

Список литературы:

1. Белов С.В., Борик М.А., Данилейко Ю.К., Ломонова Е.Е., Осико В.В., Рябоконь Б.В., Салюк В.А. Электрохирургический инструмент на основе наноструктурированных кристаллов диоксида циркония для рассечения и коагуляции биотканей // Медицинская техника. 2010. № 4. С. 12-15.
2. Борик М.А., Вишнякова М.А., Жигалина О.М., Кулебякин А.В., Лаврищев С.В., Ломонова Е.Е., Осико В.В. Исследование микро- и наноструктуры кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония // Российские нанотехнологии. 2008. № 11-12. Т. 3. С. 76-81.
3. Маркетинговое исследование российского рынка хирургического и электрохирургического инструмента / Отчет Research.Techart. ZMR-01. 2010.
4. Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E. Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique // Springer Handbook of Crystal Growth. 2010. Part B. PP. 433-477.
5. Borik M.A., Bublik V.T., Vishnyakova M.A., Lomonova E.E., Myzina V.A., Tabachkova N. Yu., Timofeev A.A. Structure and Phase Composition Studies of Partially Stabilized Zirconia // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2011. Vol. 5. № 1. PP. 166-171.
6. Белов С.В., Данилейко Ю.К., Нефедов С.М., Осико В.В., Салюк В.А. Влияние параметров высокочастотного тока на результат термической электрокоагуляции биоткани // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. № 4. С. 12-17.

Сергей Владимирович Белов,
д-р техн. наук, ст. научный сотрудник,
зам. руководителя лаборатории,
ООО «Новые энергетические технологии»,
Михаил Александрович Борик,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
ИОФ РАН им. Прохорова,
Юрий Константинович Данилейко,
д-р физ.-мат. наук, профессор, руководитель лаборатории,
ООО «Новые энергетические технологии»,
Александр Михайлович Шулуто,
д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой
факультетской хирургии № 2 лечебного факультета,
ГОУ ВПО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова,
Елена Евгеньевна Ломонова,
д-р техн. наук, зав. лабораторией,
Вячеслав Васильевич Осико,
руководитель Центра нанотехнологий,
ИОФ РАН им. Прохорова,
Виктор Афанасьевич Салюк,
д-р техн. наук, зам. руководителя лаборатории,
ООО «Новые энергетические технологии»,
г. Москва,
e-mail: ser79841825@yandex.ru

И.А. Русанова

Исследование фрактальной структуры изображений ногтевого ложа и околоногтевого эпителия

Аннотация

В статье представлены результаты исследования фрактальной структуры изображений ногтевого ложа и околоногтевого эпителия с выявлением свойств скейлинга и самоподобия для увеличения диагностической информативности на ранних стадиях проявления необратимых процессов заболеваний.

В настоящее время перспективными направлениями развития неинвазивных методов диагностики заболеваний являются не только повышение их прецизионности и сокращение времени обследования, но и разработка новых визуальных методов, которые не требовали бы каких-либо внешних воздействий на больного. Проблемы современной физики сложных систем связаны с идентификацией и количественным описанием их функционирования и вследствие этого носят междисциплинарный характер [1]-[3].

При решении научных и прикладных задач в исследовании необратимых процессов и динамики природных объектов, структуры материалов и их свойств в настоящее время все более широко используется фрактальная геометрия. Фрактальные структуры обнаружены во многих областях физики, химии, биологии и медицины. Они позволяют изучать общие принципы и закономерности сложной динамики и недостаточно раскрытой физической сущности наблюдаемых процессов в таких случайных системах, как полимеры, грубые и пористые поверхности, коллоидные агрегаты, ветвящиеся структуры артерий и т. д. Наличие самоподобных свойств указывает на то, что динамика процессов, результатом которых они являются, имеет также самоподобную природу и характеризует-

ся определенным пространственно-временным алгоритмом, действующим в соответствии с общими принципами и закономерностями развития заболевания и функционирующим на каждом иерархическом уровне.

Цифровая обработка и распознавание изображений в медицинской технике на сегодняшний день являются одними из интенсивно развиваемых направлений исследований. Большое внимание уделяется проблемам дискретизации и квантования сигналов изображений, поскольку эти вопросы важны при построении систем оптико-электронного преобразования сигналов. В процессе формирования и обработки изображений вводятся такие характеристики исследуемых поверхностей объектов, как геометрические признаки, характеристики цветности, яркостные параметры, текстурные свойства и признаки движения. Однако когда текстуры изображений обладают одинаковыми цветовыми характеристиками, трудно различимыми визуально, в пространство текстурных признаков включается фрактальный анализ (метод броуновской функции, метод оценки размера фрактала, метод пирамиды) [4]. Наличие в структуре исследуемых поверхностей масштабной инвариантности (скейлинга) и самоподобия независимо было открыто в разных областях. Одна из них – физика фазовых переходов, изу-

чающая критические явления, другая – фрактальная геометрия, включающая в себя понятие фрактальной (нецелой) размерности D . Определение фрактальных размерностей объектов позволяет изучать не только их структуру, но и связь между структурой и процессами ее образования.

В рамках решения фундаментальной проблемы изучения сложных систем в рассматриваемой работе проводится исследование чувствительности применения разработанной ранее методики [5]-[7] по обработке неоднородных структур снимков поверхностей эпителия в очаге заболевания и в околоочаговой области для выявления присутствия фрактальных свойств и увеличения диагностической информативности на ранних стадиях проявления необратимых изменений. В процессе исследования были обработаны 50 электронных снимков основных типов раковых заболеваний кожи, ногтевого ложа и околоногтевого эпителия. Для проведения сравнительного анализа в контрольную группу вошли изображения поверхностей здоровых тканей эпителия и ногтевых пластин. В соответствии с цветовым кодом рабочего пиксела поверхности объекта в программе производился перевод цветового кода пиксела в высоту точки с образованием трехмерного объекта с неоднородной поверхностью. Полученные структуры были исследованы на фрактальность согласно идеям фрактальной геометрии Б. Мандельброта. Ввиду того, что фрактальная размерность обладает малой степенью информативности, в работе предложены дополнительные меры для исследования присутствия самоподобных свойств в изображениях эпителия в виде коэффициента самоподобия и метода SRGB (площади треугольника в координатной системе свойств) [8].

Фрактальное описание экспериментальных данных

Описание экспериментальных данных с помощью фракталов позволяет рационально представлять их. Множество экспериментальных данных можно описать соответствующей фрактальной размерностью и коэффициентом самоподобия. Рассмотрим частично упорядоченное конечное множество $A(N^2)$, где N^2 – число элементов a_{ij} в множестве $a_{ij} \in A(N^2)$, где $i, j = 1, \dots, N$. Будем считать, что частичный порядок на конечном множестве задается диаграммой Хасе и элементы множества обладают некоторыми свойствами $H_\xi(a)$ (размер, цвет, объем, форма и т. д.), присущими только элементам данного множества $\forall a_{ij}(a_{ij} \in \{a|H_\xi(a)\})$. Если общих свойств несколько ($\xi > 1$), то описание множества должно быть произведено с помощью нескольких фрактальных размерностей. Определим фрактальную размерность D_ξ множества $A(N^2)$ по свойству $H_\xi(a)$ угловым коэффициентом зависимости $\log \Gamma_\xi(n^2)$ от $\log s_\xi n^2$, где $\Gamma_\xi(n^2)$ – число непересекающихся поверхностей кубов, покрывающих подмножество; $s_\xi n^2 = S_\xi(n^2)$ – площадь, занимаемая элементами подмножества

$$D_\xi = \sum_{\gamma} \frac{\log \Gamma_\xi(n_{\gamma+1}^2) - \log \Gamma_\xi(n_\gamma^2)}{\text{abs}[\log S_\xi(n_{\gamma+1}^2)] - \text{abs}[\log S_\xi(n_\gamma^2)]} \left(\frac{\alpha_{\gamma+1} - \alpha_\gamma}{N - 1} \right),$$

Коэффициент самоподобия, позволяющий выявлять минимальные отличия самоподобной структуры от идеального фрактала, определим как

$$K_\xi = \frac{D_\xi^0}{D_\xi},$$

где D_ξ^0 – фрактальная размерность самоподобного множества

$$D_\xi^0 = \frac{\log \Gamma_\xi(N^2) - \log \Gamma_\xi(1)}{\text{abs}[\log S_\xi(N^2)] - \text{abs}[\log S_\xi(1)]}.$$

При исследовании фрактальных свойств изображения в качестве свойств $H_\xi(a)$ можно выбрать три цвета: красный ($\xi = K$), зеленый ($\xi = C$) и синий ($\xi = B$). Таким образом, описание структуры изображения в данном случае осуществляется тремя фрактальными размерностями – DR, DG и DB, с помощью которых можно построить некоторую величину SRGB (площадь треугольника в координатной системе свойств), об-

ладающую высокой чувствительностью к изменению структуры изображения:

$$SRGB = \frac{1}{2} M[-2(D_R + D_B) + (D_B + D_G) + (D_G + D_B)].$$

Самоподобные свойства необратимых процессов в структуре поверхности эпителия, ногтевого ложа и околоногтевых пластин

В качестве объектов исследования были взяты электронные снимки основных типов раковых заболеваний кожи, ногтевого ложа и околоногтевых пластин (рис. 1, I). В контрольную группу входили снимки поверхностей здоровых тканей эпителия и ногтевого ложа. В соответствии с цветовым кодом каждого рабочего пиксела поверхности производился перевод весового вклада цветового кода в высоту точки с образованием объемного трехмерного объекта с изрезанной шероховатой поверхностью (рис. 1, II). Такие структуры обладают самоподобными свойствами, если измеряемая клеточная фрактальная размерность принимает значения, лежащие в интервалах $2 < D < 3$. В рабочей программе был создан алгоритм по подсчету не количества кубиков, укладываемых в пространственную структуру объекта, а количества свободных, не перекрывающихся поверхностей граней. Выявлено, что, несмотря на визуальное различие в видимых изменениях неоднородной структуры поверхности эпителия в очаговой зоне, вблизи и вне этой области (рис. 1a, b), выраженных в виде уплотнений (наростов), и в различной цветовой палитре, общее поведение визуально не наблюдаемых характерных изменений проявляется в присутствии свойств скейлинга и самоподобия, характеризующих величину фрактальной размерности различных участков исследуемой поверхности кожи: $D_1 \approx D_2$;

$$D \begin{cases} \neq D_1 \\ \neq D_2 \end{cases},$$

где D – фрактальная размерность всей пораженной области эпителия; D_1 – очага и D_2 – вблизи очаговой области. Выявлено, что фрактальная размерность структуры здорового эпителия меньше фрактальной размерности пораженных участков поверхности (рис. 1a, b).

Интерес представляет увеличение информативности исследования изменений структуры эпителия в процессе развития диффузионных необратимых процессов под влиянием раковых заболеваний, что не может быть выявлено лишь с помощью обнаружения присутствия самоподобных свойств изучаемых структур ввиду того, что фрактальная размерность имеет ограниченный диапазон изменения величины. При исследовании структурных изменений поверхностей ногтевого ложа и околоногтевого эпителия для 8 групп заболеваний (рис. 1c, d) и (рис. 2-4), которым соответствуют заболевания: 1 – голубые ногти; 2 – бородавки околоногтевые; 3 – койлонихия; 4 – дисхромия; 5 – дистрофия ногтей; 6 – онихия; 7 – акроленгитинозная меланома (подногтевая меланома); 8 – онихомикоз. Для повышения информативности были введены дополнительные величины в виде коэффициента самоподобия K и метода SRGB.

Показано, что значения величин фрактальной размерности для пораженных и непораженных необратимыми процессами участков ногтевого ложа и околоногтевого эпителия у разных типов заболеваний отличаются (рис. 2). Выявлено существование общих закономерностей в поведении D для групп заболеваний: (1, 6, 8) и (2, 4, 5). Коэффициент самоподобия $-1 \leq K \leq 1$ геометрически позволяет выявлять любые аномальные изменения в исследуемой структуре поверхности в сравнении с идеальным фракталом, характеризуя малейшие визуально неразличимые колебания цветового кода. Показано, что значения величин коэффициента самоподобия для различных областей ногтевого ложа и околоногтевого эпителия для 8 групп заболеваний отличаются (рис. 3).

Выявлено, что средние значения величин SRGB для исследуемых участков (ногтевая ложа, очаг заболевания, околоногтевая область эпителия) при различных заболеваниях в боль-

шинстве случаев различны и отрицательны и принимают значительно меньшие численные значения в сравнении с контрольной группой здоровых ногтевых пластин и околоногтевого эпителия (рис. 4).

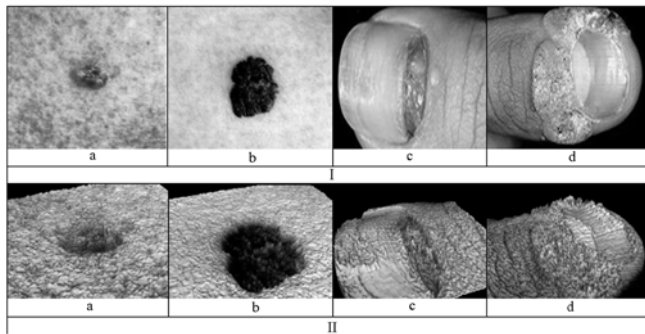


Рис. 1. Изображения поверхности эпителия с очагом заболевания (а, б), ногтевого ложа и околоногтевого эпителия (с, d) для основных типов раковых заболеваний и их трехмерное отображение: а) базально-клеточная карцинома кожи; б) злокачественная меланома кожи; с) акролентигинозная (подногтевая) меланома (мягких тканей под ногтем); d) бородавки околоногтевые

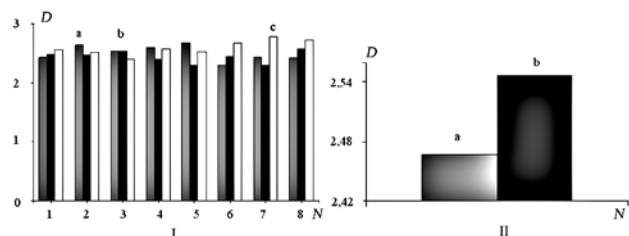


Рис. 2. Зависимость средней фрактальной размерности D : I) для 8 групп заболеваний: а) пораженный участок ногтевого ложа; б) непораженный участок ногтевого ложа; с) область околоногтевого эпителия; II) контрольная группа: а) здоровое ногтевое ложе; б) область здорового околоногтевого эпителия

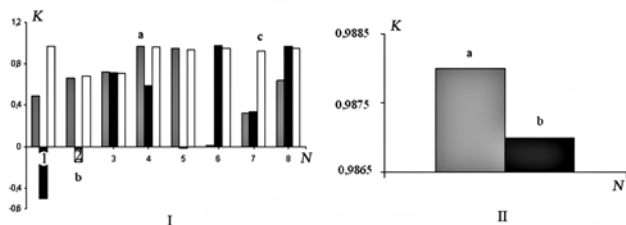


Рис. 3. Зависимость средней величины коэффициента самоподобия K : I) для 8 групп заболеваний: а) пораженный участок ногтевой ложи; б) непораженный участок ногтевой ложи; с) область околоногтевого эпителия; II) контрольная группа: а) здоровая ногтевая ложа; б) здоровая область околоногтевого эпителия

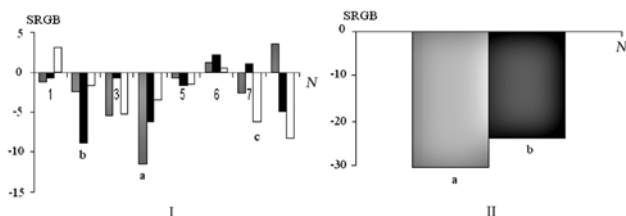


Рис. 4. Зависимость средней величины SRGB: I) для 8 групп заболеваний: а) пораженный участок ногтевой ложи; б) непораженный участок ногтевой ложи; с) область околоногтевого эпителия; II) контрольная группа: а) здоровая ногтевая ложа; б) здоровая область околоногтевого эпителия

Для здоровых ногтевых пластин средние значения SRGB исследуемых участков (ногтевая ложа и область околоногтевого эпителия) близки по величине [8].

Выводы

1. Показано, что применяемый метод чувствителен к исследованию динамики необратимых изменений структуры поверхности эпителия, ногтевого ложа и околоногтевого эпителия, позволяя проводить идентифицирование, количественное описание и диагностирование на начальной стадии заболевания, учитывая, что фрактальность не всегда проявляет себя отчетливо, она прячется в случайной статистике необратимых процессов.

2. Визуальный метод SRGB является более чувствительным в сравнении с определением фрактальной размерности и коэффициента самоподобия.

3. Выявленное наличие самоподобных свойств структуры поверхности эпителия в очаге заболевания и в окружающих областях, ногтевом ложе и околоногтевом эпителии может свидетельствовать о существовании определенного алгоритма, действующего в соответствии с закономерностями развития заболевания и выполняющегося на каждом этапе изменения состояния здоровья.

Список литературы:

1. Feder E. Fractals. – М.: Мир, 1991.
2. Алдонин Г.М. Структурный анализ на основе модели самоорганизации биоструктур // Журнал радиоэлектроники. 2006. № 11. С. 6-10.
3. Алдонин Г.М. Пространственно-временная симметрия в биоструктурах // Сетевой электронный журнал «Системотехника». 2008. № 6.
4. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. – СПб.: ИТМО, 2008.
5. Неведьев Л.А., Русанова И.А. Фрактальная обработка изображений / Труды X Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия». – Казань: КГУ, 2006. С. 147-151.
6. Русанова И.А. Исследование необратимых процессов неоднородных поверхностей глазного дна и раковых заболеваний кожи / Труды V Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 247-250.
7. Русанова И.А. Фрактальность изображений ЯМР-томограмм головного мозга / Труды 6-й зимней молодежной школы-конференции «Магнитный резонанс и его приложения». – СПб., 2009. С. 202-203.
8. Rusanova I.A., Nefed'ev L., Nabiev R. Fraktalnaja processing of surfaces of cancer diseases of a skin / International Conference on Modern Problems in the Physics of Surfaces and Nanostructures. – Yaroslavl, 2012. PP. 158-159.

Инна Александровна Русанова,
ст. преподаватель, соискатель,
кафедра образовательных технологий в физике,
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»,
Институт физики,
г. Казань,
e-mail: irusanova@yandex.ru