

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГОМОГЕННОМ ОКИСЛЕНИИ ЦИСТЕИНА В ПРИСУТСТВИИ ОКСИГЕНИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ КОБАЛЬТА (II) С О-ДИСАЛИЦИЛИДЕНФЕНИЛЕНДИАМИНОМ И ЦИТОЗИНОМ

С.С. Етмишева, У.Г. Магомедбеков, У.Г. Гасангаджиева

София Сейпуллаевна Етмишева, Ухумаали Гаджиевич Магомедбеков, Умукусум Гусейновна Гасангаджиева
Кафедра неорганической химии, Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43А,
Махачкала, Российская Федерация, 367002.
E-mail: sophi05@yandex.ru, ukhgmag@mail.ru, ugga74@mail.ru

Приведены результаты оценки характеристик динамики ранее неизученной колебательной химической реакции – гомогенного окисления цистеина в присутствии синтезированных смешаннолигандных комплексных соединений кобальта (II) с о-дисалицилиденфенилендиамином, цитозином и молекулярным кислородом. Для интерпретации экспериментальных результатов использованы методы Фурье-спектроскопии, реконструкции динамики по временным последовательностям с построением фазовых портретов и определением размерностей фазового пространства и аттрактора, вычисления характеристических показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синяя. При анализе экспериментальных данных по временным рядам методами дискретного преобразования Фурье установлено, что полученный спектр не является сплошным, на основе чего сделано заключение, что наблюдаемые осцилляции аналитического сигнала, непосредственно связанного с изменением концентраций реагирующих веществ, являются следствием протекания химических реакций в исследуемой системе. Результаты проведенного анализа также показали, что не удается выделить определенные частоты колебаний, и поэтому сделано заключение, что при гомогенном окислении цистеина в колебательном режиме возможна реализация детерминированного (динамического) хаоса. На основе реконструкции динамики по временным последовательностям получено, что семейство фазовых траекторий стягивается к определенному подмножеству точек фазового пространства – аттрактору, что указывает на детерминированный характер динамики протекающих в исследуемой системе процессов. Получено, что размерность фазового пространства соответствует 5, а размерность аттрактора принимает дробные значения, что подтверждает ранее сделанное заключение о реализации динамического хаоса. При вычислении характеристических показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синяя также установлено, что наблюдаемые химические осцилляции являются следствием протекания окислительно-восстановительных процессов в исследуемой системе, причем реализуется детерминированный хаос.

Ключевые слова: цистеин, комплексы кобальта (II), динамика, Фурье-анализ, фазовое пространство, аттрактор, показатели Ляпунова, энтропия Колмогорова-Синяя, динамический хаос

NONLINEAR DYNAMICS OF FLUCTUATION PROCESSES IN THE HOMOGENEOUS OXIDATION OF CYSTEINE IN THE PRESENCE OF OXYGENATED COBALT (II) COMPLEXES WITH O-DISALICYLIDENPHENYLENEDIAMINE AND CYTOSINE

S.S. Etmisheva, U.G. Magomedbekov, U.G. Gasangadzhieva

Sofia S. Etmisheva, Ukhumaali G. Magomedbekov, Umukusum G. Gasangadzhieva
Department of inorganic chemistry, Dagestan State University, M. Gadzhieva st., 43A, Makhachkala, Russian Federation, 367002
E-mail: sophi05@yandex.ru, ukhgmag@mail.ru, ugga74@mail.ru

The results of evaluation of the characteristics of the dynamics of previously unexplored oscillatory chemical reaction - homogeneous oxidation of cysteine in the presence of synthesized mixed ligand complex cobalt compounds (II) with o-disalicylicidenephenylenediamine, cytosine and molec-

ular oxygen are given in this article. The interpretation of the experimental results is based on Fourier method of spectroscopy, the method of reconstruction of time series dynamics with the construction of phase portraits and the determination of the dimensions of phase space and attractor, the method of calculation of the Lyapunov characteristic exponents and the Kolmogorov-Sinai entropy. Based on analysis of the experimental data on time series by discrete Fourier transform methods, it was established that the obtained spectrum is not continuous. Based on this result it was concluded that the observed oscillations of the analytical signal directly related to the change in concentrations of reaction substances and are result of the chemical reactions in the system under study. The results of the analysis also showed it was not possible to isolate certain oscillatory frequencies and, therefore, it was concluded that homogeneous oxidation of cysteine in the oscillating mode could develop deterministic (dynamic) chaos. On the basis of reconstructed dynamics of the time sequences it was obtained the family of phase trajectories directs to a certain subset of points in the phase space - the attractor, which indicates the deterministic nature of the dynamics of the processes taking place in the system under study. It was found that the dimension of the phase space corresponds to 5, while the dimension of the attractor takes fractional values, which confirms the earlier conclusion of the realization of dynamic chaos. Calculations the Lyapunov characteristic exponents and the Kolmogorov-Sinai entropy showed the observed chemical oscillations are a result of the oxidation - reduction processes in the system under study and deterministic chaos is realized.

Keywords: cysteine, cobalt (II) complexes, dynamics, Fourier analysis, phase space, attractor, Lyapunov exponents, Kolmogorov-Sinai entropy, dynamic chaos

Для цитирования:

Етмишева С.С., Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г. Нелинейная динамика флуктуационных процессов при гомогенном окислении цистеина в присутствии оксигенированных комплексов кобальта (II) с о-дисалицилиденфенилендиамином и цитозином. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 8. С. 40–46

For citation:

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. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 8. P. 40–46

ВВЕДЕНИЕ

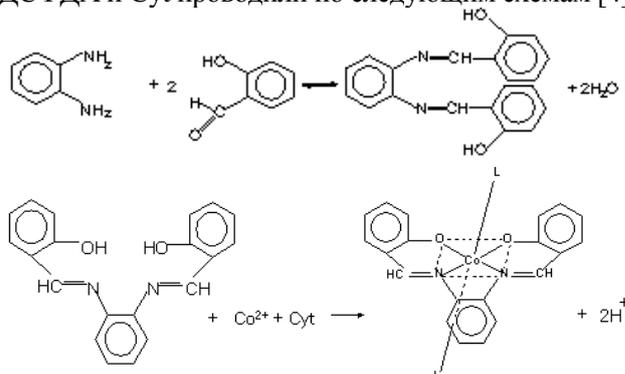
При интерпретации и анализе экспериментальных данных по флуктуационным явлениям в химической кинетике применяются различные методы, при помощи которых можно выявить особенности динамики протекающих процессов [1]. Важное место при анализе критических явлений занимают успешно развивающиеся подходы, основанные на установлении динамических характеристик различных процессов на основе анализа временных последовательностей экспериментальных результатов [1-8].

Нами установлено, что простейшие биосубстраты в присутствии оксигенированных комплексов переходных металлов в гомогенной среде могут окисляться в колебательном режиме [2-4,9-16].

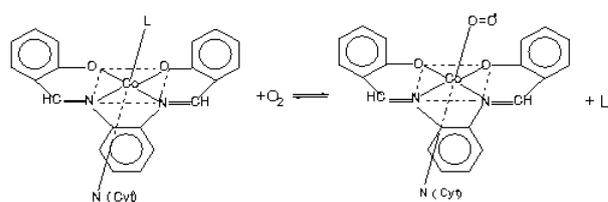
В настоящем сообщении приведены результаты оценки характеристик динамики ранее неизученной колебательной химической реакции – гомогенного окисления цистеина (Cys, R) в присутствии синтезированных новых смешаннолигандных комплексных соединений кобальта (II) с о-дисалицилиденфенилендиамином (ДСФДА), цитозином (Cyt) и молекулярным кислородом (O₂).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез о-дисалицилиденфенилендиамина и смешаннолигандного комплекса кобальта (II) с ДСФДА и Cyt проводили по следующим схемам [4]:



Оксигенацию проводили пропусканием в течение 20 мин молекулярного кислорода через раствор комплексов кобальта (II) с ДСФДА и Cyt по схеме:



Вопросы получения и строения синтезированного реагента ДСФДА и комплексов кобальта (II) с ДСФДА, Cyt и O₂ обсуждены нами в статье [4].

Исследование кинетических закономерностей гомогенного окисления цистеина в присутствии окисгенированных комплексов кобальта (II) с ДСФДА и Cyt (Co(II)-ДСФДА-Cyt-O₂) проводили в виде регистрации потенциала точечного платинового электрода относительно хлоридсеребряного, однозначно связанного с соотношением окисленной и восстановленной форм реагента [3]. Методика проведения эксперимента обсуждена нами в [3,4]. Получено, что при определенных условиях (C_R = (4,0 - 12,5)·10⁻³ моль/л; C_{cat} = (2,0 - 7,0)·10⁻⁵ моль/л; pH 7,76 ÷ 8,12 и t = (45-55) °C) жидкофазное окисление цистеина в присутствии окисгенированных комплексов кобальта (II) с ДСФДА и Cyt протекает в колебательном режиме [4]. Характерная кривая зависимости изменения потенциала точечного платинового электрода относительно хлорсеребряного от времени для условий C_R = 5,0·10⁻³ моль/л, C_{cat} = 4,76·10⁻⁵ моль/л, t = 50 °C, pH = 7,96 приведена на рис. 1.

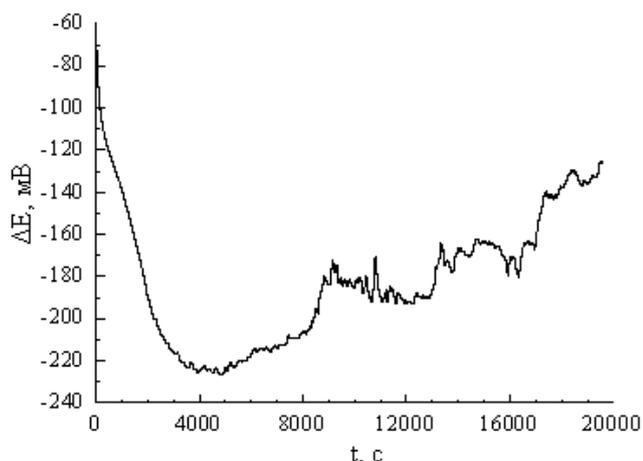


Рис. 1. Зависимость изменения относительного потенциала от времени
Fig. 1. Dependence of the change of relative potential on time

Основные характеристики новой колебательной химической реакции, реализующейся в гомогенной системе цистеин – комплексы кобальта (II) с ДСФДА, Cyt и O₂ приведены нами ранее в сообщении [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Литературные данные по окислению цистеина молекулярным кислородом обобщены в монографиях и обзорах [17,18]. Каталитическое окисление тиолов кислородом при различных условиях [9] приводит к последовательному возникновению тиольных радикалов (RS[•]) и анион-радикалов (RS^{-•}),

сульфинильных (RSO₂[•]) и сульфонильных (RSO₃[•]) радикалов, из которых образуются конечные продукты, представленные в следующей схеме:



Наряду с этим молекулярный кислород (свободный или связанный в комплекс) при взаимодействии с цистеином восстанавливается, генерируя супероксидный O₂^{-•}, гидроксильный (OH[•]) и/или пероксидный (HO₂[•]) радикалы [2,19]. Вне области устойчивости при взаимодействии частиц различного типа между собой могут возникать диссипативные структуры, включающие в себя все типы самоорганизации: колебательные процессы, пространственно-временное структурирование, а также любую другую последовательность процессов, связанных с когерентными свойствами системы [2].

При интерпретации критических явлений такого типа важное место занимают подходы по установлению динамических характеристик протекающих процессов на основе анализа временных последовательностей экспериментальных данных современными методами [1,2].

В настоящей работе для решения поставленных задач использованы методы Фурье-спектроскопии, реконструкции динамики по временным рядам с построением фазовых портретов и определением размерностей фазового пространства и аттрактора, вычисления характеристических показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синяя.

1. Анализ Фурье преобразования временно-го ряда.

Одним из приемов, использованных при интерпретации экспериментальных данных, был метод Фурье-анализа в варианте дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Обработку экспериментальных данных по временным рядам проводили численными методами [20,21], которые сводятся к построению Фурье – спектра, установлению характерных пиков в спектре, закономерности их взаимного расположения и уровня, а также на наличие пьедестала или сплошного спектра. Полученные результаты в виде спектра мощности представлены на рис. 2.

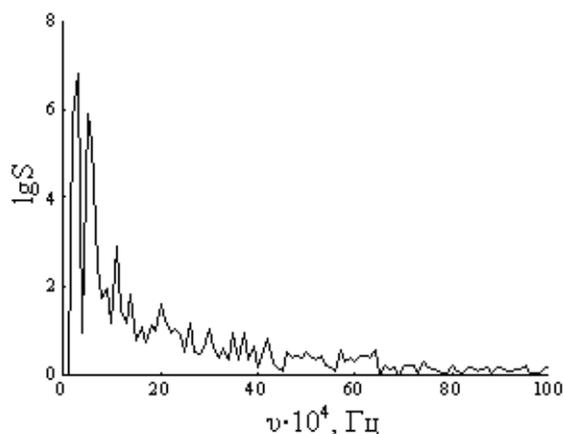


Рис.2. Фурье-спектр временного ряда
Fig. 2. Fourier spectrum of the time series

Данные рис. 2 показывают, что полученный спектр не является сплошным, и поэтому можно сделать заключение о том, что наблюдаемые флуктуации аналитического сигнала, непосредственно связанного с изменением концентраций исходных веществ, интермедиатов и/или продуктов, являются следствием протекания химических реакций в исследуемой системе. Этот факт, в свою очередь, указывает на детерминированный характер динамики протекающих в исследуемой системе процессов. Наряду с этим, результаты проделанного анализа показали (рис. 2), что не удается выделить определенные частоты колебаний, и поэтому можно заключить, что при гомогенном окислении цистеина в колебательном режиме возможна реализация детерминированного (динамического) хаоса.

2. Реконструкция динамики по временному ряду

2.1. Восстановление фазового пространства.

На основе одного только ДПФ не всегда четко можно утверждать о реализации в системе динамического хаоса или случайного сигнала (шума). По этой причине для анализа полученных экспериментальных данных был использован метод реконструкции динамики протекающих процессов по временному ряду с построением фазовых портретов и определением размерностей фазового пространства и аттрактора. Основная идея применения данного подхода к анализу динамики состоит в том, что основная структура хаотической системы – аттрактор может быть восстановлен через измерение одной переменной динамической системы, представленной как временной ряд. Поэтому при интерпретации результатов эксперимента нами использован предложенный в [22-24] эффективный метод оценки характеристик аттрактора в сочетании с возможностью восстановления траекторий в фазовом пространстве по за-

держкам времени. Согласно этому подходу [5-7,22-26] фазовый портрет динамической системы может быть восстановлен по временной зависимости одной из измеряемых переменных, если в качестве недостающих координат вектора состояния используется тот же самый временной ряд, взятый с некоторым запаздыванием.

В настоящей работе для анализа использованы ряды изменения относительного потенциала от времени. Фазовые портреты при этом построены в координатах: $\Delta E_{t+2\Delta\tau} - \Delta E_{t+\Delta\tau} - \Delta E_t$, где ΔE_t – значение функции (величины относительного потенциала) в момент времени t , а $\Delta E_{t+\Delta\tau}$ и $\Delta E_{t+2\Delta\tau}$ – значения этой же функции в момент времени $(t + \Delta\tau)$ и $(t + 2\Delta\tau)$ – соответственно. Вид фазового портрета для случая, представленного на рис. 1, приведен на рис. 3.

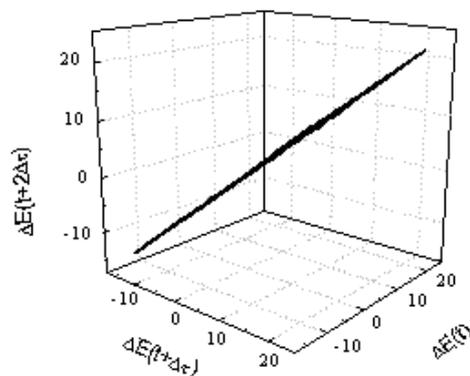


Рис. 3. Фазовый портрет в координатах $\Delta E_{t+2\Delta\tau} - \Delta E_{t+\Delta\tau} - \Delta E_t$
Fig.3. Phase portrait in coordinates $\Delta E_{t+2\Delta\tau} - \Delta E_{t+\Delta\tau} - \Delta E_t$

Вид приведенного рисунка свидетельствует о том, что семейство фазовых траекторий исследуемого процесса стягивается к определенному подмножеству точек фазового пространства – аттрактору. (Похожая картина наблюдалась и для других условий эксперимента; см. табл. 1). Наличие аттрактора, в свою очередь, указывает на реализацию детерминированной хаотической динамики при протекании окислительно-восстановительных процессов в системе цистеин – оксигенированные комплексы кобальта (II) с ДСФДА и СуТ [2,3,9-11].

2.2. Определение размерностей фазового пространства и аттрактора

В соответствии с методом реконструкции аттрактора [5,9,10,12] пространственную корреляцию можно охарактеризовать с помощью интегральной корреляционной функции аттрактора, которая представляется в виде:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - |X_i - X_j|),$$

(θ – функция Хевисайда; $\theta = 1$ при $X > 0$, $\theta = 0$ при $X \leq 0$; отклонение $C(r)$ от нуля является критерием влияния точки X_i на положение других точек).

С целью вычисления размерности аттрактора нами построена зависимость $\ln C(r)$ от $\ln r$ для последовательно возрастающих значений размерностей фазового пространства ($n = 2 - 8$), которая представлена на рис. 4, а зависимость d от n на рис. 5.

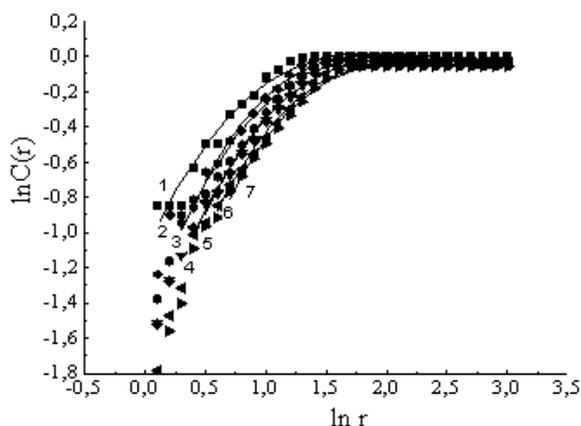


Рис. 4. Зависимость $\ln(C)$ от $\ln r$: 1- $n = 2$; 2- $n = 3$; 3- $n = 4$; 4- $n = 5$; 5- $n = 6$; 6- $n = 7$; 7- $n = 8$

Fig. 4. Dependence $\ln(C)$ on $\ln r$: 1- $n = 2$; 2- $n = 3$; 3- $n = 4$; 4- $n = 5$; 5- $n = 6$; 6- $n = 7$; 7- $n = 8$

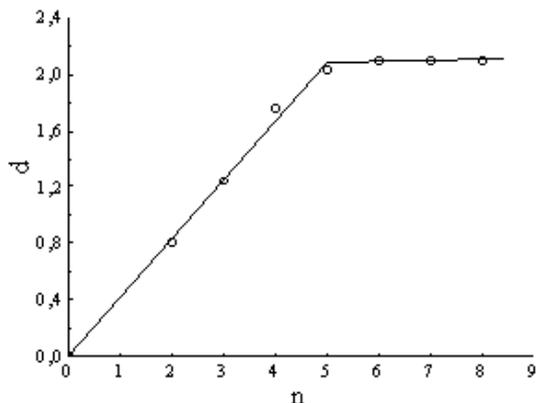


Рис. 5. Зависимость размерности аттрактора d от размерности фазового пространства n

Fig. 5. Dependence of the dimension of the attractor d on the dimensions of the phase space n

Данные рис. 5 показывают, что размерность фазового пространства d для рассматриваемого случая достигает насыщения при значении размерности фазового пространства, равной 5. Для рассматриваемого случая размерность аттрактора равна 2,1. Для всех условий эксперимента d принимает дробные значения (таблица). Эти данные свидетельствуют о реализации детерминированного хаоса в процессе окисления цистеина в присутствии комплексов кобальта (II) с ДСФДА, Су_т и O₂, что является подтверждением ранее сделанного заключения на основе Фурье-анализа.

Вместе с этим, значение размерности фазового пространства, при котором d достигает насыщения, для всех условий проведения эксперимента соответствует 5, и поэтому при математическом моделировании для описания кинетических закономерностей протекающих процессов необходимо провести анализ системы из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений автономного типа.

3. Вычисление характеристических показателей Ляпунова и энтропии Колмогорова-Синяя

Для получения полной информации об особенностях динамики исследуемых колебательных химических реакций необходимо определить характеристические показатели Ляпунова (λ_i) и энтропию Колмогорова-Синяя (КС-энтропию, h), по величинам которых можно судить о характере динамики протекающих процессов. Наличие в спектре положительных показателей Ляпунова указывает на динамический хаос, который реализуется только в диссипативных системах [27,28].

При выполнении работы нами были вычислены показатели Ляпунова для всех полученных экспериментальных рядов с использованием некоммерческой программы TISEAN 3.0.1 [29,30]. (Процедура расчета обсуждена нами ранее, см. [3]).

Результаты расчета представлены на рис. 6, а величины λ_1 , λ_2 и λ_3 и КС-энтропии – в таблице.

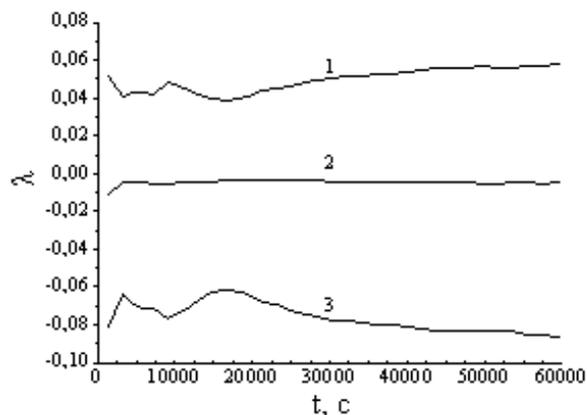


Рис. 6. Зависимость показателей Ляпунова от длины временного ряда: 1 - $\lambda_1(t)$; 2 - $\lambda_2(t)$; 3 - $\lambda_3(t)$

Fig. 6. The dependence of the Lyapunov exponents on the length of the time series 1 - $\lambda_1(t)$; 2 - $\lambda_2(t)$; 3 - $\lambda_3(t)$

Результаты, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что для всех случаев, рассмотренных в работе, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 = 0$ и $\lambda_3 < 0$, а сумма ляпуновских показателей (λ_1 , λ_2 , и λ_3) отрицательна. Наличие данных обстоятельств является признаком реализации детерминированного хаоса.

Таблица
Результаты описания динамики исследуемой системы, полученные разными методами
Table. Results on the description of the dynamics of the system under investigation, obtained by different methods

УСЛОВИЯ	d	$\lambda_1 \cdot 10^2$	λ_2	$\lambda_3 \cdot 10^2$	$h \cdot 10^2$	h^{-1}, c
I	1,7	7,0	0	-9,9	7,0	13,7
II	2,1	5,0	0	-7,4	5,0	20,0
III	-	5,9	0	-9,3	5,9	16,1
IV	1,8	4,7	0	-6,6	4,7	21,3
V	2,2	8,0	0	-1,1	8,0	12,5
VI	1,5	5,6	0	-8,7	5,6	17,2
VII	1,5	6,0	0	-9,2	6,0	16,4
VIII	1,7	4,9	0	-6,8	4,9	19,6
IX	1,7	7,3	0	-10,4	7,3	13,3
X	-	7,1	0	-10,1	7,1	13,7

Условия проведения эксперимента:

I: $C_R = 4,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
II: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
III: $C_R = 7,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
IV: $C_R = 12,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
V: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 2,00 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
VI: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 7,00 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,96$;
VII: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 45$ °C; $pH = 7,96$;
VIII: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 55$ °C; $pH = 7,96$;
IX: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 7,76$;
X: $C_R = 5,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л; $C_{cat} = 4,76 \cdot 10^{-5}$ моль/л; $t = 50$ °C; $pH = 8,12$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малинецкий Г.Г., Потопов А.Б., Подлазов А.В.** Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2016. 280 с.
2. **Магомедбеков У.Г.** Окисление биосубстратов в колебательном режиме. Махачкала: ИПЦ ДГУ. 2002. 130 с.
3. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh.** Nonlinear (fluctuational) dynamics and mathematical modeling of homogenous oxidation of biological substrates. *Russian J. of Gen. Chem.* 2011. V. 81. N 1. P. 247-257.
4. **Етмишева С.С., Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г.** Комплексное соединение кобальта (II) с о-дисульфидо-дифенилендиамином, цитозином и молекулярным кислородом – новый катализатор для гомогенных колебательных реакций. *Вестн. Дагестан. гос. ун-та. Ест. науки.* 2017. Т. 32. Вып. 4. С. 77-83. DOI:10.21779/2542-0321-2017-32-4-77-83.
5. **Малинецкий Г.Г., Потопов А.Б.** Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС. 2002. 336 с.
6. **Шашихин В. Н.** Хаос и нелинейная динамика. Регулярная и хаотическая динамика. СПб.: Изд-во. Политехн. ун-та. 2010. 210 с.
7. **Симо К., Смейл С., Шенсине А.** Современные проблемы хаоса и нелинейности. Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2002. 304 с.
8. **Чумак О. В.** Энтропии и фракталы в анализе данных. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. 164 с.
9. **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 Моск. ун-та. Сер.2. Химия.* 2011. Т. 52. №6. С. 443-448.
10. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х., Хасанов И.И., Исаева П.М.** Флуктуационная динамика процессов гомогенного окисления 1,6-дигидрокси-нафталина. *Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Ест. науки.* 2011. № 3 (163). С. 34-39.
11. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х., Хасанов И.И., Исаева П.М.** Реализа-

Образование диссипативных структур подтверждается и тем обстоятельством, что для всех случаев энтропия Колмогорова-Синяя имеет положительное значение ($h > 0$) (таблица).

Таким образом, данные по определению показателей Ляпунова и КС-энтропии показывают, что при всех условиях наблюдаемые химические осцилляции являются следствием протекания окислительно-восстановительных процессов в системе цистеин – оксигенированные комплексы кобальта (II) с ДСФДА и СуТ, причем во всех случаях реализуется детерминированный (динамический) хаос.

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

REFERENCES

1. **Malinetsky G.G., Potapov A.B., Podlazov A.V.** Nonlinear dynamics: Approaches, results, hopes. M.: Knizhnyy dom «LIBROCOM». 2016. 280 p.
2. **Magomedbekov U.G.** Oxidation of biosubstrates in the oscillatory mode. Makhachkala: DSU. 2002. 130 p.
3. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh.** Nonlinear (fluctuational) dynamics and mathematical modeling of homogenous oxidation of biological substrates. *Russian J. of Gen. Chem.* 2011. V. 81. N 1. P. 247-257.
4. **Etmisheva S.S., Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G.** The cobalt (II) complex with o-disalicyli-denephenylene-diamine, cytosine and molecular oxygen – it's new catalyst of homogeneous oscillatory mode. *Vestn. Dagestan. Gos. Un-ta. Yest. nauki.* 2017. V. 32. N 4.P. 77-83 (in Russian). DOI:10.21779/2542-0321-2017-32-4-77-83.
5. **Malinetsky G.G., Potapov A.B.** Modern problems of nonlinear dynamics. M.: Editorial URSS. 2002. 336 p.
6. **Shashihin V. N.** Chaos and nonlinear dynamics. Regular and chaotic dynamics. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta. 2010. 210 p.
7. **Simo K., Smeyl S., Shensine A.** Modern problems of chaos and nonlinearity. Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy. 2002. 304 p.
8. **Chumak O. V.** Entropy and fractals in the analysis of data. M. Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Institut komp'yuternykh issledovaniy. 2011. 164 p.
9. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh.** Formation of dissipative structures under homogeneous oxidation of biosubstrates: estimation of dynamic characteristics and parametrization of time series. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser.2. Khimiya.* 2011. T. 52. N 6. P. 443-448.
10. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh., Khasanov I.I., Isayeva P.M.** Fluctuation dynamics of the processes of homogeneous oxidation of 1,6-dihydroxynaphthalene. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Yest. nauki.* 2011. N 3 (163). P. 34-39.
11. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh., Khasanov I.I., Isayeva P.M.** Realization of deterministic chaos in the homogeneous oxida-

- ция детерминированного хаоса при гомогенном окислении 1,6-дигидроксиафталина. Естественные и точн. науки. 2011. №3 (16). С. 25-28.
12. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х.** Динамика процессов гомогенного окисления глутатиона в присутствии оксигенированных комплексов железа (II) с диметилглиоксимом и цитозином. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2012. Т. 55. Вып. 1. С. 74 – 77.
 13. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Магомедбеков Н.Х.** Параметризация временных рядов, полученных при гомогенном окислении глутатиона в колебательном режиме, методом фликершумовой спектроскопии. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2012. Т. 55. Вып. 12. С. 49 – 51.
 14. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М.** Математическая модель химических осцилляций, возникающих в гомогенной системе цистеин – оксигенированные комплексы железа (II). *Вестник Моск. ун-та. Сер.2. Химия*, 2013. Т. 54. № 6. С. 330-341.
 15. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Штанчаева М.Г.** Возникновение химических осцилляций в гомогенной системе убихинон – оксигенированные комплексы кобальта (II). *Изв. Дагестан. гос. педагогич. ун-та.* Естественные и точные науки. 2017. Т. 11. № 1. С. 21-27.
 16. **Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Гасанова Х.М., Юсупов А.М.** Химические осцилляции в гомогенной системе рибофлавин – оксигенированные комплексы кобальта (II). *Вестник Дагестанского государственного университета*. Серия 1. Естеств. Науки. 2016. Т. 31. Вып. 2. С. 60-66.
 17. **Торчинский Ю.М.** Сульфгидрильные и дисульфидные группы белков. М.: Наука, 1971. 228 с.
 18. **Баррет Дж. К. Тиолы** В кн. Общая органическая химия. Т. 5. Соединения фосфора и серы. М.: Химия, 1983. С. 130-151.
 19. **Сычев А.Я., Исак В.Г.** Соединения железа и механизмы гомогенного катализа активации O₂, H₂O₂ и окисления органических субстратов. *Успехи химии*, 1995. Т. 64. № 12. С. 1183-1209
 20. **Эберт К., Эдерер Х.** Компьютеры. Применение в химии. М.: Мир. 1988. 415 с.
 21. **Соловьев М.М., Соловьев М.Е.** Компьютерная химия. М.: Изд-во СЛОН-Пресс. 2005. 536 с.
 22. **Grasberger P., Procaccia I.** Measuring the strangeness of strange attractor. *Physica D*. 1983. V. 9. N 1. P. 189-208.
 23. **Grasberger P.** An optimized box-assisted algorithm for fractal dimensions. *Phys. Lett. A.*, 1990. V. 148. P. 63-67.
 24. **Takens F.** On the numerical determination of dimensions of an attractor. *Lect. Notes in Math.* 1125, Springer, Heidelberg. 1985. P. 99-106.
 25. **Николис Г., Пригожин И.** Познание сложного. М. URSS: ЛЕНАНД. 2014. 354 с.
 26. **Лоскутов А.Ю.** Анализ временных рядов: курс лекций. Режим доступа: http://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (дата обр. 20.02.2017).
 27. **Ляпунов А.М.** Общая задача об устойчивости движения. Черновцы: Меркурий ПРЕСС. 2000. 386 с.
 28. **Малинецкий Г.Г.** Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2009. 312 с.
 29. **Kantz H., Schreiber T.** *Nonlinear Time Series Analysis*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 388 p.
 30. **TISEAN 3.0.1 Nonlinear Time Series Analysis**The TISEAN software package.http://www.mpi-pks-dresden.mpg.de/~tisean/Tisean_3.0.1/index.html
 - tion of 1,6-dihydroxynaphthalene. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Yestestvennyye i tochn. nauki*. 2011. N 3 (16). P. 25-28.
 12. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh.** Dynamics of the processes of homogeneous oxidation of glutathione in the presence of oxygenated iron (II) complexes with dimethylglyoxime and cytosine. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 1. P. 74 – 77.
 13. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Magomedbekov N.Kh.** Parametrization of time series obtained during homogeneous oxidation of glutathione in the vibrational mode by the method of flicker-noise spectroscopy. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 12. P. 49 – 51.
 14. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M.** Mathematical model of chemical oscillations arising in a homogeneous system of cysteine-oxygenated iron (II) complexes. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser.2. Khimiya*, 2013. V. 54. N 6. P. 330-341.
 15. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Shtanchayeva M.G.** The occurrence of chemical oscillations in a homogeneous system of ubiquinone - oxygenated cobalt (II) complexes. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Yestestvennyye i tochnyye nauki*. 2017. V. 11. N 1. P. 21-27.
 16. **Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Gasanova Kh.M., Yusupov A.M.** Chemical oscillations in the homogeneous system of riboflavin - oxygenated cobalt (II) complexes. *Vestn. Dagestan. Gos. Un-ta. Seriya 1. Yestestv. Nauki*. 2016. V. 31. N 2. P. 60-66
 17. **Torchinsky Yu. M.** Sulfhydryl and disulfide groups of proteins. M.: Science, 1971. 228 p.
 18. **Barret J.K.** Thiols / In *General organic chemistry*. V. 5. Connections of phosphorus and sulphur. M.: Chemistry, 1983. P. 130-151
 19. **Sychev A.Ya., Isak V.G.** Connections of iron and mechanisms of homogeneous catalysis of activating of O₂, H₂O₂ and oxidations of organic substratums. *Russian Chemical Reviews*. 1995. V. 64. N 12. P. 1183-1209
 20. **Ebert K., Ederer X.** *Computers. Application in Chemistry*. M.: Mir. 1988. 415 p.
 21. **Soloviev M.M., Soloviev M.E.** *Computer chemistry*. M.: Izd-vo SLON-Press. 2005. 536 p.
 22. **Grasberger P., Procaccia I.** Measuring the strangeness of strange attractor. *Physica D*. 1983. V. 9. N 1. P. 189-208.
 23. **Grasberger P.** An optimized box-assisted algorithm for fractal dimensions. *Phys. Lett. A.*, 1990. V. 148. P. 63-67.
 24. **Takens F.** On the numerical determination of dimensions of an attractor. *Lect. Notes in Math.* 1125, Springer, Heidelberg. 1985. P. 99-106.
 25. **Nikolis G., Prigozhin I.** *Cognition of the complex*. M. URSS: LЕНАНД. 2014. 354 p.
 26. **Loskutov A.Yu.** *Analysis of time series: a course of lectures*. Access mode: http://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (data 20.02.2017).
 27. **Lyapunov A.M.** The general problem of the stability of motion. Chernovtsy: Mercuriy PRESS. 2000. 386 p.
 28. **Malinetsky G.G.** *Mathematical foundations of synergetics: Chaos, structures, computational experiment*. M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM». 2009. 312 p.
 29. **Kantz H., Schreiber T.** *Nonlinear Time Series Analysis*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 388 p.
 30. **TISEAN 3.0.1 Nonlinear Time Series Analysis**The TISEAN software package.http://www.mpi-pks-dresden.mpg.de/~tisean/Tisean_3.0.1/index.html

Поступила в редакцию (Received) 06.03.2018

Принята к опубликованию (Accepted) 17.07.2018