

УДК 519.21, 57.087, 57.032, 57. 042/.048

**Multifractal parametrization of images of histological sections of the rat cornea in a model of a technogenic rotating electric field****Khudoikulova Sh.N., Yegorkina S.B., Stepanov V.A.,  
Belykh V.V., Adyleva O.A.****Samarkand State Medical University****Ijevsk State Medical Academy****Ijevsk State University named after M.T. Kalashnikov****Annotation**

With the help of multifractal parameterization of the image of the cornea of the eye, the effect of a rotating electric field (VEP) of industrial frequency (50 Hz) with a duration of ten and twenty days on experimental animals (rats) was studied. A spectrum of generalized dimensions and criteria for entropy evaluation of the states of static and dynamic stability of the corneal structure has been established, on the basis of which a mathematical model of stable states of the corneal information system has been constructed, taking into account the prognostic type of behavior. The entropy indicators of stationary information-entropy levels and the intervals of the physiological norm of entropy changes in the dynamic structure of the information system of the cornea of animals are established. The periods of cyclical homeostasis of the corneal information system of animals with stable (17 days) and unstable (12 days) type of behavior were determined.

As a result of field exposure lasting 20 days on animals with a stable predictive type of behavior, the relative organization of the corneal information system was characterized by deterministic, quasi-deterministic and stochastic functions. The relative organization of the information system of the cornea of animals with an unstable prognostic type of behavior, with a duration of exposure of 10 and 20 days, was characterized by a deterministic function. The revealed differences in the functions of information systems were obviously caused by somewhat different mechanisms of response of both the cornea and the animal as a whole to field exposure. With constant external or internal disturbances, several stationary information-entropy levels can be observed in the information system of the corneal structure, differing in the rate of reproduction of its own entropy. The field effect of 10 days in our experiments caused a slight deviation from the stationary mode, probably due to the development of internal compensatory processes that seek to return the system to the original stationary level. After 20 days of field exposure, several outcomes were observed: a return to a stationary level, a transition to an equilibrium stationary state, and a jump to a higher, non-stationary level.

**Keywords: entropy, information, system, cornea, structure.**

## Введение

В последние десятилетия получила развитие информационная теория воздействия электромагнитных полей (ЭМП), основанная на концепции взаимодействия внешних электромагнитных полей с внутренним полем организма. Внешние ЭМП формируются благодаря природному электромагнитному фону, динамика параметров которого зависит от солнечной активности и космической погоды в околоземном пространстве. Частотно-амплитудный диапазон природных ЭМП достаточно широк, однако особый интерес представляет полоса крайне низких частот (КНЧ) в диапазоне до 3000 Гц. Именно к этому диапазону (50-60 Гц) приурочено максимальное электромагнитное «загрязнение» окружающей среды, связанное с техногенной деятельностью человека. Опираясь на данные исследователей в области электромагнитной биологии и медицины и на собственные экспериментальные результаты [1-6], можно говорить о том, что эффекты ЭМП КНЧ, близких по своим параметрам к электромагнитным полям природного и антропогенного происхождения, могут проявляются на всех уровнях организации живых организмов от клеточного и тканевого до организменного. При этом на разных уровнях организации синхронно реализуются различные эффекты, которые на системном плане проявляются в виде неспецифических адаптационных реакций. На сегодняшний день традиционные методы исследования адаптационных характеристик организма по ряду причин обладают невысокой точностью и не всегда учитывают характер и тенденцию изменения состояния систем организма в ответ на действие факторов внешней среды. Перспективным для интегральной оценки состояния биосистемы является подход, основанный на энтропийных методах моделирования информационных систем биологических объектов, где в качестве показателей адаптивности структуры к изменению внешнего фактора используют критические показатели мультифрактальных множеств. Использование мультифрактального анализа оптических изображений позволяет создавать математические модели, физиологических процессов живых систем, что расширяет возможности изучения информационного воздействия потоков энергии, вещества, информации на биообъекты, [3-8].

Математическая модель информационной системы объекта может быть создана на основе изучения условий устойчивости сложной системы, состоящей из множества элементов структуры, находящихся в многообразных взаимодействиях внутри и между разными системами, реализуя с некоторой неопределенностью различную степень структурной организации [9]. Исследование сложных систем производят на термодинамических аналогиях [10], анализе изменения энтропии [11], законов распределения и мультифрактального масштабирования [12,13]. Термодинамический подход рассматривает общую энтропию как сумму импульсного и структурного факторов [14]. Первый выражает разнообразие

ресурсов системы, необходимых для её эволюции, и поддержания гомеостаза. Вторым выступает фактором текущей организации системы

$$S = k_B \ln \Omega, \quad \Omega = N \ln N - \sum_i^m N_i \ln N_i$$

где:  $\Omega$  статистический вес системы,  $N$  – число частиц, размещенным по  $m$  группам, состоящим из  $N_1, N_2, \dots, N_i \dots, N_m$  частиц.

Понятию масштабная инвариантность (скейлинг), соответствует гиперболический закон распределения элементов структуры, как проявление устойчивости стохастических самоподобных структур при больших значениях аргумента [15] и самоорганизации [16,17].

В открытых системах рассматривают два типа самоорганизации: термодинамическую, контролируемую стремлением системы к минимуму свободной энергии и равновесному состоянию с максимальной структурной энтропией; динамическую, контролируемую стремлением системы к стационарному состоянию с минимумом производства энтропии по Пригожину [18] и максимумом производства информации по Хазену [19].

Фундаментальное свойство живой материи проявляется в законе ритмических колебаний процессов жизнедеятельности. Выявлена связь цикличности биоритмов с механизмами гомеостаза и адаптации организма к окружающей среде [20]. Цикличность информации впервые рассматривает И. Шмальгаузен [21], согласно его представлениям система состоит из двух каналов: по первому каналу идет информация, закодированная в хромосомах, на молекулярном уровне; по обратному каналу передается макроскопическая, фенотипическая информация, проявляющаяся в адаптации, в борьбе за существование. Фенотипическая информация является структурной, поскольку она появляется в результате воздействия среды, на которое организм отвечает адаптивными реакциями. Поэтому к структурной генотипической информации добавляется структурная фенотипическая информация внешнего происхождения, образуя структурную информацию организма. Приспособление фенотипа высших животных к среде (индивидуальное развитие) осуществляется с помощью статической (регулярной) адаптации, а может с помощью динамической (поведенческой) адаптации. Равновесное состояние не совместимо с жизнедеятельностью, поскольку суммарное изменение энтропии равно нулю, что соответствует взаимной компенсации всех процессов, связанных с поступлением, удалением и превращением вещества, энергии и информации [22]. Особенностью состояния биосистем является то, что они обладают стационарным информационно-энтропийным уровнем, значительно удаленным от термодинамического равновесия. И. Пригожин сформулировал основное свойство стационарных уровней состояния открытых систем при фиксированных внешних параметрах: скорость воспроизводства собственной

энтропии, обусловленная протеканием необратимых процессов, постоянна во времени и минимальна по величине [23].

Количество информации  $I$  и энтропия  $H$  характеризуют одну и ту же ситуацию, но с качественно противоположных сторон. Когда неопределенность полностью снята, количество полученной информации  $I$  равно изначально существовавшей неопределенности  $H$ . Для случайной величины  $X$ , имеющей конечное число значений:

$$P(x_i)=p_i, p_i \geq 0, i=1,2,\dots,n \sum p_i=1,$$

собственная информация  $I(X)=-\log P(X)$ .

Под информационной энтропией понимают меру хаотичности информации, равной среднему значению информации

$$H(X)=E(I(X)) =-\sum p_i \log p_i.$$

Элементы структуры рассматриваются как структурная матрица памяти, в которой «записано» ее функциональное качество в виде дискретной информации статической и динамической устойчивости информационной системы [24].

Энтропия информационной системы статической структуры изображения роговицы равна  $H=\sum D_{li}$ , где  $D_{li}$  – максимум информационной размерности  $i$ -го уровня.

Увеличение сложности системы происходит за счет увеличения числа разнородных элементов и связей между ними, создающих  $N$  устойчивых состояний с набором вероятностей  $p_1, p_2, \dots, p_N$ . Количество информации, соответствующей этому состоянию системы, выражается формулой К. Шеннона  $I=-\sum_j^N p_j \log_2 p_j$ . Число  $N$  определяет информационную емкость. Максимальное количество информации  $I_{max}$ , которую система содержит определяется выражением  $I_{max} =-\log_2 P$ , когда состояния равновероятны  $P = \frac{1}{N}$ .

Энтропия информационной системы динамической структуры роговицы представляет свободную (конформационную) энтропию  $H^*=\sum D_{li}^*$ , где  $D_{li}^*$  информационная размерность  $i$ -го уровня максимальной меры хаотичности  $dD_i$ .

Понятие энтропии связано с понятием энергии (суммарной энергии движения элементов) в то время, как процесс накопления информации связан с потерей энергии. Накопление информации в открытой системе и есть ее самоорганизация, адаптация и оптимизация. Благодаря процессам самоорганизации происходят изменения функционального состояния информационной системы.

Информационную систему характеризует мера относительной организованности системы [25], определяющая её функцию:  $R = 1 - H^* / H_{\max}$ . Функция системы является вероятностной (стохастической), если  $R \leq 0,1$ ; функция считается детерминированной, если  $R > 0,3$ . Функция является квазидетерминированной (вероятностно-детерминированной), если относительная организованность  $0,1 < R \leq 0,3$ .

### **Цель работы:**

- создание математической модели устойчивых состояний информационной системы (поведенческий гомеостаз) роговицы на основе мультифрактальной параметризации оптического изображения роговицы глаза животных с учетом прогностического типа поведения;
- установить пределы физиологической нормы (изменчивости) энтропии динамической структуры информационной системы роговицы животного с учетом прогностического типа поведения;
- исследовать изменения функциональных состояний информационной системы роговицы экспериментальных животных и установить закономерности полевого воздействия с учетом прогностического типа поведения и длительности воздействия;
- исследовать взаимосвязь изменений функциональных состояний информационной системы структуры роговицы с результатами гистологических исследований.

### **Объект и методы исследования**

Исследования проводились на 18 крысах: 10 животных с устойчивым прогностическим типом поведения (анализировали 16 изображений гистологических срезов) и 8 животных с неустойчивым прогностическим типом поведения (анализировали 14 изображений гистологических срезов). Исследования проводились на кафедре «Нормальная физиология» Ижевской государственной медицинской академии. Ставились эксперименты по воздействию вращающегося электрического поля, изменяющегося по синусоидальному закону с частотой 50 Гц на экспериментальных животных в течение десяти и двадцати дней по 60 минут ежедневно. После воздействия вращающегося электрического поля роговица глаза забиралась и фиксировалась в соответствии с требованиями гистологических исследований. Оптические изображения гистологических срезов роговицы экспериментальных животных, изучались при увеличении объектива 10x и 20x.

Мультифрактальная параметризация изображения гистологического среза роговицы включает следующие этапы [26]:

1. Получение цифрового изображения при увеличении 10x и 20x;
2. Генерация меры при разбиении изображения равномерной квадратной сеткой со стороной  $\delta$ , размер которой изменяется в пределах от 3 до 50 пикселей. Полученная поверхность структуры, погруженная в трехмерное евклидово пространство, покрывается набором элементарных параллелепипедов размером (X пиксель · У пикселя · градация серого). Оптическая плотность серого изображения изменяется в пределах: от 0÷255.
3. Расчет мультифрактальных характеристик и их анализ.

Методология мультифрактальной параметризации позволяет оценить структурную сложность изображения роговицы на основе энтропийных размерностей Реньи [27]:

$$D_q = \frac{1}{1-q} \ln \sum_i^S P_i^q,$$

где  $q$ - целочисленный параметр  $q = (-\infty, +\infty)$ ,  $P_i$  –вероятность  $i$ -го состояния. При  $q=0$ ,  $D_0$ – является характеристикой отображения реальной структуры, чувствительной к «усложнению» рельефа границ объекта.  $D_1$  – информационная размерность (индекс Шенона  $D_1 = -\sum P_i \ln P_i$ ), дает информацию о вероятности обнаружения в ячейке одной точки множества.  $D_2$  –связана с информацией и вероятностью обнаружить в ячейке две точки множества. При  $q=\infty$ ,  $D_\infty = \ln(1/P_{\max})$  дает информацию и вероятность  $P_{\max}$  об относительной представленности доминирующей структурной фазы множества. При  $q = -\infty$ ,  $D_{-\infty} = \ln(1/P_{\min})$  дает информацию и вероятность  $P_{\min}$  об относительной представленности редкого дефекта множества.  $dD = D_{-\infty} - D_{+\infty}$  - рассматривается как мера скрытой упорядоченности (хаотичности информации о сложности структуры) исследуемого множества. Для однородной фрактальной структуры  $dD = D_{-\infty} - D_{+\infty} = 0$ .

На практике ограничиваются диапазоном параметра  $q = \pm 40$  для получения основных данных о мультифрактальном спектре и мерой скрытой упорядоченности  $dD = D_{-40} - D_{+40}$ .

На нижнем уровне компьютерной модели изображения находится первичная ячейка делительной сетки 3x3 пиксел, объединением первичных ячеек получаем последующие мезоуровни. На мезоуровне ( $J$ ), изображение представляется как множество « $U_J$ » его структурных уровней (связанная информация) и множество « $R_J$ », возможных связей между структурными уровнями (свободная информация). На каждом следующем мезоуровне ( $J+1$ ) информация ячеек делительной сетки содержит информацию предыдущего уровня, что отображается системой вложенных множеств:  $U_j \rightarrow U_{j+1} \rightarrow S_{j+1, j}$ . Связанная информация  $C(S)$  определяется совокупностью статистических данных о состоянии ячеек  $k$  на каждом мезоуровне ( $j$ ) и представляет информационную энтропию структуры.

Переданная информация  $I(S_j)$  представляется как отображение структурной информации нижнего уровня на структуру более высокого иерархического уровня

$$I(S_{j+1}) = C(S_j) + C(S_{j,j+1}),$$

где,  $C(S_{j,j+1})$ -свободная информация, учитывающая корреляционное взаимодействие ячеек мезоуровней [28]. Синергетические механизмы информационных преобразований изображения объекта, согласно В.С. Ивановой, формируют информационную систему  $C(S)$  (модель детерминированного хаоса) структуры исследуемого изображения для определения её динамических свойств [29].

На рис.1 приводится интерфейс компьютерной программы обработки регулярного фрактального множества “Ковер Серпинского”, с бесконечно протяженным периметром элементов и размерностью площади, занятой элементами с фрактальной размерностью Хаусдорфа-Безиковича  $D_0 \approx 1.8928$ .

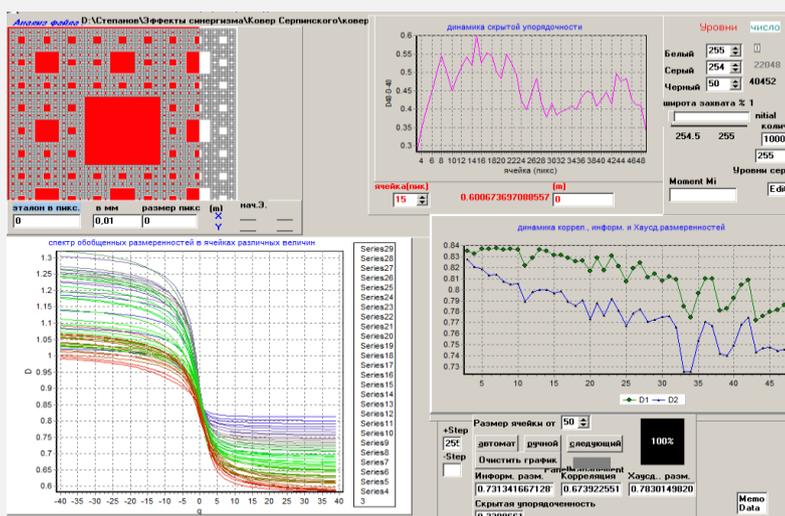


Рис.1. Интерфейс рабочей программы обработки структуры” Ковер Серпинского”.

Интерфейс программы представляет: в левой части - изображение с выделенным анализируемым участком, место размещения файла, справа - числа определяющие диапазон анализа серого на изображении и количество обнаруженных пикселей в заданном диапазоне; по центру –график динамики скрытой упорядоченности; внизу слева спектр мультифрактальных размерностей, внизу справа динамика размерностей  $D_0, D_1, D_2$ , и механизм управления работой программы.

### Обсуждение результатов

В таблицах 1-3 приводятся величины энтропии  $H$  статической и  $H^*$  динамической структур и относительная организованность  $R$  информационной системы изображения роговицы контрольных и экспериментальных животных после полевого воздействия. Энтропия структуры связана с энергией, имеющей две составляющие: свободную и связанную. Согласно первому началу термодинамики, общее количество энергии сохраняется, но изменяется её качество, определяемое соотношением между свободной и связанной энергиями.

Таблица 1. Энтропийные показатели информационной системы роговицы контрольных животных

Параметры	Устойчивое поведение			Неустойчивое поведение	
	$H$	5,17	6,34	5,28	6,75
$H^*$	0,57	3,37	5,12	6,05	3,93
$R$	0,92	0,63	0,33	0,38	0,61

Таблица 2. Энтропийные показатели информационной системы роговицы экспериментальных животных с устойчивым прогностическим типом поведения после полевого воздействия

Пара метры	10 дней ВЭП					
	1	2	3	4	5	6
$H$	6,32	8,2	10,57	5,77	8,6	7,2
$H^*$	0,64	0,66	0,69	0,54	1,33	0,66
$R$	0,93	0,94	0,95	0,93	0,89	0,94

Таблица 3. Энтропийные показатели информационной системы роговицы экспериментальных животных с неустойчивым прогностическим типом поведения после полевого воздействия

Пара метры	10 дней ВЭП					
	14	15	16	17	18	19
$H$	6,63	9,56	6,18	5,86	8,87	5,9
$H^*$	1,94	5,49	0,6	3,08	2,05	2,5

R	0,8	0,6	0,93	0,63	0,84	0,71
---	-----	-----	------	------	------	------

Согласно второму началу термодинамики, процессы преобразования энергии в закрытых системах идут в сторону роста связанной энергии и энтропии. Чем меньше свободная энергия, тем больше энтропия. Свободную энергию называют отрицательной энтропией (негэнтропией). Свободная информация (при отсутствии собственной энергии и энтропии  $H=0$ ) растет пропорционально свободной энергии и конформационной энтропии  $H^*$  динамической структуры:

$$dH^*/dt = \alpha_1 H^*, \text{ где } \alpha_1 > 0.$$

В закрытой системе (при отсутствии свободной энергии и конформационной энтропии  $H^*=0$ ), связанная энергия и информация убывает пропорционально информационной энтропии статической структуры:

$$dH/dt = -\alpha_3 H, \text{ где } \alpha_3 > 0.$$

В открытой системе скорость изменения энтропии информационной системы статической и динамической структур описываются дифференциальными уравнениями нелинейной модели Вольтерры-Лотки [30]:

$$dH^*/dt = \alpha_1 H^* - \alpha_2 H^* H = H^* (\alpha_1 - \alpha_2 H), \quad (1)$$

$$dH/dt = \alpha_2 H^* H - \alpha_3 H = H (\alpha_2 H^* - \alpha_3),$$

где  $\alpha_2$  характеризует взаимосвязь статической и динамической структур.

В замкнутой системе энтропия стремится к максимальной величине, достигая равновесного и стационарного состояния информационной системы:  $H_p = \alpha_1 / \alpha_2$ ,  $H_p^* = \alpha_3 / \alpha_2$ . Равновесное состояние определяется из условия

$\alpha_1 - \alpha_2 H = 0$  и  $\alpha_2 H^* - \alpha_3 = 0$ . В таблице 4 представлены нормированные к единице коэффициенты  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и координата точки стационарного, равновесного состояния математической модели информационной системы роговицы.

Таблица. 4. Координаты стационарного, равновесного состояния информационной системы роговицы животных с устойчивым и неустойчивым типом прогностического поведения и коэффициенты математической модели.

Устойчивый психотип						Неустойчивый психотип					
$H_p^*$	$H_p$	$R_p$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$H_p^*$	$H_p$	$R_p$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
1,25	6,7	0,87	0,973	0,145	0,181	2,0	6,2	0,78	0,941	0,152	0,303

Введем функции  $f(H^*, H)$  и  $g(H^*, H)$  и выполним преобразования дифференциальных уравнений математической модели [31]:

$$dH^*/dt = \alpha_1 H^* - \alpha_2 H^* H = f(H^*, H),$$

$$dH/dt = \alpha_2 H^* H - \alpha_3 H = g(H^*, H),$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t, \Delta t = 1 \text{ сутки},$$

$$H_{n+1} = H_n + 1/6 \cdot (m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4) \cdot \Delta t,$$

$$H^*_{n+1} = H^*_n + 1/6 \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot \Delta t,$$

$$k_1 = f(H^*_n, H_n), m_1 = g(H^*_n, H_n),$$

$$k_2 = f(H^*_n + k_1/2, H_n + m_1/2), m_2 = g(H^*_n + k_1/2, H_n + m_1/2),$$

$$k_3 = f(H^*_n + k_2/2, H_n + m_2/2), m_3 = g(H^*_n + k_2/2, H_n + m_2/2),$$

$$k_4 = f(H^*_n + k_3, H_n + m_3), m_4 = g(H^*_n + k_3, H_n + m_3).$$

При  $n=0$ , времени  $t=0$  начальные значения энтропий  $H(0)$  и  $H^*(0)$  находили усреднением показателей контрольных животных. Проводился расчет показателей энтропии через  $\Delta t = 1$  сутки (табл. 5 и 6).

Таблица 5. Энтропийные показатели детерминированного функционального состояния информационной системы роговицы животных с устойчивым типом прогностического поведения.

$t_n$ , сутки	$H$	$\frac{dH}{dt}$	$H^*$	$\frac{dH^*}{dt}$	$v$	$R$	Квадрант
0	5,6	1,44	3,02	0,48	1,52	0,63	I
1	7,37	2,02	3,14	-0,3	2,04	0,7	II
2	9,31	1,65	2,47	-0,37	1,69	0,82	II
3	10,38	0,44	1,54	-0,82	0,93	0,9	II
4	10,3	0,52	0,9	-0,47	0,7	0,94	II
5	9,53	-0,95	0,56	-0,23	0,98	0,96	III
6	8,52	-1,05	0,4	-0,1	1,05	0,967	III
7	7,49	-1	0,33	-0,04	1,0	0,969	III
8	6,55	-0,95	0,25	0,006	0,95	0,974	IV
9	5,66	-0,8	0,27	0,04	0,8	0,967	IV
10	4,92	-0,65	0,33	0,08	0,66	0,95	IV
11	4,34	-0,5	0,46	0,16	0,52	0,93	IV

12	3,93	-0,32	0,68	0,27	0,42	0,88	IV
13	3,7	-0,12	1,03	0,45	0,46	0,8	IV
14	3,73	0,19	1,6	0,69	0,71	0,7	I
15	4,15	0,69	2,4	0,89	1,13	0,6	I
16	5,23	1,52	3,25	0,7	1,67	0,57	I
17	5,87	1,94	3,53	0,46	2,0	0,58	I

Информационная система роговицы представлена векторным полем скоростей в фазовом пространстве энтропийных параметров  $H$  и  $H^*$ . Точка фазового пространства задает состояние информационной системы роговицы, приложенный в этой точке вектор  $v$  указывает скорость изменения состояния. Вектор скорости  $v = [(dH^*/dt)^2 + (dH/dt)^2]^{1/2}$ . Вектор скорости обращается в ноль в стационарной равновесной точке информационной системы (рис.2.А).

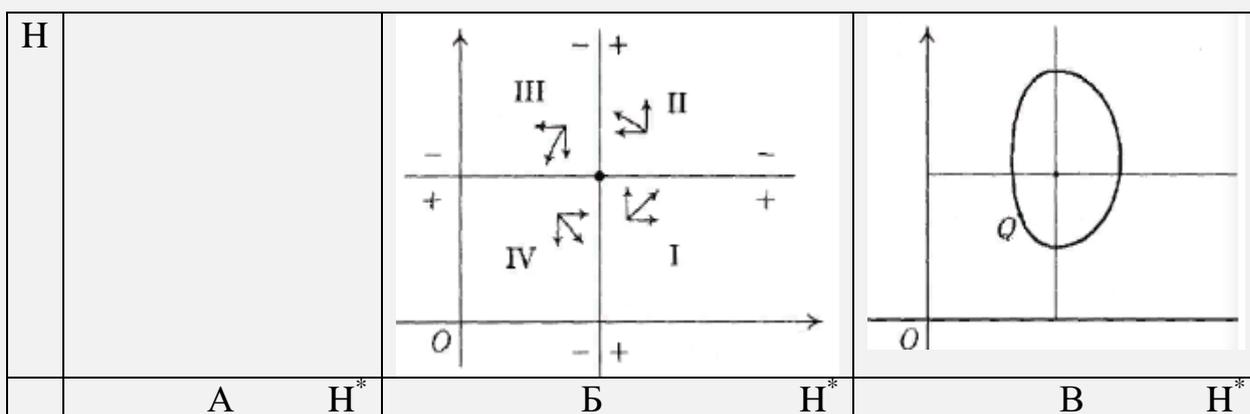


Рис.: 2. А. Стационарное равновесное состояние; 2. Б. Векторное поле скоростей в квадрантах фазового пространства; 2. В. Фазовый портрет информационной системы роговицы, как непрерывность устойчивых состояний, поддерживаемых организмом (прогностический гомеостаз).

Конформационная энтропия  $H^*$  динамической структуры опережает информационную энтропию  $H$  статической структуры, период информационного цикла составляет 17 дней ВЭП. Энтропийные показатели (прогностического гомеостаза) роговицы животных с устойчивым типом поведения представлены в табл. 5. Наименьшая величина организованности  $R=0,57$  наблюдается на 16 сутки в I квадранте.

В каждый момент времени собственная энтропия  $H$  определяется величиной термодинамической движущей силы, равной разности между приростом негэнтропии и собственной энтропии. Положительное энтропийное сальдо означает преобладание в энтропийном балансе производства негэнтропии (свободной информации) над приростом собственной энтропии (связанной

информации), что ведет к уменьшению результирующей энтропии. Отрицательное энтропийное сальдо означает преобладание в энтропийном балансе прироста собственной энтропии над производством негэнтропии, что ведет к увеличению результирующей энтропии. Режим с нулевой термодинамической движущей силой определяет стационарное состояние информационной системы ( $H_{ст.}$ ,  $H_{ст.}^*$ ), в котором прирост собственной энтропии равен приросту негэнтропии:  $\frac{dH}{dt} = -\frac{dH^*}{dt}$ . На рис. 3 кривая линия показывает рост результирующей энтропии, наклон пунктирных касательных, идущих вверх, характеризует прирост собственной энтропии ( $\frac{dH}{dt}$ ) в точках касания, а наклон пунктирных линий, идущих вниз, - скорость производства негэнтропии ( $\frac{dH^*}{dt}$ ). При равенстве этих наклонов режим стационарен, энтропия постоянна (горизонтальные линии). Стационарный режим 1 по сравнению с режимом 2 характеризуется более высокой энтропией и более низким уровнем её производства, при этом режиме в системе меньше свободы (открытости), соответственно, уменьшается число способов организации структуры живой системы (рис. 3).

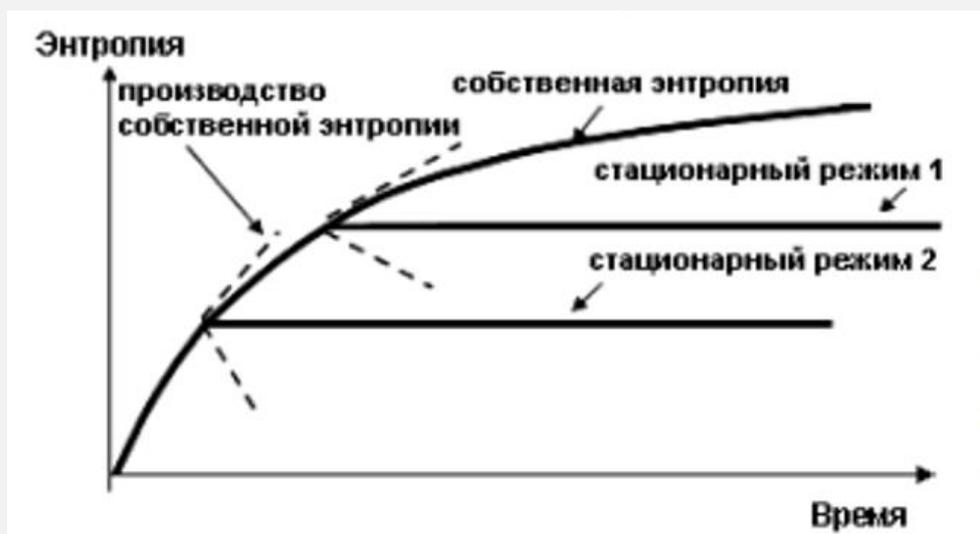


Рис. 3. График роста результирующей энтропии, производство собственной энтропии и негэнтропии

Таблица 6. Энтропийные показатели детерминированного функционального состояния информационной системы роговицы животных с неустойчивым типом прогностического поведения.

$t_n$ , сутки	$H$	$\frac{dH}{dt}$	$H^*$	$\frac{dH^*}{dt}$	$v$	$R$	Квадрант
0	6,87	3,13	4,99	-0,51	3,17	0,5	II
1	9,87	2,32	3,54	-1,98	3,05	0,75	II

2	10,87	-0,3	1,81	-1,29	1,32	0,88	III
3	9,8	-1,58	0,93	-0,51	1,64	0,93	III
4	8,1	-1,7	0,62	-0,18	1,7	0,95	III
5	6,51	-1,46	0,52	-0,03	1,46	0,94	III
6	5,24	-1,15	0,55	0,08	1,15	0,93	IV
7	4,24	-0,84	0,69	0,2	0,87	0,88	IV
8	3,54	-0,54	0,9	0,39	0,67	0,81	IV
9	3,14	-0,24	1,49	0,69	0,73	0,67	IV
10	3,1	0,19	2,39	1,12	1,14	0,47	I
11	3,63	0,95	3,71	1,44	1,73	0,29	I
12	5,17	2,31	4,94	0,77	2,52	0,33	I
13	8,13	3,3	4,66	-1,37	3,57	0,6	II
14	10,64	1,29	2,79	-1,89	2,29	0,82	II

Стационарному состоянию животных с устойчивым типом поведения соответствуют значения энтропии  $H=10,3$  и  $H^*=1,9$ . Пределы изменения энтропии динамической структуры  $H^*=0,9...1,9$  при неизменной величине энтропии статической структуры  $H=10,3$ , представляют норму реакции адаптации животного к условиям внешней среды.

Конформационная энтропия  $H^*$  динамической структуры опережает структурную энтропию  $H$  статической структуры, период информационного цикла составляет 12 дней ВЭП. Энтропийные показатели (прогностического гомеостаза) роговицы животных с неустойчивым типом поведения представлены в табл. 6. Наименьшая величина организованности  $R=0,29$  наблюдается на 11 сутки в I квадранте. Стационарному состоянию животных с неустойчивым типом поведения соответствуют значения энтропии  $H=9,9$  и  $H^*=3,2$ . Пределы изменения энтропии динамической структуры  $H^*=0,9...3,2$  при неизменной величине энтропии статической структуры  $H=9,9$  является нормой реакции адаптации животного к условиям внешней среды.

В таблице 7 представлены величины энтропии стационарных состояний информационной системы статической и динамической структур роговицы животных и физиологические нормы реакции: изменения конформационной энтропии динамической структуры. Стационарному состоянию информационной системы роговицы животного с устойчивым типом

поведения соответствует меньший интервал значений конформационной энтропии  $H_{ст.}^*$  и большая мера относительной организованности  $R_{ст.}$ .

Таблица 7. Энтропийные показатели и физиологические нормы реакции информационной системы стационарного состояния структуры роговицы животных с разным типом прогностического поведения.

Устойчивый психотип				Неустойчивый психотип			
$H_{ст.}^*$	$H_{ст.}$	$R_{ст.}$	Норма реакции	$H_{ст.}^*$	$H_{ст.}$	$R_{ст.}$	Норма реакции
			$H_{ст.}=10,3$				$H_{ст.}=9,9$
1,9	10,3	0,87	$H_{ст.}^*=0,9-1,9$ $R_{ст.}=0,87-0,94$	3,2	9,9	0,77	$H_{ст.}^*=0,9-3,2$ $R=0,77-0,94$

С помощью математической модели определены энтропийные показатели информационной системы роговицы экспериментальных животных после полевого воздействия (табл. 8, 9). Полевое воздействие длительностью 10 дней приводит к нарушению внутреннего состояния роговицы животных с индексом 1 и 2, что сопровождается отрицательной скоростью роста собственной энтропии  $\frac{dH}{dt}$ , уменьшением энтропии статической и динамической структуры информационной системы роговицы по сравнению с физиологической нормой.

Таблица 8. Энтропийные показатели информационной системы и результаты гистологического анализа состояния роговицы экспериментальных животных с устойчивым типом поведения после полевого воздействия.

Индекс крысы	$H$	$\frac{dH}{dt}$	$H^*$	$\frac{dH^*}{dt}$	$v$	$R$	Гистология срезов роговицы	$T$ , сутки
1	6,32	- 0,56	0,64	0,04	0,56	0,93	Роговица без видимых изменений	10
2	8,2	- 0,69	0,66	- 0,14	0,7	0,94	Роговица без видимых изменений	
3	10,57	- 0,85	0,69	- 0,38	0,94	0,95	Признаки хронического воспаления, появление кровеносных сосудов	
7	6,65	6,09	7,57	0,07	6,09	0,21	Под эпителием единичные лимфоциты	20

11	5,27	5,19	8,03	1,67	5,45	- 0,05	Слабая лимфоцитарно- гистиоцитарная инфильтрация	рассеянно
12	6,67	0,02	1,25	0,01	0,02	0,87	Выраженная лимфоцитарно- гистиоцитарная инфильтрация	в поэпителиальном слое, появление щелей в основном веществе
13	6,39	0,26	1,53	0,07	0,27	0,83	Рассеянно-очаговая лимфогистиоцитарная инфильтрация,	в эпителиальном слое увеличение слоев эпителия

Значение конформационной энтропии информационной системы роговицы животного с индексом 3 меньше физиологической нормы. В структуре роговицы отмечаются признаки хронического воспаления (рассеянная лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация) и появление кровеносных сосудов. Влияние размера ячейки  $d$  (масштабная инвариантность) на мультифрактальные параметры изображения роговицы животного с индексами 1 и 3 представлены на рис. 4.

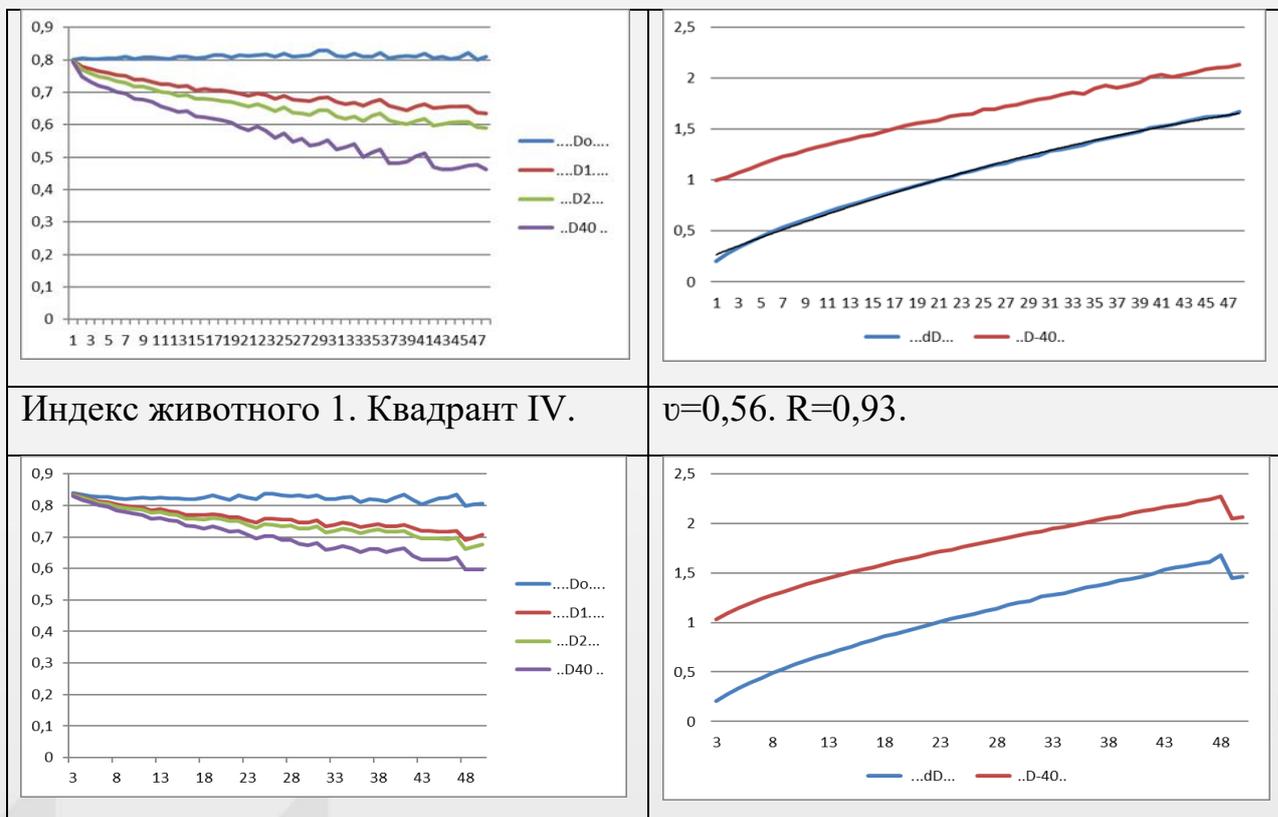
Полевое воздействие длительностью 20 дней превышает период устойчивого цикла. Конформационная энтропия динамической структуры роговицы у животных с индексами 7, 11 значительно превышает, а у животных с индексами 12, 13 находится в интервале физиологической нормы. В ткани роговицы с индексом 7 под эпителием наблюдаются единичные лимфоциты. В ткани роговицы с индексом 11 выявлена слабая лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация. Состояние структуры роговицы соответствует функции возбуждения и переходу на нестационарные информационно-энтропийные уровни  $H^*=7,57-8,0$  с высокой фазовой скоростью  $v=6,09$  и  $v=5,45$ . Относительная организованность информационной системы  $R$  снижается до квазидетерминированной и стохастической функции. Значительный рост фазовой скорости является следствием образования новых интегральных структур в роговице, резонансно взаимодействующих с новой информацией (рис.4).

У животных с индексом 12, 13 фазовая скорость близка к нулю, функциональное состояние информационной системы роговицы приближается к стационарной равновесной точке  $H_p=6,7$ ,  $H_p^*=125$ . Состоянию роговицы представляет опасность выраженная лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация в эпителиальном слое и появление щелей в основном веществе.

В результате полевого воздействия на животных с устойчивым прогностическим типом поведения изменяется функция информационной системы роговицы:

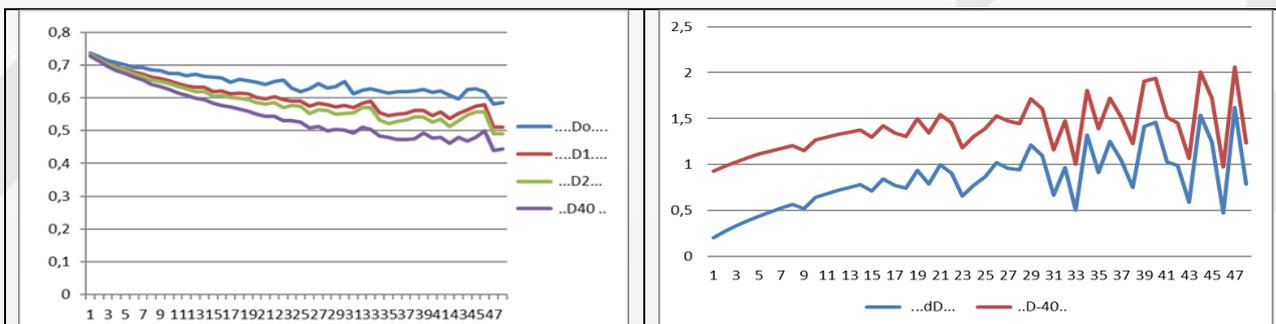
1. Относительная организованность информационной системы детерминированная функция в интервале  $0,73 < R < 0,95$  при длительности воздействия 10 и 20 дней. Изменения энтропии:  $5,0 < H < 8,7$  и  $0,6 < H^* < 3,0$ ;
2. Относительная организованность информационной системы квазидетерминированная функция при  $R=0,21$  наблюдается при длительности воздействия 20 дней. Энтропии равны  $H=6,7$  и  $H^*<7,6$ ;
3. Относительная организованность информационной системы стохастическая (вероятностная) при  $R < 0,1$  наблюдается при длительности воздействия 20 дней. Энтропии равны  $H=5,3$  и  $H^*=8,0$ .

### 10 дней ВЭП

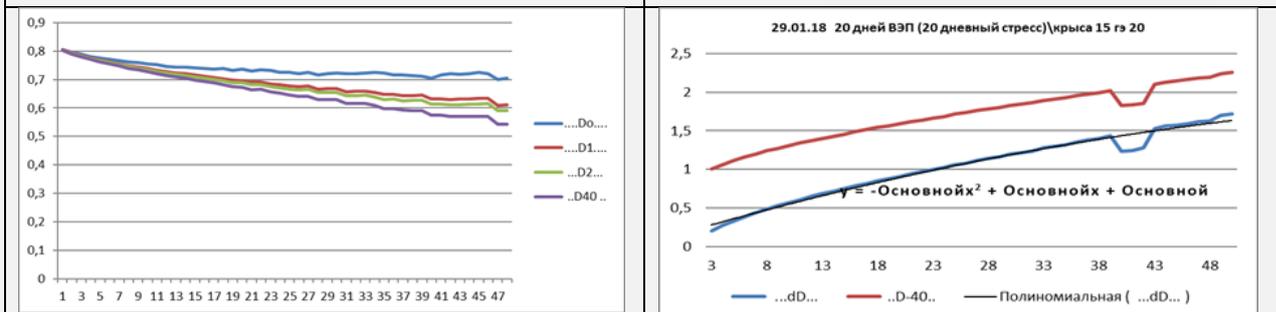


Индекс животного 3. Квадрант III.	$v=0,94. R=0,95.$
-----------------------------------	-------------------

20 дней ВЭП



Индекс животного 7. Квадрант I	$v=6,09. R=0,21.$
--------------------------------	-------------------



Индекс животного 12. Квадрант I.	$v=0,02. R=0,87.$
----------------------------------	-------------------

Рис. 4. Масштабная инвариантность мультифрактальных параметров информационной системы роговицы животных с устойчивым типом поведения.

Таблица 9. Энтропийные показатели информационной системы и результаты гистологического анализа состояния роговицы экспериментальных животных с неустойчивым типом поведения после полевого воздействия.

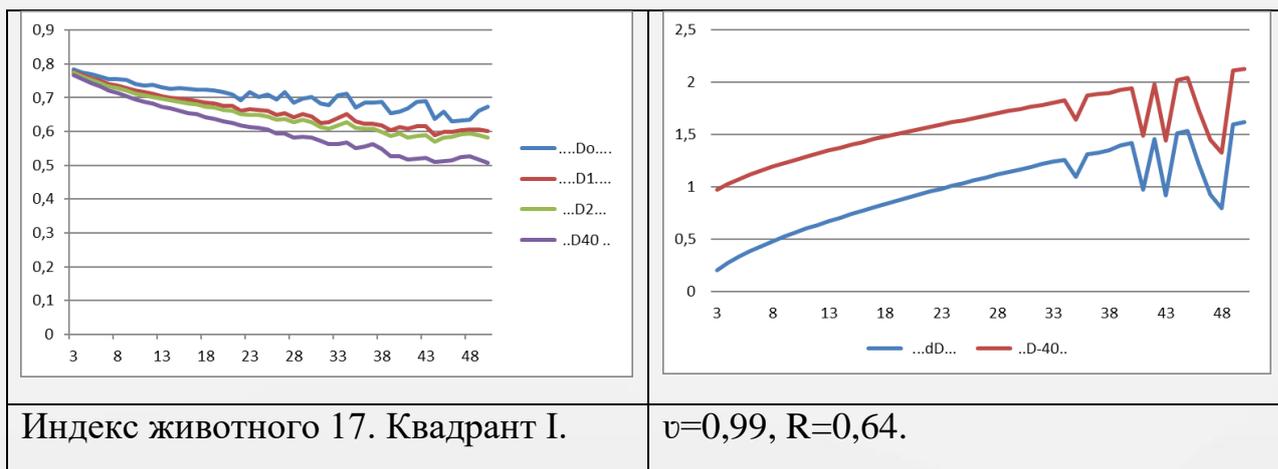
Индекс крысы	N	$\frac{dH}{dt}$	$H^*$	$\frac{dH^*}{dt}$	$v$	R	Гистология срезов роговицы	T, сутки
16	6,18	-1,31	0,6	0,001	1,31	0,93	Начальная лимфоцитарная инфильтрация из зоны лимба, уплотнение основного вещества	10
17	6,0	0,99	3,08	0,08	0,99	0,64	Начальная лимфоцитарная инфильтрация из зоны лимба, появление кровеносных сосудов и	

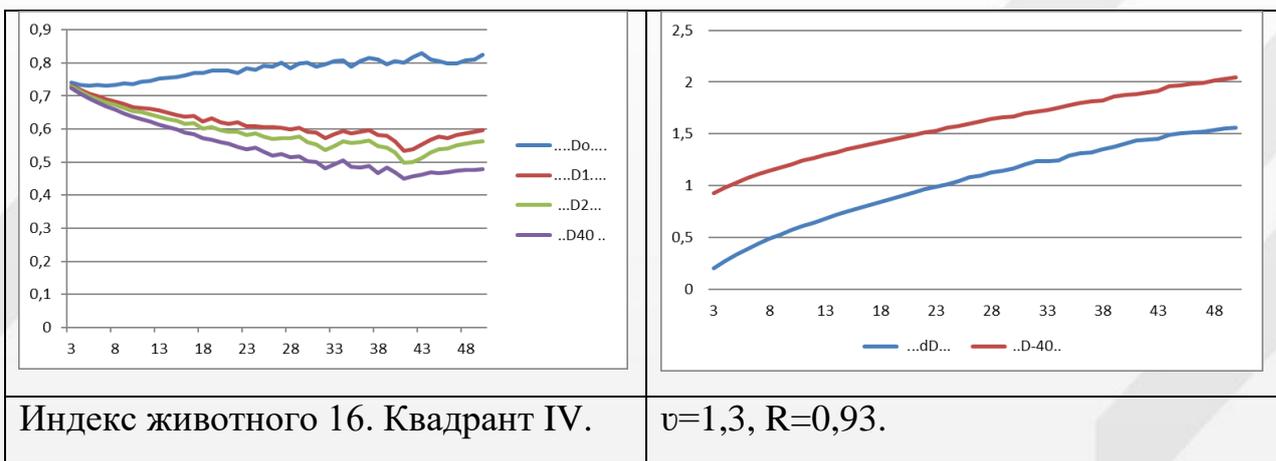
							разволокнение основного вещества	
18	8,87	0,08	2,05	-0,83	0,84	0,84	Уменьшение количества слоев поверхностного эпителия, появление кровеносных сосудов	
20	9,586	5,09	5,49	-2,83	5,82	0,6	Рассеянно-очаговая лимфогистиоцитарная инфильтрация, в эпителиальном слое увеличение количества слоев эпителия	20
21	9,25	0,99	2,7	-1,25	1,59	0,8	Вещество роговицы компактное, уплотненное, поверхностный эпителий истончен (2-3 слоя клеток)	
25	8,18	0,47	2,37	-0,72	0,86	0,8	Лимфоцитарная инфильтрация до 0,5 основного вещества, преимущественно в верхнем слое	

Конформационная энтропия  $H^*$  динамической структуры роговицы у животного с индексом 16 ниже физиологической нормы, а у животных с индексом 17 и 18 энтропия  $H^*$  попадает в интервал физиологической нормы. В роговице с индексом 16 отмечается начальная слабая лимфоцитарная инфильтрация из зоны лимба, уплотнение основного вещества. В роговице животного с индексом 17 отмечается начальная лимфогистиоцитарная инфильтрация из зоны лимба, появление кровеносных сосудов и разволокнение основного вещества роговицы. Влияние размера ячейки  $d$  (масштабная инвариантность) на мультифрактальные параметры изображения роговицы животного с индексами 16 и 17 представлены на рис. 4. Образование участков регулярности при больших масштабах  $d$  можно связать с процессом разволокнения основного вещества. Полевое воздействие 10 дней на животных приводит к нарушению внутреннего

состояния, что замедляет скорость прироста собственной энтропии  $\frac{dH}{dt}$ . Полевое воздействие длительностью 20 дней превышает период устойчивого цикла и приводит к возрастанию конформационной энтропии динамической структуры информационной системы роговицы у животного с индексом 20 выше физиологической нормы и возрастанию фазовой скорости  $v=5,82$ . В роговице отмечается рассеянно-очаговая лимфогистиоцитарная инфильтрация, в эпителиальном слое отмечается увеличение количества слоев эпителия. Образование интегральных структур у животного с индексом 20 сопровождается информационными резонансами (рис. 5). Конформационная энтропия динамической структуры информационной системы роговицы животных с индексом 21, 25 находится в интервале физиологической нормы. В роговице животного с индексом 21 основное вещество компактное, уплотненное, поверхностный эпителий истончен (2-3 слоя клеток). В роговице животного с индексом 25 отмечается лимфоцитарная инфильтрация до  $\frac{1}{2}$  основного вещества, преимущественно в верхнем слое. Прирост производства собственной энтропии и образование новых стационарных состояний при  $(H = 9,2 \text{ и } H^* = 3,0)$  и  $(H = 8,2 \text{ и } H^* = 2,6)$  поддерживает высокий уровень организованности информационной системы роговицы. Механизмом адаптации к полемому воздействию длительностью 20 дней в структуре роговицы животных с неустойчивым типом поведения предполагаем являются процессы разволокнения вещества роговицы, на это указывают наблюдаемые участки регулярности на графиках скрытой упорядоченности  $dD$  при больших масштабах.

### 10 дней ВЭП





**20 дней ВЭП**

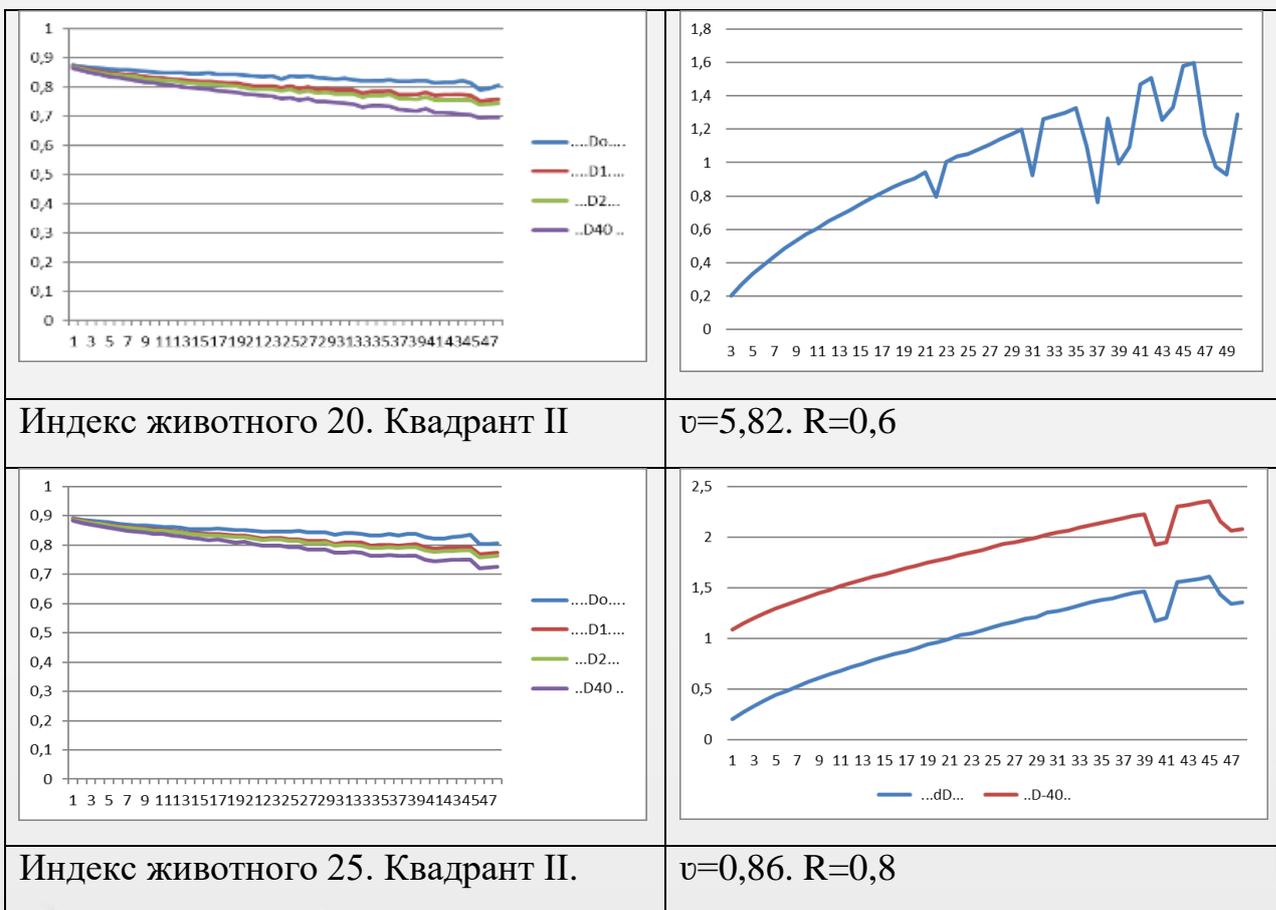


Рис. 5. Масштабная инвариантность мультифрактальных параметров информационной системы роговицы животных с неустойчивым типом поведения.

Наблюдаются изменения функции информационной системы роговицы животного с устойчивым прогностическим типом поведения:

1. Относительная организованность информационной системы детерминированная функция в интервале  $0,73 < R < 0,95$  при длительности воздействия 10 и 20 дней. Изменения энтропии:  $5,0 < H < 8,7$  и  $0,6 < H^* < 3,0$ ;
2. Относительная организованность информационной системы квазидетерминированная функция при  $R = 0,21$  наблюдается при длительности воздействия 20 дней. Энтропии равны  $H = 6,7$  и  $H^* < 7,6$ ;
3. Относительная организованность информационной системы стохастическая (вероятностная) при  $R < 0,1$  наблюдается при длительности воздействия 20 дней. Энтропии равны  $H = 5,3$  и  $H^* = 8,0$ .

### Выводы

1. Построена математическая модель динамической устойчивости состояний (поведенческий гомеостаз) информационной системы роговицы животных и установлены интервалы физиологической нормы реакции адаптации для изучения воздействия вращающегося электрического поля промышленной частоты (50 Гц) на экспериментальных животных с учетом прогностического типа поведения.
2. Вычислены периоды цикличности гомеостаза информационной системы роговицы животных с устойчивым и неустойчивым типом поведения:  $T_{\text{цикл.}} = 17$  дней и  $T_{\text{цикл.}} = 12$  дней соответственно.
3. У животных с устойчивым типом поведения в стационарном состоянии значения энтропии структур: статической  $H_{\text{ст.}} = 10,3$ ; динамической  $H_{\text{ст.}}^* = 1,9$ . Физиологическая норма реакции  $H_{\text{ст.}}^* = 0,9 - 1,9$ .
4. У животных с неустойчивым типом поведения в стационарном состоянии значения энтропии структур: статической  $H_{\text{ст.}} = 9,9$ ; динамической  $H_{\text{ст.}}^* = 3,2$ . Физиологическая норма реакции  $H_{\text{ст.}}^* = 0,9 - 3,2$ .
5. Гистология роговицы животных с устойчивым типом поведения выявляет признаки хронического воспаления (рассеянная

- лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация) и появление кровеносных сосудов, в результате полевого воздействия длительностью 10 дней. Относительная организованность R информационной системы роговицы животных детерминированная функция.
6. После 20 дней полевого действия у животных с устойчивым психотипом наблюдаются детерминированная, квазидетерминированная и стохастическая функции информационной системы роговицы. Гистология роговицы выявляет выраженную лимфоцитарно-гистиоцитарную инфильтрацию, завершающуюся образованием щелей в основном веществе и стохастической функцией информационной системы.
  7. Гистология роговицы животных с неустойчивым типом поведения выявляет признаки хронического воспаления (лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация из зоны лимба), уменьшение количества слоев поверхностного эпителия, появление кровеносных сосудов и разволокнение вещества роговицы в результате полевого воздействия длительностью 10 дней. Относительная организованность R информационной системы роговицы животных детерминированная функция.
  8. После 20 дней полевого действия у животных с неустойчивым психотипом обнаруживаются признаки хронического воспаления (рассеянно-очаговая лимфоцитарно-гистиоцитарная инфильтрация), в эпителиальном слое увеличение количества слоев эпителия. Отмечается возникновение двух новых стационарных состояний: первый режим  $N_{ст.}=8,2$  и  $N^*_{ст.}=2,6$ ; второй режим  $N_{ст.}=9,2$  и  $N^*_{ст.}=3,0$ . Относительная организованность R информационной системы роговицы животных детерминированная функция.
  9. Математическая модель информационной системы роговицы крысы, построенная на основе метода мультифрактальной параметризации, позволяет расширить возможности описания качественных и количественных характеристик процессов адаптации экспериментальных животных в ответ на действие стрессорных факторов, в частности на действие вращающегося электрического поля.

1. Рыбаков Ю.Л. диссертация д.б.н. Общее воздействие на организм слабого низкочастотного вихревого магнитного поля при развитии опухолевого процесса. Москва 2013, 258 с.
2. Зайнаева Т. П., Егоркина С. Б. Влияние вращающегося электрического поля на систему «мать – плацента -плод» у крыс с разной прогностической стрессоустойчивостью // Экология человека. 2016. No 8. С. 3–7.
3. Лаптев Д. С., Егоркина С. Б., Степанов В. А., Белых В. В. Исследование структурных изменений в тканях в условиях вращающегося электрического поля методом фрактальной параметризации.// Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Том 17, No 4, С. 32-40.
4. Лаптев Д.С., Егоркина С.Б., Степанов В.А., Худойкулова Ш.Н., Белых В.В. Оценка функционального состояния жизнедеятельности организма на основе мультифрактального анализа изменений тканей роговицы под воздействием вращающегося электрического поля. Приборостроение в XXI веке-2020. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XVI Всероссийской научно-техн. конференции (Ижевск, 2-4 декабря, 2020 г.) С.104-114.
5. Khudoikulova S.N., Laptev D.S., Egorkina S.B., Stepanov V.A. Belykh V.V. Quantitative Assessment of Stress Adaptation of Experimental Animals to Field Exposure Based on the Entropy Approach. International Journal of Current Research and Review. Scopus Original Research Article, Vol. 12, Issue 22. November 2020. P. 8-14. DOI:<http://dx.doi.org/10.31782/IJCRR.2020.122214>.
6. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 115 с.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Онегаев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука.1994.383с.
8. Чумак О.В. Энтропии и фракталы в анализе данных// Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамики». 2011. 164 с.
9. Большаков В. И., Дубров Ю. И. К установлению вида математической модели сложной системы// Доп. НАНУ. – 20014. – №7. – С. 4 – 9.
10. Mc Cfly JL (2003) Thermodynamic analogies in economics and finance: instability of markets. Physica A 329: 199-212.
1. Берестнева О.Г., Пеккер Я.С., Мурзина С.С. Энтропийные методы в анализе биосистем// Бюллетень сибирской медицины, 2014, том 13, № 4, с. 15–20.

2. *Gao J., Mao X., Zhou M., Gurbaxani B. et al.* (2011) Entropies of Negative Incomes, Pareto-Distributed Loss, and Financial Crises. PLOS ONE 6(10): e25053.doi:10.1371
3. *Gao J., Xu B.* Complex Systems, Emergence, and Multiscale Analysis: A Tutorial and Brief Survey Appl. Sci. (2021), 11, P. 1-62. 5736. <https://doi.org/10.3390/app1112573>
4. *Панченков А.Н.* Энтропия. Н. Новгород. Изд-во «Интелсервис», 1991. 240 с.
5. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. М. ; Ижевск:»Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 528 с.
6. *Кулак М.И.* Фрактальная механика материалов/ М.И. Кулак.-Минск: Выш. шк., 2002.-302 с.
7. *Хакен Г.* Синергетика/ Г. Хакен М.: Мир. 1985. 423 с.
8. *Пригожин И.* Порядок из хаоса/ И. Пригожин, И. Стенгерс. - М.: Эдиториал УРСС. 2001. - 312 с.
9. *Хазен А.М.* Введение меры информации аксиоматическую базу механики.- М.: РАУБ, 1998.- 48 с.
10. *Ежов С.Н.* Основные концепции биоритмологии// Вестник ТГЭУ. №2. 2008. С. 104-121
11. *Шмальгаузен И.И.* Основы эволюционного процесса в свете кибернетики. Проблемы кибернетики, 1960, №4. С. 121-150.
12. *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.
13. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время. Хаос. Квант. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 239 с.
14. *Белых В.В., Муравьев В.В., Степанов В.А.* Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств// Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. Т.23. №3. 2020. С. 15-24. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24.
15. *Бир С.* Кибернетика и менеджмент/ С. Бир.- Москва: Дом Книга, 2010.-280 с.
16. *Иванников В.П., Степанов В.А., Белых В.В., Суфиянов В.Г.* Фрактальный анализ рентгенограмм // Вестник-ИжГТУ. №3. 2009. – С. 150-154.
17. *Божокин С.В.* Фракталы и мультифракталы/С.В. Божокин, Д.А. Паршин.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».-2001.-128 с.

18. Беркович С.Я. Клеточные автоматы как модель реальности. Поиск новых представлений физических и информационных процессов. М. 1993г.
19. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф.// Материаловедение, Вестник ВГУ, 1999, вып.16, Воронеж. С.;6-51.
20. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели в управлении: Учеб. пособие. - М.: Дело, 2000. - 440 с.
21. Enns. R.H. It's a Nonlinear World, DOI 10, 1007/978-0-387-75340-9 Springer Science + Business Media, LLC 2011, 383P.

### Reference

1. Rybakov YU.L. *Obshchee vozdeistvie na organizm slabogo nizkochastotnogo vikhrevogo magnitnogo polya pri razvitii opukholevogo protsesssa* [The general effect on the body of a weak low-frequency vortex magnetic field during the development of the tumor process]: PhD thesis. Moscow, 2013, 258 p. (in Russ.).
2. Zainaeva T. P., Egorkina S. B. [The effect of a rotating electric field on the mother-placenta-fetus system in rats with different prognostic stress resistance]. *Ehkologiya cheloveka*. 2016. No. 8. pp. 3–7. (in Russ.).
3. Laptev D. S., Egorkina S. B., Stepanov V. A., Belykh V. V. [Investigation of structural changes in tissues under conditions of a rotating electric field by fractal parameterization]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17, no 4, pp. 32-40. (in Russ.).
4. Laptev D.S., Egorkina S.B., Stepanov V.A., Khudoikulova SH.N., Belykh V.V. Otsenka funktsional'nogo sostoyaniya zhiznedeyatel'nosti organizma na osnove mul'tifraktal'nogo analiza izmenenii tkanei rogovitsy pod vozdeistviem vrashchayushchegosya ehlektricheskogo polya [Assessment of the functional state of the vital activity of the organism on the basis of a multifractal analysis of changes in corneal tissues under the influence of a rotating electric field]. *Izhevsk, IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ.* 2020,) pp.104-114. (in Russ.).
5. Khudoikulova S.N., Laptev D.S., Egorkina S.B., Stepanov V.A. Quantitative Assessment of Stress Adaptation of Experimental Animals to Field Exposure Based on the Entropy Approach. *International Journal of Current Research and Review. Scopus Original Research Article*, Vol. 12, Issue 22. November 2020. P. 8-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.31782/IJCRR.2020.122214>

6. Vstovskii G.V., Kolmakov A.G., Bunin I.ZH. [Introduction to multifractal parametrization of material structures]. Izhevsk. Nauchno - issledovatel'skii tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2001, 115 p. (in Russ.).
7. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.ZH., Onegaev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 383p. (in Russ.).
8. Chumak O.V. *Ehntropii i fraktaly v analize dannykh* [Entropies and fractals in data analysis]. Izhevsk, Nauchno - issledovatel'skii tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2011, 164 p. (in Russ.).
9. Bol'shakov V. I., Dubrov YU. I. [To establish the type of mathematical model of a complex system]. *Dop. NANU*, 20014, no.7, pp. 4 – 9. (in Russ.).
10. Mc Cfully JL (2003) Thermodynamic analogies in economics and finance: instability of markets. *Physica A* 329: 199-212.
11. Berestneva O.G., Pekker YA.S., Murzina S.S. [Entropic methods in the analysis of biosystems]. *Byulleten' sibirskoi meditsiny*, 2014, vol.13, no. 4, pp. 15–20 (in Russ.).
12. Gao J., Mao X., Zhou M., Gurbaxani B. et al. (2011) Entropies of Negative Incomes, Pareto-Distributed Loss, and Financial Crises. *PLOS ONE* 6(10): e25053. doi:10.1371
13. Gao J., Xu B. Complex Systems, Emergence, and Multiscale Analysis: A Tutorial and Brief Survey *Appl. Sci.* (2021), 11, P. 1-62. 5736. <https://doi.org/10.3390/app1112573>
14. Panchenkov A.N. *Ehntropiya* [Entropy.] N. Novgorod. Izd-vo «Intelservis», 1991. 240 p. (in Russ.).
15. Schroeder M. *Fraktaly, khaos, stepennye zakony* [Fractals, chaos, power laws]. Moscow, Izhevsk Nauchno - issledovatel'skii tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika». - 2001. – 528 p. (in Russ.).
16. Kulak M.I. *Fraktal'naya mekhanika materialov* [Fractal mechanics of materials]. Minsk. Vysshaya shkola, 2002. 302 p. (in Russ.).
17. Khaken G. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow. Mir. 1985. 423 p. (in Russ.).
18. Prigozhin I. Stengers I. *Poryadok iz khaosa* [Order from Chaos]. Moscow. Ehditorial URSS. 2001. - 312 p. (in Russ.).
19. Hazen A.M. *Vvedenie mery informatsii aksiomaticheskuyu bazu mekhanik* [Introduction of the measure of information into the axiomatic base of mechanics]. Moscow, RAUB, 1998, 170 p. (in Russ.).

20. Ezhov S.N. [Basic concepts of biorhythmology]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo ehkonomicheskogo universiteta*, no. 2, 2008. pp. 104-121. (in Russ.).
21. Shmal'gauzen I.I. *Osnovy ehvolyutsionnogo protsessa v svete kibernetiki. Problemy kibernetiki no. 4* [Fundamentals of the evolutionary process in the light of cybernetics. Problems of cybernetics no. 4]. Moscow, The science Publ., 1960, pp. 121-150. (in Russ.).
22. Prangishvili I.V. *Ehntropiinye i drugie sistemnye zakonomernosti: Voprosy upravleniya slozhnymi sistemami* [Entropy and other system patterns: Issues of management of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 428 p. (in Russ.).
23. Prigozhin I., Stengers I. *Vremya. Khaos. Kvant* [Time. Chaos. Kvant.]. Moscow, Editorial URSS, 2000. 239 p. (in Russ.).
24. Belykh V.V., Murav'ev V.V., Stepanov V. A. [Entropy Assessment of the Quality and Resource of the Steel Structure Functional Properties]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T.Kalashnikova*, vol..23, no.,3, 2020, Pp. 15-24. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24. (in Russ.).
25. Bir S. *Kibernetika i menedzhment* [Cybernetics and management]. Moscow, Dom Kniga Publ., 2010, 280 p. (in Russ.).
26. Ivannikov V.P., Stepanov V.A., Belykh V.V., Sufianov V.G. [Fractal analysis of radiographs]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T.Kalashnikova*, vol.. 3. 2009. – pp. 150-154. (in Russ.).
27. Bozhokin S.V. Parshin D. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals.]. *Izhevsk Nauchno - issledovatel'skii tseñtr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika»*. 2001.-128 p. (in Russ.)
28. Berkovich S.Ya. *Kletochnye avtomaty kak model' real'nosti. Poisk novykh predstavlenii fizicheskikh i informatsionnykh protsessov* [Cellular automata as a model of reality. The search for new representations of physical and information processes]. Moscow. Publishing House of Moscow State University, 1993.-112 p. (in Russ.).
29. Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Terentyev V.F. [Materials Science]. Voronezh. *Vestnik VSU*, 1999, no. 16, pp.;6-51. (in Russ.).
30. Shikin E.V., Chkhartishvili A.G. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii* [Mathematical methods and models in management]. Moscow, Delo Publ, 2000. 440 p.