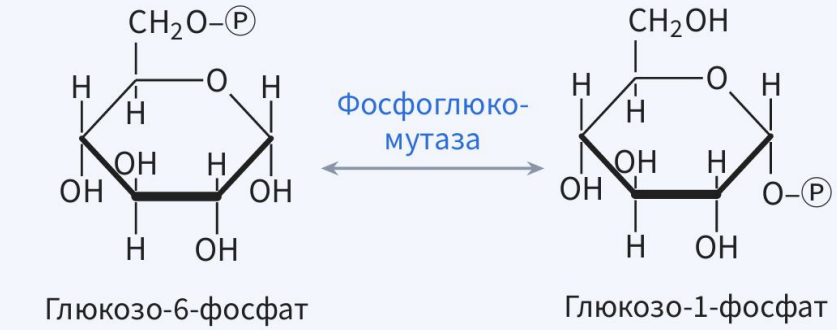
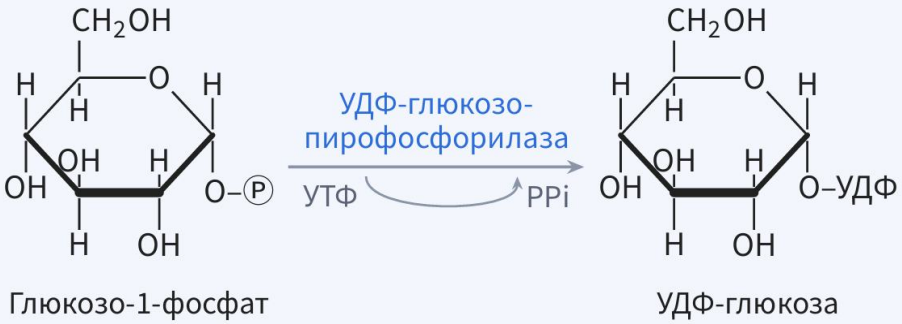




Методичка по углеводному обмену

Методичка

АВЕРНО

Оглавление

Карта углеводного обмена 01

Углеводы в организме 01

Пути обмена 01

Развилки обмена 02

Переваривание и всасывание углеводов 05

Углеводы пищи 05

Переваривание 07

Всасывание 07

Нарушения 09

Транспорт глюкозы в клетку 11

Транспорт глюкозы через мембрану 11

Переносчики GLUT 11

Фосфорилирование глюкозы 13

Дефосфорилирование глюкозо-6-фосфата 15

Гликолиз 17

Общая характеристика 17

Реакции гликолиза 18

Регуляция гликолиза 21

Судьба пирувата и NADH 24

Энергетический баланс 27

Гликолиз на одной схеме 29

Окислительное декарбоксилирование пирувата 32

Пируватдегидрогеназный комплекс 32

Строение и работа комплекса 32

Регуляция 34

Нарушения 35

Глюконеогенез 37

Общая характеристика 37

Реакции глюконеогенеза 38

Межорганные циклы 40

Регуляция 41

Нарушения 42

Гликоген: синтез и распад 45

Общая характеристика 45

Синтез гликогена 45

Распад гликогена 46

Регуляция 47

Гликогенозы 49

Пентозофосфатный путь 52

Общая характеристика 52

Окислительная стадия 52

Неокислительная стадия 53

Значение 55

Нарушения 55

Обмен фруктозы и галактозы 57

Обмен фруктозы 57

Обмен галактозы 58

Полиоловый путь 59

Глюкуроновая кислота и аминосахара . . . 60

Нарушения 61

Регуляция гликемии 64

Глюкоза крови 64

Гормоны 65

Глюкоза в разных тканях 66

Обмен в разные периоды 67

Колебания гликемии 69

© Аверно I Школа медицины 2026

Копирование материалов в любых целях запрещено

Плод и новорождённый 70

Сахарный диабет 72

Основные понятия 72

Типы диабета 72

Биохимия диабета 73

Острые осложнения 74

Подготовка к экзамену 77

Сводные таблицы 77

Обмен углеводов на одной схеме 79

© Аверно I Школа медицины 2026
Копирование материалов в любых целях запрещено

Карта углеводного обмена

Углеводы в организме

Функции углеводов

- Энергетическая
  - Окисление 1 г углеводов даёт около 4 ккал
  - Глюкоза – главное топливо мозга и единственное топливо эритроцитов
- Запасающая
  - Гликоген печени и мышц
- Структурная и рецепторная
  - Гликопротеины
  - Гликолипиды
  - Гликозаминогликаны
- Пластическая
  - Рибоза и дезоксирибоза в нуклеотидах

Глюкоза – центр обмена

- Почти все углеводы превращаются в глюкозу или входят в пути её обмена
- В клетке глюкоза сразу фосфорилируется до **глюкозо-6-фосфата**

Пути обмена

Пути распада и синтеза

- **Гликолиз** – распад глюкозы до пирувата (глава 4)
- **Окислительное декарбоксилирование пирувата** – пируват → ацетил-КоА (глава 5)
- **Глюконеогенез** – синтез глюкозы из неуглеводных веществ (глава 6)
- **Синтез и распад гликогена** – запас глюкозы (глава 7)
- **Пентозофосфатный путь** – NADPH и пентозы (глава 8)
- **Обмен фруктозы и галактозы** – вход в гликолиз (глава 9)
- Ацетил-КоА окисляется в цитратном цикле и дыхательной цепи – методичка «Биоэнергетика»

Таблица 1.1. Пути обмена углеводов

Путь	Где в клетке	Главные ткани	Когда активен
Гликолиз	Цитозоль	Все ткани; единственный путь в эритроцитах	После еды; в мышцах – при нагрузке
Окислительное декарбоксилирование пирувата	Матрикс митохондрий	Все ткани с митохондриями	Когда энергии мало; после еды
Глюконеогенез	Митохондрии и цитозоль	Печень, почки	Голодание
Синтез гликогена	Цитозоль	Печень, мышцы	После еды

Переваривание и всасывание углеводов

Углеводы пищи

Классификация

- **Углеводы** – альдегиды и кетоны многоатомных спиртов и их полимеры
- **Моносахариды** – не расщепляются до более простых сахаров
  - По числу атомов углерода: триозы, пентозы (рибоза, дезоксирибоза), гексозы (глюкоза, фруктоза, галактоза)
  - По карбонильной группе: альдозы (глюкоза, галактоза, рибоза) и кетозы (фруктоза)
  - В растворе пентозы и гексозы замыкаются в кольцо: глюкоза и галактоза – в шестичленное (пираноза), фруктоза и рибоза – в пятичленное (фураноза)
  - При замыкании кольца появляется полуацетальный гидроксил у С1 (у фруктозы – у С2): α-форма – вниз, β-форма – вверх в формуле Хеуорса
  - Глюкоза, фруктоза, галактоза
- **Дисахариды** – два остатка моносахаридов
  - Сахароза: глюкоза + фруктоза
  - Лактоза: галактоза + глюкоза, β-1,4-связь
  - Мальтоза: глюкоза + глюкоза, α-1,4-связь
- **Полисахариды** – полимеры моносахаридов
  - Крахмал – главный углевод пищи: амилоза (α-1,4) и амилопектин (α-1,4 и α-1,6)
  - Гликоген – из мяса и печени, немного
  - Целлюлоза – β-1,4-связи, не переваривается

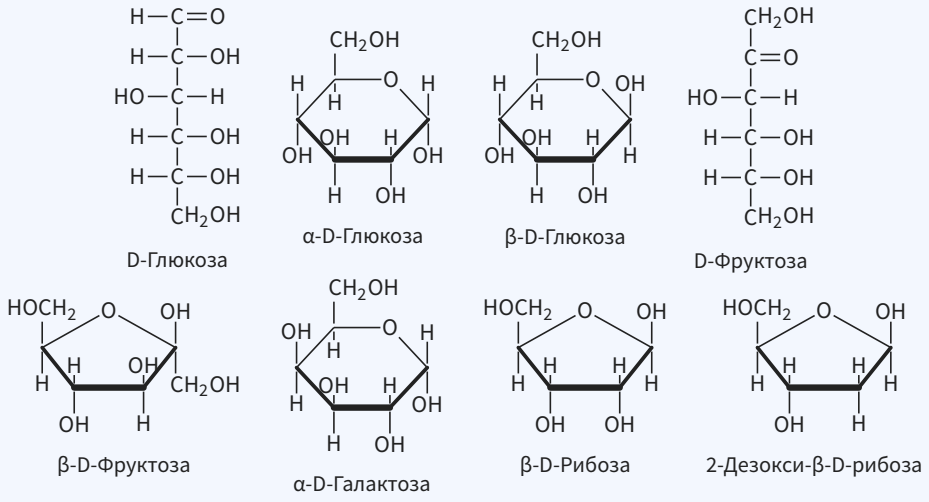


Рис. 2.1. Строение основных моносахаридов

Сравнение ферментов

- При глюкозе крови около 5 ммоль/л гексокиназа насыщена почти полностью, а глюкокиназа работает лишь на треть (рис. 3.1)
- Натощак регуляторный белок вдобавок держит глюкокиназу в ядре
- Поэтому натощак глюкоза достаётся мозгу и эритроцитам, а печень забирает её только после еды
- Остальные различия – в таблице 3.2
- Главное для экзамена: у ферментов разная Km и разные ингибиторы

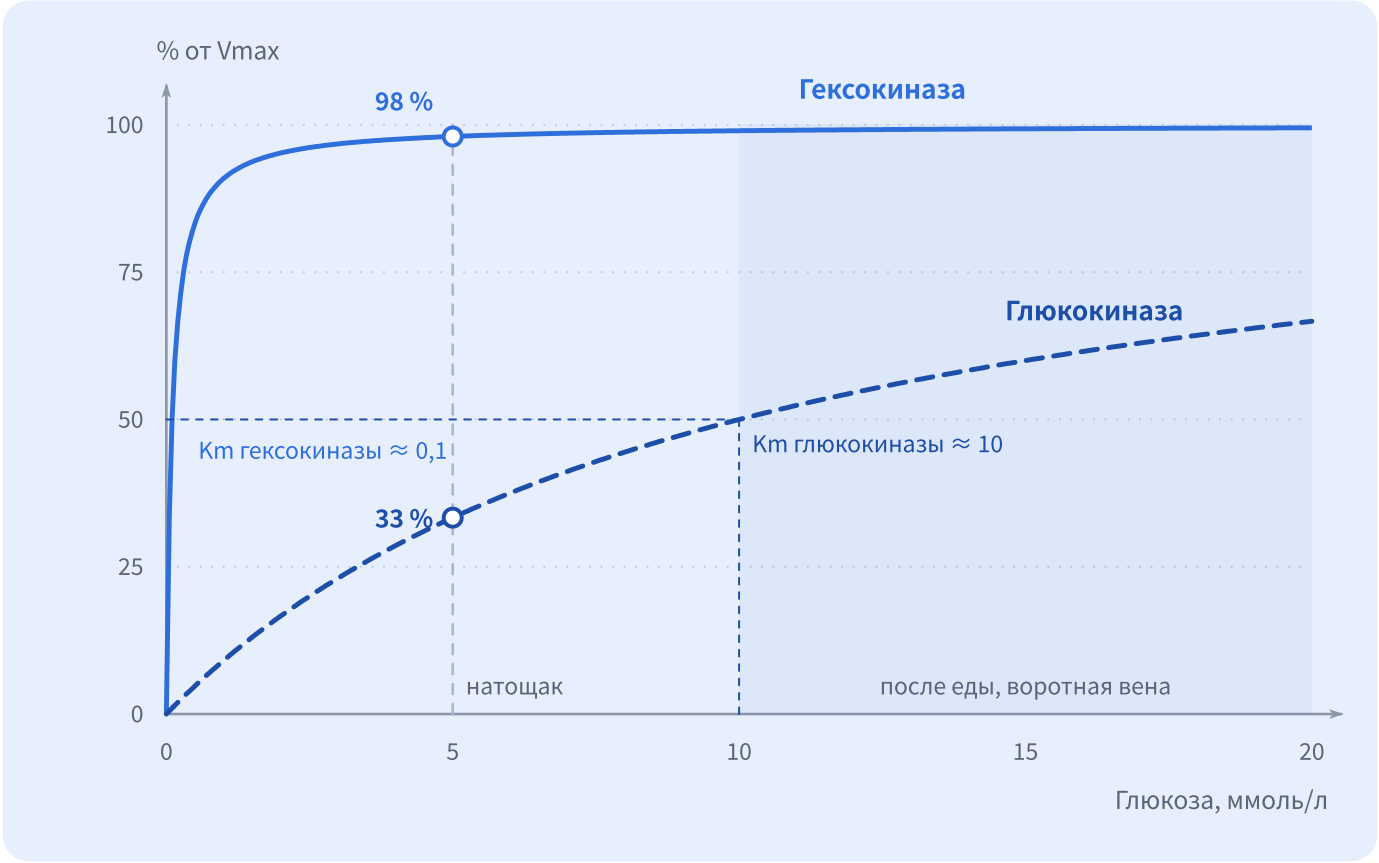


Рис. 3.1. Скорость фосфорилирования глюкозы гексокиназой и глюкокиназой; скорость каждого фермента – в процентах от его максимальной

Таблица 3.2. Гексокиназа и глюкокиназа

Признак	Гексокиназа	Глюкокиназа
Ткани	Большинство тканей	Печень, β-клетки
Km для глюкозы	Низкая: 0,05–0,1 ммоль/л	Высокая: около 10 ммоль/л
Сродство к глюкозе	Высокое	Низкое
Vmax	Низкая	Высокая
Ингибитор	Глюкозо-6-фосфат	Фруктозо-6-фосфат через регуляторный белок
Индукция инсулином	Нет	Есть
Когда работает	Всегда, в том числе натощак	После еды

- Образуется макроэргическая связь в 1,3-бисфосфоглицерате
- Реакция обратима

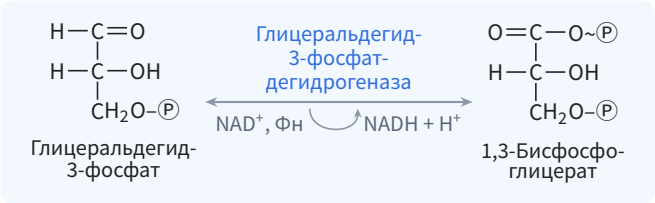


Рис. 4.7. Реакция 6. Окисление глицеральдегид-3-фосфата

Реакция 7. Первое субстратное фосфорилирование

- 1,3-бисфосфоглицерат + АДФ → 3-фосфоглицерат + АТФ
- Фермент – **фосфоглицераткиназа**
- Образуется 1 АТФ (2 АТФ на глюкозу)
- Реакция обратима

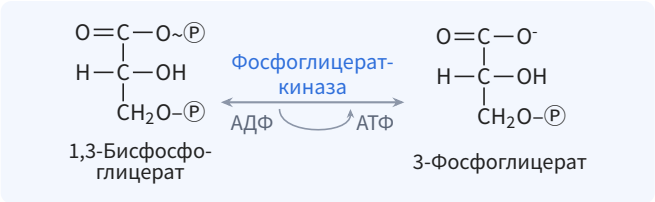


Рис. 4.8. Реакция 7. Первое субстратное фосфорилирование

Реакция 8. Перенос фосфата

- 3-фосфоглицерат ⇄ 2-фосфоглицерат
- Фермент – **фосфоглицератмутаза**



Рис. 4.9. Реакция 8. Перенос фосфата

Реакция 9. Дегидратация

- 2-фосфоглицерат ⇄ фосфоенолпируват + H_2O
- Фермент – **енолаза**
- Образуется макроэргическая связь в фосфоенолпирувате
- Ингибируется фторидом

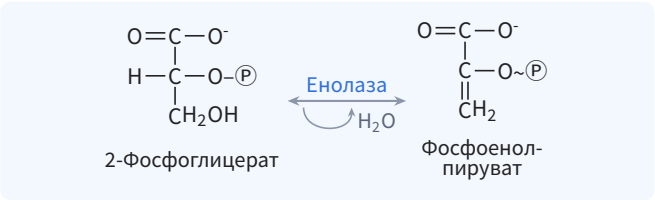


Рис. 4.10. Реакция 9. Дегидратация

Клиника

Отравления
Арсенат конкурирует с фосфатом в глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназной реакции: гликолиз идёт, но АТФ в следующей реакции не образуется. Фторид ингибирует енолазу – поэтому кровь на глюкозу берут в пробирки с фторидом натрия. Фторид тормозит гликолиз не сразу, а через 1–4 часа, поэтому сейчас предпочитают пробирки с цитратом и фторидом

Реакция 10. Второе субстратное фосфорилирование

- Фосфоенолпируват + АДФ → пируват + АТФ
- Фермент – **пируваткиназа**
- Образуется 1 АТФ (2 АТФ на глюкозу)
- Реакция необратима

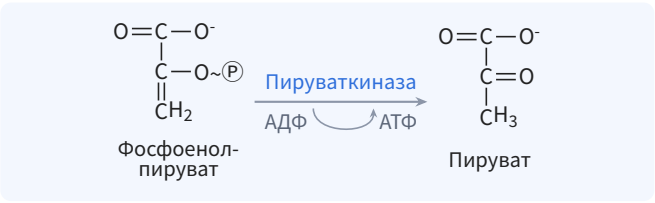


Рис. 4.11. Реакция 10. Второе субстратное фосфорилирование

Ловушка на экзамене

В гликолизе две окислительные реакции и одна реакция синтеза АТФ

Правильно: Наоборот: окислительная реакция одна – глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназная. Субстратного фосфорилирования две – фосфоглицераткиназная и пируваткиназная

Глюконеогенез

Общая характеристика

Глюконеогенез

- **Глюконеогенез** – синтез глюкозы из неуглеводных предшественников
- Нужен, когда запасы гликогена печени исчерпаны
  - Гликогена печени хватает менее чем на сутки голодания
- Глюкоза постоянно нужна мозгу, эритроцитам, мозговому веществу почек, хрусталику, работающей мышце
- Где идёт
  - Печень – около 90 % после ночного голодания
  - Почки – остальное; при голодании дольше 2 суток – до 40 %
- Локализация – митохондрии и цитозоль

Субстраты

- **Лактат** – из эритроцитов и работающих мышц
  - Цикл Кори
- **Аминокислоты** – главный источник при голодании
  - Образуются при распаде белков мышц
  - Все, кроме лейцина и лизина, – гликогенные
  - Главная – аланин: глюкозо-аланиновый цикл
- **Глицерол** – из триацилглицеролов жировой ткани
  - Глицерол → глицерол-3-фосфат → дигидроксиацетонфосфат
- Пропионил-КоА – из жирных кислот с нечётным числом атомов углерода

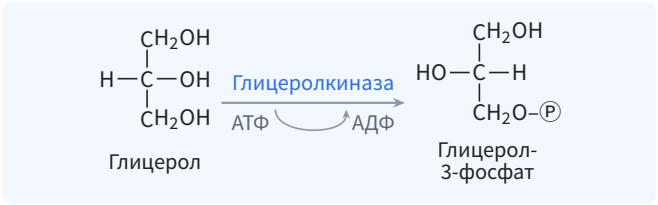


Рис. 6.1. Фосфорилирование глицерола

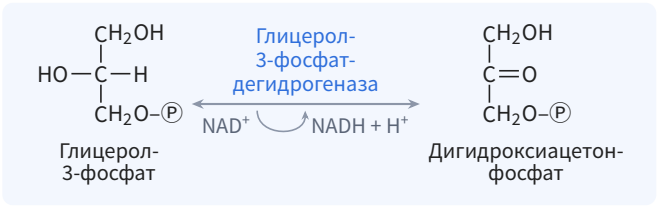


Рис. 6.2. Окисление глицерол-3-фосфата

Ловушка на экзамене

Жирные кислоты – субстрат глюконеогенеза, ведь при голодании они главный источник энергии

Правильно: Из жирных кислот с чётным числом атомов углерода глюкоза не образуется: они дают только ацетил-КоА, а реакция ПДК необратима. Субстратом глюконеогенеза является глицерол, который освобождается вместе с жирными кислотами при распаде жира

Гликоген: синтез и распад

Общая характеристика

Гликоген

- **Гликоген** – разветвлённый полисахарид из остатков α-D-глюкозы, запасная форма глюкозы у животных
- Связи между остатками глюкозы
  - α-1,4-гликозидные – в линейных цепях
  - α-1,6-гликозидные – в точках ветвления, через каждые 8–14 остатков
- Ветвление делает молекулу компактной и даёт много концов для быстрого распада
- Хранится в цитозоле в виде гранул

Где запасается

- Печень – около 100 г, до 10 % массы органа
  - Поддерживает глюкозу крови между приёмами пищи
  - Хватает менее чем на сутки голодания
- Мышцы – около 400 г, 1–2 % массы
  - Источник энергии только для самой мышцы

Термины

- **Гликогеногенез** – синтез гликогена из глюкозы
- **Гликогенолиз** – распад гликогена до глюкозо-1-фосфата и глюкозы

Синтез гликогена

Реакции

Активация глюкозы

- Глюкоза → глюкозо-6-фосфат: гексокиназа или глюкокиназа, затрачивается АТФ
- Глюкозо-6-фосфат ⇄ глюкозо-1-фосфат: **фосфоглюкомутаза**
- Глюкозо-1-фосфат + УТФ → УДФ-глюкоза + PPi: **УДФ-глюкозопирофосфорилаза**
  - PPi сразу гидролизуется – реакция становится необратимой
- УДФ-глюкоза – активная форма глюкозы для синтеза

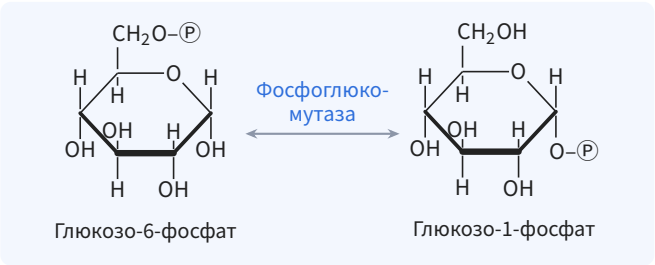


Рис. 7.1. Фосфоглюкомутаза

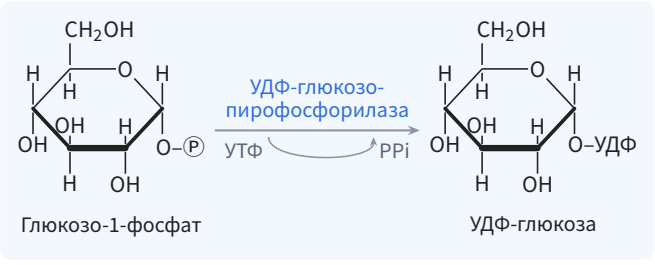


Рис. 7.2. Образование УДФ-глюкозы

- N-ацетилглюкозамин – мономер хитина

- Аминосахара входят и в некоторые антибиотики, например эритромицин

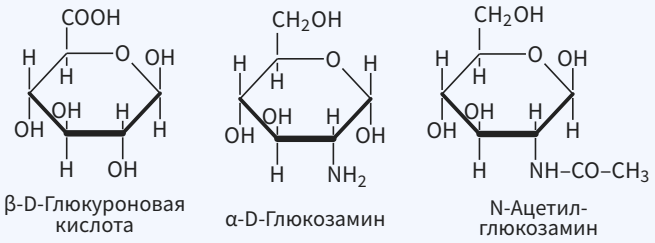


Рис. 9.11. Производные глюкозы

Нарушения

- Наследственные нарушения различаются дефектным ферментом
  - От него зависит, что накапливается и насколько тяжела болезнь
- Проявляется, когда ребёнку начинают давать фрукты, соки, сахар
- Лечение – исключить фруктозу, сахарозу и сорбитол

Непереносимость фруктозы

- Фруктозо-1-фосфат накапливается и связывает фосфат
  - Фосфата и АТФ в печени становится мало
  - Тормозятся гликогенолиз и глюконеогенез – гипогликемия
- АТФ распадается до АМФ и мочевой кислоты – гиперурикемия, лактатацидемия

Галактоземия

- Проявляется с началом кормления молоком
- Лечение – исключить молоко и молочные продукты пожизненно
  - Скрининг новорождённых позволяет начать диету до поражения органов
- Даже при соблюдении диеты часто остаются нарушения речи и интеллекта, у девочек – недостаточность яичников

Таблица 9.1. Наследственные нарушения обмена фруктозы и галактозы

Болезнь	Дефектный фермент	Что накапливается	Проявления
Эссенциальная фруктозурия	Фруктокиназа	Фруктоза в крови и моче	Нет, безобидное состояние
Наследственная непереносимость фруктозы	Альдолаза B	Фруктозо-1-фосфат в печени	После фруктов и сахара: рвота, гипогликемия, желтуха, поражение печени
Классическая галактоземия	Галактозо-1-фосфатуридилтрансфераза	Галактозо-1-фосфат, галактитол	С первых дней на молоке: рвота, желтуха, гепатомегалия, катаракта, отставание в развитии, сепсис
Дефицит галактокиназы	Галактокиназа	Галактоза, галактитол	Катаракта; печень не поражается

Сахарный диабет

Основные понятия

Определения

- **Гипергликемия** – повышение глюкозы крови выше нормы
- **Гипогликемия** – снижение глюкозы крови ниже 3,9 ммоль/л
- **Сахарный диабет** – хроническая гипергликемия из-за недостатка инсулина, нарушения его действия или обеих причин

Диагностика

- Глюкоза венозной плазмы натощак ≥ 7,0 ммоль/л
- Через 2 часа после 75 г глюкозы (ОГТТ) ≥ 11,1 ммоль/л
- Случайное определение ≥ 11,1 ммоль/л с симптомами
- HbA1c ≥ 6,5 %
- Если нет явной гипергликемии с симптомами, диагноз подтверждают повторным анализом в другой день
- Нарушенная гликемия натощак: 6,1–6,9 ммоль/л в венозной плазме (5,6–6,0 в капиллярной крови)

Пероральный глюкозотолерантный тест

- Натощак, затем 75 г глюкозы, глюкоза через 2 часа
- 2 часа: < 7,8 ммоль/л – норма, 7,8–11,0 – нарушенная толерантность, ≥ 11,1 – диабет

Гликированный гемоглобин

- Глюкоза присоединяется к гемоглобину без ферментов
- Чем выше глюкоза, тем больше HbA1c
- Эритроцит живёт около 120 дней
  - HbA1c отражает среднюю глюкозу за 3 месяца
  - Сильнее всего на значение влияют последние 4–8 недель

> **Ловушка на экзамене**
>
> **HbA1c показывает уровень глюкозы в момент анализа**
>
> **Правильно:** HbA1c отражает среднюю гликемию примерно за 3 месяца – срок жизни эритроцитов. Однократный подъём глюкозы его почти не меняет. Для глюкозы «здесь и сейчас» измеряют саму глюкозу

Типы диабета

- Основные типы – 1 и 2; реже встречаются MODY, гестационный диабет и диабет при болезнях поджелудочной железы

Таблица 11.1. Сравнение диабета 1 и 2 типа

Признак	Диабет 1 типа	Диабет 2 типа
Причина	Аутоиммунное разрушение β-клеток	Инсулинорезистентность и недостаток секреции инсулина