

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И СОЦИАЛЬНОГО
РАЗВИТИЯ
ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ
КАФЕДРА МЕД БИОФИЗИКИ, МАТЕМАТИКИ И
ИНФОРМАТИКИ**

БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

ПЛАН

- Введение
- Потенциал покоя.
- Стационарный потенциал Гольдмана-Ходжкина-Катца.
- Потенциал действия и его распространение.
- Основные понятия и формулы.
- основные классы методов исследования биоэлектрических потенциалов
- Вывод

ВВЕДЕНИЕ

- В живых организмах происходят разнообразные электрические процессы. Функционирование живых тканей сопровождается электрическими явлениями. Генерация и распространение электрических потенциалов - важнейшее физическое явление в живых клетках и тканях.
- **Биоэлектрический потенциал** - разность потенциалов между двумя точками живой ткани, определяющая ее биоэлектрическую активность. Биопотенциал имеет мембранную природу.

ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ

- В нормально функционирующей клетке поддерживается наиболее благоприятный состав ионов. Различие в их концентрациях по разные стороны мембраны приводит к появлению разности потенциалов.
- **Потенциал покоя** - разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой в нормально функционирующей клетке.
- В 1902 г. Бернштейн предположил, что потенциал покоя обусловлен проницаемостью мембраны для ионов K^+ . В состоянии равновесия для ионов K^+ справедливо уравнение

$$c_i - c_o e^{-\psi} = 0.$$

Отсюда находим: $\psi = -\ln(c_i/c_o)$, или с учетом (12.3):

$$\varphi_M = - (RT/FZ)\ln(c_i /c_o). \quad (12.7)$$

- Потенциал, определяемый формулой (12.7), называют *равновесным потенциалом*. Расчеты, выполненные по этой формуле, существенно расходятся с экспериментальными данными при низких концентрациях K^+ . Это указывает на то, что «калиевая» теория

СТАЦИОНАРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГОЛЬДМАНА-ХОДЖКИНА-КАТЦА

- В стационарном состоянии (когда параметры системы не изменяются) суммарная плотность потока равна нулю, т.е. число различных ионов, проходящих в единицу времени через мембрану внутрь клетки, равно числу ионов, выходящих из клетки через мембрану: $J = 0$

$$(J_{Na^+} \neq 0, J_{K^+} \neq 0, J_{Cl^-} \neq 0).$$

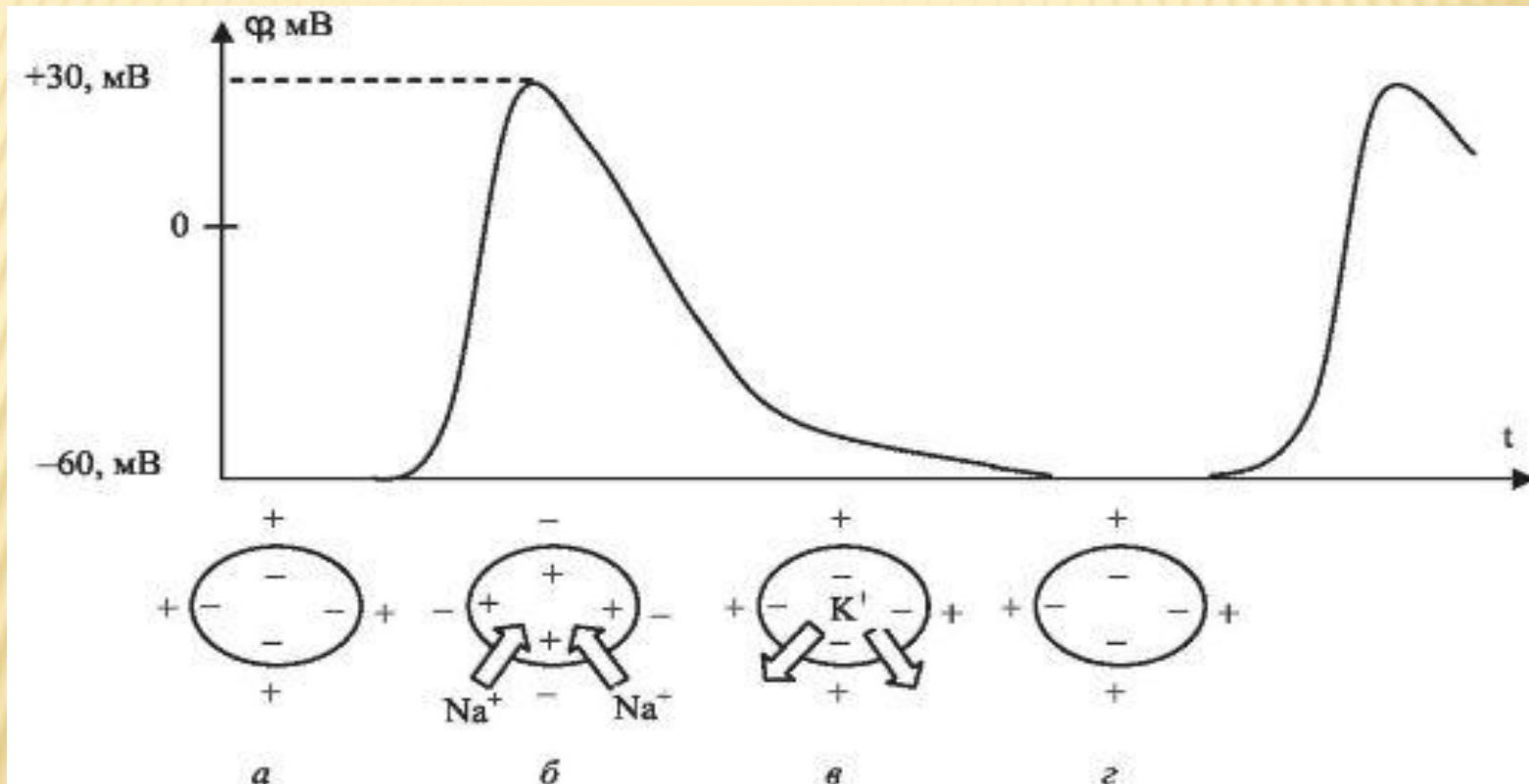
Величина мембранного потенциала покоя в стационарном состоянии определяется уравнением Гольдмана–Ходжкина–Катца:

$$\varphi_m = -\frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o}{P_K [K^+]_o + P_{Na} [Na^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i} \right). \quad (12.9)$$

ПОТЕНЦИАЛ ДЕЙСТВИЯ И ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЕ

- Все живые клетки при действии различных раздражителей переходят в возбужденное состояние. При возбуждении разность потенциалов между клеткой и окружающей средой изменяется, появляется электрический импульс, возникает потенциал действия. Общее изменение разности потенциалов на мембране, происходящее при возбуждении клеток, определяет потенциал действия.
- **Потенциал действия** - разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой при возбуждении.
- Распространение импульса определяется изменением состояния мембраны. В состоянии *покоя* в результате активного транспорта концентрация ионов K^+ в мембране значительно выше (в 36 раз), чем во внешней среде.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ И ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ МЕМБРАНЫ



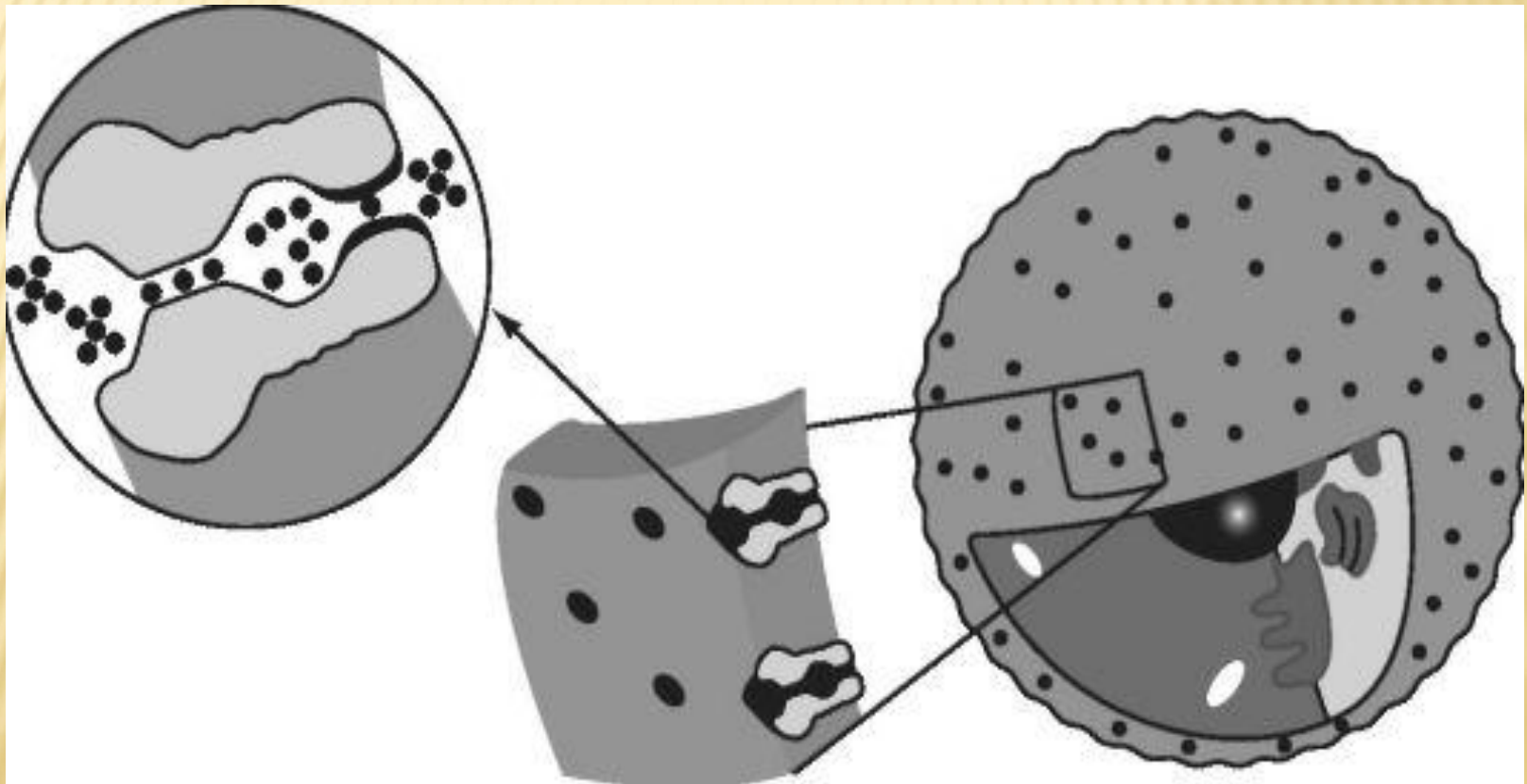
- Для ионов Na^+ все наоборот (концентрация ионов Na^+ снаружи мембраны в 6 раз выше, чем внутри). При этом на внутренней поверхности мембраны находится *отрицательный* заряд. При возбуждении будет происходить следующее.
- 1) В начале увеличивается проницаемость мембраны для ионов Na^+ .
- Натриевые каналы открываются лишь при возбуждении. Ионы Na^+ входят через мембрану внутрь клетки, в результате чего внутренняя поверхность мембраны изменяет свой заряд с «-» на «+», т.е. происходит деполяризация мембраны (рис. 12.1, б). Натриевый канал открыт малое время (0,5-1 мс). В течение этого времени происходит изменение мембранного потенциала от -60 до +30 мВ (генерация

- 2) Во время генерации импульса натриевый канал закрывается и открывается калиевый канал. Ионы K^+ частично выходят наружу (покидают клетку), что приводит к восстановлению отрицательного заряда на внутренней стороне мембраны (рис. 12.1, в). Во время импульса проводимость мембраны увеличивается в 1000 раз. Всего за время генерации одного импульса через квадратный микрон поверхности волокна проходит по 20 000 ионов натрия и калия.
- 3) Наступает рефрактерный период. Мембрана не воспринимает импульс, а возвращается в основное физиологическое состояние (рис. 12.1, г).
- Таким образом, в мембране для ионов каждого вида (прежде всего для натрия и калия) имеется свой канал, пребывающий в открытом или в закрытом состоянии в зависимости от электрического потенциала мембраны. Благодаря такому устройству удается обеспечить быстрые потоки ионов через мембраны и, как следствие, быстрое изменение разности потенциалов между клеткой и

ИОННЫЙ КАНАЛ

- Ионный канал впервые описал Р. Мак-Киннон. Канал состоит из внешней и внутренней полостей, разделенных фильтром (рис. 12.2).
- Между внутренней полостью и телом клетки расположены ворота. Фильтр устроен хитро. Обычно ион калия или натрия движется по окружающей клетку среде в гидратированном виде: к нему присоединена «шуба» из четырех молекул воды. Фильтр же содержит четыре атома кислорода, которые в случае, например, калиевого канала расположены на точно таком же расстоянии друг от друга, на каком расположены молекулы воды вокруг иона калия. Попав в фильтр, такой ион сменит шубу и даже этого не заметит. Если же ион будет другого размера, например маленький ион натрия, то пройти ему не удастся: водяная шуба не отцепится и будет мешать. Что же касается ворот, то они открываются в результате изменения конформации белка. Именно это изменение и происходит в ответ на изменение электрического потенциала мембраны.

СХЕМА ИОННОГО КАНАЛА (ИЗ НОБЕЛЕВСКОЙ ЛЕКЦИИ Р. МАК- КИННОНА)



СРАВНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОКОЯ И ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

Сравниваемые параметры	Потенциал покоя	Потенциал действия
Заряд на поверхности мембраны	Снаружи «+» Внутри «-»	Снаружи «-» Внутри «+»
Концентрация ионов	Ионов (K^+) внутри больше, снаружи меньше	Ионов (Na^+) снаружи больше, внутри меньше
Проницаемость мембраны	Мембрана проницаема для ионов (K^+)	Мембрана проницаема для ионов (Na^+)
Ионные токи	Калиевый и натриевый токи уравнивают друг друга (состояние устойчивого равновесия)	Калиевый и натриевый токи не уравнивают друг друга (состояние неустойчивого равновесия)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

- При деполяризации мембраны возникают токи, замыкающиеся через наружную проводящую среду. Между возбужденным и невозбужденным участками нервного волокна потечет электрический ток, так как у возбужденного участка внутренняя поверхность имеет положительный заряд, а у невозбужденного - отрицательный, и между ними возникнет разность потенциалов. Этот *локальный* ток служит *раздражителем* для невозбужденных участков нервного волокна, непосредственно примыкающих к месту деполяризации. В них также возникает возбуждение, т.е. потенциал действия (или деполяризация), и так далее. По поверхности клетки локальный ток течет от невозбужденного участка к возбужденному; внутри клетки он течет в обратном направлении. Локальный ток, как и любой электрический ток, раздражает соседние невозбужденные участки и вызывает увеличение проницаемости мембраны.

- Это приводит к возникновению потенциалов действия в соседних участках. В то же время в ранее возбужденном участке происходят восстановительные процессы реполяризации. Вновь возбужденный участок, в свою очередь, становится электроотрицательным, и возникающий локальный ток раздражает следующий за ним участок. Этот процесс многократно повторяется и обуславливает распространение импульсов возбуждения по всей длине клетки в обоих направлениях.
- Процесс распространения потенциала действия происходит гораздо медленнее, чем течет локальный электрический ток.
- Распространение потенциала действия по нервному волокну называется *волной возбуждения*. Эта волна не затухает, так как получает энергию из среды - от заряженной мембраны. Волна возбуждения является автоволной в активной среде возбудимых клеток.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

Биоэлектрический потенциал	Разность потенциалов между двумя точками живой ткани, определяющая ее биоэлектрическую активность. Биопотенциал имеет мембранную природу
Безразмерный потенциал	$\psi = \frac{ZF\phi_M}{RT} \quad (12.3)$ <p>Z – валентность иона, F – постоянная Фарадея, R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура среды, ϕ_M – мембранный потенциал</p>

<p>Поток ионов через мембрану</p>	$J = P\psi(c_i - c_o e^{-\psi})/(e^{-\psi} - 1), \quad (12.5)$ <p>c_i, c_o – концентрации ионов внутри и вне клетки, P – проницаемость мембраны для ионов данного вида.</p>
<p>Потенциал покоя</p>	<p>Разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой в нормально функционирующей клетке</p>
<p>Уравнение Нернста–Планка для потенциала покоя</p>	$\phi_m = -(RT/FZ)\ln(c_i/c_o) \quad (12.7)$
<p>Уравнение Гольдмана–Ходжкина–Катца для мембранного потенциала покоя в стационарном состоянии</p>	$\phi_m = -\frac{RT}{F} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o}{P_K [K^+]_o + P_{Na} [Na^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i} \right) \quad (12.9)$
<p>Потенциал действия</p>	<p>Разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой при возбуждении</p>

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ

АКТИВНОСТИ ТКАНЕЙ ИЛИ ОРГАНОВ РАЗЛИЧАЮТ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ КЛАССЫ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ:

- электрокардиографию - метод регистрации контактным способом биопотенциалов на различных участках поверхности тела или внутри него;
- электроэнцефалографию - метод регистрации контактным способом разности потенциалов на поверхности головы, характеризующий биоэлектрическую активность различных участков мозга;
- электромиографию - метод регистрации контактным способом разности потенциалов и электрического поля на поверхности мышцы (интерференционная электромиография) или внутри нее (локальная электромиография);
- электроокулографию - метод регистрации изменений биопотенциалов, обусловленных движением глазного яблока;
- кожно-гальваническую реакцию (КГР) - метод регистрации разности потенциалов на кожном покрове тела, возникающей в ответ на раздражение и являющейся выражением возбуждения вегетативной нервной системы. Этот метод широко используется при психофизиологических исследованиях.

ВЫВОД

- Электрические потенциалы, возникающие в живых клетках, органах и тканях человека и животных, - биопотенциалы являются предметом изучения одного из обширных разделов современной электрофизиологии. Биоэлектрические потенциалы отражают тонкие физиологические процессы, протекающие в организме, поэтому любые функциональные и патологические изменения в исследуемых системах и органах сказываются на их параметрах и форме. Необходимость регистрации этих изменений появляется при изучении жизненных процессов, диагностике, лечении и профилактике заболеваний, контроле состояния и работоспособности человека и т. д.