

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2024 году

по проекту **«Многоканальная электрическая стимуляция отолитовой мембраны
и полукружных каналов вестибулярного органа»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-25-00259

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Демкин Владимир Петрович

Данный проект посвящен разработке комплексного подхода к совершенствованию вестибулярных имплантов (ВИ) посредством многоканальной стимуляции вестибулярных нервов полукружных каналов и отолитовых мембран.

В 2024 году в рамках второго этапа проекта решалась задача по разработке комплексной электрофизиологической 3D-модели вестибулярного органа с учетом анатомической структуры отолитовых органов и полукружных каналов.

Полукружные каналы и отолитовые сенсорные области внутреннего уха функционируют как интегрированная система, поэтому клиническая картина у лиц с периферическими вестибулярными расстройствами включает нарушения, как полукружных каналов, так и отолитовых органов.

В связи с этим наше исследование направлено на оценку вклада отолитовых органов и полукружных каналов в нарушении вестибулярной функции на основе построения комплексной электрофизиологической 3D-модели вестибулярного органа и передаточной функции вестибулярного импланта, проведения численных экспериментов по многоканальной электрической стимуляции вестибулярных нервов и сравнения результатов *in silico* моделирования с *in vitro* экспериментами на лабораторных животных.

Основные результаты работы коллектива научной лаборатории моделирования физических процессов в биологии и медицине заключаются в следующем.

С целью подтверждения концепции сенсорной интеграции вестибулярной периферии разработаны методические рекомендации по дифференциальной экспресс-диагностике вестибулярной дисфункции, которая позволяет оценить и дифференцировать наличие системного нарушения вестибулярного органа.

Проведены клинико-лабораторные исследования по разработанной методике для оценки статуса вестибулярного аппарата, оценки вклада отолитов и каналов в формирование вестибулярных рефлексов и оценки интерференции сигналов отолитовых анализаторов и полукружных каналов в системном нарушении вестибулярной функции.

С целью получения новых знаний о механизме взаимодействия сигналов отолитовых структур и полукружных каналов вестибулярного органа и на основании результатов клинико-лабораторных исследований разработана комплексная 3D-электрофизиологическая модель вестибулярного органа, включающая пять периферийных сенсоров. В основу комплексной 3D-модели положена

детализированная анатомическая структура и эквивалентная электрическая схема замещения вестибулярного органа в представлении сосредоточенных элементов с учетом расположения стимулирующих электродов, влияния межэлектродных токов утечки и частотной зависимости реактивных сопротивлений тканей вестибулярного лабиринта.

Исходя из принципа оптимального соответствия работы вестибулярного протеза естественным электрофизиологическим процессам в тканях лабиринта, разработана математическая 3D-модель и получена формула для передаточной функции вестибулярного импланта с учетом электрофизических характеристик отолитовых органов и полукружных каналов.

В основе нашего подхода к оптимизации передаточной функции ВИ лежат следующие положения:

- разработка 3D-физико-математической модели и электрической схемы замещения вестибулярного органа в представлении сосредоточенных элементов для моделирования протекания электрических сигналов через ткани лабиринта;
- представление клеточного элемента волосковых клеток (ВК) в виде параллельного резонансного контура, позволяющего имитировать внутреннюю настройку ВК на периодический электрический сигнал;
- определение электрофизических данных клеточной структуры лабиринта на основе прецизионных измерений анатомических параметров и удельных электрофизических констант;
- имитация амплитудно-частотной зависимости передаточной функции ВИ, ее селективности и избирательности при стимулировании гармоническим сигналом.

Проведены численные эксперименты по оптимизации передаточной функции на основе *in silico* моделирования влияния расположения электродов и межэлектродных токов утечки на распространение синусоидального электрического тока при многоканальной стимуляции вестибулярного нерва, оценка частотной чувствительности, избирательности и селективности передаточной функции ВИ в интервале частот 300-2000 Гц, соответствующих области резонансных частот механических и электрических стимулов для отолитовых мембран.

Установлено, что спектральная селективность передаточной функции уменьшается с ростом частоты электрического стимула. Максимальная частотная чувствительность и избирательность передаточной функции импланта наблюдается на резонансных частотах отолитовых мембран.

Для подтверждения результатов численных экспериментов проведены лабораторные исследования многоканальной электрической стимуляции вестибулярного органа на примере лабораторных животных (крысы) *in vitro*.

В ходе лабораторных экспериментов проводились измерения амплитудно-частотных и фазовых характеристик электрического гармонического сигнала на вестибулярном нерве и соседних электродах при последовательной стимуляции каждого из электродов.

Доказано, что для эффективной стимуляции вестибулярного нерва необходимо размещать стимулирующие электроды в соответствующие анатомической структуре элементы вестибулярного лабиринта.

Обнаружено, что в случае многоканальной электрической стимуляции, с каждого электрода возникают токи утечки на соседние электроды, приводящие их к ложной активации. Токи утечки с группы близко лежащих электродов превышают в совокупности величину прямого стимулирующего тока, что необходимо учитывать при проектировании ВИ.

Все запланированные в 2024 году работы выполнены в полном соответствии с техническим заданием на проведение НИР, включая публикацию 4-х научных статей, 2 доклада на научных конференциях, регистрацию программы для ЭВМ.