

Основные объекты
исследования биофизики
клеточных и мембранных
процессов

Семинар 1

1. Особенности химического состава

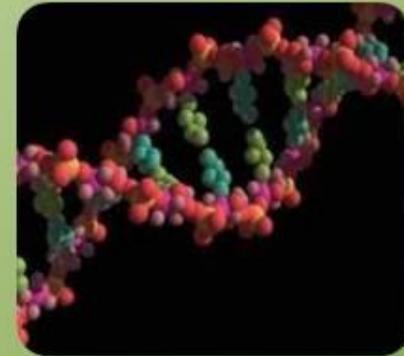
Макро- молекулы

Жиры

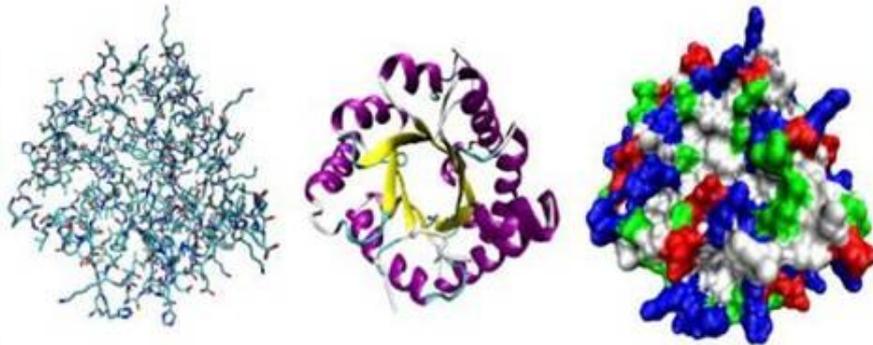
Белки

Углеводы

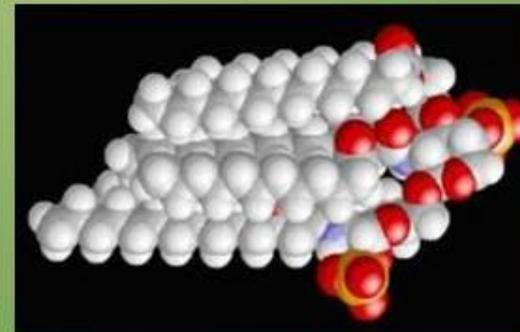
Нуклеиновы
е
кислоты



Обеспечивает явление наследственности и изменчивости и самовоспроизведение.

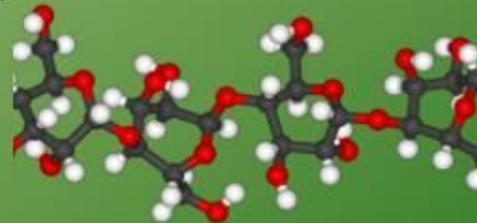


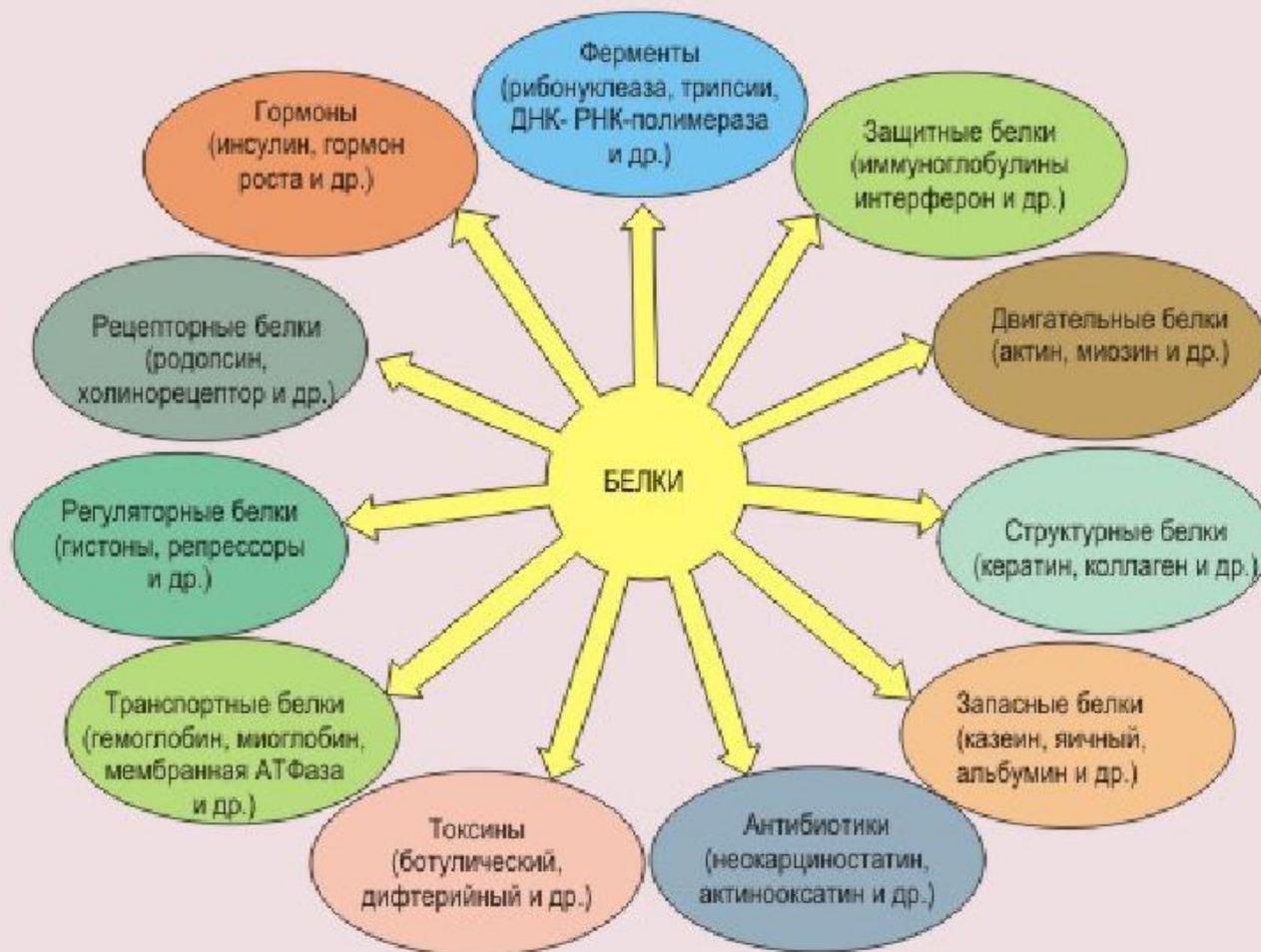
Основные структурные компоненты и биологические катализаторы - белки



Источники энергии, компоненты мембран клеток

Целлюлоза – углевод.



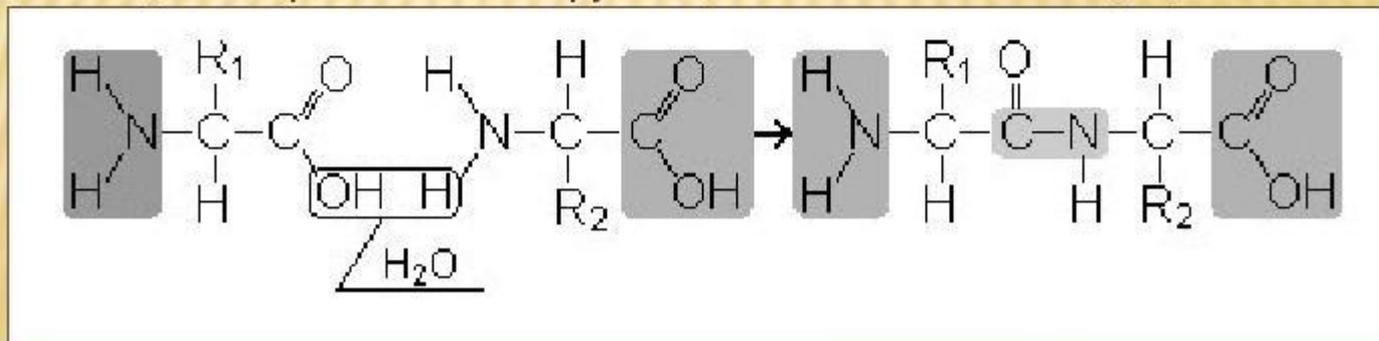


Структура белка

Название структуры белка	Пространственная структура	Химические связи поддерживающие структуру
Первичная	Линейная	Пептидная(между группами CO и NH)
Вторичная	Спиральная	Водородные
Третичная	Глобула(клубок)	Ионные, водородные, дисульфидные(-S-S-), сложно-эфирные связи
Четвертичная	Соединение нескольких глобул	Ионные, водородные, дисульфидные(-S-S-), сложно-эфирные связи

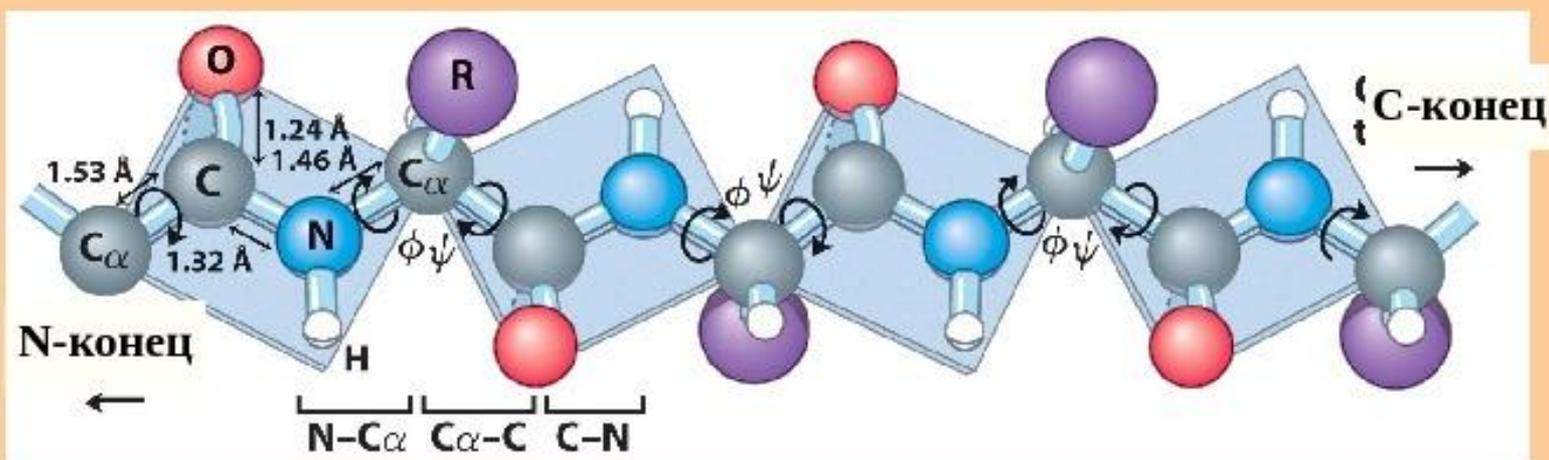
ПЕПТИДНАЯ СВЯЗЬ

- ▣ Пептиды — органические вещества, состоящие из остатков аминокислот, соединенных пептидной связью.
- ▣ Образование пептидов происходит в результате реакции конденсации аминокислот.
- ▣ При взаимодействии аминогруппы одной аминокислоты с карбоксильной группой другой между ними возникает ковалентная азот-углеродная связь, которую и называют пептидной. В зависимости от количества аминокислотных остатков, входящих в состав пептида, различают **дипептиды, трипептиды, тетрапептиды** и т.д. Образование пептидной связи может повторяться многократно.
- ▣ Это приводит к образованию **полипептидов**. На одном конце пептида находится свободная аминогруппа (его называют N-концом), а на другом — свободная карбоксильная группа (его называют C-концом).



Строение пептидной связи

Пептидная связь имеет *транс*-конфигурацию

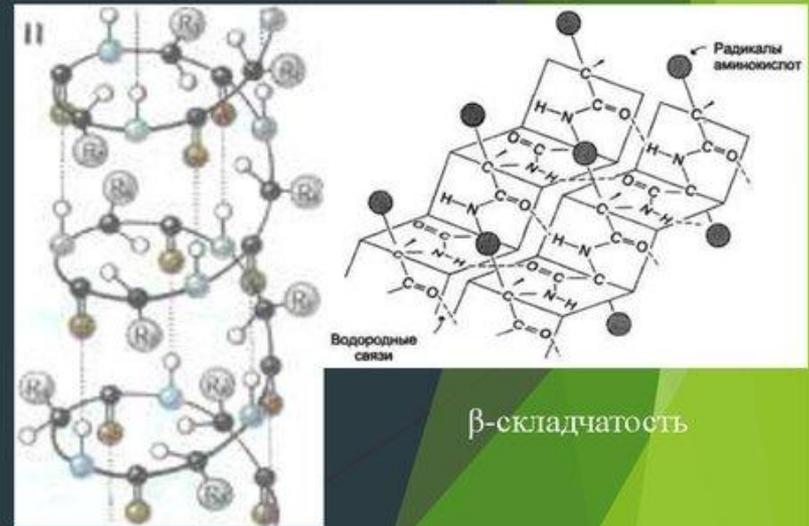
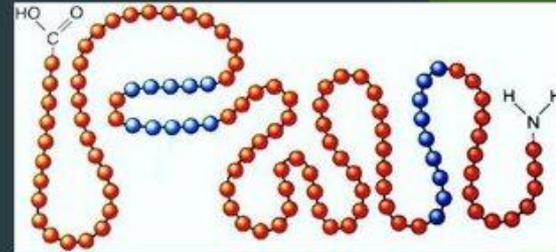


Пептидная связь может существовать в плоской *цис*-форме:

- В напряженных циклических системах (циклопептиды, производные пролина)
- При большом размере заместителей у атома N (алкилированные производные)

Структура белка

- ▶ Первичная структура белка представлена последовательность аминокислотных остатков соединенных между собой пептидными связями. Эта структура определяет свойства и функции белков. Информация о первичной структуре белка закодирована в ДНК
- ▶ Вторичная структура белка возникает в результате образования водородных связей между карбоксильными группами и аминогруппами разных участков полипептидной цепи. Вторичная структура белка может быть представлена α -спиралью или β -складчатостью.
- ▶ Спиральную структуру имеют кератин (входит в состав волос, шерсти, когтей, перьев и рогов), миозин (в составе мышц), коллаген (в составе хрящей, сухожилий, костей).
- ▶ Складчатую структуру имеет фиброин (шелковое волокно шелкопряда)



α - спираль

β -складчатость

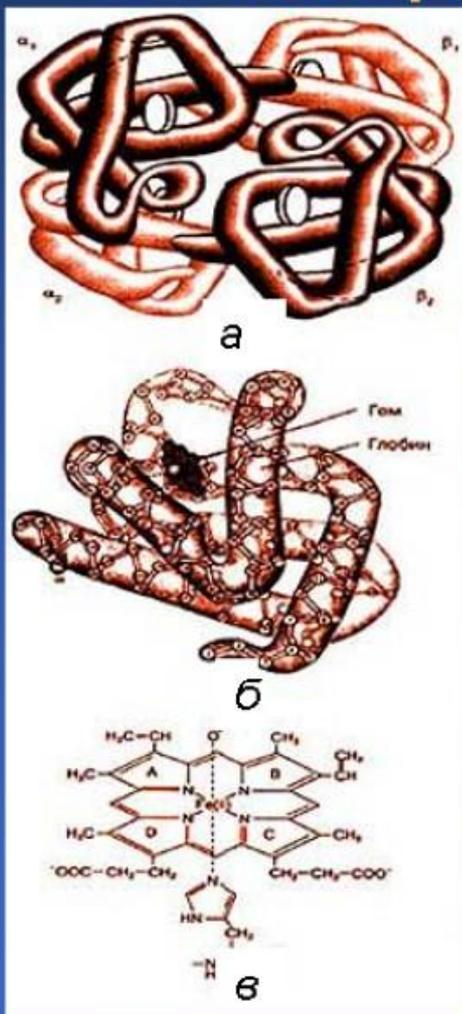
Основные различия в строении белковых молекул

- По количеству аминокислот
- По соотношению количества различных аминокислот.
- Различная последовательность чередования аминокислот.
- Количество полипептидных цепей в различных белках может варьировать от 1 до 12, но если больше единицы, то обычно четное (2, 4, 6 и т.п.)
- По наличию небелкового компонента, который называется «ПРОСТЕТИЧЕСКАЯ ГРУППА».

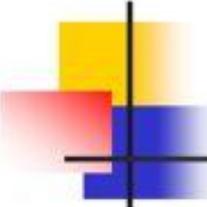


Строение, свойства, биологическая роль белков

Четвертичная структура белка



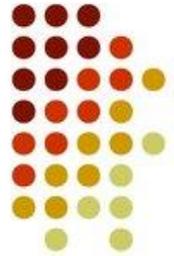
а – гемоглобин,
состоящий из четырех субъединиц
(двух α -цепей и двух β -цепей),
б – одна субъединица,
в – простетическая группа
гемоглобина



Протеиды

- **Протеиды** построены из протеинов, соединенных с молекулами другого типа (простетическими группами).
- **Фосфопротеиды** содержат молекулы фосфорной кислоты, связанные в виде сложного эфира у гидроксильной группы аминокислоты серина. К ним относится вителлин — белок, содержащийся в яичном желтке, белок молока *казеин*.
- **Гликопротеиды** содержат остатки углеводов. Они входят в состав хрящей, рогов, слюны.
- **Хромопротеиды** содержат молекулу окрашенного вещества обычно типа порфина. Самым важным из них является гемоглобин — переносчик кислорода, окрашивающий красные кровяные тельца.
- **Нуклеопротеиды** — протеиды, связанные с нуклеиновыми кислотами. Они представляют собой очень важные с биологической точки зрения белки — составные части клеточных ядер. Нуклеопротеиды являются важнейшей составной частью вирусов - возбудителей многих болезней.

Флавопротеины



Простетические группы – изоаллоксазиновые производные –
ФМН и ФАД

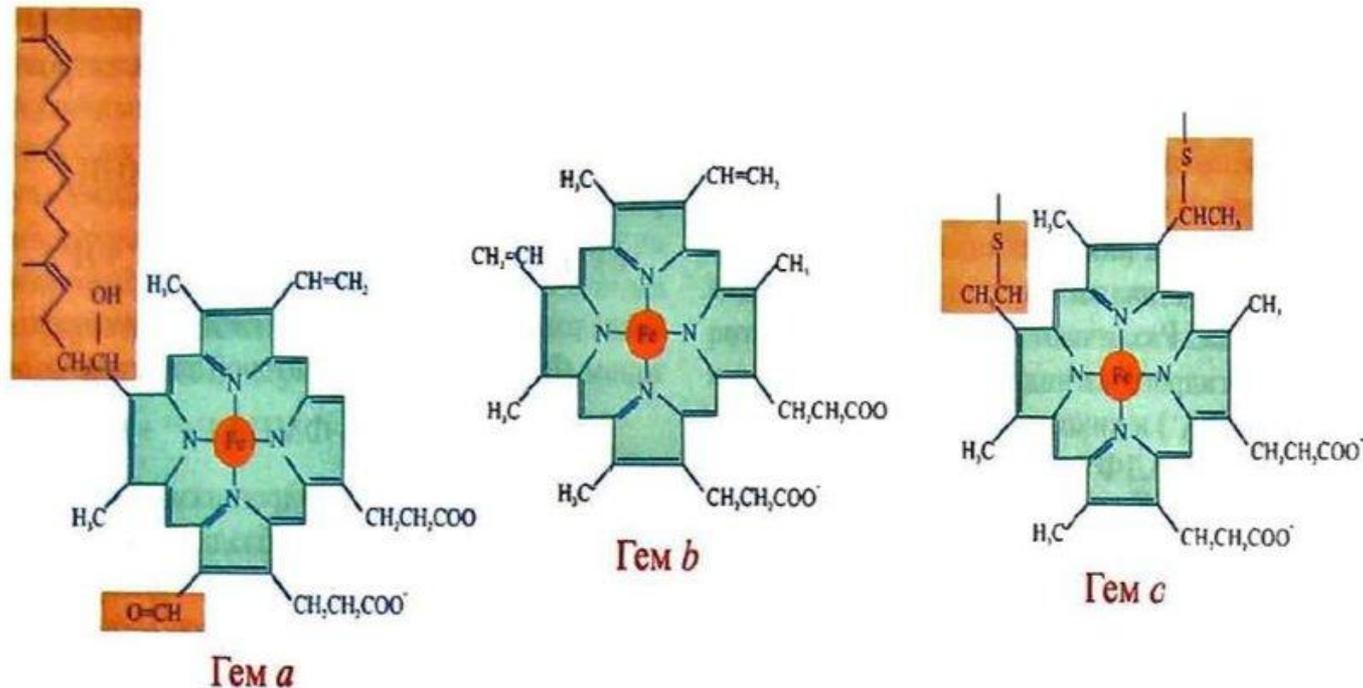
Флавопротеины входят в состав окислительно-восстановительных ферментов –

оксидоредуктаз:

- ксантиноксидаза,
- альдегидоксидаза,
- сукцинатдегидрогеназа,
- дигидрооротатдегидрогеназа,
- ацил-КоА-дегидрогеназа
- флавопротеин, транспортирующий электроны

Цитохромы

- группа электрон-переносящих белков, содержащих в качестве простетической группы гем - в отличие от дегидрогеназ переносят только по одному электрону. Активный элемент цитохромов - изменяющий свою валентность Fe.



Метаболизм нуклеотидов – (простетическая группа нуклеопротеидов)

Значение нуклеотидов:

1. Мономеры нуклеиновых кислот – ДНК и РНК;
2. Нуклеотиды- трифосфаты – источники энергии; АТФ- универсальный источник энергии; ЦТФ, ГТФ, УТФ- источники энергии в **синтезах**
3. Образуя активные формы сульфатов (ФАФС), глюкуроновой кислоты (УДФ-глюкуроновая кислота), участвуют в процессах детоксикации;
4. Входят в состав коферментов дегидрогеназ (НАД, ФАД) и кофермента ацетилирования КоА;
5. Циклические формы (цАМФ, цГМФ)- вторичные посредники в проведении гормонального сигнала

НУКЛЕИНОВЫЕ КИСЛОТЫ

МОНОМЕРЫ - НУКЛЕОТИДЫ

**ДНК -
дезоксирибонуклеиновая
кислота**

**РНК
рибонуклеиновая
кислота**

Состав нуклеотида в ДНК

**Азотистые
основания:**
Аденин (А)
Гуанин (Г)
Цитозин (Ц)
Тимин (Т)

Дезокси-
рибоза

Остаток
фосфорной
кислоты

Информационная
(матричная)
РНК (и-РНК)

Транспортная
РНК (т-РНК)

Рибосомная РНК (р-РНК)

Состав нуклеотида в РНК

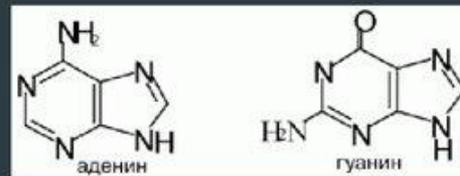
**Азотистые
основания:**
Аденин (А)
Гуанин (Г)
Цитозин (Ц)
Урацил (У):

Рибоза

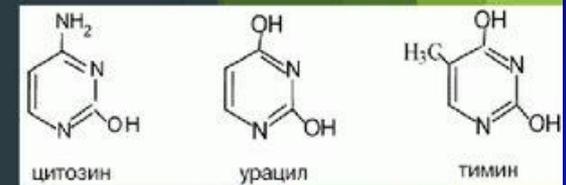
Остаток
фосфорной
кислоты

Нуклеиновые кислоты. Нуклеотид.

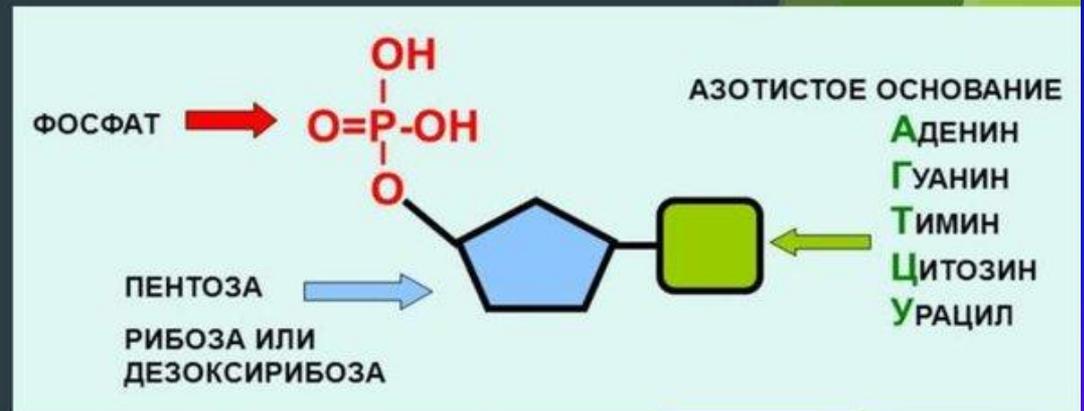
- ▶ Нуклеиновые кислоты – фосфорсодержащие биополимеры, мономерами которых являются нуклеотиды. В живых организмах встречаются два вида нуклеиновых кислот – ДНК и РНК.
- ▶ Каждый нуклеотид состоит из азотистого основания, пятиугольного сахара и остатка фосфорной кислоты.
- ▶ Азотистые основания делятся на две группы: пуриновые (аденин и гуанин) и пиримидиновые (тимин, цитозин и урацил)
- ▶ Пятиуглеродные сахара – рибоза и дезоксирибоза.
- ▶ Из отдельных нуклеотидов образуются цепи полинуклеотидов. В образовании связи между отдельными нуклеотидами участвуют – сахара и фосфорная кислота.
- ▶ На 3' конце полинуклеотидной цепи располагается молекула сахара, на 5' конце остаток фосфорной кислоты.
- ▶ Количество нуклеотидов в нуклеиновой кислоте колеблется от 80 до нескольких сотен миллионов



Пуриновые основания



Пиримидиновые основания

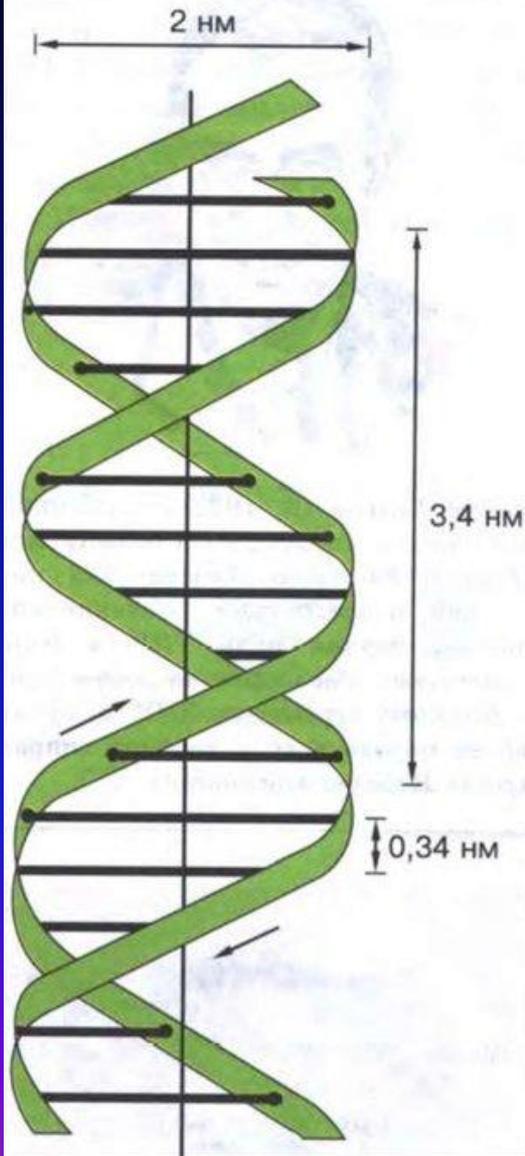


Нуклеотид

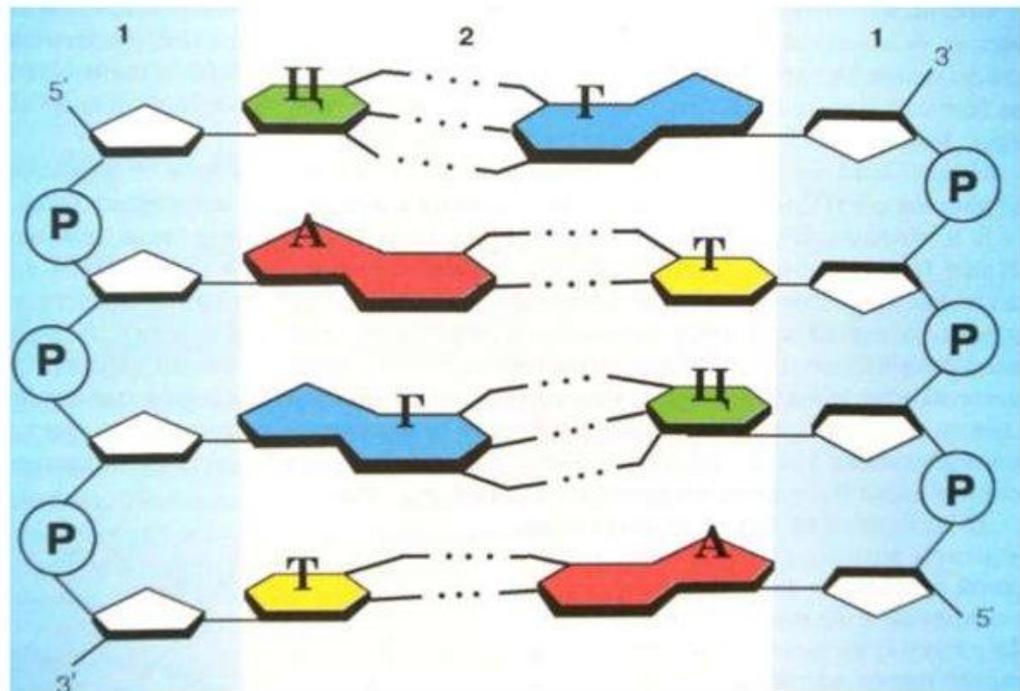
Особенности строения и свойства РНК и ДНК

№ п/п	Особенности строения, свойства, биологическая роль	РНК	ДНК
1.	Химический состав: а) углевод б) азотистые основания	а) Рибоза б) Аденин, гуанин, урацил, цитозин (нет тимина)	а) Дезоксирибоза б) Аденин, гуанин, тимин, цитозин (нет урацила)
2.	Количество нуклеотидов	Десятки, сотни и тысячи	Десятки и сотни тысяч
3.	Молекулярная масса	От 25 тыс. Да до 1 млн Да	Десятки млн Да
4.	Количество полинуклеотидных цепей в молекуле	Одна	Две
5.	Пространственная конфигурация	Спираль, конфигурация «клеверного листа», клубок	Двойная спираль линейной или кольчатой формы
6.	Локализация в клетке	Цитоплазма. Рибосомы. Ядро (мало)	Ядро. Митохондрии (мало)
7.	Биологическая роль	Передача и реализация генетической информации, участие в синтезе белков	Хранение генетической информации
8.	Главные представители	Информационная РНК (иРНК), рибосомная РНК (рРНК), транспортная РНК (тРНК)	Хроматин (комплекс ДНК и белков, входящий в хромосомы)

Нуклеиновые кислоты

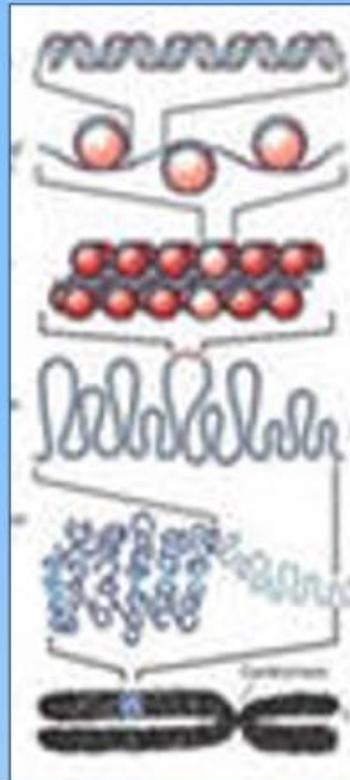


Расстояние между соседними нуклеотидами в одной цепи составляет 0,34 нм. Полный оборот спирали составляет 10 нуклеотидов, а шаг – 3,4 нм. Диаметр двойной спирали одинаков по всей длине и равен 2 нм. Это достигается за счет попарного соединения малого пиримидинового азотистого основания с большим пуриновым.

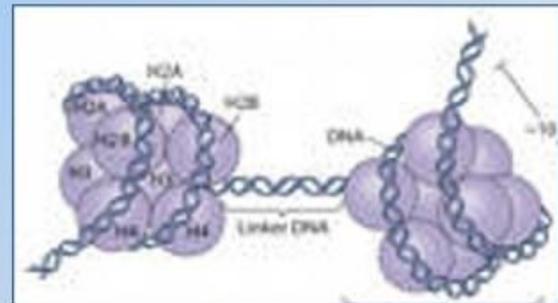
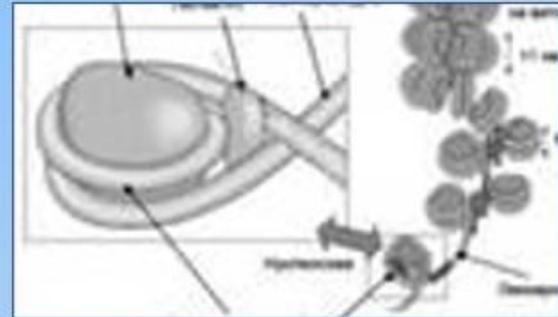


Структура хроматина

1. ДНК
2. нуклеосомный
3. нуклеомерный
4. хромомерный
5. хромонемный
6. хроматидный
7. хромосомный



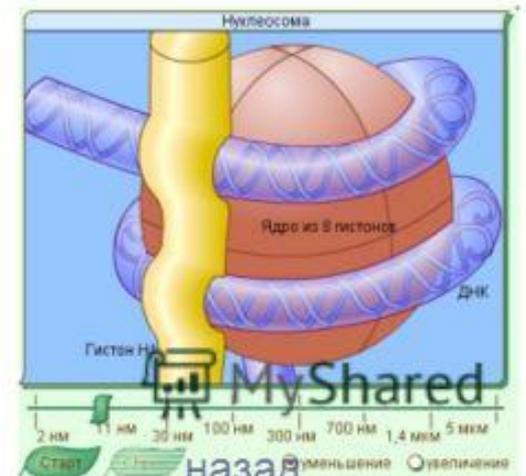
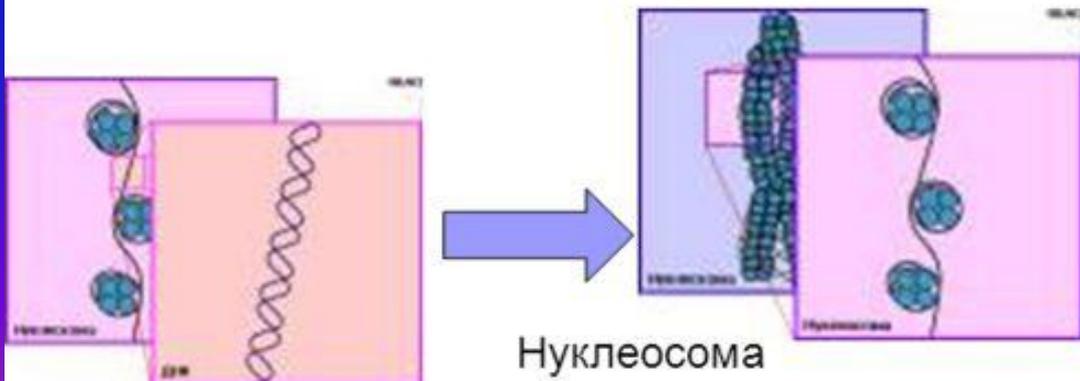
нуклеосома



Строение нуклеосомы – 8 молекул гистонов образуют сердцевину, которую обвивает ДНК, делая 1,75 оборота;

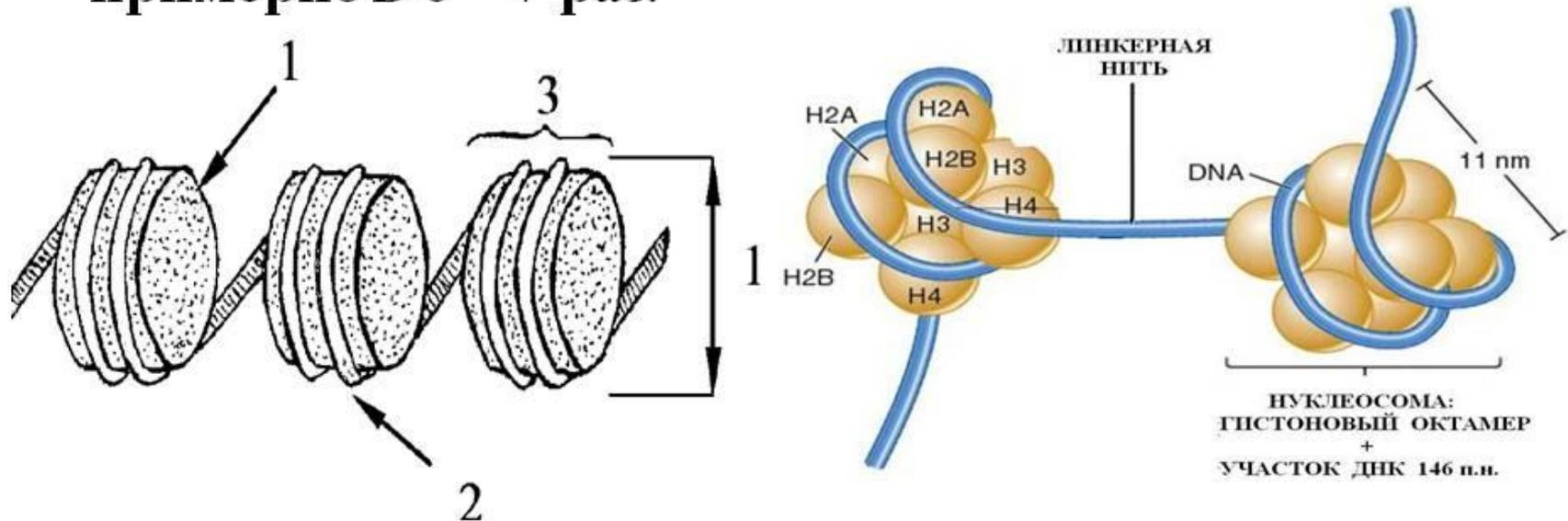
I уровень – нуклеосомный.

- В основе хромосомы имеется хромосомная фибрилла. Она состоит из фрагментов стандартной длины – около 200 пар нуклеотидов – **нуклеосом**. В ее состав входят: глобулы – 8 молекул белков-гистонов-гистоновых кор. Вокруг них спирально (1,75 витка) закручивается нить ДНК длиной около 140 пар нуклеотидов. Остальная часть ДНК (около 60 пар нуклеотидов) свободна от контакта с корами и называется «линкерным» (связующим) участком. В целом нуклеосома имеет вид «бусинок на нитке», при этом происходит укорочение ДНК с $d=2$ нм и длиной – 5 см до $d=10-11$ нм и длиной 0,7 см.

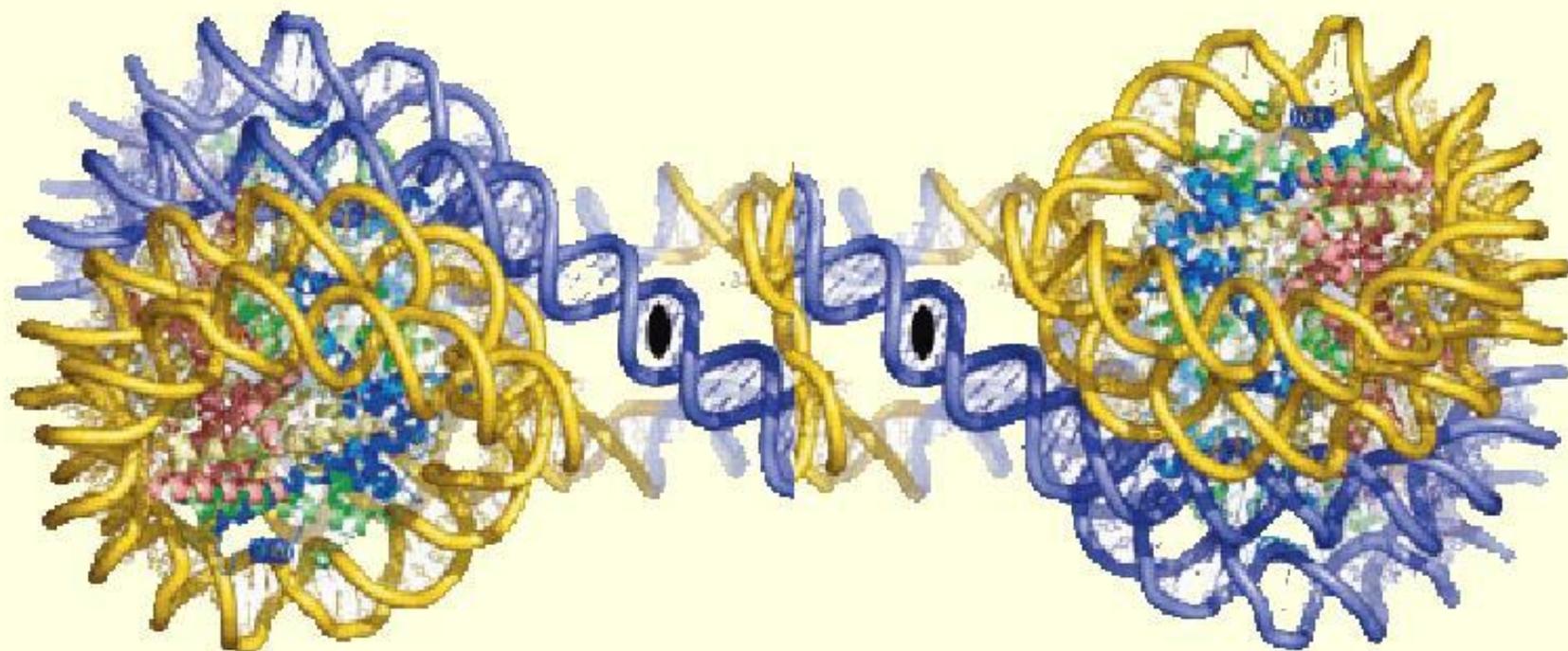


Уровни упаковки генетического материала

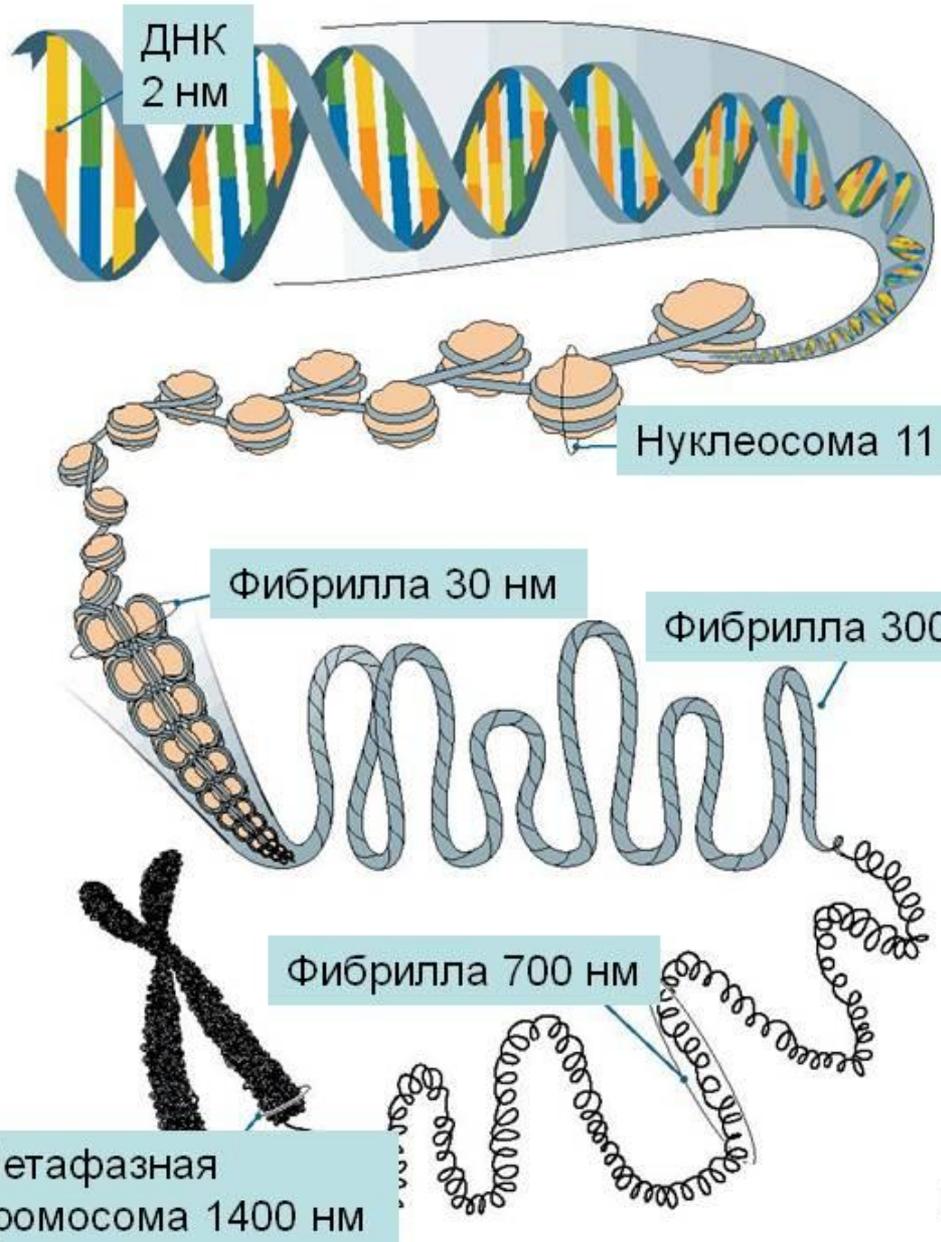
- **Нуклеосомный уровень**
- **Нуклеосома** – это белковая глобула (октаэдр), содержащая по 2 молекулы четырех гистонов H2A, H2B, H3, H4, вокруг которой двойная спираль ДНК образует 1,8 витка (200 пар нуклеотидов). Нуклеосомная нить имеет диаметр = **10-13 нм**. Такая структура обеспечивает компактизацию ДНК примерно в 6—7 раз.



СТРУКТУРА НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ



Структура тетрануклеосомы, определенная командой Тима Ричмонда, показывает, что две нуклеосомы, сложенные одна в другую, соединены с двумя другими нуклеосомами, расположенными напротив, посредством прямой нити ДНК. Эти две кипы соответственно сложены в противоположном направлении.



а
к
т
и
в
н
а
я

н
е
а
к
т
и
в
н
а
я

ДНК – 2 нм

Нуклеосома – 11 нм

Фибрилла 30 нм

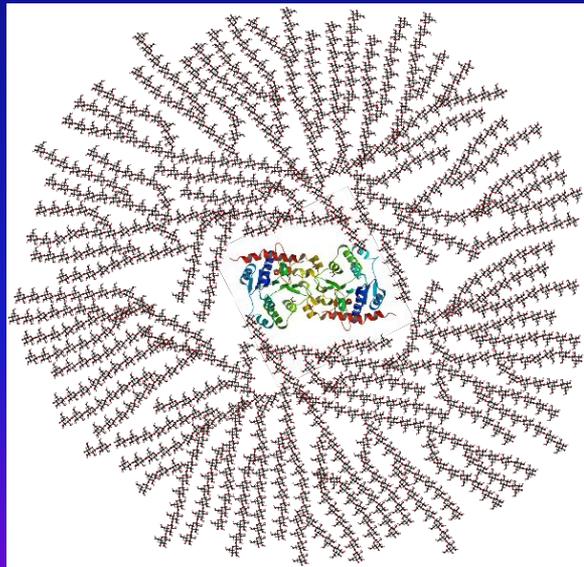
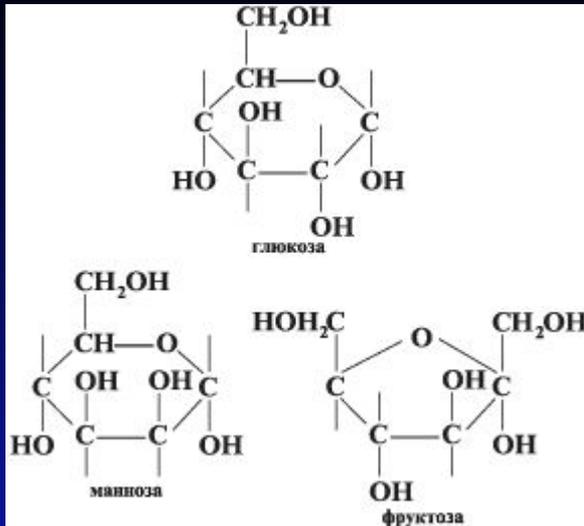
«солениод» - 300 нм

Нить – 700 нм

Метафазная хромосома 1400 нм

Метафазная хромосома – 1400 нм

УГЛЕВОДЫ - это альдегидоспирты или кетоспирты и их производные.



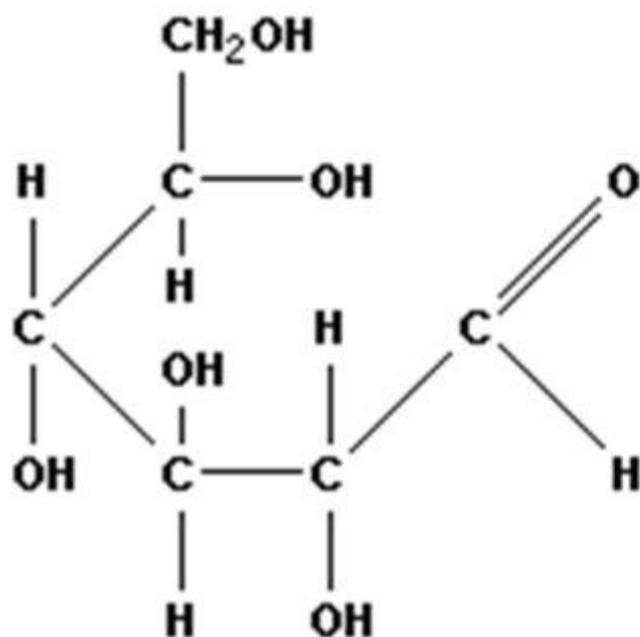
Углеводы являются неотъемлемым компонентом клеток и тканей всех живых организмов представителей растительного и животного мира, составляя (по массе) основную часть органического вещества на Земле. Источником углеводов для всех живых организмов является процесс фотосинтеза, осуществляемый растениями.

В организме человека углеводов около 1%. Основным природным углеводом является **глюкоза**, которая может находиться как в свободном виде (моносахарид), так и в составе олигосахаридов (сахароза, лактоза и др.) и полисахаридов (клетчатка, крахмал, гликоген). Глюкоза может иметь различные пространственные формы (ациклическую и циклические). В организме человека почти вся глюкоза (свободная и входящая в олиго- и полисахариды) находится в циклической α-пиранозной форме.

Другим углеводом, типичным для человека и высших животных, является **гликоген**, который состоит из сильно разветвленных молекул большого размера, содержащих десятки тысяч остатков глюкозы. Эмпирическая формула гликогена - $(C_6H_{10}O_5)_n$ ($C_6H_{10}O_5$ - остаток глюкозы).

Глюкоза и гликоген в организме выполняют энергетическую функцию, являясь главными источниками энергии для всех клеток организма (1 г = 4 ккал энергии)

Углеводы



глюкоза (моносахарид)

- вещества с общей формулой $C_x(H_2O)_y$, где X и Y – натуральные числа
- в их молекулах водород и кислород находятся в том же отношении, что и в воде

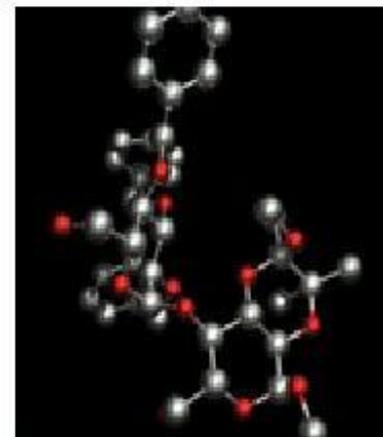
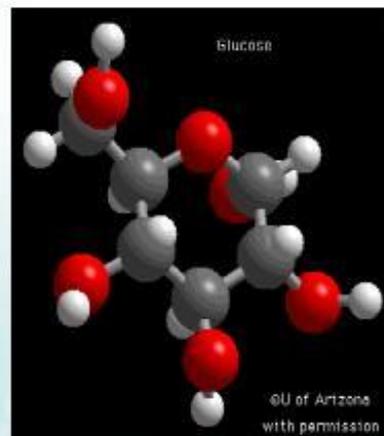
Группы

Выделяют три группы углеводов:

моносахариды, или простые сахара;

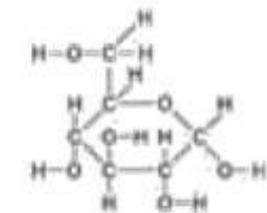
Дисахариды - это углеводы, молекулы которых состоят из двух остатков моносахаридов, соединенных друг с другом за счет взаимодействия гидроксильных групп (двух полуацетальных или одной полуацетальной и одной спиртовой).

полисахариды, состоящие более чем из 10 молекул простых Сахаров или их производных.

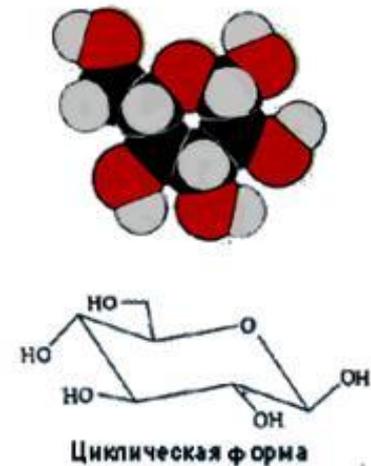
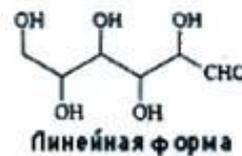
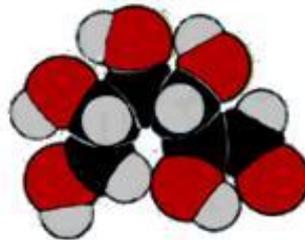
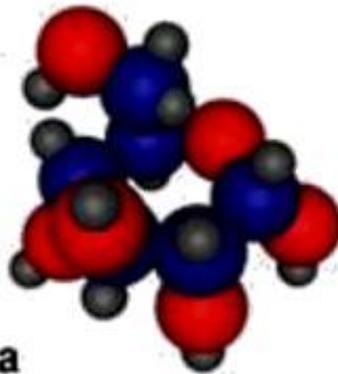


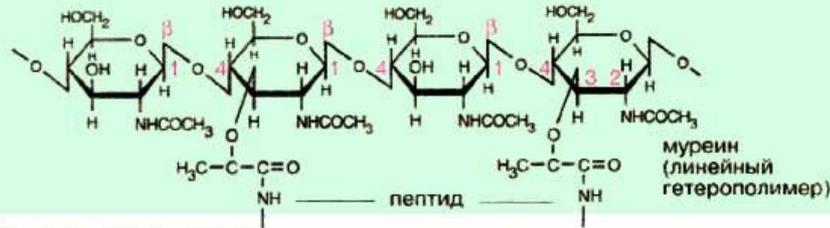
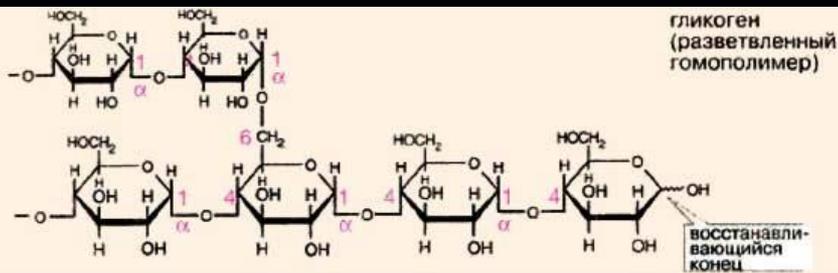
Глюкоза - виноградный сахар

1 Структура глюкозы



Глюкоза



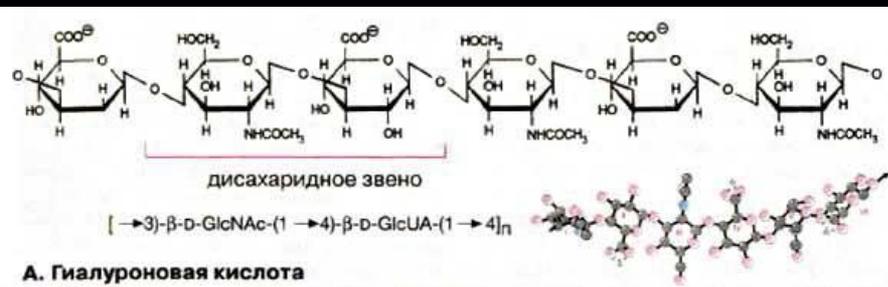


А. Структура полисахаридов

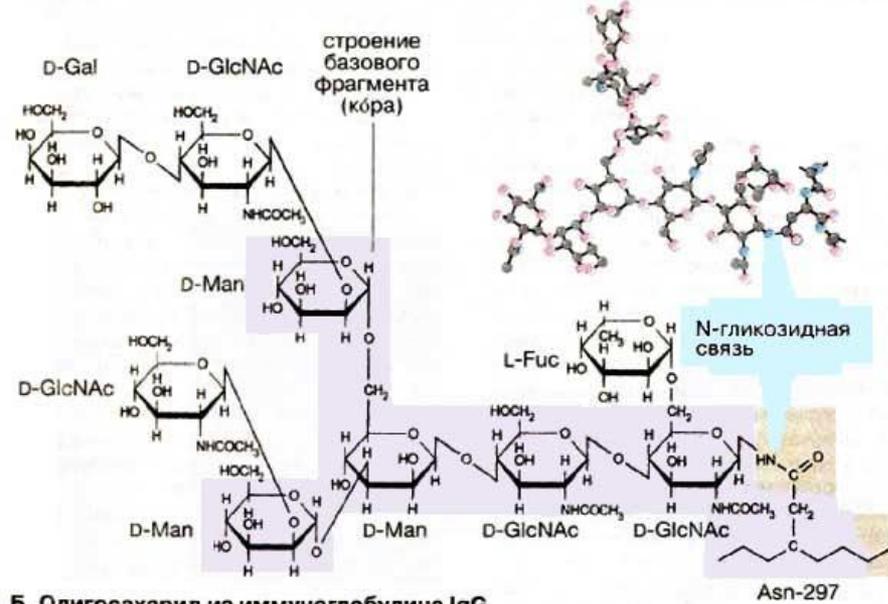
Полисахарид	Моносахарид 1	Моносахарид 2	Тип связи	Тип связи в точках ветвления	Источник	Функция ^а
<i>Бактерии</i>						
Муреин	D-GlcNAc	D-MurNAc ^{б)}	$\beta(1 \rightarrow 4)$	—	Клеточные стенки	сп
Декстран	D-Glc	—	$\alpha(1 \rightarrow 6)$	$\alpha(1 \rightarrow 3)$	Слизи	вр
<i>Растения</i>						
Агароза	D-Gal	L-aGal ^{в)}	$\beta(1 \rightarrow 4)$	$\beta(1 \rightarrow 3)$	Красные водоросли (агар)	вр
Каррагенан	D-Gal	—	$\beta(1 \rightarrow 3)$	$\alpha(1 \rightarrow 4)$	Красные водоросли	вр
Целлюлоза	D-Glc	—	$\beta(1 \rightarrow 4)$	—	Клеточные стенки	сп
Ксилан	D-Glc	D-Xyl (D-Gal, L-Fuc)	$\beta(1 \rightarrow 4)$	$\beta(1 \rightarrow 6)$	Клеточные стенки	сп
Арабиноза	D-Glc	—	$\beta(1 \rightarrow 2)$	$\beta(1 \rightarrow 2)$	Красные водоросли (гемицеллюлоза)	сп
Амилоза	L-Ara	—	$\alpha(1 \rightarrow 5)$	$\alpha(1 \rightarrow 3)$	Клеточные стенки (пектин)	сп
Амилопектин	D-Glc	—	$\alpha(1 \rightarrow 4)$	$\alpha(1 \rightarrow 3)$	Клеточные стенки	рп
Инулин	D-Glc	—	$\alpha(1 \rightarrow 4)$	$\alpha(1 \rightarrow 6)$	Амилопласты	рп
	D-Fru	—	$\beta(2 \rightarrow 1)$	—	Амилопласты	рп
	—	—	—	—	Запасящие клетки	рп
<i>Животные</i>						
Хитин	D-GlcNAc	—	$\beta(1 \rightarrow 4)$	—	Насекомые, ракообразные	сп
Гликоген	D-Glc	—	$\alpha(1 \rightarrow 4)$	$\alpha(1 \rightarrow 6)$	Печень, мышцы	рп
Гиалуроновая кислота	D-GlcUA	D-GlcNAc	$\beta(1 \rightarrow 4)$	—	Соединительные ткани	сп, вр
	—	—	$\beta(1 \rightarrow 3)$	—	—	—

^{а)} сп = структурный полисахарид; рп = резервный полисахарид; вр = водорастворимый полисахарид. ^{б)} N-Ацетилмураминовая кислота; ^{в)} 3,6-ангидро-галактоза.

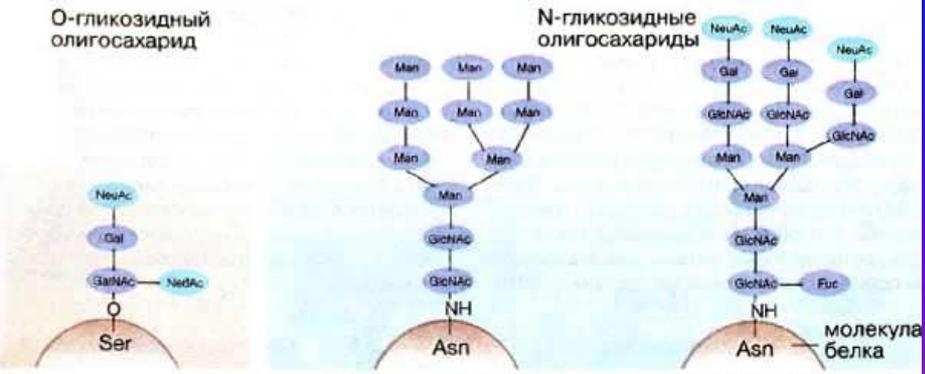
Б. Важнейшие представители полисахаридов



А. Гиалуроновая кислота



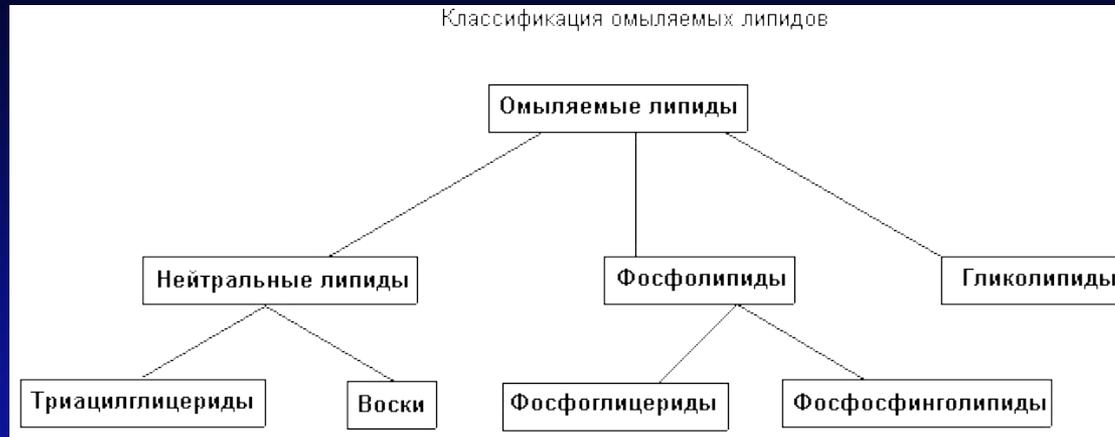
Б. Олигосахарид из иммуноглобулина IgG



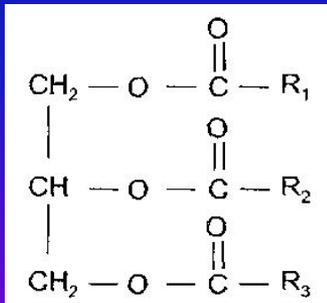
В. Различные типы олигосахаридов в гликопротеинах

обогатненный маннозой сложный (комплексный)

Липиды - жиры и жироподобные вещества (липоиды). Жиры являются источником энергии для организма. (1 г жира = 9 ккал энергии) . Липоиды являются обязательными компонентами всех биологических мембран. В организме человека имеются три класса липоидов: **фосфолипиды, гликолипиды и стероиды.**



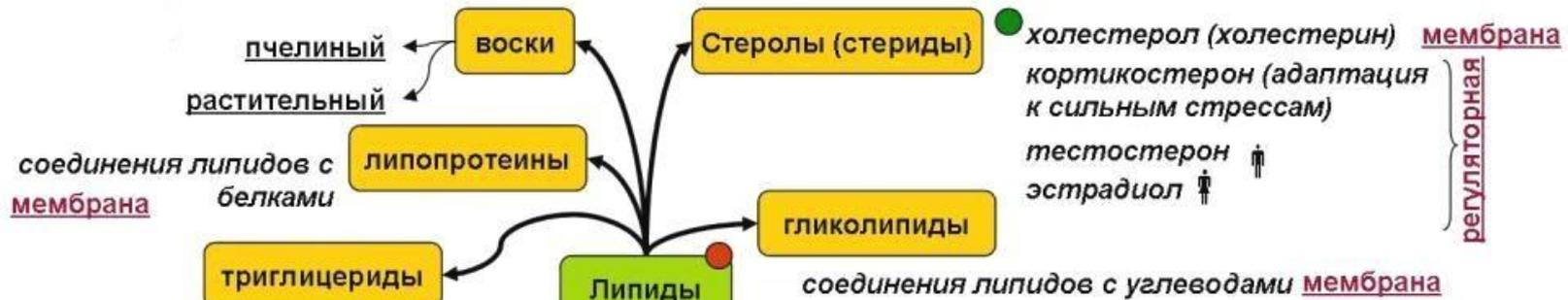
Молекула жира состоит из остатка спирта - **глицерина** и трех остатков **жирных кислот**, соединенных сложноэфирной связью. Животные жиры содержат в основном триацилглицериды с остатками насыщенных кислот и поэтому имеют твердую консистенцию. Растительные масла включают в основном остатки ненасыщенных кислот и являются жидкостями



Жирные кислоты, входящие в состав жиров, делятся на предельные, или насыщенные, (не имеют двойных связей) и непредельные, или ненасыщенные, (содержат одну или несколько двойных связей). Наиболее часто в состав природных жиров входят жирные кислоты, содержащие **16** или **18** атомов углерода (насыщенные: пальмитиновая, стеариновая; ненасыщенные: олеиновая, линолевая)

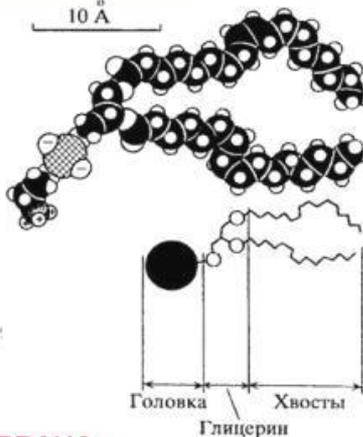
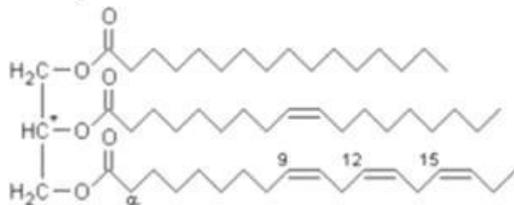
Триацилглицериды – это сложные эфиры глицерина и высших жирных кислот.

Воски – это сложные эфиры жирных кислот и высших одноатомных спиртов ($\text{C}_{12} - \text{C}_{46}$).

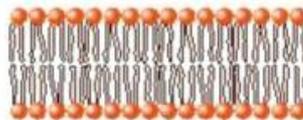


жиры (твердые)
содержат насыщенные жирные кислоты

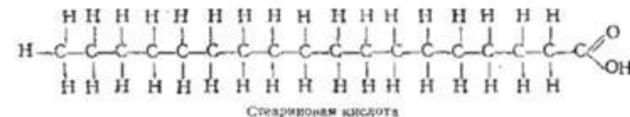
масла (жидкие)
содержат ненасыщенные жирные кислоты



МЕМБРАНА



1. Высокая калорийность → **запасающая и энергетическая**
1г – 38,9 кДж
источник воды при окислении



2. Гидрофобны → **строительная**
защита оперения птиц
защита листьев от испарения
пчелиные соты

3. Несжимаемы → **амортизация**

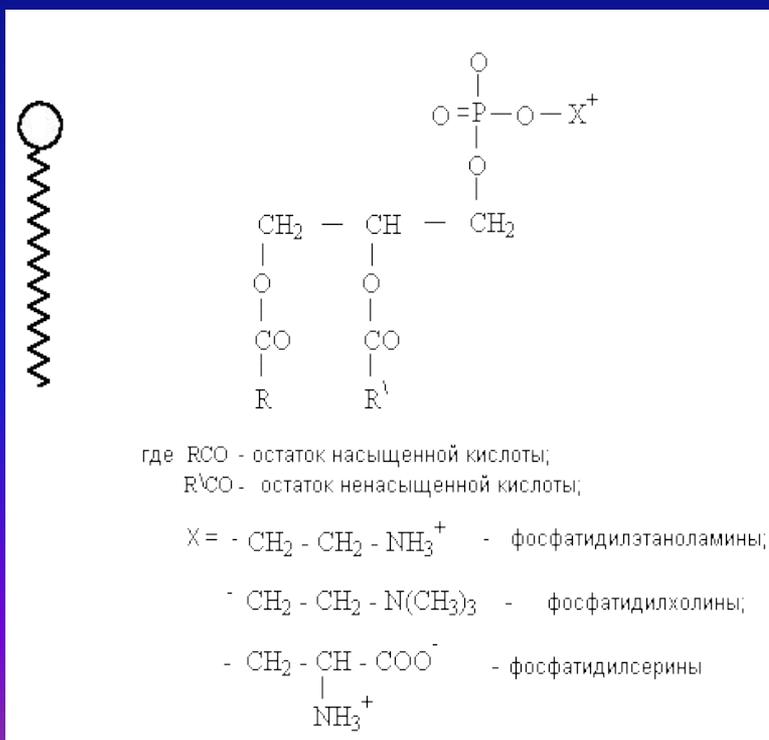
4. Низкая теплопроводность → **терморегуляция**

Липиды – высокомолекулярные органические соединения, основу которых составляют высшие жирные кислоты (число атомов углерода в молекуле не менее 6) или высокомолекулярные спирты.

Фосфолипиды – основные структурные компоненты клеточных мембран.

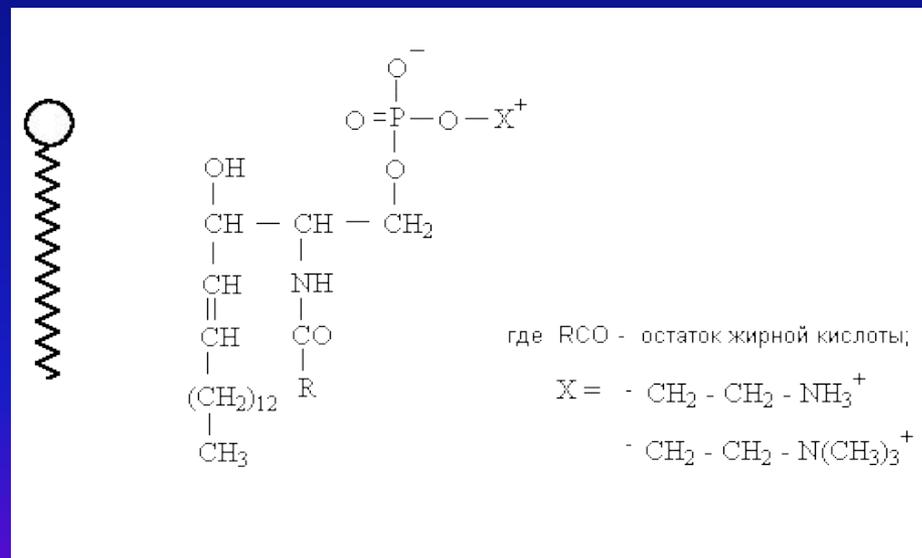
Фосфоглицериды

Основные структурные компоненты, составляющие молекулы фосфоглицеридов, это глицерин, жирные кислоты, фосфорная кислота, аминокспирты (этаноламин или холин) или аминокислота серин

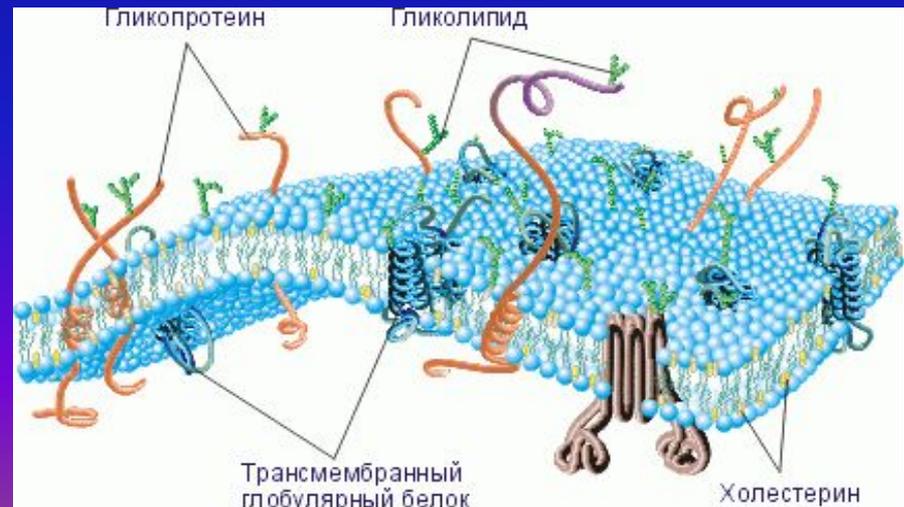
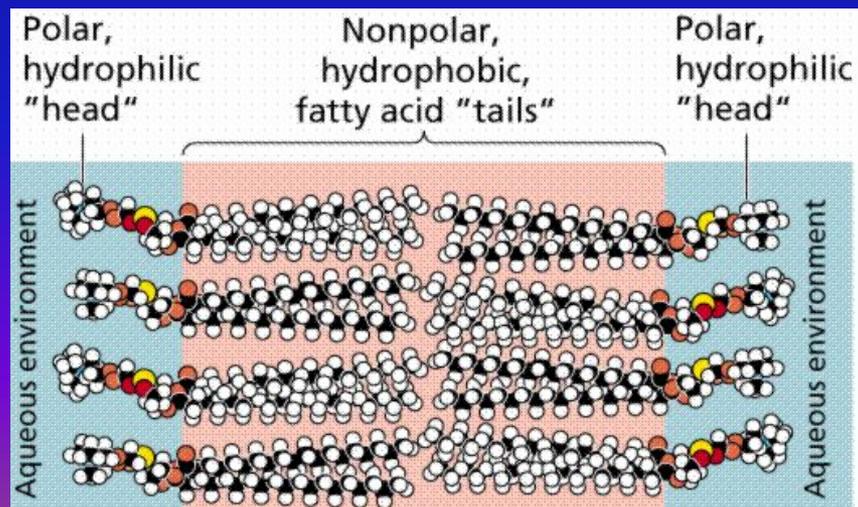
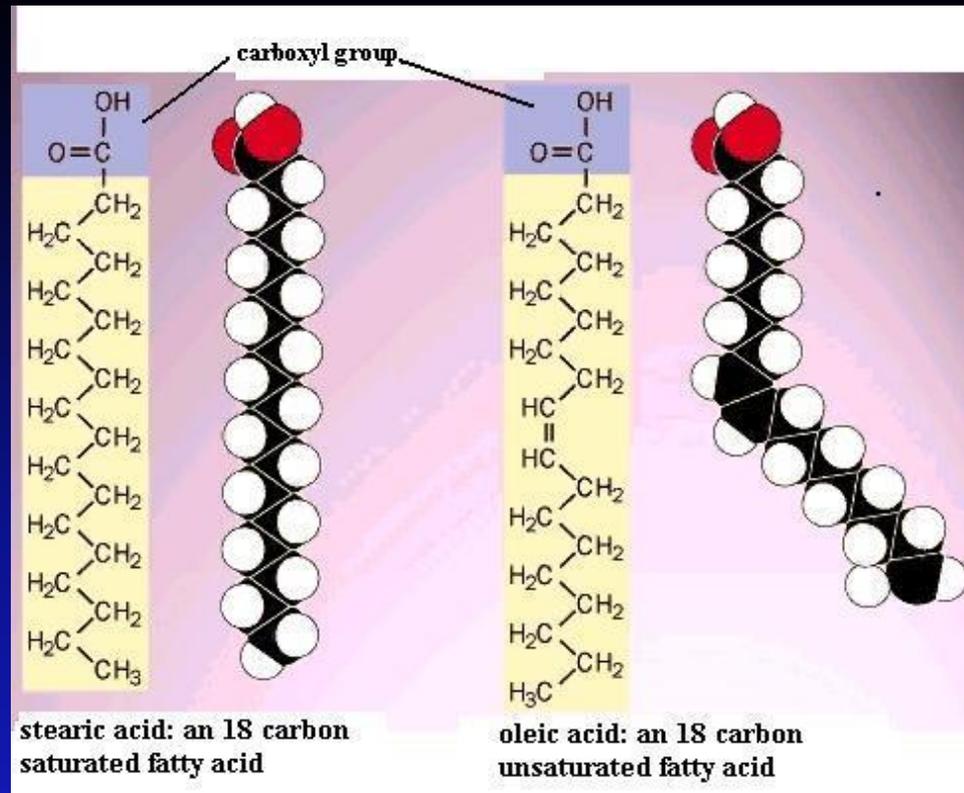
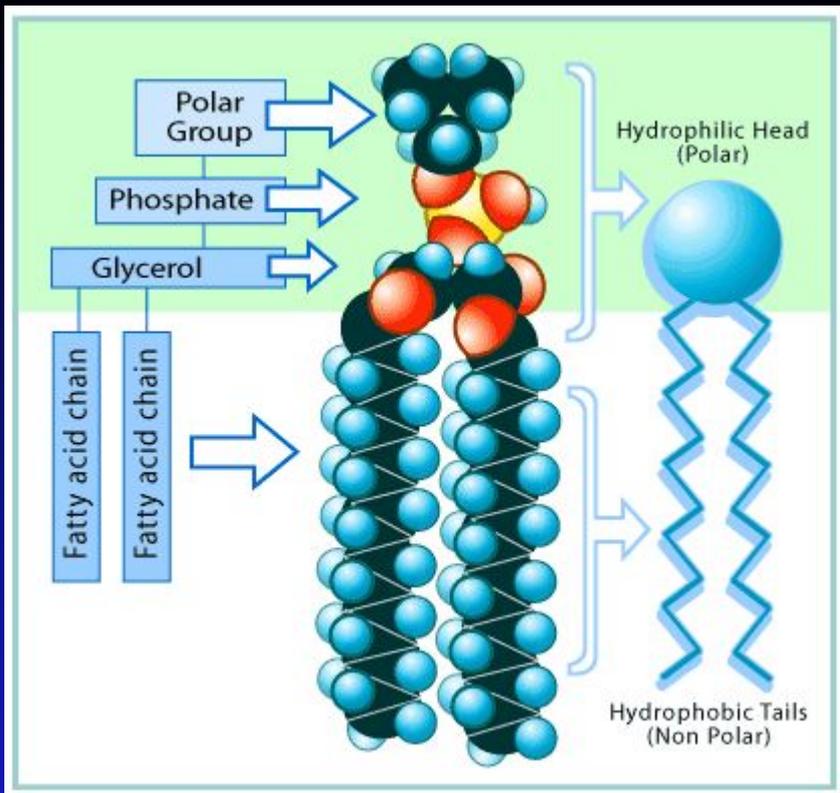


Фосфосфинголипиды

Основные структурные компоненты молекул фосфосфинголипидов – сфингозин, жирные кислоты, фосфорная кислота, аминокспирты этаноламин или холин. Общая формула:

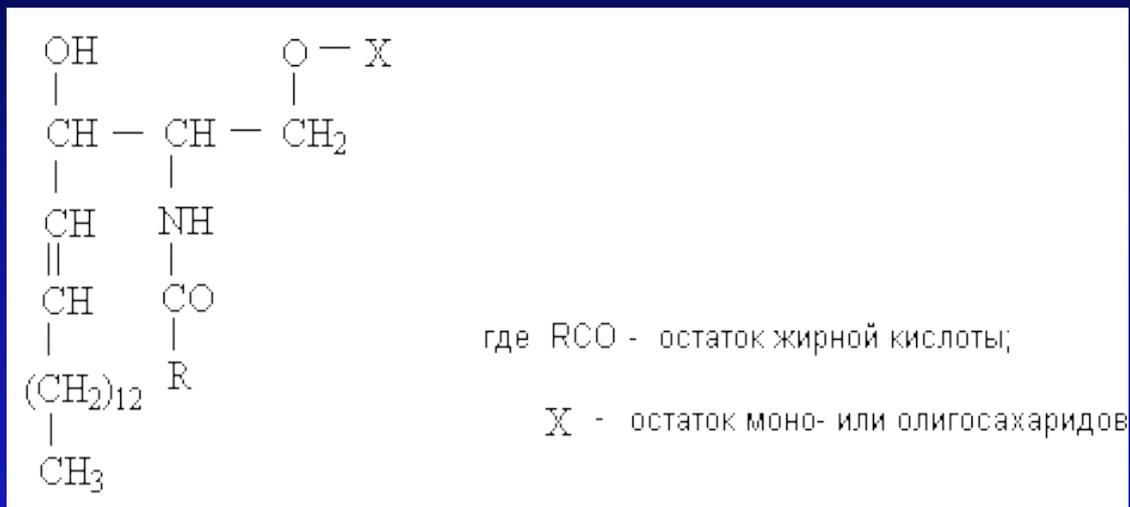


Молекулы фосфолипидов *дифильны*. Они содержат полярную гидрофильную “голову” и неполярный гидрофобный “хвост”.



Гликолипиды

Гликолипиды содержат углеводные остатки и не содержат фосфорной кислоты. Наиболее важными из них являются *гликосфинголипиды*. Основные структурные компоненты гликосфинголипидов: сфингозин, жирная кислота, моно- или олигосахарид.

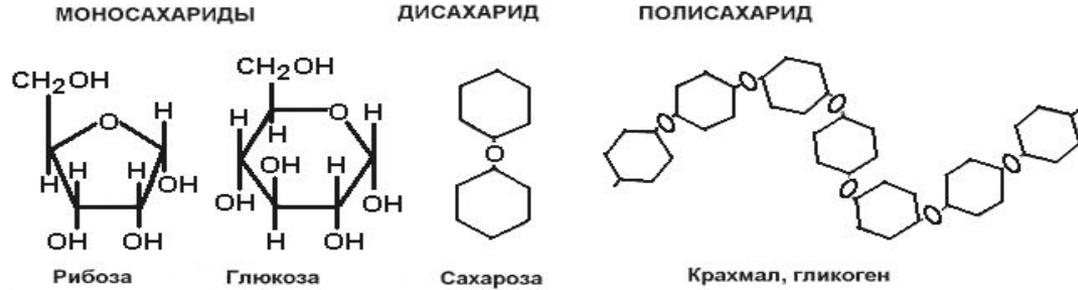


Типичные представители гликосфинголипидов – *цереброзиды* и *ганглиозиды*.

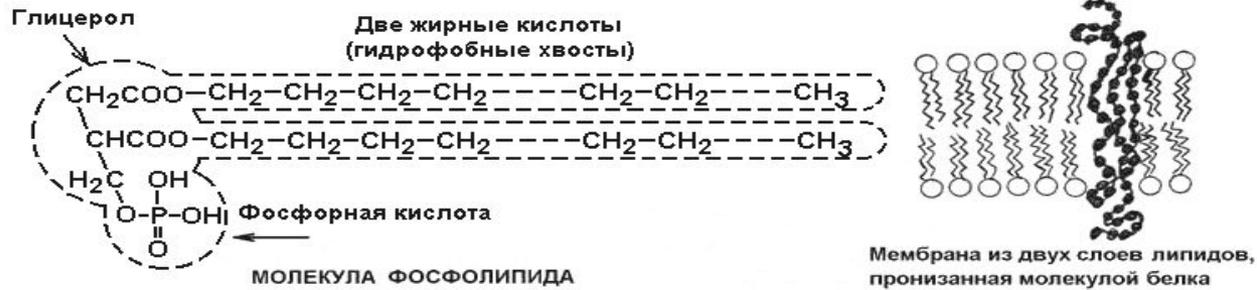
Цереброзиды содержат остатки D-галактозы или D-глюкозы, которые связаны с OH группой сфингозина β-гликозидной связью. Цереброзиды входят в состав мембран нервных клеток.

Ганглиозиды содержат остатки сложных олигосахаридов, способных нести отрицательный заряд за счет присутствия в них остатков сиаловых кислот. Ганглиозиды выделены из серого вещества мозга. Они образуют рецепторные участки на поверхности клеточных мембран.

УГЛЕВОДЫ

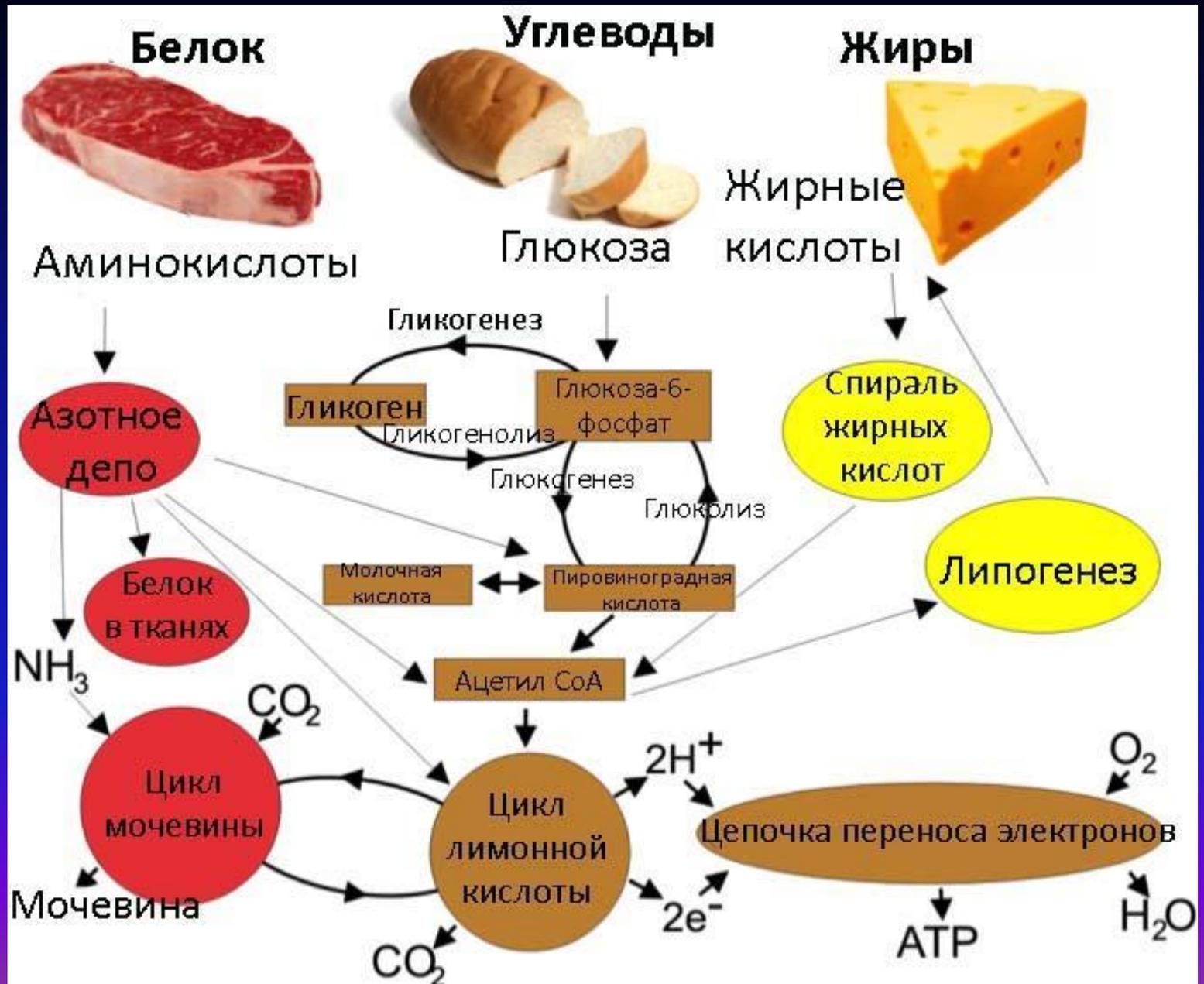


ЛИПИДЫ (ЖИРЫ)



БЕЛКИ





Первичная структура биополимеров определяется химическими или валентными взаимодействиями.

Ковалентная связь - это химическая связь, возникающая за счет обобществления электронов связываемых атомов и увеличения электронной плотности в области между химически связанными атомами.

Различают несколько механизмов образования ковалентной связи: **обменный (равноценный), донорно-акцепторный, дативный.** При использовании обменного механизма образование связи рассматривается как результат спаривания спинов свободных электронов атомов. При этом осуществляется перекрывание двух атомных орбиталей соседних атомов, каждая из которых занята одним электроном. По донорно-акцепторному механизму перекрывается орбиталь с парой электронов одного атома и свободная орбиталь другого атома

Межъядерное расстояние между химически связанными атомами называется длиной химической связи. Расстояние между атомами существенно уменьшается при образовании кратных связей. Направление ковалентных связей характеризуется валентными углами - углами между линиями, соединяющими связываемые атомы. Совокупность длин связей и валентных углов молекуле определяет ее пространственное строение

Конфигурация макромолекулы определяется взаимным расположением входящих в нее мономерных звеньев, а также их структурой. В настоящее время для описания конфигурации макромолекул, как правило, используют термин «структура» или «первичная структура». Различают ближний (конфигурация присоединения соседних звеньев) и дальний конфигурационный порядок, характеризующий структуру достаточно протяженных участков макромолекул.

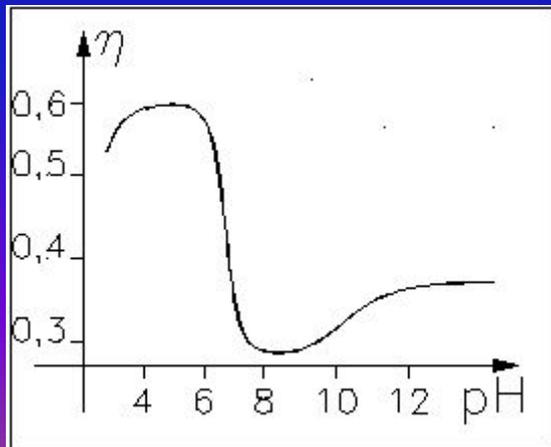
Конформацией макромолекулы называется пространственное расположение атомов и групп атомов, которое задаётся набором и последовательностью конфигурационных изомеров и их относительным взаимным расположением в цепи, обусловленным тепловым движением или внешними воздействиями на макромолекулу.

В растворе наиболее вероятная конформация полимера - свернутый клубок, в котором энтропия системы максимальна. При растяжении полимеров происходит развертывание клубка и уменьшение числа возможных конформаций, что сопровождается уменьшением энтропии.

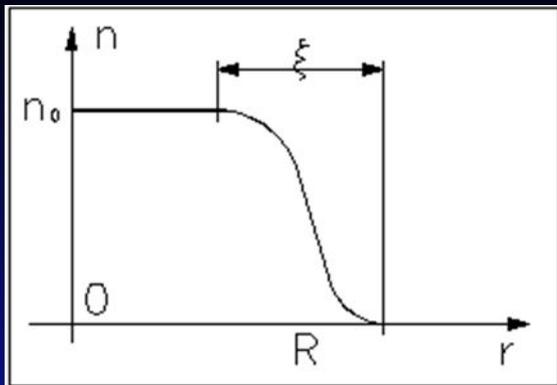
Переходы глобула - клубок в биополимерах

В полимерных нитях, вследствие взаимосвязанности звеньев, изменение плотности в одной точке пространства связано с изменением плотности в другой точке, то есть существует пространственная корреляция плотности. Если в макромолекуле отсутствует объёмное взаимодействие, то она не имеет достоверной пространственной структуры. В этом состоянии флуктуация (изменение вероятности) плотности имеет значение того же порядка, что и сама плотность. Такое состояние носит название *клубка*. Радиус корреляции, то есть характерное расстояние, в пределах которого плотность звеньев резко меняется, становится того же порядка, что и размеры макромолекулы R

Наличие объёмных взаимодействий может привести к такому состоянию, в котором флуктуация плотности мала по сравнению с самой плотностью. Такое плотное образование называется *глобулой*. В нем радиус корреляции флуктуации плотности намного меньше размеров молекулы.



Примером перехода глобулы в клубок может служить зависимость вязкости раствора полиглутаминовой кислоты от её кислотности.



В реальных макромолекулах объёмное взаимодействие в отсутствие внешнего воздействия создаёт самосогласованное поле, приводящее к образованию глобулы. Характер распределения плотности имеет другой вид:

Фазовый переход (фазовое превращение) в термодинамике — переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий.

Фазовые переходы первого рода (например, плавление, кристаллизация и т. д.) характеризуются постоянством температуры, изменениями энтропии и объёма. Он сопровождается поглощением или выделением теплоты, называемой теплотой фазового перехода.

Фазовые переходы, не связанные с поглощением или выделением теплоты и изменением объёма, называются фазовыми переходами второго рода. Эти переходы характеризуются постоянством объёма и энтропии, но скачкообразным изменением теплоёмкости. Общая трактовка фазовых переходов второго рода предложена советским учёным Л.Д.Ландау (1908-1968). Согласно этой трактовке, фазовые переходы второго рода связаны с изменением симметрии: выше точки перехода система, как правило, обладает более высокой симметрией, чем ниже точки перехода.