

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ЭПИТЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЁННОСТИ В ПОРАХ СКАФФОЛДА

Бузмаков М.Д., Красняков И.В., Брацун Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614013, Пермь, ул. Профессора Поздеева 11, +7 (342) 2-391-414,
maxim.buzmakov97@gmail.com, DABracun@pstu.ru

Эпителиальная ткань – это плотно прилегающая друг к другу совокупность клеток на базальной мембране, образующая пласт. Она покрывает, например, поверхность кожи или полых органов. Также эпителиальная ткань может выполнять барьерные, обменные, дыхательные, рецепторные и регуляторные функции на границе внешней или внутренней среды организма живых существ. Важнейшим фактором, регулирующим морфогенез эпителия, являются механические взаимодействия между клетками и окружающей средой, приводящие к деформациям (складкам, растяжениям). Особую роль в этих процессах играет эффект стеснённости (конфайнмента), возникающий при росте ткани в ограниченном пространстве, который способен направленно влиять на пролиферацию, форму клеток и динамику ткани в целом [1].

В данной работе для изучения эффекта стеснённости используется сложная дискретная система на основе вершинной модели, в которой каждая клетка представлена в виде шестиугольника. Общая динамика системы описывается уравнением потенциальной энергии, учитывающим упругость площади, рёбер, углов, а также напряжение цитоскелета каждой клетки. Эволюция ткани моделируется через перемещение вершин, на которые действуют силы, вычисленные как градиент этой энергии. Также реализованы механизмы деления, интеркаляции и обмена химическими сигналами. Описанная математическая модель позволяет наблюдать и записывать полную историю каждой клетки, начиная от ее зарождения [2]. Объектно-ориентированный подход к моделированию позволяет создавать любую форму эпителиальной ткани, а также начальное количество участвующих клеток. При помощи данной модели проведено исследование динамики роста и реорганизации эпителиального пласта в условиях жёсткого пространственного ограничения – внутри пор скаффолда. Определены оптимальные диапазоны геометрических параметров, обеспечивающие минимизацию стресса и сохранение плотной упаковки клеток. Полученные результаты могут помочь в разработке новых подходов в тканевой инженерии, регенеративной медицине и онкологических исследованиях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № FSNM-2025-0001).

Литература

1. Zallen J.A., Goldstein B. *Cellular mechanisms of morphogenesis // Seminars in Cell & Developmental Biology.* – 2017. – Vol. 67. – P. 101-102.
2. Красняков И.В., Бузмаков М.Д. *Исследование процессов переупаковки клеток в эпителиальных листах in silico: часть I – одноосное растяжение ткани // Российский журнал биомеханики.* – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 105-118.