

ФРАКТАЛЬНОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ. III ФРАКТАЛЬНОСТЬ ОРГАНОВ И ОРГАНИЗМОВ

Симонян Г.С., Симонян А.Г.

Ереванский государственный университет, Ереван, e-mail: Sim-gev@mail.ru

В статье рассматривается фрактальность органов и организмов. Показано, что фрактальная размерность бронхиального дерева у млекопитающих не зависит от размера тела и варьирует в пределах 1,57 – 1,59. Фрактальная размерность сосудов сетчатки глаза составляет 1,7 и снижается при старении человека и при осложнениях сахарного диабета. Значение фрактальной размерности кровеносной системы человека находится в пределах значений от 2.5 до 2.6. Установлено, что мочевыделительная система, а также желчные протоки в печени имеют фрактальную геометрию. Показано, что ветвления перирадиальных каналов медузы *Aurelia aurita* представлены в виде стандартных дихотомически ветвящихся фрактальных деревьев. Приводится, что все четыре сектора медузы *Craspedacusta sowerbyi* функционально и морфологически эквивалентны и обладают радиальной 4-лучевой симметрией и фрактальностью.

Ключевые слова: фрактал, бронхи, кровеносная система, мочевыделительная система, желчные протоки в печени, медуза

FRACTALITY OF BIOLOGICAL SYSTEMS. III FRACTALITY OF ORGANS AND ORGANISMS

Simonian G.S., Simonian A.G.

Yerevan State University, Yerevan, e-mail: Sim-gev@mail.ru

The fractality of organs and organisms was discussed in the article. It is shown the fractal the dimension of the bronchial tree in mammals isn't depended from the body size and varied from 1.57 to 1.59. The fractal dimension of vessels of the retina is 1.7 and decreases in aging humans and in complications of diabetes. The value of fractal dimension of the circulatory system of man is in the range of from 2.5 to 2.6. It is found that the urinary system, as well as the bile ducts in the liver, has fractal geometry. It is shown that in the radial branch channels jellyfish *Aurelia aurita* presented in the form of standard dichotomous branching fractal trees. Provided that all the four sectors jellyfish *Craspedacusta sowerbyi* morphologically and functionally equivalent and have 4 radial beam symmetry and fractal.

Keywords: fractal, bronchi, circulatory system, urinary system, the bile ducts in the liver, jellyfish

Для обеспечения максимальной площади обмена с окружающей средой и интенсификации соответствующего метаболизма живые организмы с помощью фрактальных ветвящихся структур увеличивают площади раздела фаз и максимально заполняют пространства. Биологическая функция фрактальных структур – это создание огромного разнообразия биологической формы и функции. Биологические фракталы количественно охарактеризованы фрактальной размерностью как мерой заполнения пространства. Исследования хаоса и фракталов в биологии постепенно охватывают все уровни организации живого, от молекул до экосистем [1, 2, 4, 5, 8-10, 12].

В работе [9] нами показаны особенности фрактальных структур биополимеров, таких как полисахариды – гликоген и хитозан, белки, ДНК и лигнин. В статье [10] рассматривается пространственная организация клеток и клеточных ансамблей на основе концепций фрактальной геометрии. **Целью данной работы** является обсуждение особенностей фрактальных структур органов и организмов.

Фрактальность и фрактальная размерность органов и организмов

Фракталы не только окружают нас, они и внутри нас и многих животных и растений, поскольку многие органы организма человека и животных, а также растений обладают фрактальными свойствами. Используя возможности фрактальных структур, природа исключительно эффективно сконструировала человеческий организм. На уровне органов и организма изучается фрактальная организация дыхательной, сосудистой, мочевыделительной и других систем, а также желчные протоки в печени [1-3, 12-13].

Наиболее тщательно изучена фрактальная структура дыхательных путей, по которым воздух поступает в легкие.

Легкие – жизненно важные органы, ответственные за обмен кислорода и углекислого газа в организме человека и выполняющие дыхательную функцию. Схема легких включает в себя три важнейших структурных элемента: бронхи, бронхиолы и легочные альвеолы.

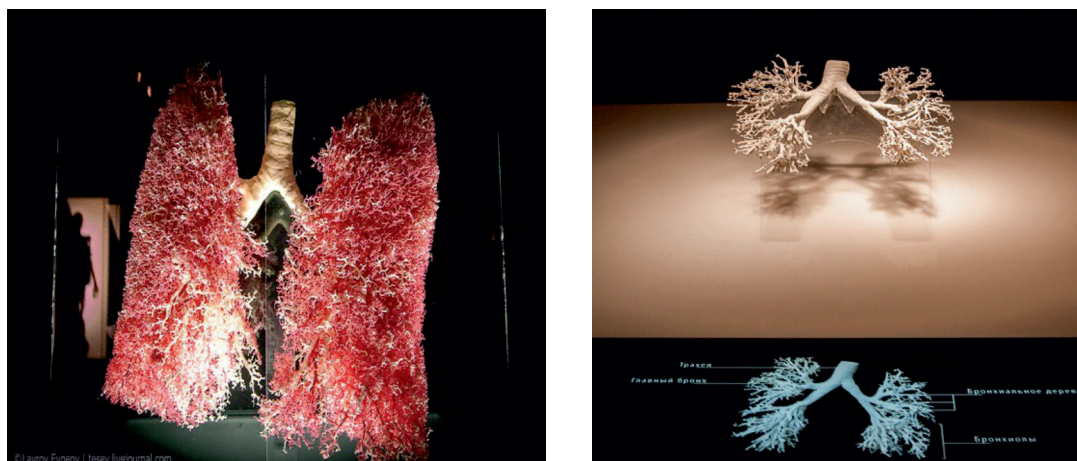


Рис. 1. Структура дыхательных путей

Каркасом легких является разветвленная система бронхов. Каждое легкое состоит из множества структурных единиц (долек). Каждая доля имеет пирамидальную форму с средним размером 15x25 мм. В вершину доли легкого входит бронх, ветви которого называются малыми бронхиолами. Всего каждый бронх делится на 15-20 бронхиол. На концах бронхиол находятся особые образования – ацинусы, состоящие из нескольких десятков альвеолярных ветвей, покрытых множеством альвеол. Важнейшими структурными элементами легких являются альвеолы, от которых зависит нормальный обмен кислорода и углекислого газа в организме. Легочные альвеолы представляют собой небольшие пузырьки с очень тонкими стенками, оплетенные плотной сетью капилляров. Благодаря микроскопическим альвеолам, средний диаметр которых не превышает 0,3 мм, площадь дыхательной поверхности легких увеличивается до 80 квадратных метров. Они обеспечивают большую площадь для газообмена и непрерывно снабжают кровеносные сосуды кислородом. В ходе газообмена кислород и углекислый газ проникают сквозь тонкие стенки альвеол в кровь, где «встречаются» с эритроцитами [6]. Таким образом, легкие представляют собой пример того, как большая площадь «втиснута» в довольно маленькое пространство [1].

Бронхи и бронхиолы легкого образуют «дерево» с многочисленными разветвлениями. Количественный анализ ветвления дыхательных путей показал, что оно имеет фрактальную геометрию.

Средняя фрактальная размерность бронхиального дерева крыс, кроликов и людей составляет 1,587, 1,58 и 1,57, соответственно [13]. Таким образом, фрактальная раз-

мерность бронхиального дерева у млекопитающих не зависит от размера тела.

Кровеносные сосуды – это полные трубки, по которым движется кровь. Сосуды, несущие кровь от сердца к органам, называются артериями, а от органов к сердцу – венами. В артериях и венах не осуществляется газообмен и диффузия питательных веществ, это просто путь доставки. По мере удаления кровеносных сосудов от сердца они становятся мельче. Обмен веществами между кровью и интерстициальной жидкостью происходит через проницаемую стенку капилляров – мелких сосудов, соединяющих артериальную и венозную системы. Сами сосуды и циркулирующая по ним кровь занимают совсем небольшое пространство – около 5 процентов объема тела. Люди имеют около 150 тыс км кровеносных сосудов. За одну минуту через стенки всех капилляров человека просачивается около 60 литров жидкости [6].

Подробно изучена фрактальная топология сосудов сетчатки глаза, фрактальная размерность которых составляет 1,7 [3, 12]. В обзоре [3] были приведены доказательства снижения фрактальной размерности и упрощения сосудистой сети сетчатки при старении человека и при осложнениях сахарного диабета. Следует отметить, что фрактальная размерность кровеносной системы человека лежит между 2,5 и 2,6 [1, 12].

Мочевыделительная система человека – система органов, формирующих, накапливающих и выделяющих мочу у человека. Состоит из пары почек, двух мочеточников, мочевого пузыря и мочеиспускательного канала.

Основной ролью почек является фильтрация из крови ненужных веществ. Кровоток в почках осуществляется через по-

чечные артерии (ветви брюшной аорты) и составляет 1,25 л/мин (25% от сердечного кровотока). Почечные лоханки продолжают к низу мочеточниками, спускающимися к мочевому пузырю. Мочевой пузырь служит для накопления мочи. Конечной частью выделительной системы является уретра (мочеиспускательный канал). В результате фильтрации, реабсорбции и секреции почки образуют мочу – гиперосмолярный раствор, накапливающийся в мочевом пузыре. В среднем человек производит приблизительно 1,5 литра мочи в сутки [6, 11].

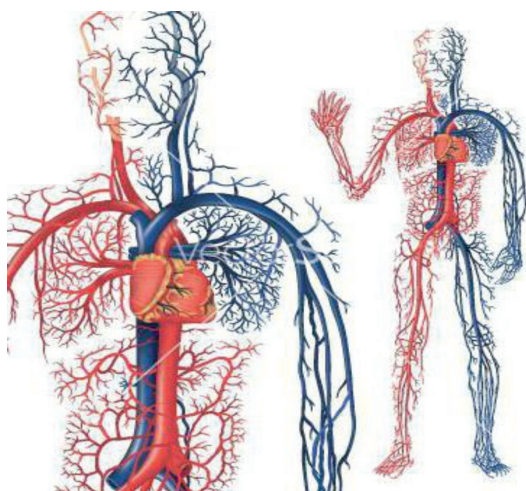


Рис. 2. Кровообращение

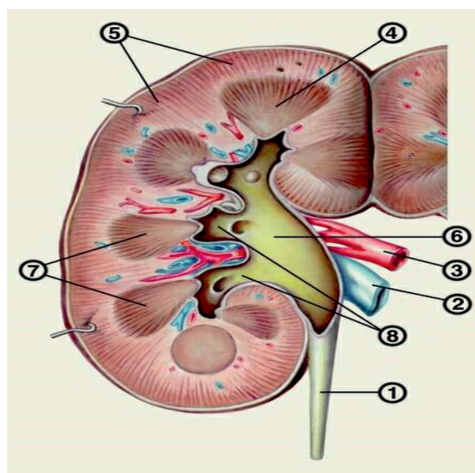


Рис. 3. Схема строения почки: 1 – мочеточник; 2 – почечная вена; 3 – почечная артерия; 4 – мозговое вещество; 5 – корковое вещество; 6 – лоханка; 7 – почечные пирамиды; 8 – большие почечные чашечки

Печень – самая крупная пищеварительная железа, предназначенная для выделения

желчи и переработки приносимых кровью по воротной вене веществ. К желчевыводящей системе печени следует отнести желчные капилляры, септальные и междольковые желчные протоки, правый и левый печеночные, общий печеночный, пузырный, общий желчный протоки и желчный пузырь.

Сосуды, нервы и желчные протоки проходят через ворота печени, которые располагаются в ее поперечной борозде. Общий желчный проток, соединяясь с протоком поджелудочной железы, впадает в двенадцатиперстную кишку. В правой продольной борозде находится желчный пузырь. Это своеобразный резервуар для желчи, который опорожняется по мере необходимости в момент поступления пищи в двенадцатиперстную кишку. Печень состоит из печеночных долек диаметром 1-2 мм, которые образованы печеночными клетками, расположенными вокруг центральной вены в виде радиальных балок. Каждая долька оплетена густой сетью мелких веточек печеночной артерии и воротной вены. От них отходят капилляры, которые проникают внутрь дольки между печеночными балками. Капилляры, впадая в центральную вену дольки, сливаясь, образуют более крупные вены, открывающиеся в печеночные. Последние являются притоками нижней полостной вены. Между печеночными клетками балок проходят желчные капилляры, или ходы, которые на выходе образуют междольковые протоки. Соединяясь, они формируют левый и правый печеночные протоки, которые в области ворот печени соединяются в общий печеночный проток [6].



Рис. 4. Желчные протоки печени

В качестве фрактальной модели организма в работе [4] была выбрана и рассмотрена медуза *Aurelia aurita*. Система медузы представлена ветвящимися эпителиальными каналами, располагающимися практически в одной плоскости – зонтика

медузы. Гастроваскулярная система сцифомедузы выполняет функции транспорта питательных и экскретируемых веществ, а также половых продуктов. У сцифомедузы *Aurelia aurita* принято различать три типа радиальных гастроваскулярных каналов: 8 неветвящихся адрадиальных, 4 ветвящихся перрадиальных (располагаются в той же плоскости, что и ротовые лопасти, и впадают в ротовую полость) и 4 ветвящихся интеррадиальных (впадают в гастрокрикулярные каналы, окаймляющие боковые поверхности желудочных карманов). Жидкость с пищевыми частицами из желудочных (точнее, гастрогенитальных) карманов поступает в адрадиальные каналы, а затем в кольцевой канал. Из кольцевого канала жидкость собирается в перрадиальные и интеррадиальные каналы, из которых она в конечном итоге попадает в ротовую полость [14]. В гастроваскулярных каналах происходит внутриклеточное пищеварение. Наиболее пригодны для анализа так называемые перрадиальные каналы, каждый из которых имеет один общий ствол, расположенный между желудочными карманами. Показано, что ветвления перрадиальных каналов медузы *Aurelia aurita*, представлены в виде стандартных дихотомически ветвящихся фрактальных деревьев.

На рис. 5 приведено строение медузы *Craspedacusta sowerbyi*. Форма тела только что отпочковавшейся медузы (около миллиметра диаметром) близка к шарообразной, но в ходе роста изменяется, переходя в сплюснутую полусферу при диаметре до 20 мм. Кроме того, в ходе развития значительно увеличивается число щупалец (с 16 до 500), а также закладываются и увеличиваются в числе отсутствующие у молодых

особей органы равновесия – статоцисты. Как и у других представителей семейства *Olindiasidae*, венчик щупалец значительно сдвинут на верхнюю сторону зонтика. С четырьмя радиальными каналами пищеварительной системы ассоциированы половые железы, обладающие формой свисающих в полость зонтика карманов. Ротовой хоботок хорошо развит и выдается за пределы зонтика [7].

Как видно, все четыре сектора медузы *Craspedacusta sowerbyi* обладают радиальной 4-лучевой симметрией, функционально и морфологически эквивалентны и обладают фрактальностью. Новые ветви берут начало от кольцевого канала.

Выводы

1. Показано, что фрактальная размерность бронхиального дерева у млекопитающих не зависит от размера тела, варьирует в пределах 1,57 – 1,58.

2. Фрактальная размерность сосудов сетчатки глаза составляет 1,7 и снижается при старении человека и при осложнениях сахарного диабета.

3. Получается, что фрактальная размерность кровеносной системы человека варьирует в пределах значений от 2.5 до 2.6.

4. Установлено, что мочевыделительная система и желчные протоки в печени имеют фрактальную геометрию.

5. Показано, что ветвления перрадиальных каналов медузы *Aurelia aurita*, представлены в виде стандартных дихотомически ветвящихся фрактальных деревьев.

6. Все четыре сектора медузы *Craspedacusta sowerbyi* функционально и морфологически эквивалентны и обладают радиальной 4-лучевой симметрией и фрактальностью.

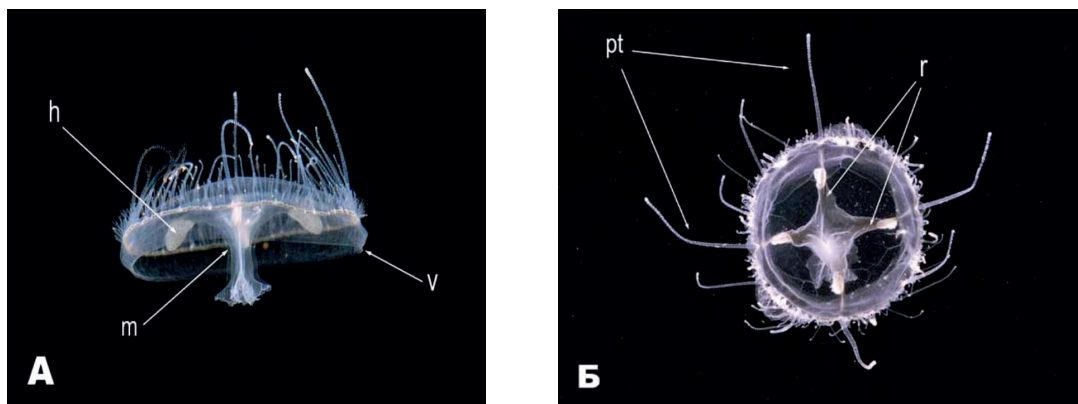


Рис. 5. Строение медузы *Craspedacusta sowerbyi* А – вид сбоку, В – вид сверху, h – гонады, m – ротовой хоботок или манубрум, v – парус, pt – перрадиальные щупальца, r – радиальные каналы гастроваскулярной системы

Список литературы

1. Глейк Дж. Хаос: создание новой науки / Пер. с англ. М. Нахмансона, Е. Барашковой/ – СПб.: Амфора, 2001. – 398 с.
2. Голдбергер Эри Л., Ригни Дейвид Р., Уэст Брюс Дж. Хаос и фракталы в физиологии человека // В мире науки. – 1990. – № 4. – С. 25–32.
3. Зуева М.В. Нелинейные фракталы: приложения в физиологии и офтальмологии. // Офтальмология. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 4–11.
4. Исаева В.В., Каретин Ю.А., Чернышев А.В., Шкуратов Д.Ю. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе. – Владивосток: Институт биологии моря ДВО РАН, 2004. – 128 с.
5. Каретин Ю.А. Фрактальные свойства клеток и клеточных ансамблей: Автореф. канд.биол.наук. – Владивосток, 2005. – С. 188.
6. Курепина М.М., Воккен Г.Г. Анатомия человека: Учебник для биологических факультетов педагогических институтов Издание четвертое. – М.: Просвещение, 1979. – 304 с.
7. Наумов Д.В. Гидроиды и гидромедузы. – М.-Л.: АН СССР, 1960. – 626 с.
8. Симонян Г.С., Симонян А.Г. Энтропийный подход к оценке хаоса и порядка биологических систем // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 9. – С. 100–104.
9. Симонян Г.С., Симонян А.Г. Фрактальность биологических систем. I фрактальность биополимеров. // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 11. – С. 93–97.
10. Симонян Г.С., Симонян А.Г. Фрактальность биологических систем. II фрактальность клеток и клеточных ансамблей. // Успехи современного естествознания. – 2015.
11. Тараева И.Е. Нефрология. 2-ое изд. – М.: Медицина, 2000. – 689 с.
12. Урицкий В.М., Музалевская Н.Н. Фрактальные структуры и процессы в биологии // Биомедицинская информатика и эниология. Сборник трудов. Под ред. Р.И. Полонникова и К.Г. Короткова. – СПб.: Ольга, 1995. – С. 84–130.
13. Canals M., Olivares R., Labra F., Novoa F. Ontogenetic changes in the fractal geometry of the bronchial tree in *Rattus norvegicus* // Biol. Res. – 2000. – V. 33, – N. 1 Santiago. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602000000100010>.
14. Southward A.J. Observations on the ciliary currents of the jelly-fish *Aurelia aurita* // J. Mar. Biol. Assoc. U.K. – 1955. – V. 34, N 2. – P. 201–216.