

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВОЛОСКОВЫХ КЛЕТОК ОТОЛИТОВЫХ ОРГАНОВ КРЫСЫ

Л. В. Смаглий¹⁻³, В. П. Демкин¹, М. В. Светлик¹, С. В. Мельничук¹,
Т. В. Руденко^{1,2}, М. Д. Акинина¹

¹Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия

³Северский биофизический научный центр, г. Северск, Россия

Вестибулярная система человека обеспечивает восприятие информации об изменении положения тела в пространстве и последующее перераспределение мышечного тонуса и сохранение равновесия. Функциональные нарушения вестибулярной системы вызывают постуральную нестабильность, осциллопсию и хроническое нарушение равновесия. При двухсторонней вестибулярной дисфункции единственным методом лечения является имплантация вестибулярного протеза. Изучение механизмов работы вестибулярного аппарата человека *in vivo* очень сложна, в связи с чем эффективным методом является физико-математическое моделирование и последующая проверка результатов расчетов с экспериментальными результатами, полученными на лабораторных животных [1]. Отолитовые органы (утрикула и саккула) наряду с полукружными каналами обеспечивают интегративный ответ на изменение положения головы. Гетерогенное строение отолитовой мембраны, включающей три слоя (гель-слой, мэш-слой, слой отолитов), а также различная чувствительность афферентов стриолярной и экстрастриолярной области к высоко- и низкочастотным стимулам не позволяют однозначно определить экспериментальными методами параметры электрической стимуляции при протезировании вестибулярного аппарата. В связи с этим нами предложена физико-математическая модель динамики отолитовых органов, учитывающая структурно-морфологические особенности отолитовой мембраны и позволяющая выявить и спрогнозировать ответ при действии периодического механического стимула.

Модельным объектом служили отолитовые органы крысы. Построение геометрической модели утрикулы и саккулы крысы производили на основании данных Desai S.S. с соавт. (2005). Расчет степени активации волосковых клеток отолитовых мембран проводили с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics® 4.2. и метода конечных элементов для вычисления 3D-смещений слоев отолитовой мембраны при действии механического стимула, соответствующего гармоническим колебаниям в диапазоне частот 0–5000 Гц, шагом 10 Гц и направленным вдоль главных осей головы (X, Y, Z). Выявлен резонансный характер зависимости смещения слоев отолитовой мембраны от частоты внешнего стимула. Определены резонансные частоты колебаний гель-слоя (230 ± 5 Гц, 1430 ± 5 Гц, 3290 ± 5 Гц,) и границы гель-мэш слоев (330 ± 5 Гц, 1720 ± 5 Гц, 4360 ± 5 Гц) утрикулы, а также гель-слоя (370 ± 5 Гц, 1500 ± 5 Гц, 2575 ± 5 Гц, 3300 ± 5 Гц, 4530 ± 5 Гц) и границы гель-мэш слоев (390 ± 5 Гц, 1490 ± 5 Гц, 2640 ± 5 Гц) саккулы. Установлено, что гель-слой отолитовой мембраны преимущественно реагирует на высокочастотную стимуляцию и обуславливает преобладание высокочастотных колебаний волосковых клеток в области стриолы.

В то же время мэш-слой отолитовой мембраны реагирует на низкочастотную стимуляцию и обуславливает преобладание низкочастотных колебаний волосковых клеток в области экстрастриолы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00259.

Библиографические ссылки

1. The vestibular implant: Opinion statement on implantation criteria for research / R. van de Berg [et al.] // Journal of Vestibular Research. 2020. Vol. 30. P. 213–223.