

УДК 612.135

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ
КАПИЛЛЯРНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЙ
МОДЕЛИ**

Белошицкая О.К., НТУУ «КПИ», Факультет биомедицинской инженерии
Настенко Е.А., НТУУ «КПИ», Факультет биомедицинской инженерии,
Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова
Национальной академии медицинских наук Украины

UDC 612.135

**RESEARCH OF DYNAMIC FEATURES OF THE CAPILLARY NETWORK
USING CELLULAR AUTOMATA MODEL**

Beloshitska O.K., National Technique University of Ukraine “Kyiv Polytechnic
Institute”, Faculty of Biomedical Engineering
Nastenko E.A., National Technique University of Ukraine “Kyiv Polytechnic
Institute”, Faculty of Biomedical Engineering, National M. Amosov Institute of
Cardio-Vascular Surgery

Рассмотрено капиллярную сеть с помощью клеточно-автоматной модели в программе Cellular Automata (v. 6.1.2). Проанализировано модель со значительными динамическими свойствами насыщения тканей кислорода и капиллярного кровотока. Исследовано свойства поведения капиллярной сети в зависимости от заданных начальных условий и получено интегральные зависимости от метаболической активности тканевых клеток.

Ключевые слова: клеточный автомат, капиллярная сеть, капилляр, сердечно-сосудистая система.

Considered capillary network using cellular automaton model in the Cellular Automata (v. 6.1.2). Analyzed a model with significant dynamic properties of tissue oxygen saturation and capillary blood flow. Investigated the properties of the

capillary network behavior depending on the set of initial conditions and obtained integral depending on the metabolic activity of tissue cells.

Keywords: cellular automata, capillary network, capillary, cardiovascular system.

Введение. Кровообращение обеспечивает все процессы метаболизма в организме человека и поэтому является компонентом различных функциональных систем, определяющих гомеостаз.

Основное значение сердечно-сосудистой системы состоит в снабжении кровью органов и тканей. Кровь непрерывно движется по сосудам, что дает возможность выполнять все жизненно важные функции. К системе кровообращения относятся сердце и сосуды – кровеносные и лимфатические.

Капилляр имеет входной и выходной сфинктеры, которые перекрывают ток крови по нему на определённое время. Прекапиллярный сфинктер представляет собой участок прекапилляра, содержащий две гладкомышечные клетки, расположенные в начале прекапилляра.

Капилляры могут находиться в двух функциональных состояниях: закрытые (может протекать только плазма) или же открытые (по капиллярам течёт кровь, то есть в капилляр попадают эритроциты). Количество активных капилляров может изменяться и зависит от метаболической активности тканей.

Цель и задачи исследования. Интересной задачей является исследование основных динамических свойств капиллярной сети в зависимости от начальных условий модели в виде клеточного автомата, учитывая анатомическое строение и функционирование системы кровообращения.

Материалы и методы их исследования. В соответствии с представлениями синергетики капиллярная сеть рассматривается как система, обладающая критической самоорганизацией, и как система, функционирующая на кромке хаоса, т.е. в состоянии «устойчивого неравновесия». Для нелинейной динамики сложных систем, в частности капиллярной сети, используется три

категории характеристик [1]: вариабельность или вариативность; сложность; самоорганизация.

Клеточный автомат (КА) – это дискретная динамическая система, которая представляет собой совокупность клеток (ячеек), которые одинаковым образом взаимодействуют между собой.

Ученый Вольфрам в статье «Статическая механика клеточных автоматов» [2] дал такое определение: КА – это математическая идеализация физической системы, в которой время и пространство дискретны, а физические величины могут принимать конечное множество значений.

Клеточные автоматы (КА) разбиваются на 4 класса (за классификацией Wolfram), которые различаются по типам конфигураций, к которым эволюционирует КА [3].

Класс 1. КА, эволюционирующие к пространственно однородному глобальному состоянию. Например, все клетки КА переходят в состояние 1 или все клетки переходят в состояние 0. Небольшие локальные возмущения начальной конфигурации не изменяют терминального состояния КА.

Класс 2. КА, эволюционирующие к простым устойчивым или периодически расположенным структурам. Небольшие локальные изменения начальных конфигураций могут изменить терминальное состояние на ограниченном участке КА.

Класс 3. КА, поведение которых хаотично, т.е. бесконечно меняется непредсказуемым образом. Любое локальное изменение начального состояния распространяется на постепенно увеличивающееся пространство в КА.

Класс 4. КА, эволюционирующие к довольно сложным локальным фигурам, иногда движущимся (распространение волны). Изменения начальных состояний влекут за собой сложные нерегулярные изменения поведения.

Программа Cellular Automata (v. 6.1.2) представляет собой модель микроциркуляторной сети в виде клеточного автомата [4], на основе которого можно исследовать основные статические и динамические свойства функционирования сердечно-сосудистой системы (рис. 1).

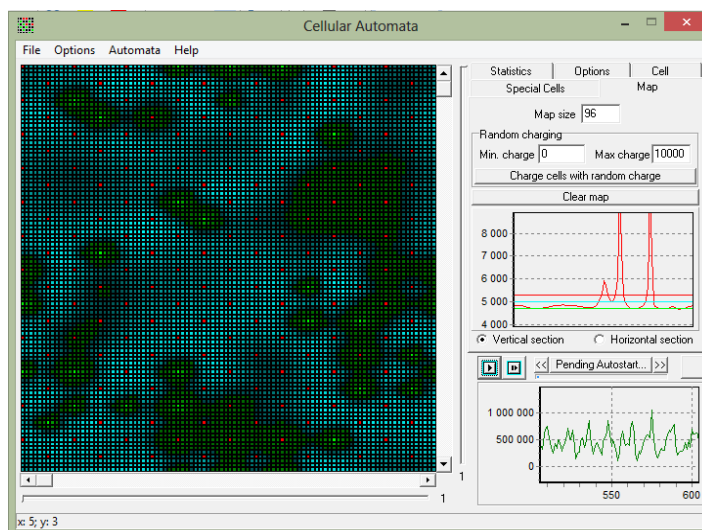


Рис. 1 – Главное окно программы Cellular Automata (v. 6.1.2)

Все клетки образуют так называемую решетку КА. Решетки могут быть различных типов, отличаясь как по размерности, так и по форме клеток. Различают окрестности Марголуса (2 соседа), фон-Неймана (4 соседа), Мура (8 соседей). В данной программе используется окрестность Мура.

Описанную КА-модель можно рассматривать как генератор сигналов различной сложности и исследовать свойства реальных физиологических систем.

Количество активных (открытых) капилляров на каждом шаге изменяется и зависит от метаболических свойств активности тканей, в частности диссипации и порогов открытия/закрытия капилляров. К изменению их числа и продолжительности нахождения в активном состоянии приводит изменение метаболической активности тканей и уровня системного кровотока.

Микроциркуляторная единица обеспечивает нутритивный кровоток (кровоток в капиллярах) и шунтовой кровотока (кровоток с артерий в вены).

При накоплении метаболитов при значении среднего заряда ниже порога активации, капилляр открывается, а когда это значение превышает значение порога активации – капилляр закрывается.

Капилляры осуществляют доставку кислорода и элиминацию (высвобождение) метаболитов. Ткань, окружающая капилляр, на каждом шаге осуществляет потребление кислорода и накопление метаболитов.

КА-модель капиллярной сети в программе Cellular Automata (v. 6.1.2) представлена следующим образом:

- Ткани, окружающие капилляры, состоят из «сытых» клеток, кислородный запрос которых удовлетворен, и «голодных» клеток, у которых наблюдается кислородное голодание (гипоксия);
- Клетки-капилляры – закрытые и открытые капилляры.

Значения порогов открытия/закрытия капилляров описываются следующим образом. Заряд (насыщение кислородом) открытых капилляров больше или равен заряду закрытых капилляров. Общий заряд капилляров состоит из заряда капилляра или заряда ткани.

Экспериментальные данные и их обработка. При анализе КА-модели капиллярной сети было получено разнообразие форм колебаний капиллярного кровотока и тканевого насыщения кислородом (рис. 2).

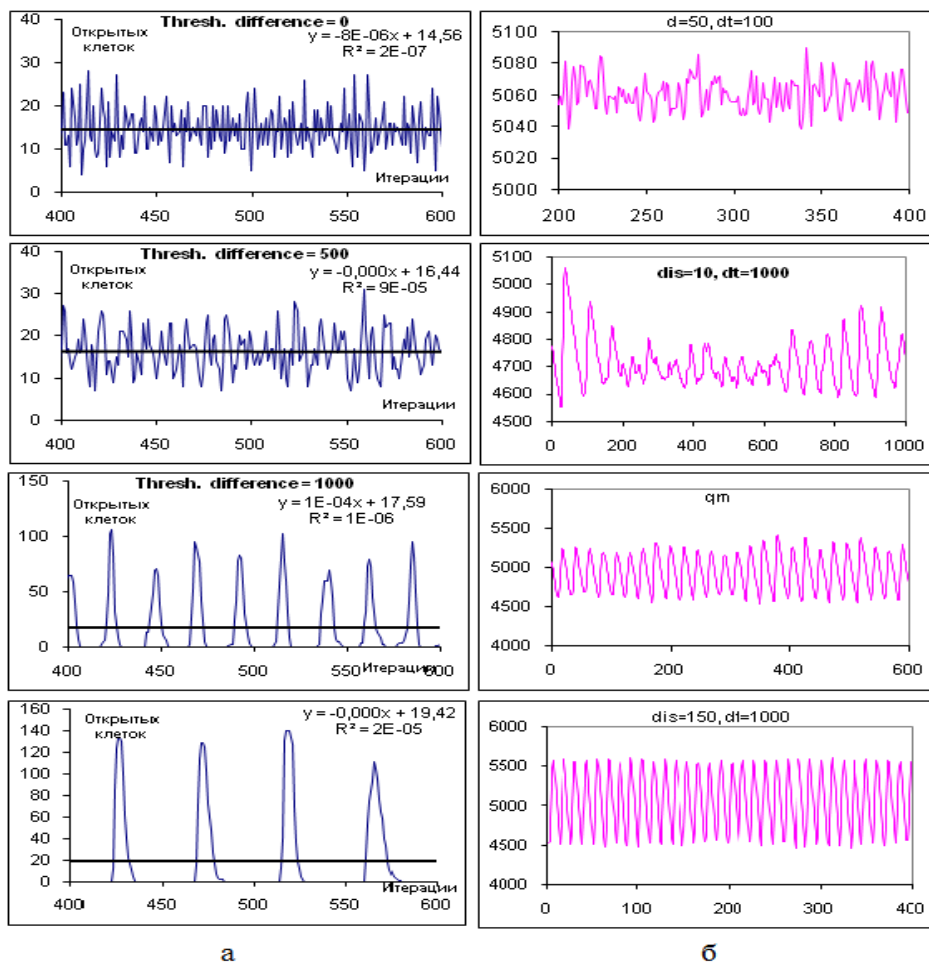


Рис. 2 – Диапазоны колебаний свойств капиллярного кровотока (а) и насыщение тканей кислородом (б)

Модель демонстрирует не только хаотические и периодические колебания, но еще и колебания с фликкер-шумом. Отсюда можно сделать вывод, что смоделированная система обладает высокими адаптивными свойствами. Поэтому модель воспроизводит разнообразное поведение показателей тканевого насыщения кислородом и капиллярного кровотока, поведение которых существенно зависит от исходных параметров системы. На графиках также четко прослеживаются колебания, соответствующие сокращениям сердца.

Показано, что система капиллярной сети обладает свойствами КА 4 рода по классификации Wolfram. При этом были получены следующие качественные особенности регуляции капиллярной сети (рис. 3):

- насыщение ткани кислородом поддерживается на приемлемом уровне в большей части регуляторного диапазона;
- капиллярный кровоток пропорционален кислородному запросу тканей;
- количество мерцающих капилляров сначала достигает максимума, потом снижается, т.к. большинство их остается открытыми.

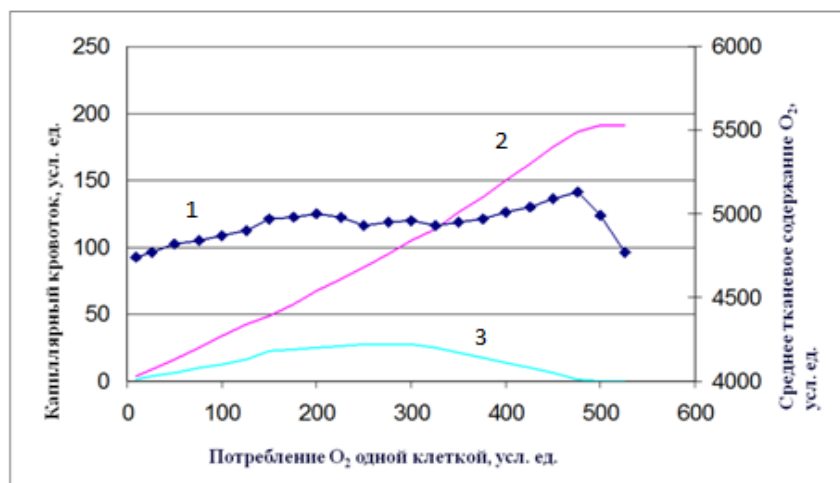


Рис. 3 – Интегральные характеристики капиллярной сети. 1 – содержание кислорода в тканях, 2 – капиллярный кровоток, 3 – количество мерцающих капилляров.

Алгоритм моделирования относительной функциональной автономии микроциркуляторной сети (КНК – клеточный автомат) можно описать так:

1. Количество капилляров, которые могут быть открытыми одновременно, без критического падения А-В градиента давления крови, ограничивается текущей величиной системного кровотока.

2. Каждый капилляр открывается и закрывается в соответствии с удовлетворением метаболической потребности тканей, т.е. система открывает и закрывает только такое количество капилляров, которое необходимо для удовлетворения потребности тканей в кислороде O_2 .

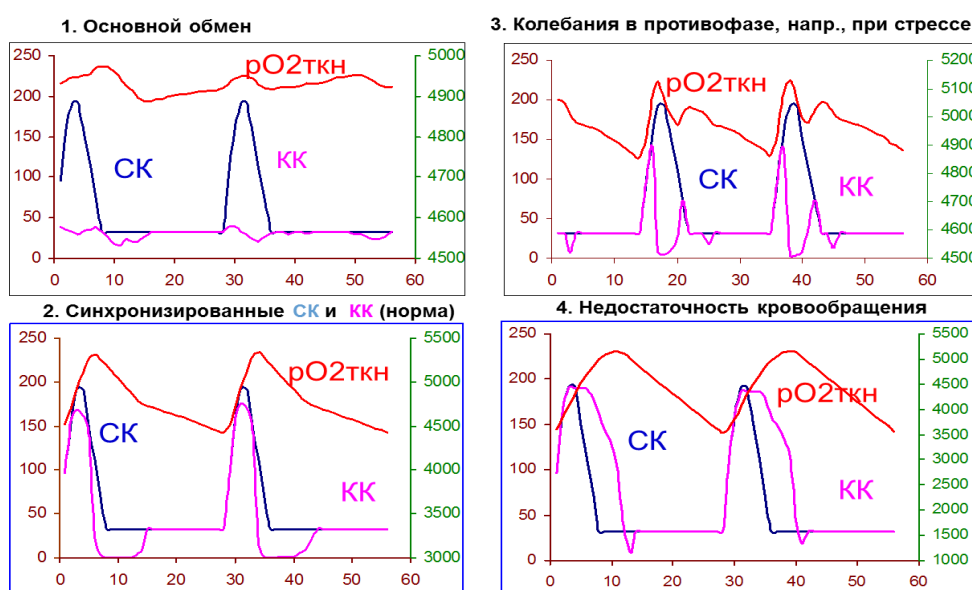


Рис. 4 – Графики системного кровотока (СК), капиллярного кровотока (КК) и насыщение ткани кислородом (КА-моделирование)

При сравнительном анализе системного (СК), капиллярного (КК) кровотока и КА-моделирования (рис. 4) можно сделать такие выводы:

1. При основном обмене (минимальный метаболический запрос) – организм спит или человек находится под наркозом: значения СК не синхронизируется с КК.

2. При норме («оптимальный» метаболический запрос): СК и КК синхронизированные.

3. При колебаниях в противофазе (средний метаболический запрос), например, при стрессе: капилляры закрываются до окончания систолы, происходит избыточность кровотока.

4. При недостаточности кровообращения (максимальный метаболический запрос): систола заканчивается, но капилляры не закрываются, т.к. не удовлетворен метаболический запрос по кислороду.

Выводы.

С помощью данной КА-модели исследуются нелинейные динамические оценки при различных начальных условиях.

Разработанная модель используется в качестве базовой, а также для разработки комплекса лабораторных работ курса биомедицинской кибернетики. Комплекс количественных оценок рассматривается в курсе основ синергетики, затем производится исследование их количественных значений на КА-модели.

Начаты теоретические исследования поведения нейронной сети головного мозга и динамики кровоснабжения структур головного мозга.

Литература:

1. Каретин Ю.А. Синергетика. Курс лекций для биологов. – Владивосток, 2007. – 154 с.
2. Wolfram S. Statistical mechanics of Cellular automata // Review of Modern Physics. Vol.55. 1993. P. 607-640.
3. Wolfram S. A new kind of science. - Wolfram Media Inc., Champaign, Ill., USA. 2002.
4. G. Knyshov, Ye. Nastenko, V. Maksymenko, O. Kravchuk, Yu. Shardukova. The Interactions between Arterial and Capillary Flow with Cellular Automaton / WC 2009, IFMBE Proceedings 25/IV, 2009. Munich. P. 572–574.

Белошицкая Оксана Константиновна

Украина, г. Киев, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Факультет биомедицинской инженерии, Кафедра биомедицинской инженерии, магистр.

Научные интересы: Математическое моделирование биологических систем и процессов, клеточные автоматы, исследование и моделирование физиологических систем, медицинские информационные системы.

E-mail: ksenia_bil@ukr.net

Тел.: +38(099)606-19-75

Настенко Евгений Арнольдович

Доктор биологических наук; старший научный сотрудник, кандидат технических наук. Украина, г. Киев, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Факультет биомедицинской инженерии, Кафедра биомедицинской кибернетики, заведующий кафедрой, профессор кафедры; Национальный институт сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова Национальной академии медицинских наук Украины, заведующий отделением информационных технологий и математического моделирования физиологических процессов.

Научные интересы: Науки о жизни (сердечно-сосудистая система, транспорт кислорода и др.), технологии Data Mining (кластерный анализ и др.), методы нелинейной динамики, математическое моделирование (включая технологии клеточных автоматов), цифровая обработка биомедицинских данных (включая генные алгоритмы), исследование и моделирование физиологических систем (в частности - системы кровообращения человека).