

Научная статья
УДК 669.017:519.7:543.423.1
doi: 10.17223/24135542/38/9

Синергетический подход к управлению старением живых организмов

**Владимир Ильич Отмахов¹, Юрий Сергеевич Саркисов²,
Алёна Евгеньевна Янюк²**

^{1, 3} *Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия*

¹ *otmahov2004@mail.ru*

² *sarkisov@tsuab.ru*

³ *bloom201328@mail.ru*

Аннотация. Исследование причин и процессов старения организма людей является одной из актуальных проблем современной физики, химии и биологии эволюции живых существ. В работе показано, что наиболее доступным и информативным маркером старения может служить динамика изменения содержания химических элементов в волосах мужчин в зависимости от их возраста. Для исследований использован метод дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (ДАЭС с МАЭС). Показано, что изменение содержания химических элементов в волосах людей мужского пола может служить маркером процессов старения и отвечает теории диссипативного состояния системы в точках бифуркации, которое контролируется функцией самоподобия и кодом обратной связи. Отмечается, что точки бифуркации соответствуют содержанию химических элементов в 10, 20 и 50 лет. Установлено, что детерминированное среднее значение функции самоподобия для исследуемых субъектов популяции мужчин разного возраста отвечает значению 0,79 при коде обратной связи $m = 4$. Показано, что легкие элементы, составляющие основу элементного состава волос человека, сильнее реагируют на возрастные изменения, чем более тяжелые элементы. С увеличением заряда ядра элемента диапазон концентраций содержания химических элементов в волосах мужчин резко снижается. Динамика изменения содержания химических элементов в волосах мужчин может служить надежным маркером процессов возрастного старения организма.

Настоящая работа посвящена изучению процессов старения живых организмов на примере изменения динамики содержания химических элементов в волосах людей мужского пола на разных этапах их жизни.

Ключевые слова: элементный состав волос, маркеры старения, функция самоподобия, спектральный анализ, точки бифуркации

Для цитирования: Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Янюк А.Е. Синергетический подход к управлению старением живых организмов // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 38. С. 109–119. doi: 10.17223/24135542/38/9

Original article

doi: 10.17223/24135542/38/9

Synergetic approach to the management of living organisms aging

Vladimir I. Otmakhov¹, Yury S. Sarkisov², Alena E. Yanyuk³

^{1, 3} *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

² *Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation*

¹ *otmahov2004@mail.ru*

² *sarkisov@tsuab.ru*

³ *bloom201328@mail.ru*

Abstract. Research into the causes and processes of the aging of humans is one of the actual problems of modern physics, chemistry and biology of the evolution of living beings. The paper shows that the most accessible and informative marker of aging can be the dynamics of changes in the chemical elements content in the hair of men depending on their age. The method of arc atomic emission spectroscopy with a multichannel emission spectrum analyzer (AAES with MESA) was used for the research. The paper shows that changes in the chemical elements content in the hair of male humans can serve as a marker of aging processes and meets the theory of dissipative state of the system at bifurcation points, which is controlled by the self-similarity function and feedback code. It is noted that bifurcation points correspond to the content of chemical elements at 10, 20 and 50 years of age. It is found that the deterministic mean value of the self-similarity function for the studied subjects of the men population of different ages corresponds to the value of 0.79, with the feedback code $m = 4$. It is shown that light elements, which form the basis of the elemental composition of human hair, react more strongly to age-related changes than heavier elements. With the increase of the element nucleus charge, the range of concentrations of chemical elements content in men's hair sharply decreases. Dynamics of changes in the content of chemical elements in men's hair can serve as a reliable marker of the processes of aging of the organism.

This work is devoted to the study of aging processes in living organisms on the example of changes in the dynamics of the chemical elements content in the hair of male humans at different stages of their lives.

Keywords: elemental composition of hair, markers of aging, self-similarity function, spectral analysis, bifurcation points

For citation: Otmakhov, V.I., Sarkisov, Yu.S., Yanyuk, A.E. Synergetic approach to the management of living organisms aging. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 38, 109–119. doi: 10.17223/24135542/38/9

Введение

В работах [1–10] развита концепция диссипативного состояния различных по природе систем в точках потери устойчивости симметрии, позволяющая разработать универсальный алгоритм эволюции физических, химических, биологических и других видов объектов материального мира разного

уровня сложности их организации. Эволюция сложных систем на мезо- и макроуровне контролируется их состоянием на микро(нано-)уровне, так как неминуемо проходит через множество «иерархий коллапсов волновых функций, микророждающихся и исчезающих когерентностей, где постоянно существует вероятность выбора (бифуркаций)» предпочтительного направления развития событий [5]. Это обусловлено тем, что точки бифуркации отвечают спонтанному нарушению симметрии и коллапсу волновой функции, и, как показано И. Пригожиным [11], в этих точках проявляется универсальность поведения нано-, мезо- и макросистем живой и неживой природы. Согласно предлагаемому подходу, эволюция сложных систем рассматривается только на основе использования дискретных значений управляющих параметров при переходе от одной точки бифуркации к другой. Показано, что независимо от типа систем взаимосвязь между критическими значениями управляющих параметров, отвечающих потере устойчивости симметрии в предыдущей и последующей точках бифуркаций, определяется функцией самоподобия F :

$$F = \lambda_i / \lambda_{i+1} = \Delta_i^{1/m} \quad (1)$$

где λ_i и λ_{i+1} – критические значения управляющих параметров для предыдущей и последующей точек бифуркаций, отвечающих механизму адаптации путем нарушения симметрии.

Дело в том, что предложенный алгоритм носит универсальный характер только в том случае, если мера устойчивости таких систем Δ_i отвечает одному из чисел, обобщенных золотой пропорцией, связанных с оператором действия (P) золотой пропорцией двоичным кодом обратной связи:

$$m = 2^{P-1}. \quad (2)$$

Обобщенное уравнение золотой пропорции имеет вид:

$$x^{P-1} - x^P - 1 = 0 \quad (3)$$

при $p = 1, 2, 3, 4 \dots$

Это уравнение отвечает спектру мер устойчивости симметрии любой системы в виде иерархического ряда значений положительных корней d_p уравнения: 1,618; 1,465; 1,380; 1,324; 1,285; 1,255; 1,232; 1,213... и соответствующего ряда значений иррациональных чисел $\Delta_i = d_p - 1$: 0,618; 0,465; 0,380; 0,324; 0,285; 0,255; 0,232; 0,213. В этих рядах значения d_p и Δ_i являются мерой устойчивости симметрии системы, изменяющейся самоподобно при переходе от предыдущего значения Δ_i (или d_p) к последующему. При этом m характеризует порог адаптивности системы к изменению кода устойчивости и может принимать значения 2, 4, 8 и т. д. [5].

В настоящей работе сделана попытка применить развиваемый подход к изучению процессов старения живых организмов на примере содержания химических элементов в волосах людей мужского пола на разных этапах их жизни. Маркеров старения организма множество. Однако выбранный маркер динамики изменения содержания химических элементов в волосах мужчин в зависимости от их возраста является, на наш взгляд, наиболее доступным и в то же время не менее информативным.

Методика эксперимента

Элементный анализ проводился с помощью спектрометра «Гранд» с многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС) в комплексе с полихроматором «Роулэнд» и генератором «Везувий-3» [12–22]. Рабочий спектральный диапазон от 160 до 1 100 нм с пределами спектрального разрешения от 0,005 до 0,3 нм, диапазоном определения массовой концентрации элементов состава веществ и материалов от 10^{-7} до 100%, пределом допускаемого значения среднего квадратического отклонения результатов определения массовой концентрации элементов состава веществ и материалов не более 10% и пределом допускаемого значения систематической погрешности определения массовой концентрации элементов состава веществ и материалов не более 20 %. При выполнении измерений использовали стандартные образцы состава графитового коллектора микропримесей (комплект СОГ-37) (ГСО 8487–2003) со сроком действия 60 лет [23]. Пробоподготовка проводилась в соответствии с методикой измерений массовой концентрации элементов в пробах волос пациентов методом атомно-эмиссионного анализа с дуговым возбуждением спектра. Свидетельство об аттестации методики измерений № 08-47/380.01.00143–2013.2016 от 02.02.2016 [24].

Для расчета функции самоподобия F была использована выборка из 100 пациентов, потеря устойчивости симметрии рассчитывалась по точкам бифуркации как среднее значение величин, представляющих концентрации основных элементов, входящих в состав волос, – Ca, Na, Mg, Zn, K. Функция самоподобия определялась путем отношения предыдущей и последующей точек бифуркаций λ_i и λ_{i+1} , записанных в порядке возрастания для исследуемых выборок.

Результаты исследования

На рис. 1–7 представлены экспериментальные результаты изменения концентраций химических элементов в волосах мужчин в возрасте от 5 до 80 лет. Как видно из представленных рисунков, все они характеризуются в основном одинаковым чередованием экстремумов приблизительно в 10, 20 и 50 лет. Эта тенденция характерна для самых разных по природе химических элементов и, безусловно, не является случайной. По нашему мнению, отмеченные экстремумы возраста мужчин отвечают точкам бифуркации, в которых происходят перестройка организма, потеря устойчивости симметрии функции самоподобия, проявляются признаки адаптации как к новым изменениям внутри организма, так и к внешним воздействиям окружающей среды. Как видно из таблицы, содержание элементов в волосах мужчин резко уменьшается с увеличением порядкового номера элемента. Но независимо от диапазона концентрации все кривые носят симбатный характер. Содержание элементов различных металлов стабильно невысокое, но в 10, 20 и 50 лет кривые носят скачкообразный характер и являются маркерами старения организма. Установлено, что организм сам циклично и ступенчато может регулировать элементный баланс содержания химических элементов в соответствии с возрастом человека.

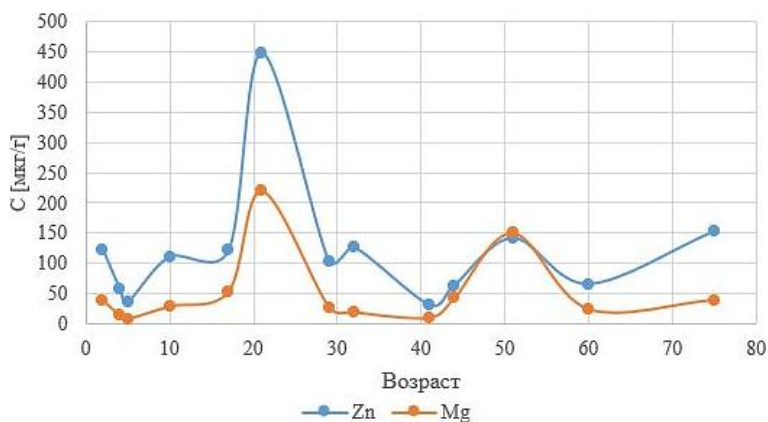


Рис. 1. Периодическая зависимость содержания цинка и магния в мужских волосах от возраста

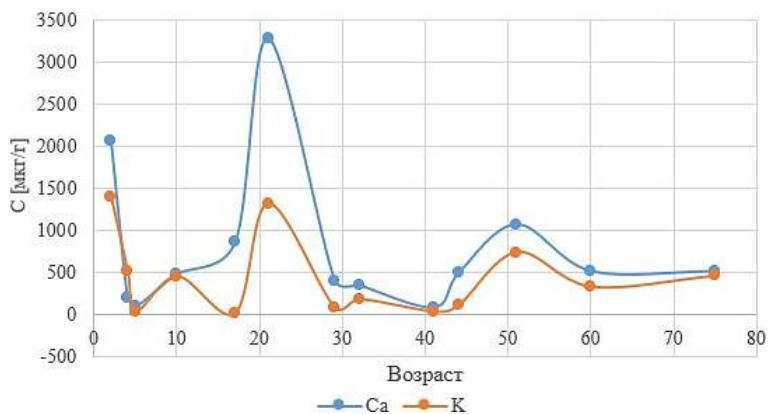


Рис. 2. Периодическая зависимость содержания кальция и калия в мужских волосах от возраста

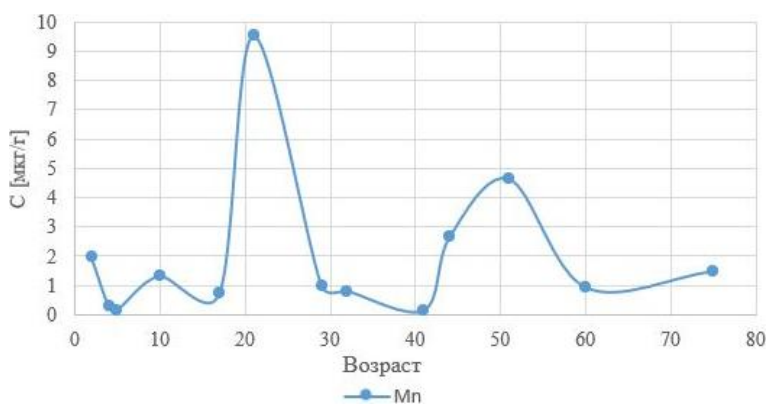


Рис. 3. Периодическая зависимость содержания марганца в мужских волосах от возраста

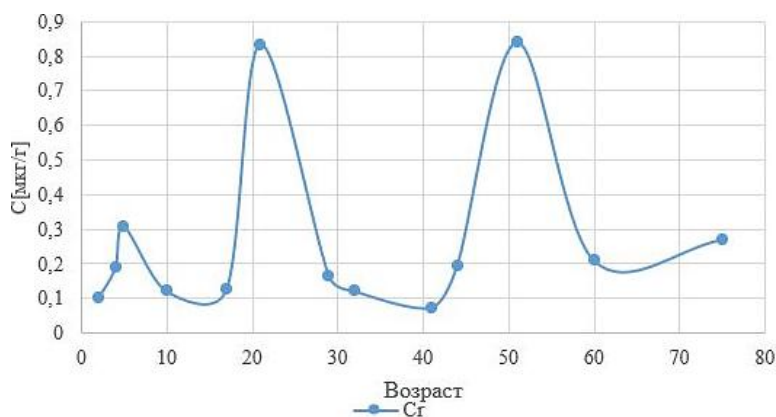


Рис. 4. Периодическая зависимость содержания хрома в мужских волосах от возраста

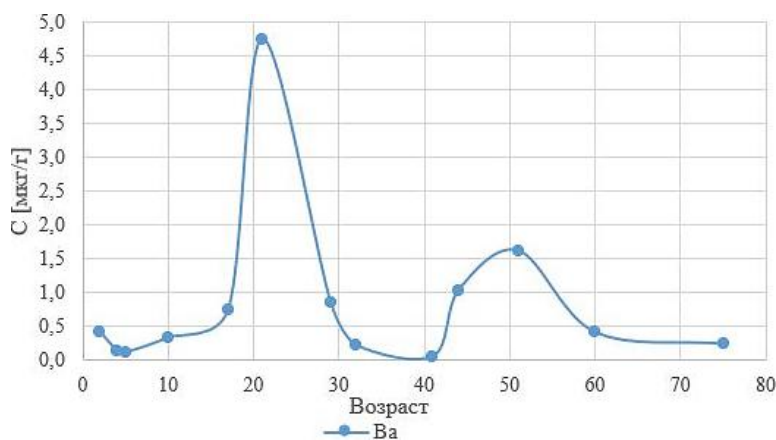


Рис. 5. Периодическая зависимость содержания бария в мужских волосах от возраста

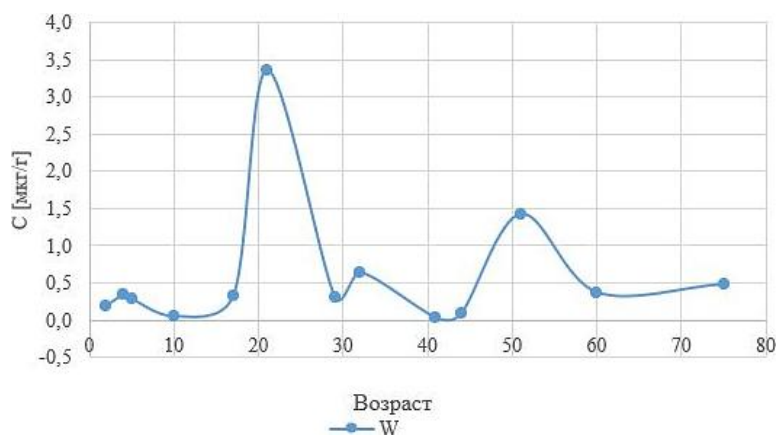


Рис. 6. Периодическая зависимость содержания вольфрама в мужских волосах от возраста

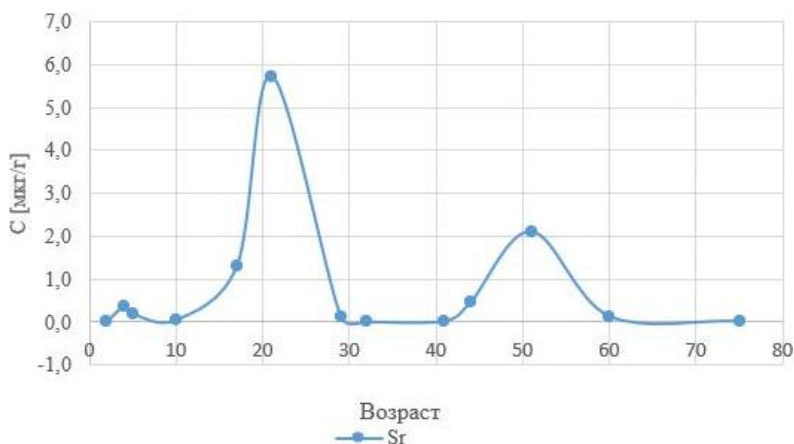


Рис. 7. Периодическая зависимость содержания стронция в мужских волосах от возраста

Диапазон концентраций основных структурообразующих химических элементов в волосах мужчин ($n = 20$), мкг/г

Элементы	Ca	K	Mg	Ba	Mn	Zn	W	Sr
Возраст 20 и 50 лет	3 300–1 000	1 300–700	220–150	4,5–1,7	9,5–4,5	450–150	3,5–1,5	6–2

Данные таблицы нами распространены на всю популяцию мужчин разного возраста ($n = 100$), и по этим данным рассчитаны детерминированные значения функции самоподобия.

Применяя теорию бифуркаций к анализу изменения динамики содержания химических элементов в волосах мужчин, можно утверждать, что система характеризуется множеством самоподобных состояний, взаимосвязанных функцией F и универсальной мерой устойчивости симметрии системы, равной одному из чисел обобщенной золотой пропорции и связанной с кодом обратной связи.

Как видно из работы [5], детерминированные значения функции самоподобия F , отвечающей сохранению меры устойчивости, связанной с кодом обратной связи, изменяются от 0,618 до 1. Функция самоподобия для отмеченных выше точек бифуркации в 10, 20 и 50 лет, характеризующая содержание химических элементов в мужских волосах для всей популяции в процессе ее эволюции, оказалась равной 0,79 при коде обратной связи $m = 4$, что соответствует базовому значению инварианту золотой пропорции $0,380^{1/4}$. Это означает, что изменение содержания химических элементов в волосах мужчин носит нелинейный характер и характеризует перестройку организма с возрастом человека как множество чередующихся метастабильных состояний в процессе последовательного приспособления (адаптации) организма к новым условиям. Это еще раз подтверждает, что волосы человека могут служить маркером старения и объективно характеризовать один из его аспектов.

Заключение

Результаты, полученные в работе, носят предварительный характер, так как связаны со слабой изученностью генетических, экологических, биогеохимических и других факторов. Из-за методических и методологических трудностей невозможно объективно оценить некоторые факторы старения по динамике изменения химического состава волос мужчин. В настоящее время исследования в этом направлении углубляются и расширяются с целью получения более достоверных данных. Дальнейшие исследования позволят открыть новые, более глубокие закономерности взаимосвязи вещественного изменения содержания химических элементов в волосах человека с самыми различными признаками (маркерами) старения. Это является предметом дальнейших исследований.

Список источников

1. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М. : Наука, 1994. 383 с.
2. Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закиричная М.М. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 1998. 366 с.
3. Иванова В.С. Приложение квантовой теории И. Пригожина к анализу самоорганизации частиц // Прикладная синергетика – II : труды конф. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 2004. С. 201–208.
4. Иванова В.С. Разрушение металлов. М. : Металлургия, 1979. 167 с.
5. Иванова В.С. Введение в междисциплинарное и наноматериаловедение. М. : Сайнс-пресс, 2005. 208 с.
6. Иванова В.С. Механика и синергетика усталостного разрушения // Физико-химическая механика материалов. 1986. № 22 (1). С. 62–68.
7. Иванова В.С. Макрокинетика самоорганизующихся превращений в метастабильных сплавах // Известия РАН. Металлы. 1998. № 1. С. 84–89.
8. Иванова В.С. Универсальность свойств самоорганизации динамических структур живой и костной природы // Синергетика : сб. науч. тр. семинара. М. : МГУ, 1999. Т. 2. С. 85–98.
9. Иванова В.С. О связи структуры со свойствами материалов в критических точках // Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова. 60 лет : сб. науч. тр. М. : ЭЛИЗ, 1998. С. 412–429.
10. Иванова В.С., Фолманис Г.Э. Самоуправляемый синтез наночастиц в неравновесных физико-химических процессах // Нелинейный мир. 2004. № 2. С. 81–85.
11. Пригожин И. Конец определенности. Время. Хаос и Новые законы природы // Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 1999. 215 с.
12. Отмахов В.И., Рабцевич Е.С., Горст Д.А., Петрова Е.В., Бабенков Д.Е. Создание методики определения элементного состава клещей для оценки их восприимчивости к возбудителям клещевых инфекций // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2018. № 11. С. 23–31.
13. Отмахов В.И., Рабцевич Е.С., Петрова Е.В., Шилова И.В., Шелег Е.С., Бабенков Д.Е. Элементный анализ лекарственных растений Сибири методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии с многоканальным анализатором эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 85 (1, ч. II). С. 60–66.
14. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Павлова А.Н., Обухова А.В. Периодические зависимости распределения химических элементов в зольном остатке волос человека // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 85 (1, ч. II). С. 73–77.

15. Бабенков Д.Е., Отмахов В.И., Петрова Е.В., Повесьма Ю.А., Салосина Ю.Е. Методология выбора алгоритмов оптимизации условий проведения дугового атомно-эмиссионного спектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 85 (1, ч. II). С. 77–81.
16. Отмахов В.И. Методологические особенности создания методик атомно-эмиссионного анализа различных объектов // Аналитика и контроль. 2005. № 9 (3). С. 245–249.
17. Отмахов В.И., Обухова А.В., Ондар С.А., Омельченко М.В., Рабцевич Е.С., Петрова Е.В. Оценка достоверности проведения химического анализа волос методом дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2018. № 12. С. 25–36.
18. Отмахов В.И., Петрова Е.В. Атомно-эмиссионный анализ биологических объектов с целью проведения экомониторинга районов Томской области и горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 1. С. 73–77.
19. Обухова А.В., Отмахов В.И., Шилова И.В., Саркисов Ю.С., Янюк А.Е., Петрова Е.В. Особенности накопления элементов в плодово-ягодных растениях, культивируемых в окрестностях г. Зеленогорска Красноярского края // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 289–298.
20. Отмахов В.И., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Кускова И.С., Обухова А.В., Петрова Е.В. О некоторых закономерностях распределения химических элементов в живых организмах // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. № 17. С. 34–50. doi: 10.17223/24135542/17/3
21. Otmakhov V.I., Kuskova I.S., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Chemical codes identification based on periodic dependences of chemical element distribution in biological objects // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1611 (1). Art. 012038. doi: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038
22. Otmakhov V.I., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Atomic Emission Spectrometer “Grand” for Studying the Features of Accumulation and Distribution of Chemical Elements in Objects of Animal Origin // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 574. P. 1362–1371. doi: 10.1007/978-3-031-21432-5_145
23. ГСО 8487–2003. Стандартные образцы состава графитового коллектора микропримесей : комплект СОГ-37. Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2003. 12 с.
24. Методика (метод) измерений массовой концентрации элементов в пробах волос методом атомно-эмиссионного анализа с дуговым возбуждением спектра : свидетельство об аттестации методики измерений № 08-47/380.01.00143-2013.2016 от 02.02.2016.

References

1. Ivanova V.S.; Balankin A.S.; Bunin I.Zh.; Oksogoev A.A. *Sinergetika i fraktaly` v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]; M.: Nauka, 1994; P. 383.
2. Ivanova V.S.; Kuzeev I.R.; Zakirnichnaya M.M. *Sinergetika i fraktaly`. Universal`nost` mexanicheskogo povedeniya materialov* [Synergetics and fractals. The universality of the mechanical behavior of materials]; Ufa, 1998; P. 366.
3. Ivanova V.S. Prilozhenie kvantovoj teorii I. Prigozhina k analizu samoorganizacii chasticz nanomira [Application of I. Prigozhins quantum theory to the analysis of self-organization of particles in the nanoworld]. *Trudy` konferencii “Prikladnaya sinergetika – II”*. Ufa, UGNT, 2004, PP. 201–208.
4. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov* [Destruction of metals]; M.: Metallurgiya, 1979; P. 167.
5. Ivanova V.S. *Vvedenie v mezhdisciplinarnoe i nanomaterialovedenie* [Introduction to Interdisciplinary and Nanomaterial Science]; M.: SAJNS-PRESS, 2005; P. 208.
6. Ivanova V.S. Mexanika i sinergetika ustalostnogo razrusheniya [Mechanics and synergetics of fatigue failure]. *Fiz-xim. mexanika materialov*. 1986, 22, 1, P.62–68.
7. Ivanova V.S. Makrokinetika samoorganizuyushhixsya prevrashshenij v metastabil`ny`x splavax [Macrokinetics of self-organizing transformations in metastable alloys]. *Izv. RAN. Metally`*. 1998, 1, P. 84–89.

8. Ivanova V.S. Universal'nost' svoystv samoorganizatsii dinamicheskix struktur zhivoj i kostnoj prirody. Sinergetika [The universality of the self-organization properties of dynamic structures of living and bony nature. Synergetics]. *Sb. nauchny'x trudov seminarov*. M.: MGU, 1999, t. 2, P. 85–98.
9. Ivanova V.S. O svyazi struktury so svoystvami materialov v kriticheskix tochkax [On the relationship between structure and material properties at critical points]. *Sb. "Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Bajkova 60 let"*. M.: E'LIZ, 1998, P. 412–429.
10. Ivanova V.S.; Folmanis G.E'. Samoupravlyaemy'j sintez nanochastits v neravnovesny'x fiziko-ximicheskix processax [Self-controlled synthesis of nanoparticles in nonequilibrium physico-chemical processes]. *Nelinejny'j mir*. 2004, 2, 2, P. 81–85.
11. Prigozhin I. *Konecz opredelyonnosti. Vremya. Khaos i Novy'e zakony' prirody* [The end of certainty. Time. Chaos and New laws of Nature]; Izhevsk: Regul'yarnaya i xaocheskaya dinamika, 1999; P. 215.
12. Otmaxov V.I.; Rabcevizh E.S.; Gorst D.A.; Petrova E.V.; Babenkov D.E. Sozdanie metodiki opredeleniya e'lementnogo sostava kleshhej dlya ocenki ix vospriimchivosti k vozbuditelyam kleshhevy'x infekcij [Creation of a methodology for determining the elemental composition of ticks to assess their susceptibility to tick-borne pathogens.]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ximiya*. 2018, 11, P. 23–31.
13. Otmaxov V.I.; Rabcevizh E.S.; Petrova E.V.; Shilova I.V.; Sheleg E.S.; Babenkov D.E. E'lementny'j analiz lekarstvenny'x rastenij Sibiri metodom dugovoj atomno-e'missionnoj spektrometrii s mnogokanal'ny'm analizatorom e'missionny'x spektrov [Elemental analysis of medicinal plants of Siberia by arc atomic emission spectrometry with a multichannel analyzer of emission spectra]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019, 85, 1, ch. II, P. 60–66.
14. Otmaxov V.I.; Sarkisov Yu.S.; Pavlova A.N.; Obuxova A.V. Periodicheskie zavisimosti raspredeleniya ximicheskix e'lementov v zol'nom ostatke volos cheloveka [Periodic dependences of the distribution of chemical elements in the ash residue of human hair]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019, 85, 1, ch. II, P. 73–77.
15. Babenkov D.E.; Otmaxov V.I.; Petrova E.V.; Poves'ma Yu.A.; Salosina Yu.E. Metodologiya vy'bora algoritmov optimizatsii uslovij provedeniya dugovogo atomno-e'missionnogo spektral'nogo analiza [Methodology for selecting algorithms for optimizing the conditions for conducting arc atomic emission spectral analysis]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019, 85, 1, ch. II, P. 77–81.
16. Otmaxov V.I. Metodologicheskie osobennosti sozdaniya metodik atomno-e'missionnogo analiza razlichny'x ob'ektov [Methodological peculiarities of the creation of atomic emission analysis techniques for various objects]. *Analitika i kontrol'*. 2005, 9, 3, P. 245–249.
17. Otmaxov V.I.; Obuxova A.V.; Ondar S.A.; Omel'chenko M.V.; Rabcevizh E.S.; Petrova E.V. Ocenka dostovernosti provedeniya ximicheskogo analiza volos metodom dugovoj atomno-e'missionnoj spektroskopii [Assessment of the reliability of the chemical analysis of hair by the method of arc atomic emission spectroscopy]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ximiya*. 2018, 12, P. 25–36.
18. Otmaxov V.I.; Petrova E.V. Atomno-e'missionny'j analiz biologicheskij ob'ektov s cel'yu provedeniya e'kmonitoringa rajonov Tomskoj oblasti i gornogo Altaya [Atomic emission analysis of biological objects for the purpose of ecomonitoring the districts of the Tomsk region and the Altai Mountains]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2004, 307, 1, P. 73–77.
19. Obuxova A.V.; Otmaxov V.I.; Shilova I.V.; Sarkisov Yu.S.; Yanyuk A.E.; Petrova E.V. Osobennosti nakopleniya e'lementov v plodovo-yagodny'x rasteniyax, kul'tiviruemy'x v okrestnostyax g. Zelenogorsk Krasnoyarskogo kraja [Peculiarities of the elements accumulation in fruit and berry plants cultivated in the vicinity of Zelenogorsk, Krasnoyarsk Territory]. *Ximiya rastitel'nogo sy'r'ya*. 2023, 4, P. 289–298.
20. Otmaxov V.I.; Sarkisov Yu.S.; Gorlenko N.P.; Kuskova I.S.; Obuxova A.V.; Petrova E.V. O nekotory'x zakonomernostyax raspredeleniya ximicheskix e'lementov v zhivy'x organizmax

- [On some regularities of the distribution of chemical elements in living organisms]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*. 2020, 17, P. 34–50. doi: 10.17223/24135542/17/3
21. Otmakhov, V.I.; Kuskova, I.S.; Obukhova, A.V.; Petrova, E.V.; Sarkisov, Y.S. Chemical codes identification based on periodic dependences of chemical element distribution in biological objects // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1611 (1). Art. 012038. doi: 10.1088/1742-6596/1611/1/012038
 22. Otmakhov V.I., Obukhova A.V., Petrova E.V., Sarkisov Y.S. Atomic Emission Spectrometer “Grand” for Studying the Features of Accumulation and Distribution of Chemical Elements in Objects of Animal Origin // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 574. P. 1362–1371. doi: 10.1007/978-3-031-21432-5_145
 23. GSO 8487–2003. *Standartny`e obrazcy sostava grafitovogo kollektora mikroprimesej* [Standard samples of structure of a graphite collector of microimpurity]. Komplekt SOG-37. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2003. P. 12.
 24. *Metodika (metod) izmerenij massovoy koncentracii e`lementov v probax volos metodom atomno-e`missionnogo analiza s dugovy`m vozbuzhdeniem spektra* [Methodology (method) for measuring the mass concentration of elements in hair samples by atomic emission analysis with arc excitation of the spectrum]. Svidetel'stvo ob attestacii metodiki izmerenij № 08-47/380.01.00143-2013.2016 ot 02.02.2016.

Сведения об авторах:

Отмахов Владимир Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры аналитической химии химического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: otmahov2004@mail.ru

Саркисов Юрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии общеобразовательного факультета Томского государственного архитектурно-строительного университета (Томск, Россия). E-mail: sarkisov@tsuab.ru

Янюк Алёна Евгеньевна – магистрант кафедры аналитической химии химического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: bloom201328@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Otmakhov Vladimir I. – PhD, Professor, Analytical Chemistry Department, Chemical Faculty, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: otmahov2004@mail.ru

Sarkisov Yuriy S. – PhD, Professor, Department of Chemistry, Faculty of General Education, Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sarkisov@tsuab.ru

Yanyuk Alena E. – Master's Student of the Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bloom201328@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.02.2025; принята к публикации 29.09.2025
The article was submitted 08.02.2025; accepted for publication 29.09.2025