

УДК 577.3:612.65:621.391

А. В. СИДОРЕНКО<sup>1</sup>, Г. И. ОВСЯНКИНА<sup>2</sup>, Н. А. СОЛОДУХО<sup>1</sup>, М. А. ЖАЛКОВСКИЙ<sup>1</sup>

## НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕМОТЕРАПИИ

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск,

<sup>2</sup>Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь

(Поступила в редакцию 08.07.2013)

**Введение.** В последнее время все большее внимание уделяется методам стимулирующего действия лазерного излучения при заболеваниях, характеризующихся длительностью восстановления и рефрактерностью к проводимой терапии.

Практически все существующие концепции первичного механизма действия низкоинтенсивного лазерного излучения на биологические объекты основываются на предположении о фотохимической природе этого явления [1, 2]. В настоящее время выдвигается гипотеза, основанная на представлении о действии градиентных сил на клетки и органеллы, возникающих при наличии пространственных градиентов интенсивности излучения. Результаты исследований, проведенных в Республике Беларусь, свидетельствуют о том, что фотоакцептором, избирательно поглощающим излучение с длиной волны 632,8 мкм в крови, является гемоглобин [3].

В основе позитивного клинического эффекта низкоинтенсивного лазерного излучения лежит его способность стимулировать разнообразные процессы защиты, адаптации и репарации, т. е. механизмы саногенеза. Адаптогенное действие низкоинтенсивного лазерного излучения реализуется на клеточном, тканевом и системном уровнях организации живых систем [4].

Одним из наиболее распространенных способов воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на организм является лазерная гемотерапия, которая относится к перспективным методам лечения больных компрессионной ишемической нейропатией [5].

Использование информационных технологий и нелинейных методов анализа позволяет выявить новые элементы для диагностики функциональных состояний центральной нервной системы при лечении больных компрессионной ишемической нейропатией лазерным излучением.

Для обработки и анализа электроэнцефалограмм пациентов в настоящей работе использован один из методов нелинейной динамики – метод задержанной координаты. Этот метод успешно применен нами для анализа электроэнцефалографических сигналов у пациентов с нарушением мозгового кровообращения [6], при спастической кривошее [7], а также для изучения излучений мобильной связи при наличии защитных радиопоглощающих экранов [8].

Цель работы – исследование и нелинейный анализ электроэнцефалограмм пациентов с компрессионной ишемической нейропатией в процессе проведения лечебных процедур с помощью лазерной гемотерапии для получения качественных и количественных параметров, характеризующих функциональное состояние центральной нервной системы.

**Методика проведения исследований.** При регистрации электроэнцефалограмм по схеме «10/20» использован компьютерный электроэнцефалограф МБН 20 производства научно-медицинской фирмы «МБН». Обработку зарегистрированных электроэнцефалограмм осуществляли в разработанном нами информационно-измерительном комплексе [9]. В процессе исследований обработаны электроэнцефалограммы 20 пациентов в восьми отведениях:  $Fp_1-A_1$ ,  $Fp_2-A_2$ ,  $C_3-A_1$ ,  $C_4-A_2$ ,  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$ ,  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$ . Электроэнцефалограммы обрабатывали при обращении пациентов в клинику и после проведения курса гемотерапии. При гемотерапии осуществляли вну-

тривенное лазерное облучение крови с помощью аппарата «Люзар МП». Длина волны и выходная мощность излучения составляли 0,67 мкм и 3–4 мВт соответственно. Курс лечения включал 7–8 процедур длительностью 15 мин.

В процессе обработки электроэнцефалограмм с помощью метода задержанной координаты и спектрального корреляционного анализа проводили построение фазовых портретов, а также рассчитывали параметры корреляционной размерности, энтропии Колмогорова, спектральной плотности мощности и ее распределения в частотных диапазонах ритмических составляющих мозга (дельта-, тета-, альфа-, бета-, гамма-диапазонах). Достоверность определения параметров определяли методом дискриминационной статистики. Достоверными при обработке цифровых данных считали результаты при вероятности ошибки  $p < 0,05$ .

Метод задержанной координаты, в отличие от традиционных методов анализа электроэнцефалограмм, включая спектральный корреляционный, разработан для нестационарных сигналов и позволяет учитывать нелинейности, свойственные электрофизиологическому сигналу. Анализ временной реализации сигнала, зависящего от одной переменной, позволяет восстановить структуру динамической системы в фазовом пространстве, которое характеризуется корреляционной размерностью и энтропией Колмогорова. Алгоритм метода задержанной координаты, описанный в работе [10], был адаптирован нами в работе [9].

**Результаты и их обсуждение.** Проведенные исследования показали, что практический интерес представляют электроэнцефалограммы отведений  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$ ,  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$ .

Анализ фазовых портретов, построенных по электроэнцефалограммам, позволил выделить две группы пациентов (рис. 1, 2).

У пациентов I группы в результате лечения наблюдаемые изменения в фазовых портретах сводятся к увеличению области локализации как для электроэнцефалограмм отведений  $O_1-A_1$ ,

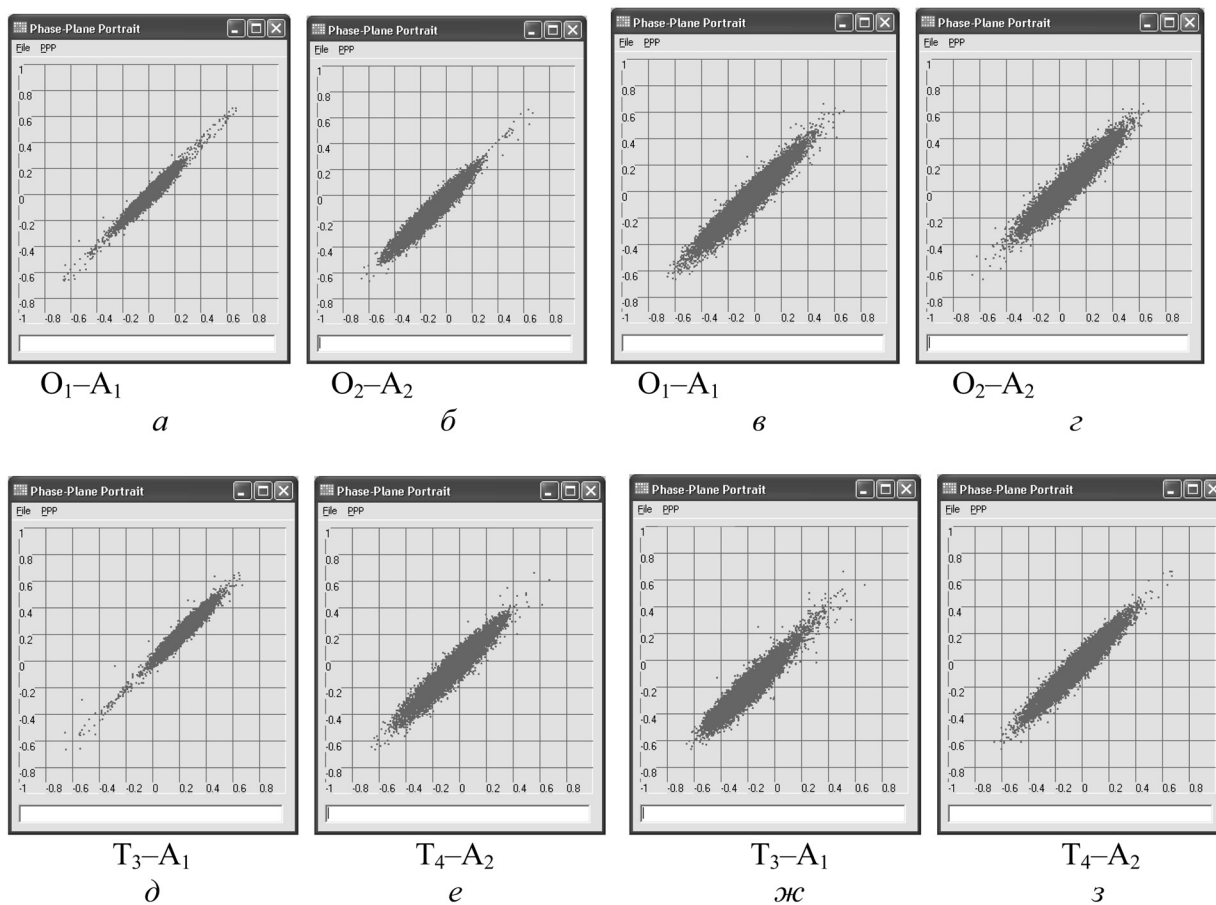


Рис. 1. Фазовые портреты электроэнцефалограмм пациентов I группы: до проведения курса гемотерапии (а, б, д, е) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$  и после проведения курса гемотерапии (в, г, ж, з)

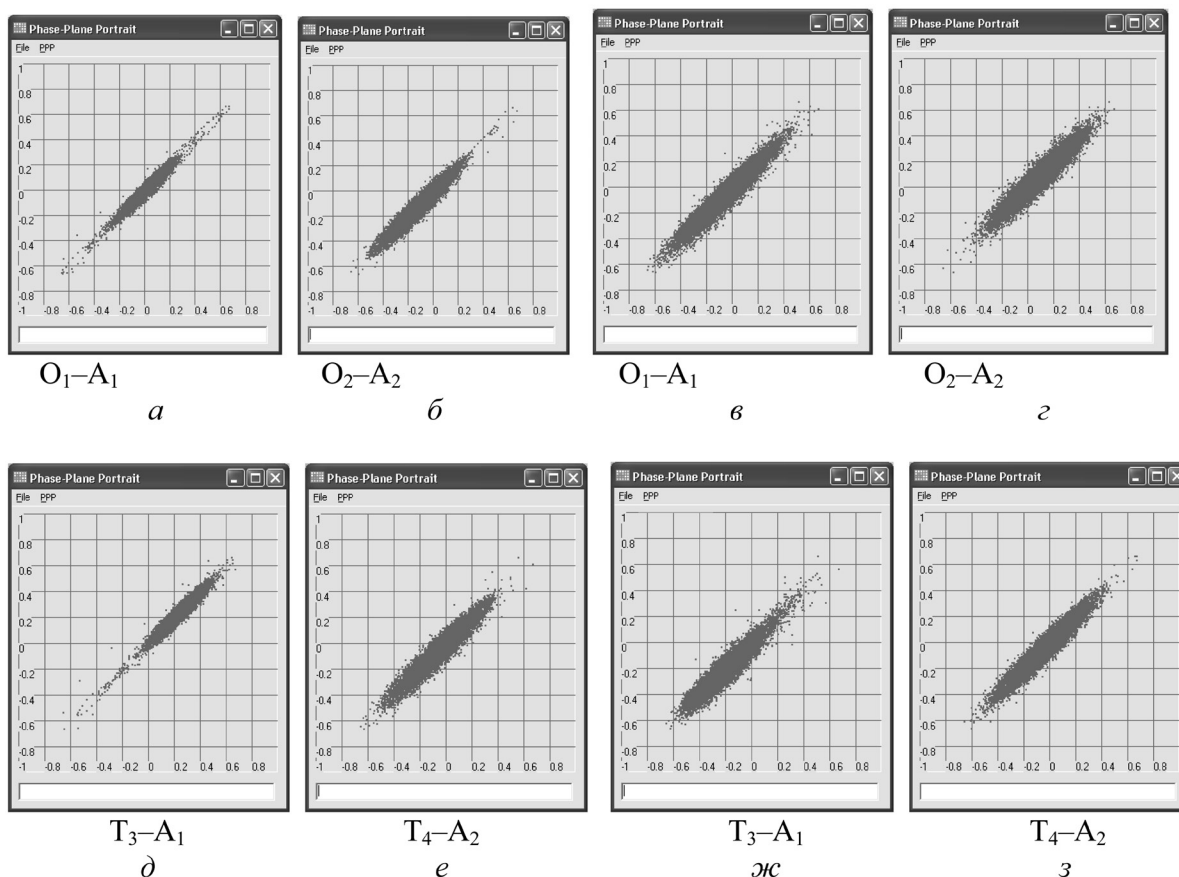


Рис. 2. Фазовые портреты электроэнцефалограмм пациентов II группы: до проведения курса гемотерапии (а, б, д, е) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$  и после проведения курса гемотерапии (в, г, ж, з)

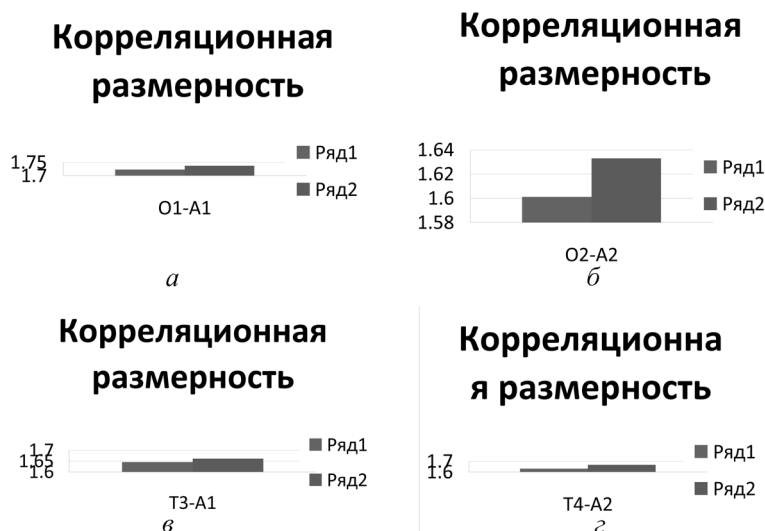


Рис. 3. Гистограммы распределений корреляционной размерности  $d$  электроэнцефалограмм пациентов I группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (а-г) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$

$O_2-A_2$ , так и электроэнцефалограмм отведений  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$  (рис. 1). Во II группе в фазовых портретах электроэнцефалограмм для отведений  $O_1-A_1$  происходит увеличение области локализации, а для электроэнцефалограмм  $T_3-A_1$  наблюдается деформация эллипсоидной формы со смещением вверх. Также отмечается «размытость» эллипсоидной формы для электроэнцефалограмм как для отведений  $O_2-A_2$ , так и для отведений  $T_4-A_2$ .

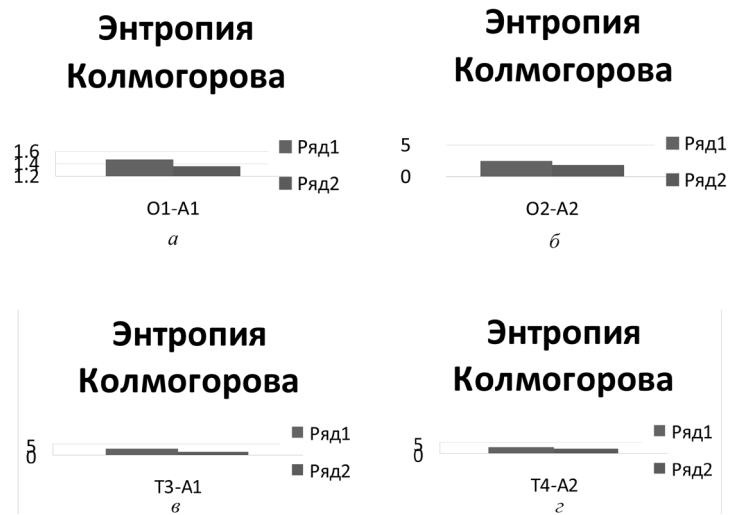


Рис. 4. Гистограммы распределений энтропии Колмогорова  $E$  электроэнцефалограмм пациентов I группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (*a–г*) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$

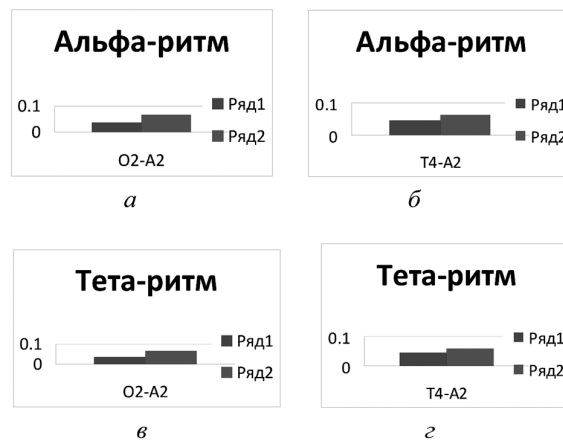


Рис. 5. Гистограммы распределений спектральной плотности мощности альфа- и тета-ритмов электроэнцефалограмм пациентов I группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (*a–г*) в отведениях  $O_2-A_2$  и  $T_4-A_2$

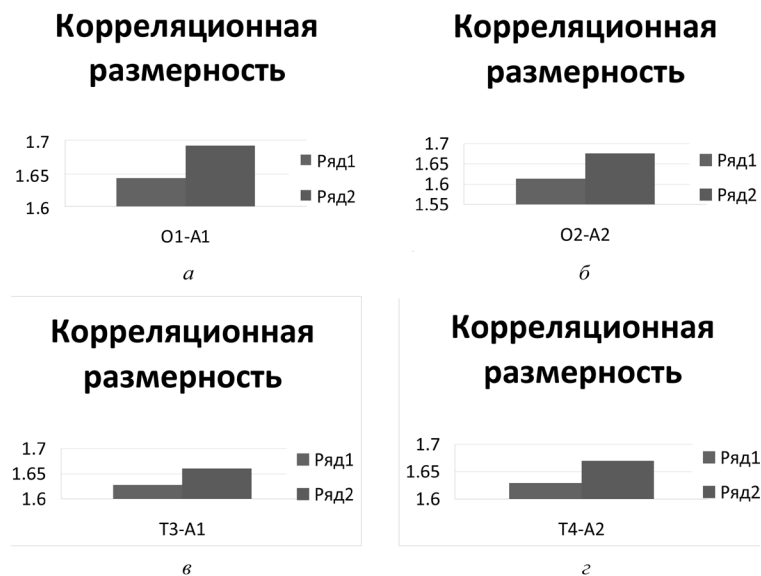


Рис. 6. Гистограммы распределений корреляционной размерности  $d$  электроэнцефалограмм пациентов I группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (*a–г*) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$

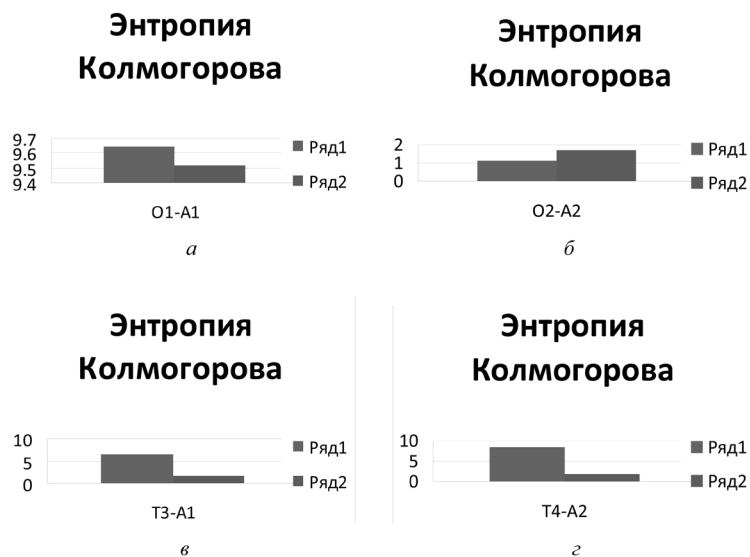


Рис. 7. Гистограммы распределений энтропии Колмогорова  $E$  электроэнцефалограмм пациентов II группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (а–г) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$

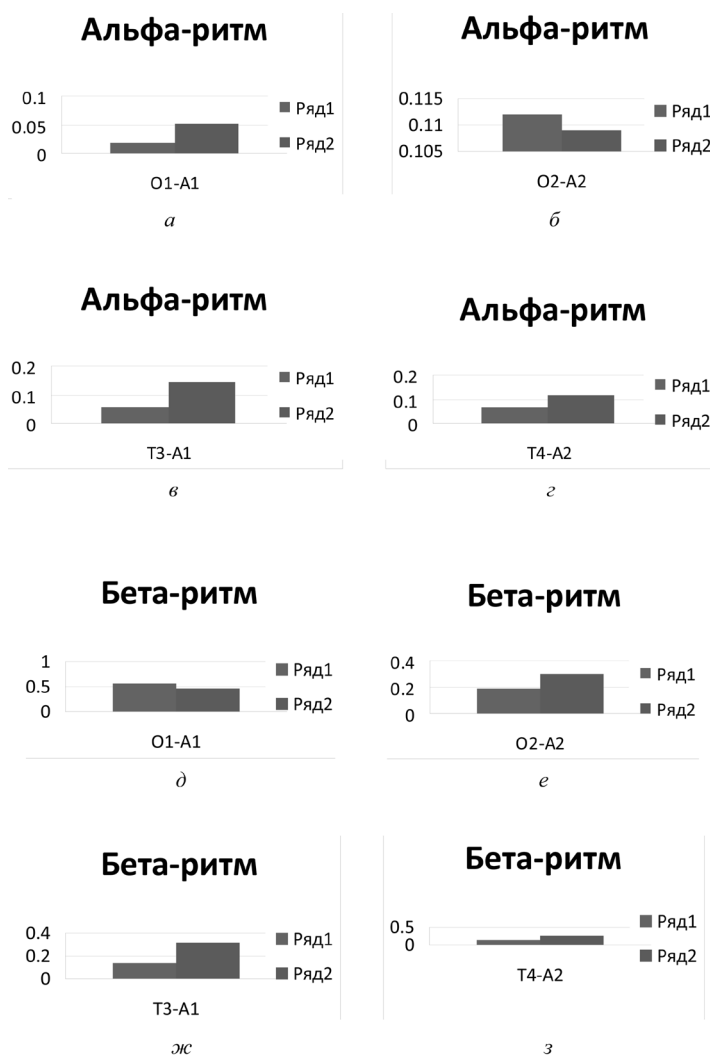


Рис. 8. Гистограммы распределений спектральной плотности мощности альфа- и бета-ритмов электроэнцефалограмм пациентов II группы до (ряд 1) и после (ряд 2) проведения курса гемотерапии (а–г) в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $O_2-A_2$  и  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$

Фазовые портреты электроэнцефалограмм для пациентов II группы приведены на рис. 2.

Такие изменения в процессе лечения подтверждаются количественными параметрами.

Параметры электроэнцефалограмм, рассчитанные методом задержанной координаты для пациентов I группы, представлены в виде гистограмм распределения корреляционной размерности  $d$  (рис. 3), энтропии Колмогорова  $E$  (рис. 4), а также спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-ритмов (рис. 5).

У пациентов I группы в результате лечения отмечается возрастание корреляционной размерности от 0,8 до 2,2 %; энтропия Колмогорова падает с 7,4 до 43,9 %. Это свидетельствует об увеличении стабильности динамических систем [11], восстановленных по электроэнцефалограммам, в результате проведенного лечения. У пациентов I группы наблюдается увеличение спектральной плотности мощности тета- и альфа-ритмов в отведениях  $O_2-A_2$ ,  $T_4-A_2$  (рис. 5).

У пациентов II группы отмечаются другие закономерности. В результате проведенной гемотерапии в электроэнцефалограммах корреляционная размерность по отношению к фону увеличивается от 2 до 3,9 %; энтропия Колмогорова снижается, соответственно, в отведениях  $O_1-A_1$  и  $T_3-A_1$  с 2 до 75 %, а в отведении  $O_2-A_2$  наблюдается ее увеличение (рис. 6, 7). Спектральная плотность мощности альфа- и бета-ритмов возрастает в отведениях  $O_1-A_1$ ,  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$ ;  $T_3-A_1$ ,  $T_4-A_2$  соответственно; в отведениях  $O_2-A_2$ ,  $T_4-A_2$  спектральная плотность альфа-ритма падает, а бета-ритма – возрастает (рис. 8).

**Заключение.** Результаты проведенных исследований показали, что при лазерной гемотерапии реакция организма пациентов с компрессионной ишемической нейропатией проявляется в изменении функционального состояния центральной нервной системы. Анализ электроэнцефалограмм разных пациентов показал, что изменения функционального состояния центральной нервной системы пациентов при этом могут быть проанализированы в динамике и охарактеризованы количественно с помощью параметров корреляционной размерности и энтропии Колмогорова, что позволяет оценить эффективность проводимого лечения. Результаты, полученные методом задержанной координаты, подтверждают улучшение интеграционных процессов головного мозга пациентов с компрессионной ишемической нейропатией.

## Литература

1. Лазерная физика и применение лазеров: материалы междунар. конф., Минск, 14–16 мая 2003 г. Минск, 2003.
2. Улащик В. С., Волотовская А. В., Слобожанина А. В. // Лазерная медицина. 2005. № 1. С. 4–9.
3. Марочков А. В. Внутрисосудистое лазерное облучение крови, механизмы взаимодействия и клиническое применение. Минск, 1996.
4. Михайлова Е. В. // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2000. № 2. С. 38–40.
5. Волотовская А. В. Мембраноклеточные эффекты лазерного облучения крови (экспериментально-клиническое исследование): автореф. ... дис. канд. мед. наук. Минск, 2001.
6. Sidorenko A. V., Ovsynkina G. I., Solonovich N. F. // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2006. Vol. 9, N 1. P. 97–104.
7. Лихачев С. А., Сидоренко А. В., Овсянкина Г. И. и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. мед. навук. 2009. № 3. С. 31–38.
8. Сидоренко А. В., Лыньков Л. М., Овсянкина Г. И. и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. мед. навук. 2010. № 4. С. 57–65.
9. Сидоренко А. В. Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов. Минск, 2003.
10. Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50, N 5. P. 346–349.
11. Анищенко В. С., Астахов В. В., Вадивасова Т. Е. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. М.; Ижевск, 2003.

*A. V. SIDORENKO, G. I. OVSYANKINA, N. A. SOLODUKHO, M. A. ZHALKAVSKY*

## NONLINEAR ANALYSIS OF ELECTROENCEPHALOGRAMS OF NEUROLOGICAL PATIENTS USING LASER HEMOTHERAPY

### Summary

It is shown that during laser hemotherapy the body reaction of patients with compression ischemic neuropathy manifests itself in the changes of the functional state of the central nervous system. The analysis of the electroencephalograms of different patients has shown that the changes in the functional state of the central nervous system of patients can be analyzed in dynamics and characterized quantitatively using parameters the correlation dimension and the Kolmogorov entropy, which enables one to assess the treatment efficiency. The results obtained by the delayed coordinate method support the improvement of the brain processes of patients with compression ischemic neuropathy.