

УДК 577.31,519.722, 599.323.45, 53.097

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-32-40

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ТКАНЯХ РОГОВИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ В УСЛОВИЯХ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

Д. С. Лаптев, аспирант, Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

С. Б. Егоркина, доктор медицинских наук, доцент, Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

В. А. Степанов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Белых, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе изучалось влияние времени полевого воздействия и психотипа животного на формирование мультифрактальных параметров информационной системы роговицы животного и проявления синергизма адаптации.

Мультифрактальный анализ изображений дает количественную оценку структурных параметров, а синергетика определяет динамическую устойчивость и адаптационную способность структуры тканей роговицы, вызванные стресс-реакцией экспериментального животного на воздействие вращающимся электрическим полем.

После 10 дней воздействия термодинамическая самоорганизация увеличивает информационную энтропию (D_1) мезоуровней и стресс, независимо от психотипа. Эти процессы наблюдаются у животного с неустойчивым психотипом и после 20-дневного воздействия.

У животного с устойчивым психотипом после 20 дневного воздействия наблюдается новый спектр мезоуровней и динамической устойчивости, динамическая самоорганизация снижает D_1 мезоуровней.

При значениях структурной стабильности $A_m=0,35$ наблюдаются два адапционных уровня: равновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем термодинамической самоорганизации, энтропия мезоуровня возрастает ($\Delta H>0$), параметр порядка равен $K_{s1}^{\max}=0,115$); неравновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем динамической самоорганизации, энтропия мезоуровня убывает ($\Delta H\leq 0$), параметр порядка равен $K_{s2}^{\max}=0,075$).

При увеличении структурной стабильности $A_m>0,35$ происходит деградация уровней структуры (параметр K_s понижается с увеличением A_m).

Предельная адаптивность животного с устойчивым психотипом выше, чем у неустойчивого или амбивалентного.

Хроностресс приводит структуру тканей роговицы к бифуркации, когда возможно несколько исходов, относительно «нормы хаотичности».

При остром стрессовом состоянии у животного может возникать адаптация с проявлениями патологий: наблюдается рост D_1 , возрастание энергетических затрат на поддержание равновесия системы.

Адаптация без признаков патологии соответствует неравновесному устойчивому состоянию: D_1 близка к «норме хаотичности».

Если D_1 ниже «нормы хаотичности», это хроническое неравновесное состояние.

Мезоуровни характеризуются: возрастанием общей энтропии (уровень подсистемы выживания определяется процессами термодинамической самоорганизации, характеристический элемент структуры находится в шоковом состоянии из-за стресса или причащается к существованию в условиях стресса, ограничив метаболические запросы биологической системы); снижением общей энтропии (уровень подсистемы выживания определяется процессами динамической самоорганизации, мобилизующей внутренний резерв адаптации биологической системы).

Ключевые слова: адаптация, мультифрактальная упорядоченность, энтропия, информационная система, самоорганизация, состояние стресса.

Введение

В докладе 2018 года Правительству Российской Федерации о реализации программы фундаментальных научных исследований академий наук на 2013–2020 годы отмечаются работы по разработке методов и алгоритмов распознавания роговицы на растровых изображениях срезов для автоматизации диагностирования заболевания глаз, математическому моделированию интрастромальной коррекции формы роговицы глаза при кератоконусе.

Тематика настоящей работы связана с разработкой методов и алгоритмов распознавания структурных изменений в тканях при различных физиологических и патологических состояниях на растровых изображениях срезов роговицы, в том числе при кератоконусе, как реакция на стресс и может относиться к перечню фундаментальных исследований по офтальмологии [1, 2].

Открытая система подвержена воздействию внешних и внутренних факторов, вызывающих процессы развития, направленные на самоорганизацию либо на деградацию системы. Процессы самоорганизации живых организмов, благодаря возможному поступлению извне энергии и информации (как негэнтропии), сопровождаются понижением энтропии [3–5].

Важная особенность живого организма – это наличие эндогенных источников энергии, приводящих в процессе взаимодействия с окружающей средой к саморегуляции «меры открытости» термодинамической системы (гомеостазис) [6]. Состояние гомеостазиса можно рассматривать как аналог стационарного состояния, описанного для открытых неустойчивых механических систем как «норма хаотичности» [7].

Воздействие стресс-факторов и формирование и реализация ответных адаптивных реакций, требующих затрат энергии, модифицирует гомеостаз организма, повышая его термодинамическую неустойчи-

вость и уровень обобщенной энтропии. Термодинамический аспект стресс-ответа организма заключается в выполнении функции энергетического донора для механизмов восстановления гомеостаза. Это соответствует представлениям творца теории стресса Г. Селье [8] о необходимости стресса (эустресса – стресса без патологий) для поддержания жизнедеятельности биосистем и, с другой стороны, созвучно представлению В. И. Вернадского [9]: эволюция биосферы «питается энтропией».

Физиология и анатомия биологических систем математически сжато описываются фрактальными структурами, энтропия и фрактальность являются параметрами структурного хаоса [10–12]. В качестве показателей адаптивности структуры к изменению внешнего фактора используют критические показатели мультифрактальных множеств и универсальный алгоритм самоорганизации структур адаптации [13, 14].

Тканевой уровень фрактальных исследований включает морфологическую организацию и разнообразные гистогенезы в норме и патологии, особенно при онкогенезе. Для воздействия на живой организм с лечебно-оздоровительными целями необходимы количественные критерии «нормы хаотичности» и степеней отклонений от нее. При этом процессы самоорганизации включаются в понятие «здоровье», деградации – в понятие «болезнь». Все отклонения от нормы хаотичности можно условно считать болезнью [15]. Физиологам еще предстоит лучше понять то, каким образом процессы развития приводят к возникновению фрактальных структур и как динамические процессы в организме порождают наблюдаемые признаки хаоса [16].

Для ранней диагностики заболеваний органов легочной системы разработаны алгоритмы и компьютерная программа мультифрактальной параметризации цифровых флюорограмм для автоматизации процесса диагностирования при скрининг-контроле [17, 18].

В сложных системах процессы самоорганизации структур протекают в условиях как далеких, так и близких к состоянию равновесия, получивших названия динамической [19] и термодинамической [20] самоорганизаций. Влияние внешних факторов на систему может быть оценено через изменение энтропии состояния системы. При достижении системой стационарного состояния суммарное изменение энтропии можно считать равным нулю, что соответствует взаимной компенсации всех процессов, связанных с поступлением, удалением и превращением вещества, энергии и информации [21].

Анализ комплексных исследований состояния биосистем выявляет взаимосвязь процессов, связанных адаптацией и изменением энтропии структуры в следующих закономерностях [22]:

1) в динамической системе может быть несколько стационарных состояний, отличающихся уровнем воспроизводства энтропии;

2) зона здоровья (стационарное состояние), суммарное изменение энтропии поддерживается равным нулю в результате компенсации всех процессов, свя-

занных с поступлением, удалением и превращением вещества, энергии и информации. Энтропия биосистемы $\Delta H = \Delta H_{\text{внутр}} + \Delta H_{\text{обм}}$, где $\Delta H_{\text{внутр}}$ – приращение энтропии за счет изменения внутреннего состояния ($\Delta H_{\text{внутр}} > 0$ – рост наблюдается из-за необратимых процессов внутри системы), производство отрицательной энтропии ($\Delta H_{\text{обм}} < 0$ за счет обменных процессов с окружающей средой);

3) зона заболевания (нестационарное состояние с повышенным воспроизводством энтропии). В биологической системе любая болезнь (воспаление) характеризуется увеличенным потреблением энергии для компенсации приобретенных или врожденных дефектов и сопровождается ростом энтропии ΔH ;

4) переходная зона риска сопровождается нарушением процесса обмена биосистемы с окружающей средой, что вызывает уменьшение производства отрицательной энтропии ($\Delta H_{\text{обм}}$) и увеличение общего прироста энтропии ΔH ;

5) острое заболевание соответствует нестационарному состоянию с повышенным воспроизводством энтропии, из этого состояния возможны исходы (бифуркация): возвращение на устойчивый исходный уровень или равновесное состояние с новым энергоинформационно-энтропийным уровнем или скачок на более высокий, нестабильный уровень.

Традиционные методы исследования адаптационных характеристик животного по ряду причин обладают невысокой точностью и не учитывают характер и тенденцию изменения состояния организма. Перспективным для интегральной оценки состояния биосистемы является подход, основанный на энтропийных методах моделирования информационных систем биологических объектов, что позволяет оценить воздействие внешних факторов на изменения энтропийных показателей и дает количественную характеристику процессу адаптации.

Актуальная задача заключается в получении динамической модели мезоструктур биологической системы для нахождения энтропийных показателей и инструментария воздействия на эти показатели для оптимального управления структурой и состоянием системы.

Цель работы – получение количественных оценок возможностей стрессовой адаптации экспериментальных животных, подвергнутых воздействию вращающимся электрическим полем на основе мультифрактальной параметризации оцифрованного изображения структуры тканей роговицы.

Задачи исследования:

– определение управляющих параметров и параметров порядка процессов формирования динамической модели мезоструктур системы, контролирующей адаптационную способность структуры тканей роговицы;

– применение динамической модели мезоструктур системы для определения состояния структуры и оценки адаптационной способности крысы на основе исследования структурных изменений тканей роговицы в зависимости от психотипа.

Определение информационной системы биологического объекта

Мультифрактальная параметризация цифрового изображения структуры дает спектр обобщенных размерностей Реньи ($D_q - q$) и эффективные количественные характеристики: меру беспорядка (скрытой периодичности) $\Delta_{40} = D_{-40} - D_{+40}$ и меру скрытой упорядоченности $K = D_1 - D_{40}$ (при положительных q), где информационная энтропия D_1 является мерой организованности исследуемой структуры; q – управляющий параметр $q \in [-40; +40]$. Характеристики D_q несут количественную информацию о термодинамических условиях формирования изучаемых структур. Энтропия D_{-40} – является мерой организованности разреженного множества элементов структуры, а D_{40} – наиболее плотного множества. С увеличением параметра $K = D_1 - D_{40}$ в структуре становится больше упорядоченности, система накачивается информацией (негэнтропией). Параметр Δ_{40} характеризует наблюдаемое разнообразие размещения элементов структуры мультифрактала. С увеличением размера ячейки d в неравновесной структуре выявляются Δ_{40}^* – периодические состояния потери упорядоченности (информационные резонансы). Размеры d^* являются активными элементами структуры мультифрактального множества, формируя спектр структурных размеров и информационных уровней (мезоуровней исследуемого мультифрактала). Моменту зарождения фрактала отвечает показатель фрактальной размерности D_0 , а его распад соответствует фрактальная размерность D_{-40} , их отношение определяет оценку структурной стабильности мезоуровня.

Основными показателями, определяющими алгоритм самоперестройки структур динамических систем, являются мера динамической устойчивости Δ_i , сохраняющаяся постоянной, и показатель периодической адаптационной перестройки m структуры к внешнему воздействию. Корни обобщенной золотой пропорции $\Delta_1=0,618$; $\Delta_2=0,465$; $\Delta_3=0,380$; $\Delta_4=0,324$; $\Delta_5=0,285$; $\Delta_6=0,255$; $\Delta_7=0,232$; $\Delta_8=0,213$ являются кодом устойчивости структур в различных системах живой и неживой природы. Переход к хаосу реализуется при значениях Δ_i в пределах от $\Delta_i^{\max}=0,618$ до $\Delta_i^{\min}=0,213$. Универсальный алгоритм самоорганизации описывается функцией подобия: $A_m = D_0/D_{-40} = \Delta_i^{1/m}$.

С позиции синергетики и теории фракталов универсальность поведения сложных систем является следствием существования информационных свойств данного класса материалов, для которого его спектр мультифрактальных параметров и связанные с ним информационные свойства могут рассматриваться своеобразным генотипом динамических структурных мезоуровней материала. Функция самоподобия $A_m = D_0/D_{-40} = \Delta_i^{1/m}$ характеризует адаптивность и устойчивость структурных мезоуровней, является динамической моделью, удобной для классификации и прогнозирования свойств и состояний биологического объекта.

Мультифрактальная параметризация изображений структур тканей роговицы экспериментальных животных, подвергнутых воздействию вращающимся электрическим полем, позволяет установить коды

динамической устойчивости на основе закона золотой пропорции для классификации, диагностики и прогнозирования физического состояния с помощью информационной системы биологического объекта.

При термодинамической самоорганизации мезоуровень стремится к равновесному состоянию, не испытывая периодических процессов, при этом информационная энтропия D_1 мезоуровня возрастает. При динамической самоорганизации системы информационной энтропия D_1 мезоуровня не возрастает, устойчивость мезоуровня обеспечивают периодические процессы. Оценка изменения информационной энтропии мезоуровня $\Delta H(d_i)$ проводилась численным методом, как разность информационных энтропий $\Delta H(d_i) = D_1(d_{i+1}) - D_1(d_{i-1})$ соседних ячеек с размерами d_{i+1} и d_{i-1} .

Объект исследования

Вращающиеся электрические поля (ВЭП) в условиях интенсивного использования электрической энергии в промышленности и в быту оказывают негативное воздействие на человека. Результаты исследования влияния ВЭП на репродуктивную систему самок крыс отмечают структурные изменения плаценты, задержку развития плода и повышение частоты эмбриональной смертности, актуальной является проблема прогнозирования состояния и ресурса структурной адаптации [23].

Процессы адаптации регуляторных систем и компенсаторных возможностей животного с различной стрессоустойчивостью могут контролировать адаптационную способность внутренних органов и изменять структуру тканей роговицы животного.

С помощью методики «Открытое поле» на кафедре «Нормальная физиология» Ижевской государственной медицинской академии животные делились на три психотипа: устойчивый, неустойчивый, амбивалентный. Эксперименты ставились с 10- и 20-дневной экспозицией. После воздействия вращающегося электромагнитного поля роговица глаза забиралась и фиксировалась в соответствии с требованиями гистологических исследований. Оптические изображения гистологических срезов роговицы экспериментальных животных с различным психотипом поведения, подвергнутых воздействию вращающегося электрического поля в течение десяти и двадцати дней, изучались при увеличении объектива 10^x и 20^x .

Обсуждение полученных результатов

Для выявления параметров порядка, отвечающих бифуркационной неустойчивости структуры тканей роговицы экспериментальных животных, подвергнутых длительному воздействию вращающегося электрического поля, была проведена мультифрактальная параметризация структуры оцифрованных изображений тканей роговицы с определением спектра фрактальных размерностей.

Влияние времени воздействия поля на экспериментальных животных изучалось по изменению мультифрактального показателя структуры $K_s = D_1 - D_{40}$ в зависимости от меры динамической устойчивости Δ_i и меры структурной стабильности A_m . Зависимости $K_s = f(A_m)$, представленные на рис. 1, позволили

установить параметры порядка, отвечающие структурной бифуркации, связанной с неравновесными переходами $K_{s1}^{max}=0,115$ при $A_m = 0,35$ и $K_{s2}^{max}=0,75$ при $A_m=0,35$. В точках неравновесного перехода мера динамической устойчивости мезоуровней $\Delta_i=0,324$ предел адаптации $A_m^*=0,87$, предельное число перестроек структуры до перехода к хаосу $m^*=8$.

С возрастанием меры структурной стабильности до значений $A_m=0,35$ наблюдаются два адаптационных уровня:

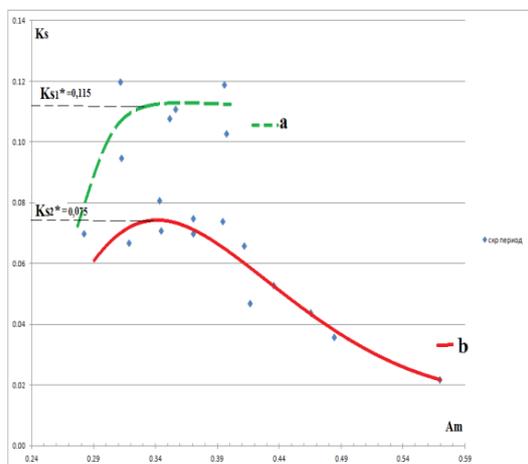
- равновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем термодинамической самоорганизации ($m=1$), т. е. нет структурных перестроек, адаптация вероятно идет за счет образования пор и разрыхления тканей при этом энтропия мезоуровня возрастает ($\Delta H > 0$), параметр порядка равен $K_{s1}^{max}=0,115$);

- неравновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем динамической самоорганизации, энтропия мезоуровня убывает ($\Delta H \leq 0$), параметр порядка равен $K_{s2}^{max}=0,075$).

У животного с устойчивым психотипом фрактальная размерность границ D_0 меньше, а фрактальные размерности D_1, D_2, D_{40} выше по сравнению с животным с неустойчивым психотипом, т. е. информационные системы отличаются степенью хаотичности.

После 20 дней воздействия в информационной системе структуры тканей роговицы возникает новый спектр мезоуровней и динамической устойчивости: у животного с устойчивым психотипом преобладают неравновесные мезоуровни с динамической самоорганизацией (энтропия уровней убывает $\Delta H \leq 0$), наблюдается бифуркация удвоения $m=2$ и периодическая перестройка структуры роговицы. Параметр порядка структуры возрастает до $K_{s2}^{max}=0,075$, а при $A_m > 0,35$ происходит деградация уровней структуры (параметр K_s понижается с увеличением структурной стабильности A_m) (рис. 1).

Зависимости $K_s=f(\Delta_i)$, представленные на рис. 1 (кривые *c, d*), повторяют установленные оценки параметров порядка, отвечающих структурной бифуркации.



Влияние времени воздействия поля и психотипа животного на динамику стрессорной адаптивности

Анализ изображения роговицы животного 3 к 10 (нет воздействия поля) с амбивалентным психотипом выявляет единственный неравновесный мезоуровень ($\Delta H < 0$) с параметром порядка $K_s^* \approx 0,096$, который может рассматриваться как «норма хаотичности» контрольного состояния структуры: $A_m = 0,3, \Delta_i = 0,324, A_m^* = 0,87$.

В результате 10-дневного воздействия вращающегося электрического поля, независимо от психотипа, возрастает параметр порядка до значений $K_s = 0,11 \div 0,12$, все мезоуровни равновесны ($\Delta H > 0$), $K_s \approx K_s^*$. Возможной причиной является устойчивость экспериментального животного к внешнему воздействию, элементы структуры находятся в минимальном шоковом состоянии, адаптируясь к существованию в этих условиях. Сохраняется возможность самостоятельного выхода из стресса при уменьшении воздействия.

После 20 дней воздействия у животного с устойчивым психотипом возникают неравновесные $\Delta H < 0$ и равновесные $\Delta H > 0$ мезоуровни с параметром порядка меньшим или близким к «норме», т. е. $K_s \leq K_s^*$. У животного с неустойчивым психотипом наблюдается расслоение значений величины K_s на область, близкую норме $K_s \approx 0,075 - 0,08$ (равновесные и неравновесные мезоуровни) и $K_s \approx 0,11 \div 0,12$ (равновесные мезоуровни).

В результате воздействия вращающимся электрическим полем на экспериментальных животных определены: мера динамической устойчивости $\Delta_i = 0,324$ и предел адаптации $A_m^* = 0,87$, при достижении которого могут реализоваться адаптационные уровни, соответствующие параметрам порядка $K_{s1}^{max}=0,115$ и $K_{s2}^{max}=0,075$.

Процессы самоорганизации и формирование стрессорной адаптации структуры тканей роговицы анализировались на основе зависимости мультифрактальных параметров D_0, D_1 от параметра порядка K_s (рис. 2).

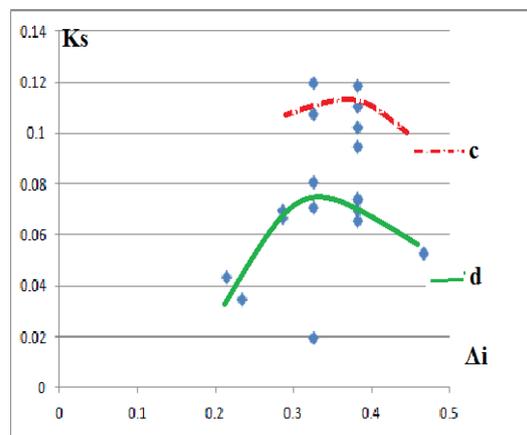


Рис. 1. Зависимость параметра порядка $K = D_1 - D_{40}$ структуры тканей роговицы от структурной стабильности (адаптационная способность) A_m и устойчивости Δ_i : а) $K_{2max}=0,12, A_m=0,4$; б) $K_{1max}=0,08, A_m=0,35$; в) $K_{2max}=0,12, \Delta_i=0,380$; д) $K_{2max}=0,08, \Delta_i=0,324$

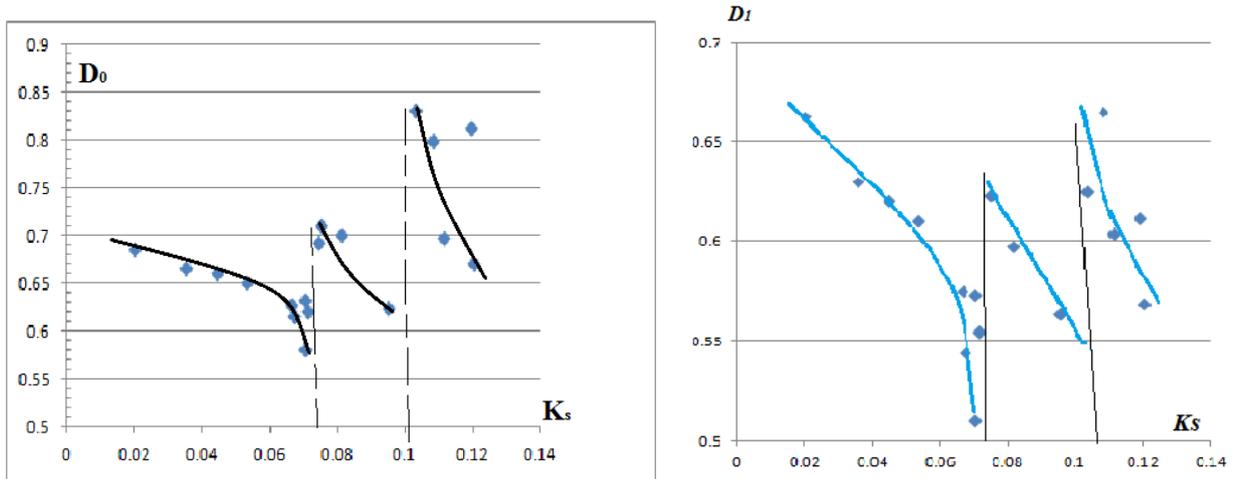


Рис. 2. Зависимость фрактальных размерностей энерго-информационных уровней изображений структуры тканей роговицы D_0 и D_1 от параметра порядка K_s

Выявлено нарушение взаимосвязи мультифрактальных параметров D_0 , D_1 и параметра порядка K_s структуры при достижении порогового значения управляющего параметра $A_m=0,35$. Наблюдаются два неравновесных фазовых перехода с $K_{s1} = 0,115$ и $K_{s2} = 0,075$, выявляются три разных типа механизмов адаптации тканей роговицы к стрессорным воздействиям. Мультифрактальная параметризация изображения роговицы при двадцатикратном увеличении выявляет новые (отсутствующие при десятикратном увеличении изображения) критические значения управляющих параметров, определяющих параметры порядка (рис. 3, 4). С ростом структурной стабильно-

сти A_m до значений $A_m=0,38$, параметры порядка достигают максимальных значений $K_{s1}^{\max}=0,035$, $K_{s2}^{\max}=0,051$ и $K_{s3}^{\max}=0,085$ (кривые *a*, *b*, *c*). У животного с устойчивым психотипом наблюдаем параметры мезоуровней $K_{s1}^{\max}=0,035$ и $K_{s2}^{\max}=0,051$, с пределом адаптации $A_m=0,79$ и мерой динамической устойчивости $\Delta_i=0,380$. У животного с неустойчивым психотипом наблюдаем параметры мезоуровней $K_{s2}^{\max}=0,051$ и $K_{s3}^{\max}=0,085$, с пределом адаптации $A_m^*=0,79$ и мерой динамической устойчивости $\Delta_i=0,380$. Дальнейший рост структурной стабильности $A_m>0,38$ сопровождается деградацией мезоуровней (кривые *a*, *b* убывают на рис. 3).

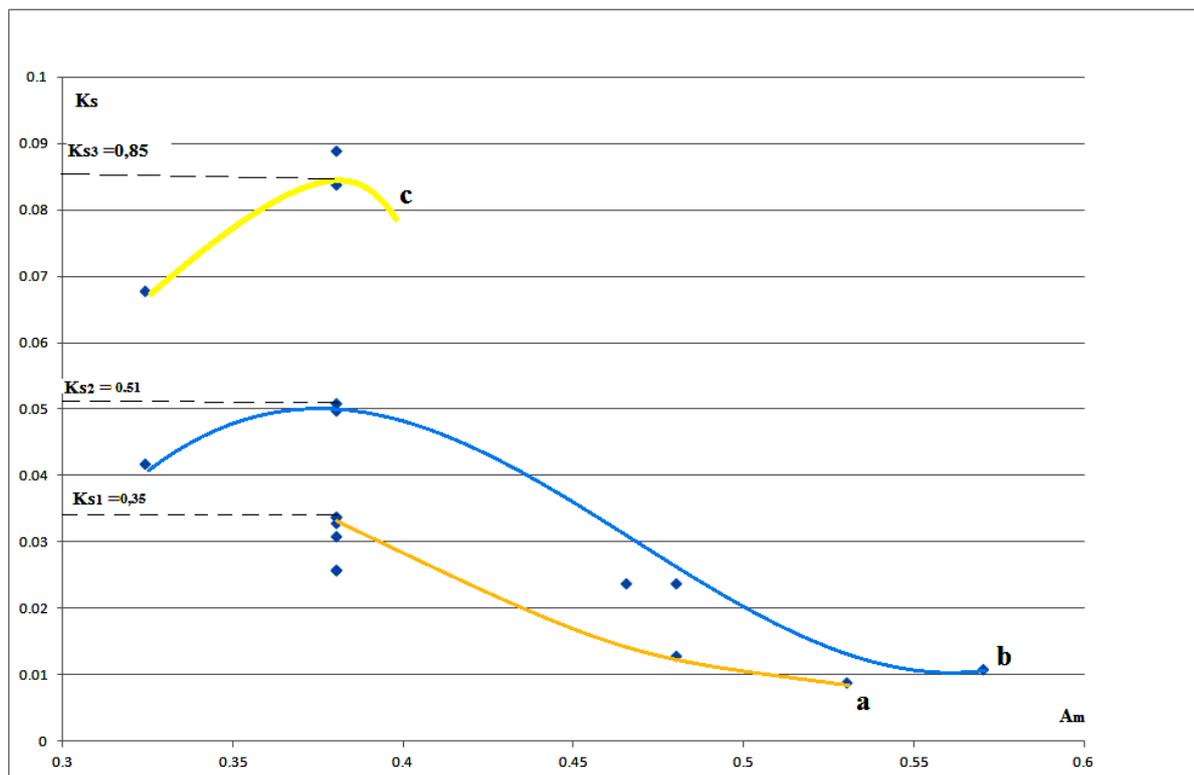


Рис. 3. Зависимость параметра порядка $K=D_1 - D_{40}$ структуры тканей роговицы от структурной стабильности A_m : а) $K_{s1}^{\max}=0,035$, $A_m=0,38$; б) $K_{s2}^{\max}=0,051$, $A_m=0,38$; в) $K_{s3}^{\max}=0,085$, $A_m=0,38$;

Пороговый характер зависимости информационной энтропии D_1 структуры тканей роговицы экспериментальных и контрольных животных от параметра порядка K_s возникает при критических значениях K_{s1}^* , K_{s2}^* , K_{s3}^* . На фазовые переходы влияют психотип животного и время полевого воздействия. У животного с устойчивым психотипом после 10 дней

воздействия поля наблюдается единственный мезоуровень в интервале $0,032 < K_s < 0,05$. После 20 дней воздействия возникает равновесный мезоуровень, соответствующий критическому параметру $K_{s2}^* \approx 0,05$, при этом происходит термодинамическая самоорганизация (рис. 4).

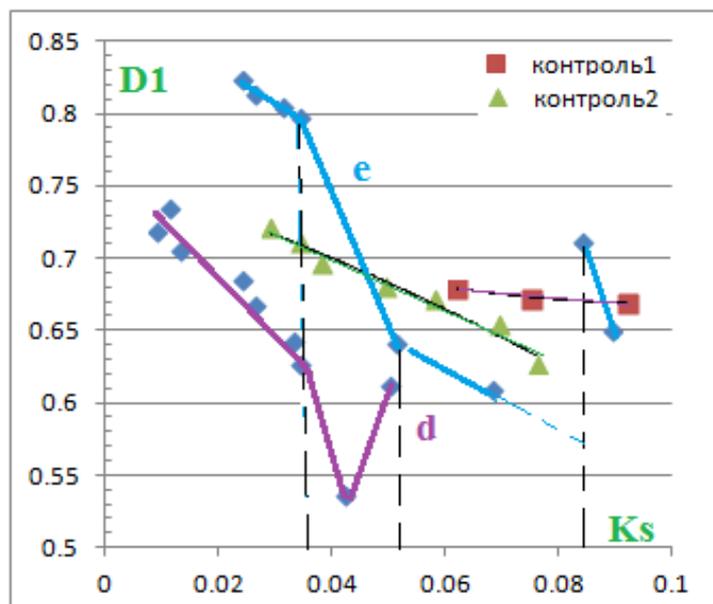


Рис. 4. Зависимость D_1 энерго-информационных уровней изображений структуры тканей роговицы от параметра порядка K_s : d) животное с устойчивым психотипом; e) животное с неустойчивым психотипом; контроль 1 – животное с неустойчивым психотипом 6 к 20; контроль 2 – животное с неустойчивым психотипом 8 к 20

У животного с неустойчивым психотипом наблюдаются три фазовых перехода: при 10-дневном воздействии достигается неравновесный мезоуровень ($\Delta H < 0$) с превышением энтропии D_1 выше «нормы хаотичности» при $K_{s1}^* = 0,085$; после 20 дней воздействия при K_{s2}^* и K_{s3}^* , наблюдаются неравновесные устойчивые мезоуровни ($\Delta H < 0$) с энтропией ниже «нормы хаотичности» в первом случае и выше «нормы хаотичности» во втором случае. При $K_s < 0,034$ все мезоуровни неравновесные устойчивые, их энтропия растет в результате деградации, при этом информационная энтропия D_1 у животного с неустойчивым психотипом выше, чем у животного с устойчивым психотипом, т. е. информационные системы отличаются степенью хаотичности.

Результаты стрессовой адаптации экспериментальных животных приводятся в табл. 1, с наблюдаемыми границами «нормы хаотичности» структурных параметров контрольных животных с известным психотипом.

С возрастанием меры структурной стабильности A_m в информационной системе роговицы животных обнаруживается тенденция снижения параметра порядка K_s (табл. 2).

Таблица 1. Оценка границ «нормы хаотичности» контрольных животных с амбивалентным (увеличение 10x) и неустойчивым психотипом (увеличение 20x)

Психотип	Δ_i	A_m	D_1	K_s
Амбивалентный	0,324	0,87	0,57	0,10
Неустойчивый	0,213	0,99	0,70	0,038
	0,232	0,98	0,71	0,034
	0,255	0,96	0,72	0,031
	0,285	0,92	0,72	0,029
	0,324	0,87	0,61–0,67	0,07–0,09
	0,380	0,79	0,72–0,68	0,05–0,06

Таблица 2. Связь структурной стабильности и параметра порядка контрольного животного с неустойчивым психотипом (увеличение 20x)

Показатель	Значения				
	A_m	0,325	0,350	0,400	0,450
K_s	0,075	0,06	0,05–0,06	0,38–0,042	0,029–0,34

Полученные результаты показали, что эффекты синергизма проявляются вблизи точек неравновесного фазового перехода, обеспечивающего самооптимизацию структуры в условиях стресса. Применение фрактального подхода и синергетики к изучению структуры биологических объектов, позволяет повысить информативность результатов экспериментальных исследований. Для установления механизмов

адаптации, связанных со структурными перестройками, требуются дополнительные гистологические исследования.

Выводы

1. Метод мультифрактальной параметризации изображений, позволяет количественно описывать адаптационную способность структуры тканей роговицы, вызванные стресс-реакцией на внешнее воздействие экспериментального животного.

2. У животного с устойчивым психотипом фрактальная размерность границ D_0 меньше, а фрактальные размерности D_1 , D_2 , D_{40} выше по сравнению с животным с неустойчивым психотипом, т. е. информационные системы отличаются степенью хаотичности.

3. С возрастанием меры структурной стабильности до значений $A_m=0,35$ наблюдаются два адаптационных уровня:

а) равновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем термодинамической самоорганизации ($m=1$), энтропия мезоуровня возрастает ($\Delta H > 0$), параметр порядка $K_{s1}^{\max} = 0,115$;

б) неравновесный (в структуре тканей роговицы происходит упорядоченность путем динамической самоорганизации, энтропия мезоуровня убывает ($\Delta H \leq 0$), параметр порядка $K_{s2}^{\max} = 0,075$).

4. Мезоуровни характеризуются:

а) возрастанием общей энтропии (уровень подсистемы выживания определяется процессами термодинамической самоорганизации, характеристический элемент структуры находится в шоковом состоянии из-за стресса или приучается к существованию в условиях стресса, ограничив метаболические запросы биологической системы);

б) снижением общей энтропии (уровень подсистемы выживания определяется процессами динамической самоорганизации, мобилизующей внутренний резерв адаптации биологической системы).

5. После 20 дней полевого воздействия в информационной системе структуры тканей роговицы возникает новый спектр мезоуровней и динамической устойчивости. У животного с устойчивым психотипом преобладают неравновесные мезоуровни с динамической самоорганизацией (энтропия уровней убывает $\Delta H \leq 0$), параметр порядка возрастает до $K_{s2}^{\max}=0,075$.

6. При увеличении структурной стабильности $A_m > 0,35$ происходит деградация уровней структуры (параметр K_s понижается с увеличением A_m).

Библиографические ссылки

1. Показатели объема тканей роговицы в норме и при кератоконусе / А. Н. Куликов, Е. В. Кудряшова, В. Н. Гаврилюк, Д. С. Мальцев // Современные технологии в офтальмологии. 2019. Вып. №5 (30). С. 292.

2. Абовян А. А., Зильфян А. А. Роль матричной металлопротеиназы-9 в диагностике кератоконуса // Современные технологии в офтальмологии. 2018. № 5. С. 263–265.

3. Шредингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. М. ; Ижевск : R&D Dynamics, 2002. 92 с.

4. Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем. М. : Янус-К, 2002. 284 с.

5. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М. : Эдиториал УРСС, 2000. 310 с.

6. Чернышева М. П. Временная структура биосистем и биологическое время. СПб. : Написано пером, 2014. 172 с.

7. Линк Г. Физическая теория живой клетки. Незамеченная революция. СПб. : Наука, 2008. 376 с.

8. Селье Г. Очерки об адаптационном синдроме. М. : Прогресс, 1960. 80 с.

9. Вернадский В. И. Начало и вечность жизни. М. : Сов. Россия, 1989. 190 с.

10. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organism // Science. 1999. Vol. 284. No. 5420. Pp. 1677-1679.

11. Weibel E.R. Design of biological organisms and fractal geometry // Fractal in biology and medicine / Eds Nonnenmacher T.F., Losa G.A., Weibel E.R. Basel e a.: Birkhauser. 1994. 68-85.

12. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе : монография / В. В. Исаева, Ю. А. Каретин, А. В. Чернышев, Д. Ю. Шкуратов. Владивосток : Институт биологии моря ДВО РАН, 2004. 128 с.

13. Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 115 с.

14. Иванова В. С. Универсальность самоорганизации динамических структур живой и костной природы // Синергетика. 1999. № 2. С. 85–38.

15. Хадарцев А. А. Теоретические основы новых медицинских технологий // Вестник Международной академии наук (Русская секция). 2006. № 1. С. 22–28.

16. Фракталы и мультифракталы в биоэкологии : монография / Д. Б. Гелашвили, Д. И. Иудин, Г. С. Розенберг, В. Н. Якимов, Л. А. Солнцев. Н. Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. 370 с.

17. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. Г. Суфиянов, В. В. Белых, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2009. № 3. С. 150–154.

18. Степанов В. А., Белых В. В. Программа для сравнительного фрактального анализа растровых изображений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615852. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01 июня 2016.

19. Пригожин И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках. М. : Наука, 1985. 313 с.

20. Гладышев Г. П. Термодинамика и макрокинетика природных иерархических процессов. М. : Наука, 1988. 287 с.

21. Прангшвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова. М. : Наука, 2003. 428 с.

22. Математические методы и информационные технологии в задачах оценки состояния биосистем: монография / [авт.: О. Г. Берестнева и др.] ; Национально исследовательский Томский политехнический университет. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. 162 с. ISBN 978-5-4387-0608-3.

23. Зайнаева Т. П., Егоркина С. Б. Влияние вращающегося электрического поля на систему «мать – плацента – плод» у крыс с разной прогностической стрессоустойчивостью // Экология человека. 2016. № 8. С. 3–7.

24. Goldberger A. L. Fractal variability versus pathological periodicity: complexity and stereotypy indisease // *Perspect. Biol. Med.* 1997. Vol. 40. No. 4. Pp. 543-561.

References

1. Kulikov A.N., Kudryashova Ye.V., Gavrilyuk V.N., Mal'tsev D.S. [Corneal tissue volume indicators are normal and with keratoconus]. *Sovremennye tekhnologii v oftal'mologii.* 2019. No. 5. P. 292 (in Russ.).

2. Abovyan A.A., Zil'fyan A.A. [The role of matrix metalloproteinase-9 in the diagnosis of keratoconus]. *Sovremennye tekhnologii v oftal'mologii.* 2018. No. 5. Pp. 263-265 (in Russ.).

3. Shredinger E. *Chto takoye zhizn'? Fizicheskiy aspekt zhivoy kletki.* [What is life? The physical aspect of a living cell]. Moscow, Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics, 2002, 92 p. (in Russ.).

4. Klimontovich YU.L. *Vvedeniye v fiziku otkrytykh sistem* [Introduction to the physics of open systems]. Moscow, Yanus-K Publ., 2002. 284 p. (in Russ.).

5. Prigozhin I., Stengers I. *Poryadok iz khaosa. Novyy dialog cheloveka s prirodoy* [Order out of chaos. A new dialogue of man with nature]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000, 310 p. (in Russ.).

6. Chernysheva M. P. *Vremennaya struktura biosistem i biologicheskoye vremya* [Temporal structure of biosystems and biological time]. St. Petersburg, "Written with a pen" Publ., 2014, 172 p. (in Russ.).

7. Link G. *Fizicheskaya teoriya zhivoy kletki. Nezamechennaya revolyutsiya.* [Physical theory of a living cell. Unnoticed revolution]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2008, 376 p. (in Russ.).

8. Sel'ye G. *Ocherki ob adaptatsionnom sindrome.* [Essays on the adaptation syndrome]. Moscow, Progress Publ., 1960, 80 p. (in Russ.).

9. Vernadskiy V.I. *Nachalo i vechnost' zhizni.* [The beginning and eternity of life]. Moscow, Sov. Russia Publ., 1989, 190 p. (in Russ.).

10. West G.B., Brown J.H., Enquist B.J. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organism. In *Science.* 1999. Vol. 284. No. 5420. Pp. 1677-1679.

11. Weibel E.R. Design of biological organisms and fractal geometry // *Fractal in biology and medicine* / Eds. Nonnenmacher T.F., Losa G.A., Weibel E.R. Basel e a.: Birkhauser. 1994. 68-85.

12. Isaeva V.V., Karetin Yu.A., Chernyshev A.V., Skuratov D.Yu. *Fraktaly i khaos v biologicheskoy morfogeneze. Institut biologii morya.* [Fractals and chaos in biological morphogenesis]. Institute of Marine Biology. FEB RAS. Vladivostok, 2004. 128 p. (in Russ.).

13. Vstovskiy G.V., Kolmakov A.G., Bunin I. ZH. *Vvedeniye v mul'tifraktal'nyuyu parametrizatsiyu struktur materia-*

lov. [Introduction to multifractal parameterization of material structures] Moscow, Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics, 2001, 115 p. (in Russ.).

14. Ivanova V.S. [Universality of self-organization of dynamic structures of living and bone nature]. *Sinergetika*, [In Sat. "Synergetics"], 1999, no. 2, pp. 85-38 (in Russ.).

15. Khadartsev A.A. [Theoretical foundations of new medical technologies]. *Bulletin of the International Academy of Sciences (Russian section).* 2006. 1. Pp. 22-28 (in Russ.).

16. Gelashvili D. B., Judin D. I., Rosenberg G. S., Yakimov V. N., Solntsev L. A. *Fraktaly i mul'tifraktaly v bioekologii: monografiya.* [Fractals and multifractals in bioecology: Monograph]. Nizhny Novgorod: Publishing house of the Nizhny Novgorod State University, 2013. 370 p. (in Russ.).

17. Ivannikov V.P., Sufiyarov V.G., Belykh V.V., Stepanov V.A. [Fractal analysis of radiographs]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2009, no. 3, pp. 150-154 (in Russ.).

18. Stepanov V.A., Belykh V.V. *Programma dlya sravnitel'nogo fraktal'nogo analiza rastrovyykh izobrazheniy.* [Program for comparative fractal analysis of raster images]. Certificate of state registration of computer programs No. 2016615852. State date Registration in the Computer Software Registry on June 01, 2016.

19. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu. Vremya i slozh-nost' v fizicheskikh naukakh* [From the existing to the arising. Time and complexity in the physical sciences]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 313 p. (in Russ.).

20. Gladyshev G.P. *Termodinamika i makrokinetika prirodnyykh iyerarkhicheskikh protsessov* [Thermodynamics and macrokinetics of natural hierarchical processes.]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 287 p. (in Russ.).

21. Prangishvili I.V. *Entropiyemye i drugie sistemnyye zakonomernosti: Voprosy upravleniya slozhnyimi sistemami* [Entropy and other systemic laws: Issues of managing complex systems]. Institute of Management Problems. V.A. Trapeznikova. Moscow, Nauka Publ., 2003, 428 p. (in Russ.).

22. O. G. Berestneva i dr. *Matematicheskiye metody i informatsionnyye tekhnologii v zadachakh otsenki sostoyaniya biosistem* [Mathematical methods and information technology in assessing the status of biosystems]. National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2015, 162 p. ISBN 978-5-4387-0608-3.

23. Zaynayeva T.P., Yegorkina S.B. [The effect of a rotating electric field on the system "mother - placenta - fetus" in rats with different predictive stress tolerance]. *Ekologiya cheloveka*, 2016, no. 8, pp. 3-7 (in Russ.).

24. Glensdorf P., Prigozhin I. *Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustoychivosti i Fluktuatsii* [Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations.]. Moscow, URSS Publ. 2003, 280 p. (in Russ.). ISBN 5-354-00293-1.

The Study of Structural Changes in the Tissues of the Cornea of Experimental Animals in a Rotating Electric Field by Fractal Parameterization

D. S. Laptev, Post-graduate, Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

S. B. Yegorkina, Professor, Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

V. A. Stepanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Belykh, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The influence of field exposure time and the animal psychotype on the formation of multifractal parameters of the information system of the animal cornea and manifestations of the synergy adaptation was studied.

Multifractal image analysis provides a quantitative assessment of structural parameters, and synergetics allows you to determine the dynamic stability and adaptive capacity, of the corneal tissue structure caused by the stress response of the experimental animal to the influence of a rotating electric field.

After 10 days of exposure, thermodynamic self-organization increases informational entropy (D1) of mesoscale and stress, independently of psychotype.

These processes are observed in an animal with an unstable psychotype and after 20 days of exposure.

A new spectrum of mesoscale and dynamic stability is observed, dynamic self-organization reduces the D1 of the mesoscale in an animal with a stable psychotype after a 20 day exposure. At structural stability values $A_m = 0.35$, two adaptation levels are observed:

a. equilibrium (ordering occurs in the structure of corneal tissues by thermodynamic self-organization, the entropy of the mesoscale increases ($\Delta H > 0$), the order parameter is $K_{s1max} = 0.115$);

b. nonequilibrium (in the structure of the corneal tissue, ordering occurs through dynamic self-organization, the entropy of the mesoscale decreases ($\Delta H \leq 0$), the order parameter is $K_{s2max} = 0.075$).

With an increase in the structural stability $A_m > 0.35$, degradation of the levels of the structure occurs (parameter K_s decreases with an increase in A_m).

The limit adaptability of an animal with a stable psychotype is higher than that of an unstable or ambivalent one.

Chronostress leads the corneal tissue structure to bifurcation, when several outcomes are possible, relative to the "norm of randomness".

In an acute stressful state, an animal may experience adaptation with manifestations of pathologies: there is an increase in D1, an increase in energy costs to maintain the balance of the system.

Adaptation without signs of pathology corresponds to a nonequilibrium steady state: D1 is close to the "norm of randomness".

If D1 is lower than the "norm of randomness", this is a chronic nonequilibrium state.

Meso levels are characterized by:

1) an increase in general entropy (the level of the subsystem of survival is determined by the processes of thermodynamic self-organization, a characteristic element of the structure is in a state of shock due to stress or is accustomed to living under stress, limiting the metabolic demands of the biological system);

2) a decrease in overall entropy (the level of the subsystem of survival is determined by the processes of dynamic self-organization that mobilizes the internal reserve of adaptation of the biological system).

Keywords: adaptation, multifractal ordering, entropy, information system, self-organization, stress state.

Получено: 30.10.19