

УДК 544.431:537.877

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОГО
ОКИСЛЕНИЯ ЦИСТЕИНА В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ
ПО МЕТОДУ ФЛИККЕР-ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ****Етмишева С.С., Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М.***ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», Махачкала,
e-mail: sophi05@yandex.ru, ukhgmag@mail.ru, ugga74@mail.ru, hmgas@mail.ru*

В сообщении приведены результаты по оценке параметров динамики ранее неизученной гомогенной колебательной реакции, протекающей в системе цистеин – оксигенированные комплексы кобальта (II) с *o*-дисалицилиденфенилендиамином и цитозином методом фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС). Применение метода фликкер-шумовой спектроскопии позволяет использовать шум в качестве источника информации о процессах, происходящих в исследуемых системах, на микроскопическом уровне. Данный метод анализа временных рядов позволяет придать информационную значимость хаотическим сигналам, порождаемым неравновесными нелинейными системами. Следует отметить, что ФШС-метод описывает динамику процесса в сложных нелинейных диссипативных системах на основе определенного набора физических параметров, отражающих внутренние динамические свойства исследуемой системы, получаемых из экспериментально измеряемых данных. Экспериментальное изучение анализируемых процессов проводили в виде регистрации изменения потенциала точечного платинового микроэлектрода относительно хлорсеребряного в течение времени. Показано, что полученные временные последовательности для всех условий эксперимента могут быть проанализированы на основе описания их определенным набором параметров, характеризующим особенности внутренней структуры исследуемой динамической системы. При этом одна группа параметров характеризует самоподобие в корреляционных связях среди «нерегулярностей-всплесков», а другая группа паспортных данных несет в себе информацию о корреляционных связях среди «нерегулярностей-скачков». Показано, что временная последовательность для каждого случая имеет свой набор параметров, что позволяет установить «паспортные» данные исследуемых временных рядов и их индивидуальность. Отмечено, что экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в гомогенной системе цистеин-оксигенированные координационные соединения кобальта (II) с *o*-ДСФДА и *Cyt* реализуется детерминированный хаос.

Ключевые слова: цистеин, катализатор, окисление, комплексы кобальта (II), *o*-дисалицилиденфенилендиамин, цитозин, колебания, динамический хаос

**ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE CATALYTIC OXIDATION
OF CYSTEINE IN THE VIBRATIONAL MODE BY THE METHOD
OF FLICKER-NOISE SPECTROSCOPY****Etmisheva S.S., Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M.***Dagestan State University, Makhachkala, e-mail: sophi05@yandex.ru,
ukhgmag@mail.ru, ugga74@mail.ru, hmgas@mail.ru*

The results of evaluation of the parameters of the dynamics of previously unexplored homogeneous vibrating reaction, occurring in the system of cysteine-oxygenated cobalt (II) complexes with *o*-disalicylidene-phenylenediamine and cytosine by flicker-noise spectroscopy (FNS), have been provided. The application of the method of flicker noise spectroscopy allows to use noise as a source of information about the processes in the systems under study at the microscopic level occurring. The method of analyzing time series allows giving the informational significance to chaotic signals generated by non-equilibrium nonlinear systems. It should be noted that the FNS method describes the dynamics of the process in complex nonlinear dissipative systems based on a specific set of physical parameters, which are determined from experimentally measured data and reflect the internal dynamic properties of the system under study. An experimental study of analyzed processes in the system under study was performed by registration of the change of a point platinum microelectrode potential with respect to silver chloride within particular period of time. It is shown that the time series analyzed for all of the experimental conditions can be analyzed on the base of description their specific set of parameters which is characterizing the features of the internal structure of the dynamical system under study. At the same time, one of the groups of parameters characterizes self-similarity in correlations among the most abrupt «irregularities-bursts», while the another group of passport data carries information about correlations among the «irregularities-jumps». It was shown that the time sequence for each case has its own set of parameters, which is allowing us to establish the «passport» data of the time series under study and their individuality. It was noted that the experimental results are confirming the data of the deterministic chaos realization during the homogeneous oxidation of cysteine in the presence as a catalyst of coordination compounds of cobalt (II) with *o*-disalicylidene-phenylenediamine, cytosine and molecular oxygen.

Keywords: cysteine, catalyst, oxidation, cobalt (II) complexes, *o*-disalicylidene-phenylenediamine, cytosine, oscillations, dynamic chaos

Нами получено [1], что каталитическое окисление (*Cys*, *R*) цистеина в присутствии смешаннолигандных координационных соединений кобальта (II) с *o*-дисалицилиден

фенилендиамином (*o*-ДСФДА), цитозином (*Cyt*) и молекулярным кислородом в водной среде протекает в колебательном режиме. При анализе критических явлений в обсуж-

даемой системе [1] методами нелинейной динамики (Фурье-спектроскопия, реконструкции динамики по временным последовательностям данных с вычислением размерностей фазового пространства и аттрактора, определение характеристических показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синая) показано, что рассматриваемые химические осцилляции являются в исследуемой системе следствием протекания окислительно-восстановительных процессов, причем реализуется детерминированный хаос.

Для описания особенностей флуктуационной динамики и установления индивидуальности той или иной временной последовательности экспериментальных данных такого типа процессов в настоящее время получили развитие подходы фликкер-шумовой спектроскопии. Данный метод анализа временных рядов позволяет придать информационную значимость хаотическим сигналам, порождаемым неравновесными нелинейными системами [2-4].

Цель настоящего сообщения состояла в проведении оценки параметров динамики на основе метода фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) ранее неизученной колебательной реакции, реализующейся в системе цистеин-оксигенированные комплексы кобальта (II) с *o*-ДСФДА и *Cyt*.

Материалы и методы исследования

Используемое в качестве катализатора смешаннолигандное координационное соединение кобальта (II) с *o*-дисалицилиден фенилендиамином (*o*-ДСФДА) и цитозином (*Cyt*) получали смешиванием в молярном отношении $\text{Co(II)}: o\text{-ДСФДА} : \text{Cyt} = 1:1:1$ соответственно.

Изучение флуктуационных явлений, проявляющихся при гомогенном окислении цистеина в присутствии в качестве катализатора оксигенированных комплексов кобальта (II) с *o*-ДСФДА и *Cyt*, проводили потенциометрическим методом в виде регистрации электродного потенциала точечного платинового микроэлектрода относительно хлорсеребряного электрода в течение определенного изменения промежутка времени. Ранее было установлено [5-7], что изменение потенциала рассматриваемой электродной системы непосредственно связано с соотношением концентраций окисленной и восстановленной форм реагента. Исследование процесса проводилось в стеклянном реакторе, состоящем из двух ячеек цилиндрической формы $d = 37$ мм,

$h = 55$ мм, соединенных между собой электролитическим ключом, который заполнен насыщенным раствором KCl, и помещенном в термостат ТЖ-ТС-01 (точность термостатирования $\pm 0,01$ °C). В реактор вносили раствор реагента и катализатора. Общий объем доводили до 20 мл буферным раствором. После этого пропускали через контрольный раствор 10 см^3 воздуха для насыщения раствора кислородом. В качестве индикаторного был использован точечный платиновый электрод с площадью поверхности $S = 1 \text{ мм}^2$, а в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный. Данные по измерению потенциала автоматически заносились в компьютер.

Было получено, что для условий, когда $C_R = (4,0 \div 12,5) \times 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = (2,0 \div 7,0) \times 10^{-3}$ моль/л; pH $7,76 \div 8,12$ и $t = 45 \div 55$ °C гомогенное окисление биосубстрата в присутствии в качестве катализатора комплексов кобальта (II) с *o*-ДСФДА, *Cyt* и молекулярным кислородом протекает в гомогенной среде в колебательном режиме. Некоторые кривые зависимости изменения потенциала от времени приведены на рис. 1, а, 2, а и 3. а. Методика проведения эксперимента и полученные результаты приведены нами в [1; 5].

Результаты исследования и их обсуждение

Для описания динамики процесса окисления цистеина в колебательном режиме был использован подход, основанный на принципах фликкер-шумовой спектроскопии временных последовательностей. Теоретические основы ФШС-метода обсуждены в работах [2-4], а возможность применения данного метода для описания гомогенных колебательных реакций приведена нами в [6-8]. Показано [2; 3; 8], что основной идеей метода ФШС является придание информационной значимости нерегулярностям анализируемых сигналов на определенном временном, пространственном или энергетическом уровнях иерархической организации анализируемых систем. При этом информационное различие в типах нерегулярностей (всплесков, скачков и т.д.) следует из того обстоятельства, что динамические характеристики протекающих процессов, т.е. «паспортные данные», можно извлечь на основе анализа спектров мощности и разностных моментов («структурных функций») различного порядка [2; 9; 10]. В соответствии с этой точкой зрения для извлечения информации из сложных

сигналов, представленных в виде временного ряда, используется корреляционная функция в виде:

$$\Psi(t) = \langle V(t)V(t + \tau) \rangle, \quad (1)$$

где V – аналитический сигнал, t – время, τ – параметр временной задержки.

При проведении анализа информации, включенной в корреляционную функцию, обычно рассматривают не саму эту функцию, а такие ее преобразования, как спектр мощности $S(f)$ (f – частота) в виде:

$$S(f) = \int_{-T/2}^{T/2} \langle V(t)V(t + t_1) \rangle \cos(2\pi f t_1) dt_1,$$

$$\langle Q(t, t_1) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} Q(t, t_1) dt. \quad (2)$$

Вместе с этим при решении задачи установления количественных характеристик

хаотических сигналов, т.е. их параметризации, определяются разностные моменты второго порядка $\Phi^{(2)}(\tau)$, которые можно представить следующим образом:

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t + \tau)]^2 \rangle. \quad (3)$$

Вместе с тем интерполяционные зависимости, характеризующие вклад в спектр мощности $S(f)$ хаотической составляющей $S_c(f)$, можно представить в виде:

$$S_c(f) \approx \frac{S_{cS}(0)}{1 + (2\pi f T_0)^{n_0}} + \frac{S_{cR}(0)}{1 + (2\pi f T_1)^{2H_1 + 1}}, \quad (4)$$

где $S_{cS}(0)$ и $S_{cR}(f)$ – параметры, характеризующие низкочастотные пределы составляющих $S_c(f)$ [11].

С применением этих соотношений нами была проведена параметризация всех временных рядов, зарегистрированных при выполнении настоящей работы.

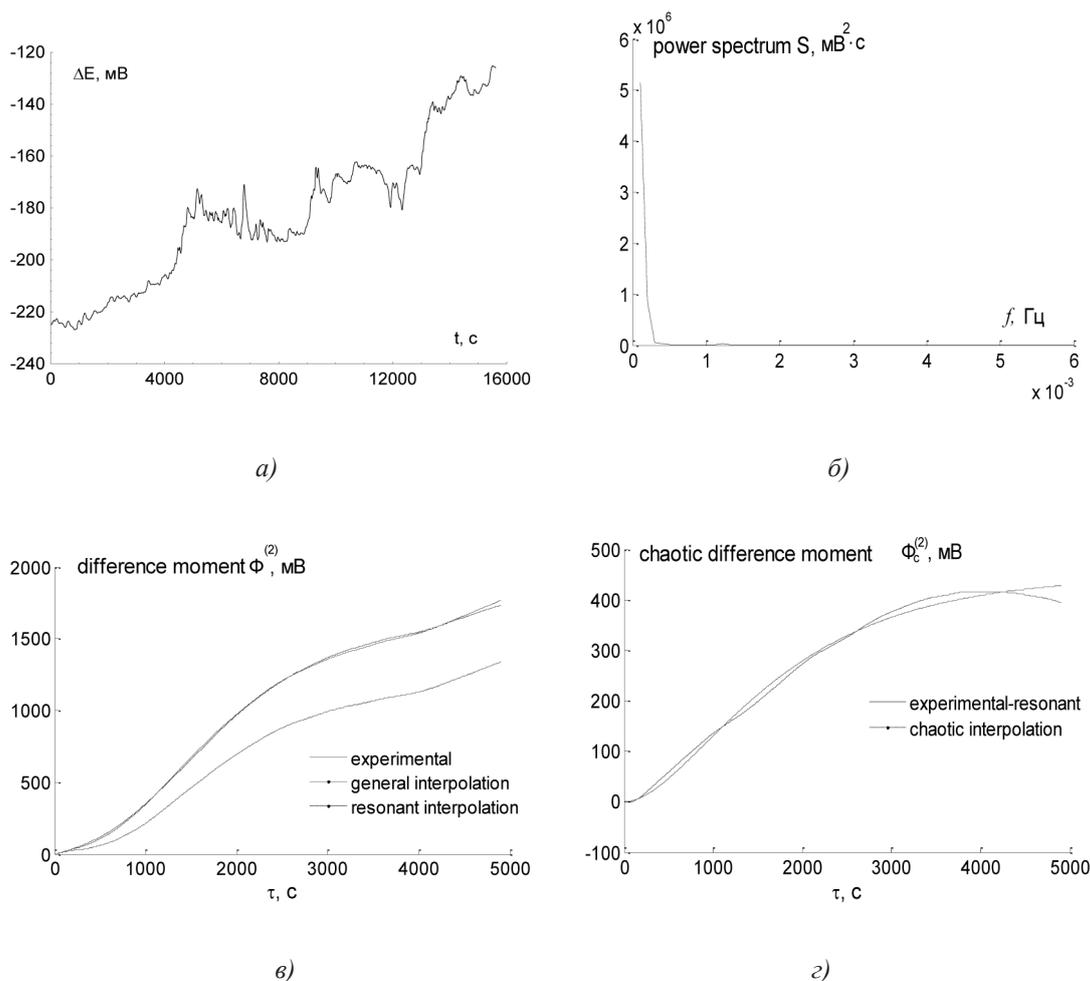


Рис. 1. ФШС-анализ зависимости $\Delta E(t)$
 ($C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $t = 50$ °C, $pH = 7,96$)

На рис. 1–3 в качестве иллюстрации приведены результаты ФШС-анализа экспериментальных временных рядов гомогенного окисления цистеина в колебательном режиме для некоторых изученных случаев (условия проведения экспериментов приведены в подписях в таблице; обозначения: a – анализируемая флуктуационная область зависимости $\Delta E(t)$; b – спектр $S(f)$ в низкочастотной области; v – экспериментальная $\Phi^{(2)}(\tau)$, расчетная зависимость $\Phi^{(2)}(\tau)$, резонансная составляющая $\tilde{\Phi}_r^{(2)}(\tau)$; z – экспериментальная $\Phi^{(2)}(\tau)$, получаемая за вычетом резонансной составляющей) [7].

В таблице представлены результаты ФШС-анализа динамики фиксированных изменений потенциала для всех условий эксперимента, проведенных при выполнении настоящей работы.

Обозначения [3; 4]: $S(0)$ – параметр, характеризующий низкочастотный предел спектра мощности, формируемой нерегулярностями-скачками; n_0 – величина, характеризующая скорость потери корреляционных

связей в последовательности нерегулярностей-всплесков, происходящих на временных интервалах T_0 ; H_1 – константа Херста, характеризующая скорость, с которой динамическая переменная теряет «память» о своем значении на временных интервалах, меньших времени T_1 ; σ – среднее квадратичное отклонение измеряемой динамической переменной.

Полученные результаты (рис. 1–3 и таблица), свидетельствуют о том, что временные ряды, подвергнутые анализу, описываются определенным набором параметров $S(0)$, T_0 , n_0 , σ , H_1 и T_1 , характеризующим особенности внутренней структуры обсуждаемой динамической системы [3; 10; 12]. Необходимо подчеркнуть, что одна группа параметров $S(0)$, T_0 и n_0 характеризует самоподобие в корреляционных связях среди наиболее резких «нерегулярностей-всплесков», а вторая группа паспортных данных H_1 , T_1 , σ – несет в себе информацию о корреляционных связях среди «нерегулярностей-скачков» и о скорости потери информации на этих корреляционных связях [13; 14].

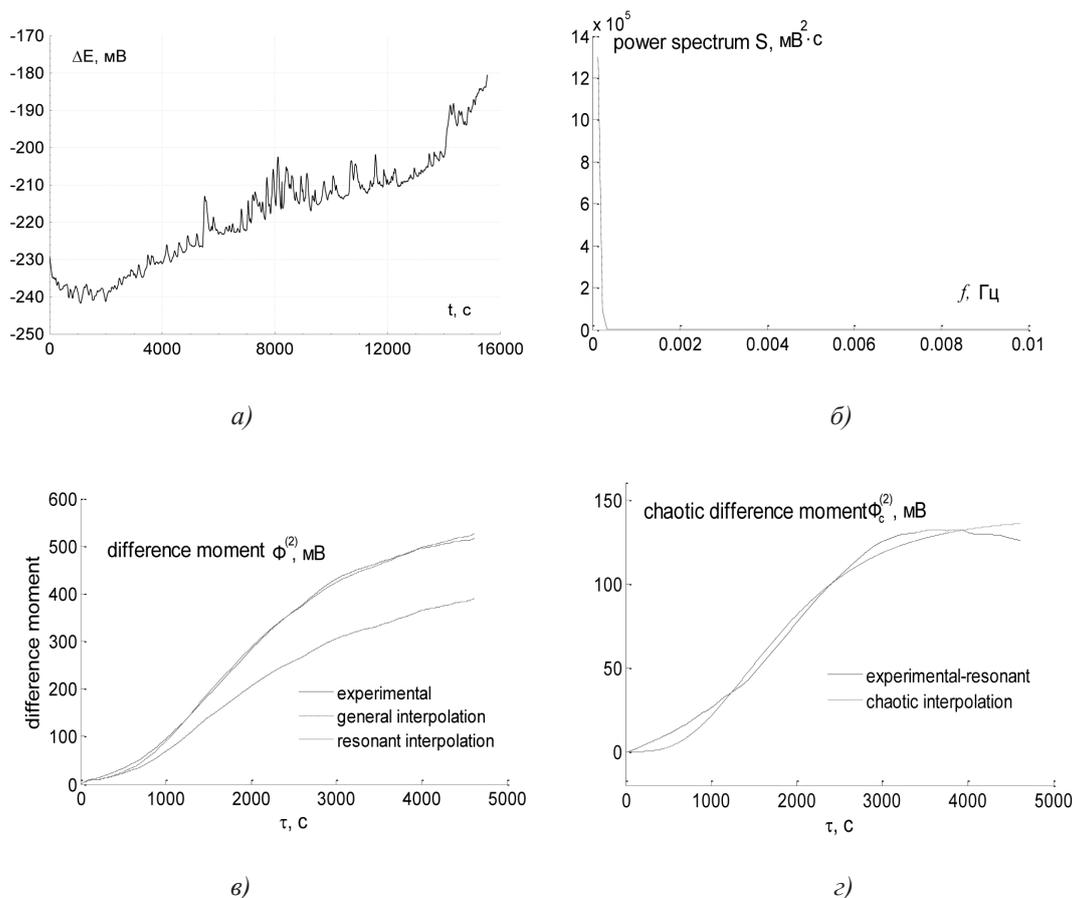


Рис. 2. ФШС-анализ зависимости $\Delta E(t)$
 ($C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $t = 55^\circ\text{C}$, $pH = 8,12$)

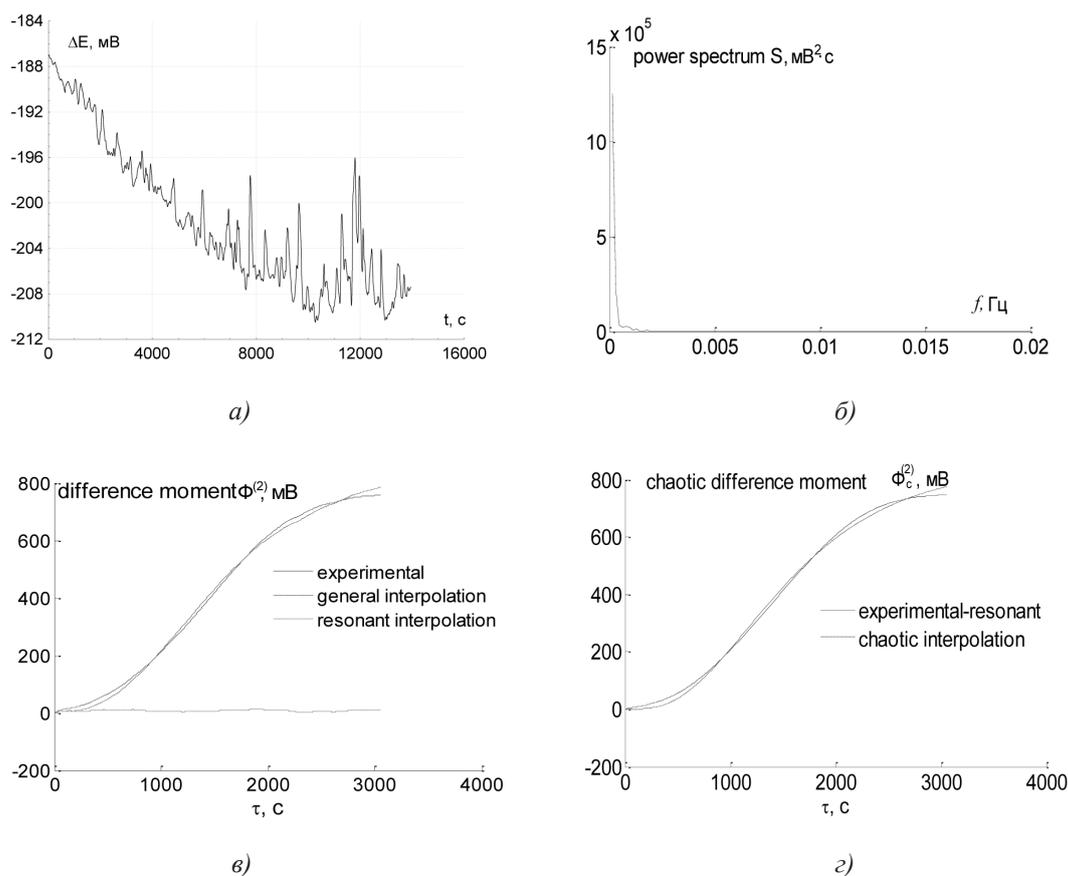


Рис. 3. ФШС-анализ зависимости $\Delta E(t)$
 ($C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л, $t = 50^\circ\text{C}$, $pH = 8,12$)

«Паспортные» параметры флуктуационной динамики процесса окисления цистеина в колебательном режиме

Условия проведения эксперимента	$S(0)$, $\text{mB}^2 \cdot \text{c}$	T_0 , c	n_0	σ , мВ	H_1	T_1 , c
$C_R = 4,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	38282	570	1,92	10,10	3,53	520
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$; (рис. 1)	2581612	1652	1,91	14,95	1,01	1270
$C_R = 7,5 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	983	211	1,99	5,12	3,47	730
$C_R = 12,5 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	29197	114	1,99	18,01	1,34	350
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 2,00 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	527518	470	1,94	28,17	1,24	2359
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 7,00 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	93	37	2,07	8,03	1,29	2503
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 45^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$	1270	85	2,05	8,43	3,72	651
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 55^\circ\text{C}$; $pH = 7,96$; (рис. 2)	763492	1593	2,05	8,33	2,16	672
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 7,76$	20577	186	2,02	20,52	1,92	629
$C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ (моль/л); $t = 50^\circ\text{C}$; $pH = 8,12$; (рис. 3)	860	78	2,18	13,09	1,67	2730

Заключение

Таким образом, результаты проведенного анализа показывают, что зависимости изменения потенциала от времени для каждого отдельного случая имеют свой массив параметров, что, в свою очередь, позволяет

провести однозначную параметризацию регистрируемых сигналов, т. е. установить динамические характеристики («паспортные» данные) исследуемых временных рядов с получением определенной информации об особенностях определенной временной последовательности [13].

Не менее важным является и то обстоятельство, что между предыдущими и последующими событиями существуют определенные корреляционные связи, что говорит о детерминированном характере флуктуаций концентраций в анализируемой системе.

Основным же результатом обработки временных рядов при помощи рассматриваемого метода является то, что эти параметры и их значения позволили подтвердить реализацию динамического хаоса в изучаемой системе [2; 3]. Важно и то, что эти данные подтверждают полученные ранее результаты [1] о возникновении детерминированного хаоса при гомогенном окислении цистеина в присутствии в качестве катализатора координационных соединений кобальта (II) с *o*-дисалицилиденфенилендиамином, цитозином и молекулярным кислородом.

Работа выполнена на базе Научно-образовательного центра «Нелинейная химия» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аналитическая спектроскопия» Дагестанского государственного университета.

Авторы благодарят профессора С.Ф. Тимашева за помощь, оказанную при проведении вычислений и анализе расчетных данных.

Список литературы / References

1. Етмишева С.С., Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г. Нелинейная динамика флуктуационных процессов при гомогенном окислении цистеина в присутствии оксигенированных комплексов кобальта (II) с *o*-дисалицилиденфенилендиамином и цитозином // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2018. Т. 61. Вып. 8. С. 40–46. DOI: 10.6060/ivkkt.20186108.5765.
2. Etmisheva S.S., Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G. Nonlinear dynamics of fluctuation processes in the homogeneous oxidation of cysteine in the presence of oxygenated cobalt (ii) complexes with *o*-disalicylidenephenylenediamine and cytosine // Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2018. V. 61. № 8. P. 40–46 (in Russian).
3. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения «сигнал-шум» // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 2. С. 156–169.
4. Timashev S.F., Vstovsky G.V. Flicker-Noise Spectroscopy for Analyzing Chaotic Time Series of Dynamic Variables: Problem of Signal-to-Noise Relation // Russian Journal of Electrochemistry. 2003. V. 39. № 2. P. 141–153. DOI: 10.1023/A:1022352707576.
5. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 248 с.
6. Timashev S.F. Flicker-noise spectroscopy: information in chaotic signals. M.: FIZMATLIT, 2007. 248 p. (in Russian).
7. Тимашев С.Ф. Информация сложного: информация в хаотических сигналах // Российский химический журнал. 2009. Т. LIII. № 6. С. 50–61.
8. Timashev S.F. Information of the complex: information in chaotic signals // Russian Journal of General Chemistry. 2009. V. LIII. № 6. P. 50–61 (in Russian).
9. Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х. Нелинейная (флуктуационная) динамика и математическое моделирование процессов гомогенного окисления биосубстратов // Российский химический журнал. 2009. Т. LIII. № 6. С. 74–83.
10. Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Hasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh. Nonlinear (fluctuation) dynamics and mathematical modeling of the processes of homogeneous oxidation of biosubstrates // Russian Journal of General Chemistry. 2009. V. LIII. № 6. P. 74–83 (in Russian).
11. Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х. Образование диссипативных структур при гомогенном окислении биосубстратов: оценка динамических характеристик и параметризация временных рядов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2011. Т. 52. № 6. С. 443–448.
12. Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Hasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh. Formation of dissipative structures upon homogeneous oxidation of biosubstrates: Evaluation of dynamic characteristics and parameterization of time series // Moscow University Chemistry Bulletin. 2011. V. 52. № 6. P. 365–370. DOI: 10.3103/S002713141106006X.
13. Магомедбеков У.Г., Гасанова Х.М., Гасангаджиева У.Г., Магомедбеков Н.Х., Хасанов И.И., Исаева П.М. Флуктуационная динамика процессов гомогенного окисления 1,6-гидроксинафталина // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 3. С. 34–39.
14. Magomedbekov U.G., Gasanova Kh.M., Gasangadzhieva U.G., Magomedbekov N.Kh., Khasanov I.I., Isaeva P.M. Fluctuation dynamics of the processes of homogeneous oxidation of 1,6-dihydroxynaphthalene // Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Estestvenny'e nauki. 2011. № 3. P. 34–39 (in Russian).
15. Тимашев С.Ф., Поляков Ю.С. Обзор фликкер-шумовой спектроскопии в электрохимии // Fluctuation and Noise Letters. 2007. V. 7. № 2. P. R5–R47. DOI: 10.1142/S0219477507003829.
16. Timashev S.F., Polyakov Yu.S. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry // Fluctuation and Noise Letters. 2007. V. 7. № 2. P. R5–R47. DOI: 10.1142/S0219477507003829.
17. Тимашев С.Ф., Демин С.А., Панищев О.Ю., Поляков Ю.С., Каплан А.Я., Нефедьев Ю.А. Фликкер-шумовая спектроскопия как «прибор» для индивидуальной медицины будущего // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2012. Т. 154. № 4. С. 161–177.
18. Timashev S.F., Demin S.A., Panishchev O.Yu., Polyakov Yu.S., Kaplan A.Ya., Nefed'ev Yu.A. Flicker-noise spectroscopy as a «device» for the individual medicine of the future // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskoe Nauki. 2012. V. 154. № 4. P. 161–177 (in Russian).
19. Маковийчук М. Фликкер-шумовая спектроскопия. Структурно-неупорядоченные полупроводники. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 168 с.
20. Makoviychuk M. Flicker-noise spectroscopy. Structurally unordered semiconductors. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 168 p. (in Russian).
21. Тимашев С.Ф., Юльметьев Р.М., Демин С.А., Панищев О.Ю., Поляков Ю.С. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе магнитоэнцефалограмм (при фоточувствительной эпилепсии) // Альманах клинической медицины. 2008. Т. 17. № 1. С. 233–237.
22. Timashev S.F., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishchev O.Yu., Polyakov Yu.S. Flicker-noise spectroscopy in analysis of magnetoencephalogram (under photosensitive epilepsy) // Almanakh klinicheskoy meditsiny. 2008. V. 17. № 1. P. 233–237 (in Russian).
23. Колганов В. И., Акберова Э. М., Малыхин М. Д., Бабичев С.В. Анализ спектрального состава оптических шумов в растворе на границе с сульфокатионообменной мембраной МК-40 после температурного воздействия методом фликкер-шумовой спектроскопии // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2015. № 3. С. 25–30.
24. Kolganov V.I., Akberova E.M., Malykhin M.D., Babichev S.V. Analysis of the spectral composition of optical noise in a solution at the interface with the MK-40 sulfocation-exchange membrane after temperature exposure by the method of flicker-noise spectroscopy // Vestnik VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. 2015. № 3. P. 25–30 (in Russian).
25. Магомедова Р.А. Самоорганизация и образование диссипативных структур в системе цистеин – оксигенированные комплексы железа (II): дис... канд. хим. наук. Махачкала, 2010. 127 с.
26. Magomedova R.A. Self-organization and the formation of dissipative structures in the cysteine system – oxygenated iron (II) complexes: dis... kand. khim. nauk. Makhachkala, 2010. 127 p. (in Russian).
27. Гаджибалаева З.М. Нелинейная динамика и математическое моделирование процессов гомогенного окисления лейкорибофлавина: дис... канд. хим. наук. Махачкала, 2009. 118 с.
28. Gadzhibalayeva Z.M. Nonlinear dynamics and mathematical modeling of the processes of homogeneous oxidation of leukoriboflavin: dis... kand. khim. nauk. Makhachkala, 2009. 118 p. (in Russian).