человеческого генома, была напечатана **13 февраля 2001 года в журнале «Nature»**.



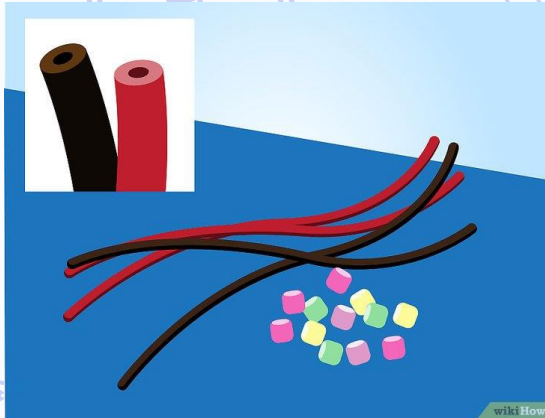
Век ДНК



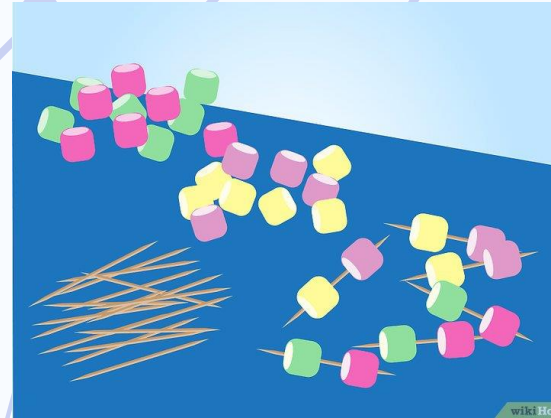


Спасибо за внимание!

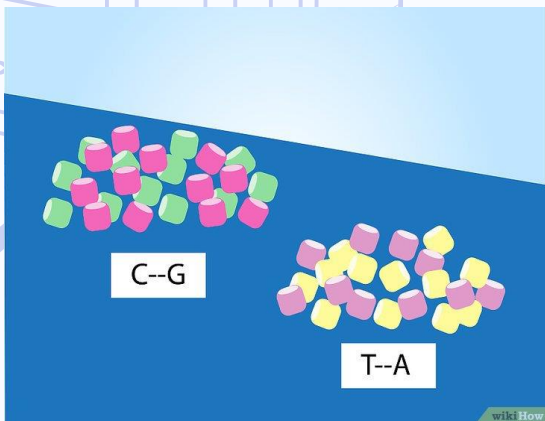
Модель ДНК из конфет



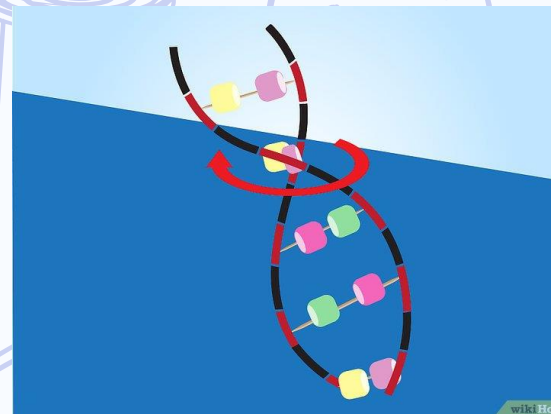
1 Выберите сорт конфет. Чтобы сделать боковые нити из сахара и групп фосфатов, используйте мармелад, лакрицу или зефир в виде трубочек. В качестве азотистых оснований возьмите конфеты "мармеладные мишки" четырех разных цветов. Какие конфеты бы вы ни использовали, они должны быть достаточно мягкими, чтобы их можно было проткнуть зубочисткой.



3 Разберите мармеладных мишек по парам. В нити ДНК в парах расположены цитозин и гуанин (Ц и Г), а также тимин и аденин (Т и А). Выберите мармеладных мишек четырех различных цветов - они будут представлять разные азотистые основания. Не важно, в какой последовательности располагается пара Ц-Г или Г-Ц, не делайте пары с несоответствующими цветами, например, Т-Г или А-Ц. Выбор цветов может быть абсолютно произвольным.



2 Приготовьте остальные материалы. Возьмите зубочистки, которые вы используете при создании модели. Если у вас нет мармеладных мишек под рукой, но есть зефир, он будет прекрасной альтернативой.



4 Соберите модель ДНК. Разложите ваши трубчатые конфеты на гладкой поверхности и прикрепите зубочистки с мармеладными мишками к длинному мармеладу, вставляя в нее острые концы зубочисток. Прикрепив все зубочистки, изогните нити в направлении против часовой стрелки, чтобы придать модели вид двойной спирали. Наслаждайтесь видом выполненной вами модели ДНК!