

## AN EMERGENT CLUSTER IMAGE IN A COMPLEX SYSTEM

Makarov L.M.<sup>1</sup>, Pozdnyakov A.V.<sup>2</sup> (Russian Federation)

<sup>1</sup>Makarov Leonid Mikhailovich - Candidate of Technical Sciences, Professor,  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS,  
ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF TELECOMMUNICATIONS NAMED AFTER PROF. M.A. BONCH-  
BRUEVICH;

<sup>2</sup>Pozdnyakov Alexander Vladimirovich - Doctor of Medical Sciences, Professor,  
DEPARTMENT OF MEDICAL BIOPHYSICS,  
ST. PETERSBURG STATE PEDIATRIC MEDICAL UNIVERSITY,  
ST. PETERSBURG

**Abstract:** a model of the microbiota, which is part of the human body, as a complex system, is presented. Taking computer methods of computational topology as a basis, the possibility of constructing an emergent visual image is shown. Using the known data on the quantitative indicators of bacteria of the gastrointestinal tract and oral cavity, through which the dynamics of the change of microflora events is initialized, the possibility of forming concise judgments about numerous states of the body in the process of vital activity, including in norm and pathology, in relation to different age groups is demonstrated.

**Keywords:** emergence, computational topology, computer modeling.

## ЭМЕРЖЕНТНЫЙ ОБРАЗ КЛАСТЕРА В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Макаров Л.М.<sup>1</sup>, Поздняков А.В.<sup>2</sup> (Российская Федерация)

<sup>1</sup>Макаров Леонид Михайлович – кандидат технических наук, профессор,  
кафедра интеллектуальных систем автоматизации и управления,  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича;

<sup>2</sup>Поздняков Александр Владимирович – доктор медицинских наук, профессор,  
кафедра медицинской биофизики,  
Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет,  
г. Санкт-Петербург

**Аннотация:** представлена модель микробиоты, являющейся частью организма человека, как сложной системы. Принимая в качестве основы компьютерные методы вычислительной топологии, показана возможность построения эмерджентного визуального образа. Используя известные данные о количественных показателях бактерий кишечного-желудочного тракта и полости рта, посредством которых инициализируется динамика смены событий микрофлоры, демонстрируется возможность формировать лаконичные суждения о многочисленных состояниях организма в процессе жизнедеятельности, в том числе в норме и патологии, применительно к разным возрастным группам.

**Ключевые слова:** эмерджентность, вычислительная топология, компьютерное моделирование.

УДК 519.61 + 573.2

Представление о сложной системе, обладающей как минимум двумя элементами, в строгом математическом определении установлено в механике, квантовой механике, астрономии. Например, хорошо интерпретируемое поведение сложной системы для трех тел в астрономии удастся получить только при четких условиях.

Живой организм – сложная система, обладающая множеством подсистем, функциональных кластеров. Общее понятие системы формируется на представлении о наличии элементов, находящихся в определенных отношениях и связях. Компактная группа элементов, как часть большой системы, может рассматриваться в формате кластера, или иначе подсистемы.

Типичным представителем кластера для организма человека являются бактериальные сообщества микроорганизмов ротовой полости, кишечника, поверхности кожи. Для живого организма, как сложной системы, наличие различных микробиот чрезвычайно важно. Это микробиоты, формируемые совместно геномами бактерий и организма человека.

Декларируя о наличии геномных связей, формулируется набор принципов организации специфических кластеров в разных функциональных подсистемах организма. С учетом отличия геномов разных видов организмов, специфичность кластеров микробиоты значительно меняется. Высокая вариативность микробиоты, даже при рассмотрении одного вида, находит объяснение в стремлении организма сохранить гомеостазис, при постоянной изменчивости внешних и внутренних факторов. В таком понимании эмерджентность кластера - микробиоты, содержащего разные микроорганизмы, отождествляется с наличием свойства инициализировать биохимические сигнальные процессы, как правило, направленные на

исполнение гомеостазиса целостного организма [1]. Нарушение взаимосвязей в кластере инициализирует разрушительные процессы в организме, что является проявлением патологии.

По современным концепциям возможность полного описания микробиоты представляется проблематичной. В основу такого суждения положен тезис об отсутствии фиксации в лабораторных условиях базового набора микроорганизмов, составляющих кластер – микробиоту. Следуя этим представлениям, на практике системы классификации бактерий по существу являются искусственными, объединяют бактерии в определенные группы на основе сходства их по комплексу морфологических, физиологических, биохимических признаков, а также посредством определения нуклеотидной последовательности в геноме [2].

Принимая это во внимание, методология исследования микробиоты создается на количественных показателях элементов кластера (бактериальном наборе). Эти показатели микробиоты устанавливаются инструментальными лабораторными методами. Формально выделяют три состояния кластера, которые соотносят с высоким уровнем активности (действие тонизирующего фактора), нормальным проявлением активности микробиоты, и низким уровнем активности (действие седативного фактора). Количественные показатели микробиоты, с учетом специфики фиксации аналитического материала от разных функциональных подсистем организма, обладают различиями.

Применительно к организму человека в общее понимание микрофлоры включают примерно 40 триллионов бактериальных клеток. Системный взгляд на такое многообразие позволяет выделить несколько функционально связанных блоков, участвующих в жизнедеятельности организма. В практической микробиологии наибольшее внимание уделяется микрофлоре кишечника и ротовой полости. Это функционально связанные жидкие биосреды формируют и постоянно поддерживают сложные процессы регуляции в живом организме. Суждения о состоянии микрофлоры кишечника и ротовой полости позволяют оперативно оценивать эффективность работ других многочисленных подсистем организма человека. Наличие патогенной микрофлоры запускает сложные биохимические процессы в целостной системе – живом организме, которые можно обнаружить по количественному составу микробиоты.

Так, например, для желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) типичными представителями микробиоты являются бактерии, список которых представлен в таблице 1 [2].

Таблица 1. Микробиота ЖКТ (норма)

	<b>Бактерии</b>	<b>Количество W (экз.)</b>	<b>Log<sub>10</sub>W=g</b>
1.	Bifidobacterium	1,1E+10	10.041
2.	Lactobacillus	0,9E+8	8.954
3.	Bacteroides	1,1E+11	11.041
4.	Enterococcus faecalis	0,81E+8	8.908
5.	Fusobacteriales	0,94E+8	8.973
6.	E. coli	1,05E+7	7.021

Для микробиоты полости рта список типичных бактерий представлен в таблице 2 [2].

Таблица 2. Микробиота полости рта (норма)

	<b>Бактерии</b>	<b>Количество V (экз.)</b>	<b>Log<sub>10</sub>V=h</b>
1.	S. Mutans	1,50E+05	5.176
2.	S. Salivarius	1,00E+07	7.041
3.	S. Mitis	1,00E+08	8.041
4.	S. Neisseria	1,00E+07	7.082
5.	S. Lactobacillus	1,00E+05	5.021
6.	S. Staphylococcus	1,00E+05	5.060

Выделяя из большого разнообразия бактерий, образующих кластеры функциональных подсистем организма, небольшой набор, декларируют высокую доминантность избранных родов бактерий в различных возрастных группах. Эти знания позволяют стандартизовать методы исследования микробиоты.

В микробиологии выделяют нормальную и патологическую микрофлору кластера. И в том и другом случае оперируют представлениями о кластере, содержащем разный набор бактерий. Различия номенклатурного состава микробиоты ЖКТ и полости рта хотя и указывают на определенную специфичность структуры кластеров, но обладает ограниченным набором суждений о наличие взаимной связи.

Для типичных задач микробиологии по оценке развитости микробиоты устанавливаются простые правила подготовки тест-пробы: тест-пробы создаются из одной микробиоты и одного объема. Для определения оценки развитости микробиоты проводится инструментальный подсчет количества бактерий, соотносимых с установленным видом и рангом.

Обнаружение уникальных показателей микробиоты, с учетом большого разнообразия кластеров, проведем средствами алгоритмической топологии, оперирующей представлениями геометрического образа [3, 4].

Рассмотрим образ циклоиды, заданный уравнением:

$$X(\varphi) = r\varphi - r\text{SIN}(\varphi) \quad ; \quad Y(\varphi) = r - r\text{COS}(\varphi) \quad (1)$$

Параметрическая запись развертки событий образа циклоиды, содержит понятие о цикличности – повторяемости треков на интервале в  $2\pi$ . Где  $r$  – характеризует суммарное значение бактерий в кластере:  $g$  или  $h$ , представленное в логарифмическом масштабе. Это замечание важно для понимания нестационарного характера дискретности событий в кластере микробиоты, обладающего размерностью  $g$ . Расширяя представления о наличии периодичности и дискретности событий, устанавливается реальная возможность соотносить статические показатели образа с возрастом организма. Динамика смены численного и качественного изменения микробиоты в разных возрастных группах оказывается полезной при формировании диагностического суждения. В таком случае лаконичность диагностического суждения дополняется возможностью использовать количественные показатели состояния микробиоты, инициализируемые графическим образом циклоиды.

Типичными количественными показателями образа циклоиды являются длина  $L_r$  дуги первой арки и радиус  $R_r$  первой арки.

$$L_r = 8r \quad ; \quad R_r = 4r \text{SIN}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

Указанные показатели модели, оценивающей особенности структуры кластера микробиоты, создают основу проведения многочисленных аналитических расчетов.

Рассмотрим модель развертки событий кластера бактерий ЖКТ. Воспользуемся данными таблицы 1 и выражением (1). По результатам проведенных расчетов сформируем образ микробиоты ЖКТ для трех типичных состояний: нормальное, седативное и тонизирующее (рис.1)

Интерпретация указанных состояний микробиоты формируется в терминах диагностики состояния организма. В первом случае устанавливается наличие таких показателей организма, которые свидетельствуют о нормальном процессе жизнедеятельности.

Напротив, седативное состояние организма рассматривается как проявление патологии, где отмечается пониженная активность функциональных систем организма.

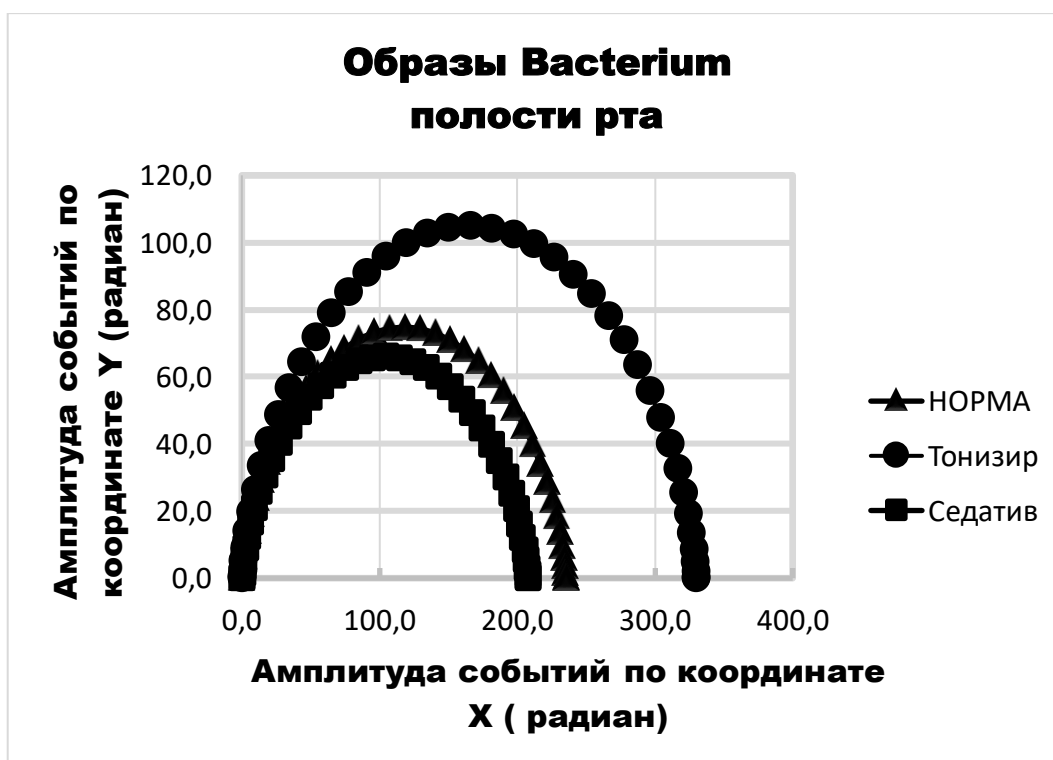


Рис. 1. Образ различных состояний микробиоты кишечника

Проявление патологии можно обнаружить и при наличии процессов активации функциональных систем организма. Это тонизирующий эффект, рассматриваемый как ответная реакция организма на возмущающий фактор.

Рассмотрим аналогичную модель развертки событий кластера бактерий полости рта (рис. 2). Воспользуемся данными таблицы 2 и выражением (1).

В организме человека пищевая трофическая цепь начинается с ротовой полости. Нормальная резидентная микрофлора полости рта очень разнообразна и многочисленна. Однако, выбрав в микробиоте наиболее представительные группы бактерий, соотносимые с известным видом и родом, создают количественное описание. Именно количественное описание микрофлоры уникальным образом, адаптированное к исследуемому индивиду, характеризует взаимодействие с целостным организмом в реальных физиологических условиях, а также в случае патологических процессов.

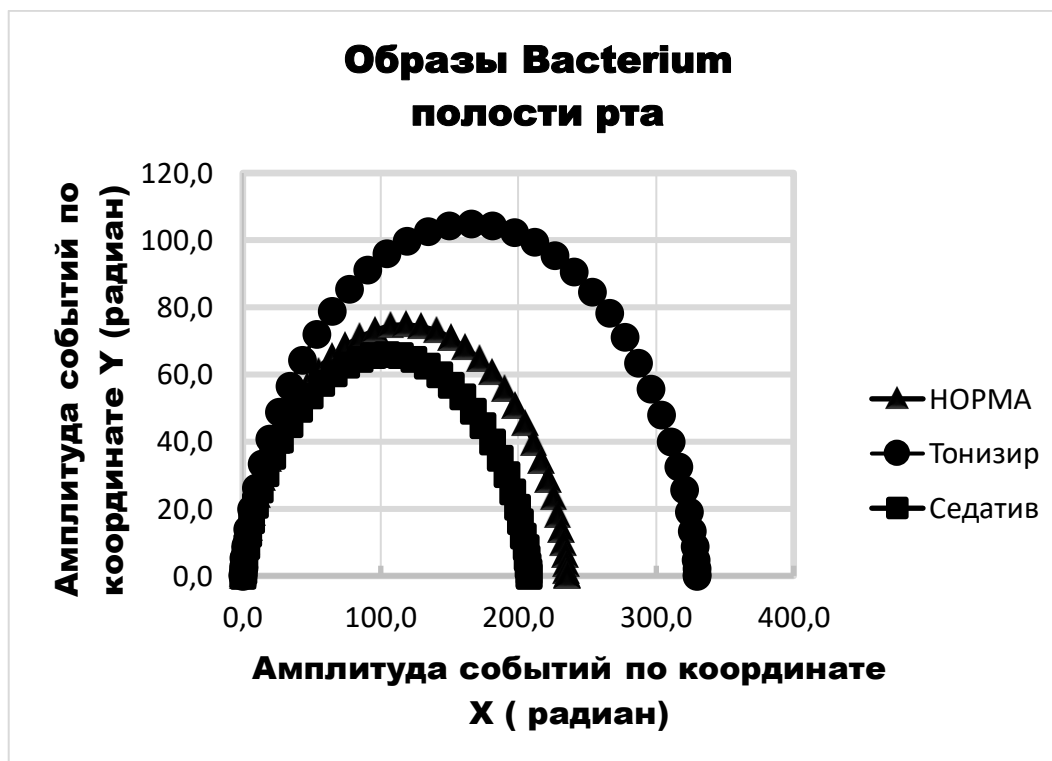


Рис. 2. Образ различных состояний микробиоты полости рта

Рассмотрим типичные расчетные показатели кластеров – микробиоты, вычисленные по выражению (2).

Таблица 3. Количественные показатели микробиоты

Наименование	Показатель «НОРМА» /радиан/	
	Показатель $L_r$	Показатель $R_r$
Микробиота кишечника	439,52	219,76
Микробиота полости рта	299,39	149,69

Обнаружение указанных процессов представляется возможным и происходит по распределению численных показателей микробиоты, причем на ограниченном количестве элементов кластера.

Принимая во внимание специфичность взаимосвязи микробиоты с геномом организма, как целостной системы, учитывается то факт, что в случае патологии проявляются процессы, значительно отличающиеся от типичных инфекций, поскольку в этом случае не проявляется эффект контактности с возбудителем и обуславливается, как правило, проявлением активности всего ассоциативного набора бактерий кластера. В таком контексте и проявляется эмергентность кластера бактерий, являющегося составной частью большой системы – организма человека.

Применение компьютерных технологий анализа данных биологических исследований микробиоты, основу которых составляет вычислительная – алгоритмическая топология, позволяет оперативно улавливать не только визуальные различия кластеров, столь важные в медицинской практике, но и представлять возможность оперировать количественными показателями, которые являются хорошим аргументом при формировании лаконичного интеллектуального суждения о состоянии микробиоты. Такой

подход оперативного мониторинга оказывается полезным в определении динамики смены событий в организме человека как при жизни, так и в условиях применения различных терапевтических процедур.

#### *Список литературы / References*

1. *Макаров Л.М.* Формализм вычисления оценки эмергентности. Наука, техника и образование, 2020. № 1 (65).
2. Микробиом человека. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrobiom-cheloveka/viewer/> (дата обращения: 19.08.2022).
3. *Макаров Л.М.* Информационная энтропия International scientific review of the problems and prospects of modern science and education Collection of scientific articles LXVII International correspondence scientific and practical conference, 2020.
4. *Макаров Л.М., Поздняков А.В.* Фрактальный образ генома коронавируса Covid -19. В сборнике: International scientific review of the problems and prospects of modern science and education Collection of scientific articles LXIX International correspondence scientific and practical conference, 2020. С. 6-10.