



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2026. Т. 34, № 3
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2026;34(3)

Научная статья
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003217
EDN: WSMBBS

Нахождение связей трех взаимодействующих биологических осцилляторов методом моделирования фазовой динамики

О. Е. Дик

Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: [✉ dickviola@gmail.com](mailto:dickviola@gmail.com)

Поступила в редакцию 17.02.2026, принята к публикации 28.03.2026,
опубликована онлайн 2.04.2026, опубликована 29.05.2026

Аннотация. Цель настоящей работы — выявление связей трех взаимодействующих биологических осцилляторов с помощью метода моделирования фазовой динамики и определение зависимости влияния патологического состояния на конфигурации однонаправленных тройных связей этих систем. **Методы.** Для решения задачи выявления взаимосвязей применен метод моделирования фазовой динамики слабосвязанных систем. В качестве характеристик взаимосвязи между системами использованы оценки матрицы связности трехосцилляторной сети. **Результаты.** Проведена проверка правильности выявления связей для модели трёх хаотических осцилляторов Ресслера с известными направленными связями и выявлена возможность появления дополнительного влияния одного осциллятора на другой или совместного влияния двух осцилляторов на третий при увеличении силы связи. Для экспериментальных временных рядов, соответствующих флуктуациям дыхательного ритма, кривым variability артериального давления и variability интервалов нейрональной активности продолговатого мозга, выявлено влияние патологического состояния на появление дополнительных связей в тройных взаимодействиях осцилляторов нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем. **Заключение.** Применение метода моделирования фазовой динамики для оценки характеристик взаимосвязи между тремя взаимодействующими биологическими осцилляторами показало важность влияния физиологического состояния на оценку преимущественного влияния одного осциллятора на другой.

Ключевые слова: фазовая динамика, три связанные системы, связность, биологические осцилляторы.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке государственного финансирования, выделенного Институту физиологии им. И. П. Павлова РАН (№ 1021062411784-3-3.1.8).

Для цитирования: Дик О. Е. Нахождение связей трех взаимодействующих биологических осцилляторов методом моделирования фазовой динамики // Известия вузов. ПНД. 2026. Т. 34, № 3. С. 463–480. DOI: 10.18500/0869-6632-003217. EDN: WSMBBS

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Finding connections between three interacting biological oscillators using phase dynamics modeling

O. E. Dick

Pavlov Institute of Physiology of Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia
E-mail: [✉dickviola@gmail.com](mailto:dickviola@gmail.com)

Received 17.02.2026, accepted 28.03.2026, available online 2.04.2026, published 29.05.2026

Abstract. The *purpose* of this work was to identify couplings between three interacting biological oscillators using phase dynamics modeling and to determine the influence of a pathological condition on the configuration of unidirectional triplewise couplings in these systems. *Methods.* To identify these couplings, we used phase dynamics modeling for weakly coupled systems. Estimates of the connectivity matrix of the three-oscillator network were used to characterize the interconnections between the systems. *Results.* We verified the accuracy of identifying couplings for a model of three chaotic Rössler oscillators with known directional couplings. We also identified the possibility of additional influence of one oscillator on another, or the combined influence of two oscillators on a third, with increasing coupling strength. For experimental time series corresponding to respiratory rate fluctuations, blood pressure variability curves, and variability of neuronal activity intervals in the medulla oblongata, we identified the influence of a pathological condition on the emergence of additional couplings in triple interactions between oscillators in the nervous, respiratory, and cardiovascular systems. *Conclusion.* The application of phase dynamics modeling to assess the characteristics of the coupling between three interacting biological oscillators demonstrated the importance of physiological state in assessing the predominant influence of one oscillator over another.

Keywords: phase dynamics, three coupled systems, couplings, biological oscillators.

Acknowledgements. This work was supported by state funding allocated to the Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences (No. 1021062411784-3-3.1.8).

For citation: Dick OE. Finding connections between three interacting biological oscillators using phase dynamics modeling. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2026;34(3):463–480. DOI: 10.18500/0869-6632-003217

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Выявление управляющих функциональных взаимодействий между системами, имеющими сложную топологию связности, представляет собой актуальную задачу, решение которой важно для определения механизмов функционирования анализируемых систем. Эти задачи широко применяются для выявления климатологических взаимосвязей [1, 2], для исследования процессов передачи информации в нейронных сетях различных областей мозга [3–5], для анализа взаимосвязей сигналов сердечно-сосудистой и дыхательной систем [6, 7], а также для анализа взаимодействия сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем [8, 9].

Изучаемые парные взаимодействия между двумя системами могут быть функционально ненаправленными и синхронными, а могут быть направленными, например, двунаправленными (когда обе системы влияют друг на друга) или однонаправленными (когда одна система влияет на другую). В этом случае применяются методы анализа двумерных временных рядов, генерируемые анализируемыми системами, в частности, методы, основанные на реконструкции фазовой динамики. Однако в реальных приложениях необходимо применять методы, рассчитанные на многомерный анализ временных рядов, для определения связности большего количества анализируемых систем.

Как правило, структура связи многомерных систем определяется с помощью попарного анализа. Для этой цели было разработано множество методов, таких как вычисление нелинейных индексов причинности Грейнджера [10], показателей на основе пространства состояний [11],

условной взаимной информации [12], энтропии переноса [13], мер, основанных на фазовой динамике [14] и условных вероятностях рекуррентности [15].

Однако парный анализ часто недостаточен для выявления более сложных взаимодействий между временными рядами [16, 17]. В работах [18, 19] предложены методы тройного анализа для определения направленной связности малой сети систем посредством реконструкции фазовой динамики из многомерных временных рядов. Сравнивая функции связи всех возможных триплетов осцилляторов, авторы продемонстрировали возможность надежного определения направленности существующих связей, доказав это на небольших сетях осцилляторов ван дер Поля с известной направленностью связей и периодическими незашумленными сигналами и продемонстрировав возможность идентификации дополнительных связей, отсутствующих в исходной системе, что связано с увеличением силы связи [18, 19].

Известно, что направленность парных связей двух экспериментально зарегистрированных сигналов, генерируемых биологическими осцилляторами, может зависеть от функционального состояния в норме или при его нарушении [8, 9]. В работе [5] на основе метода моделирования фазовой динамики выявлено изменение направленности парных связей между низкочастотными электроэнцефалографическими (ЭЭГ) сигналами различных областей мозга при повышении уровня стресса у здоровых испытуемых за счет решения стрессогенных когнитивных задач. В работе [4] также выявлено изменение направленности парных связей между ЭЭГ-сигналами различных областей мозга во время приступа эпилепсии у пациентов со сниженным уровнем сознания.

Актуальной задачей является выявление влияния нарушения функциональных состояний на направленность связей между одновременно экспериментально зарегистрированными сигналами трех биологических осцилляторов, то есть нахождение конфигураций тройных связей между дыхательной, сердечно-сосудистой и нервной системами.

Целью данной работы является выявление связей трех взаимодействующих биологических осцилляторов с помощью метода моделирования фазовой динамики и определение зависимости влияния патологического состояния на конфигурации однонаправленных тройных связей этих осцилляторов.

В первой части работы для проверки правильности определения структуры связи трехосцилляторной сети применена модель трёх хаотических осцилляторов Ресслера с известными однонаправленными связями. Во второй части работы для анализируемых данных использованы флуктуации дыхательного ритма (RES), кривые вариабельности артериального давления (BPV) и вариабельности нейрональной активности (NAV) продолговатого мозга крыс, полученные и подробно описанные в работах [8, 20] для двух групп крыс (контрольной группы и группы с патологическим состоянием в форме экспериментально вызванного колита).

Для каждой группы проанализированы 15 временных рядов BPV, NAV, RES длительностью 55 секунд и содержащих 55000 значений. Эти временные ряды извлечены из одновременно зарегистрированных колебаний артериального давления, дыхания и нейрональной активности, зарегистрированной с помощью электрода, погруженного в область ретикулярной формации продолговатого мозга, обусловленной тем, что именно в этой области находятся нейроны, связанные с патологией кишечника. Временные ряды BPV и NAV являются последовательностями временных интервалов между локальными максимумами исходных данных нейрональной активности и артериального давления; аппроксимированы кубическими сплайнами с удалением нелинейных трендов и полосовой фильтрацией с основными частотами, близкими к частоте дыхательного ритма.

В предыдущих работах [8, 20] эти данные были использованы для выявления фазовой синхронизации между попарными временными рядами, а в работах [9, 21] для определения направленности влияния сигналов одной системы на другую и выяснения изменения характеристик взаимосвязи во время болевого воздействия.

1. Методика

Определение связности основано на применении модели фазовой динамики взаимодействующих систем. Для сигналов, генерируемых этими системами, сначала вычисляются мгновенные фазы $\phi_k(t)$, а затем создается модель фазовой динамики, определяющая приращения мгновенных фаз на временном интервале τ [14]:

$$\Delta\phi_k(t) = \phi_k(t + \tau) - \phi_k(t) = F_k(\phi_X(t), \phi_Y(t), \phi_Z(t)), \quad k = X, Y, Z. \quad (1)$$

В настоящей работе сначала для каждого сигнала (например, сигнала $x(t)$) оценивались мгновенные протофазы $\Theta_X(t)$ с помощью синхросжатого вейвлетного преобразования с комплексной вейвлетной функцией Морле [22]:

$$SWT(f, t) = \frac{1}{\Delta f} \sum_{f_k} W(f_k, t) f_k^{3/2} \Delta f_k, \quad (2)$$

где $\Delta f_k = f_k - f_{k-1}$, $f_k = (k/n)F_s$, $k = 1, \dots, n$, F_s — частота дискретизации сигнала $x(t)$, n — количество частот f , используемых в вычислении $W(f, t)$:

$$W(f, t) = f \int_{-\infty}^{+\infty} x(t') \exp(-0.5(t' - t)^2 f^2) \exp(-2\pi i(t' - t)f) dt'. \quad (3)$$

Применение вейвлет-преобразования приводит к полосовой фильтрации $x(t)$ и созданию аналитического сигнала $s(t) = A(t) \exp(i\Theta(t))$ вокруг частоты f . Например, определение мгновенных фаз на основе вейвлетного преобразования для фиксированного временного масштаба применено в работах [23, 24]: для выявления климатологических взаимосвязей.

Вычисление протофаз основано на нахождении частотных компонент сигнала решением задачи условной оптимизации поиска среди всех кривых гребней тех $f_r(t)$, для которых коэффициенты синхросжатого вейвлетного преобразования $SWT(f, t)$ максимальны, что соответствует минимуму функции [25]:

$$P(f_r) = - \int SWT(f_r(t), t)^2 dt + 0.01 \int [(df_r(t)/dt)^2 + (df_r^2(t)/d^2t)^2] dt. \quad (4)$$

На основе определенного гребня $f_r(t)$ мгновенная частота $f(t)$ и мгновенная протофаза $\Theta(t)$ анализируемого сигнала определяются:

$$f(t) = f_r(t), \Theta(t) = \arg | SWT(f_r(t), t) |. \quad (5)$$

Преобразование полученной протофазы $\Theta(t)$ в истинную развернутую фазу $\phi(t)$, увеличивающуюся на 2π за каждый полный оборот радиуса-вектора, осуществляется по методу [26]:

$$\phi = \Theta + 2 \sum \text{Im} [S_n(\exp(in \Theta - 1)/n)], \quad (6)$$

где

$$S_n = 1/N \sum_{j=1}^N \exp(in \Theta_j). \quad (7)$$

Глобальный вейвлетный спектр, задающий усредненное распределение энергии синхросжатого вейвлетного спектра по частотам на временном интервале $[t_1, t_2]$, определяется

$$E(f) = f \int_{t_1}^{t_2} | SWT(f, t) |^2 dt. \quad (8)$$

Далее в виде ряда Фурье задаются функции связности для всех трех определенных фаз [27]:

$$F_k(\phi_X(t), \phi_Y(t), \phi_Z(t)) = \sum_{l_X, l_Y, l_Z} A_{X, l_Y, l_Z}^{(k)} \exp(i(l_X \phi_X(t) + l_Y \phi_Y + l_Z \phi_Z)). \quad (9)$$

Эти функции описывают различные варианты взаимодействий [18]. Для нахождения коэффициентов $A_{X, l_Y, l_Z}^{(k)}$ находятся минимумы функций:

$$S_j^2 = 1/(N - \tau) \sum_{i=1}^{N-\tau} ((\phi_k(t_i + \tau) - \phi_k(t_i)) - F_k(\phi_X(t), \phi_Y(t), \phi_Z(t)))^2, \quad k = X, Y, Z. \quad (10)$$

В соответствии с работами [14, 27], в качестве τ мы использовали значения, равные меньшему из характерных периодов колебаний анализируемых сигналов, и значения $l_k = 3, k = X, Y, Z$, так как усложнение фазовой модели повышает возможность определения ложных связей [28]. То есть для экспериментальных данных использовались значения τ , равные меньшему из характерных периодов колебаний RES, BPV, NAV в узкополосном диапазоне частот [1.2, 2.4] Гц, и порядок разложения $l_k = 3, k = RES, BPV, NAV$.

В работах [18, 19] предложено вычислять частичные нормы функций связи, количественно определяющие направленность связи. Парное действие осциллятора j на осциллятор k определяется компонентами функций $F_k(\phi_X(t), \phi_Y(t), \phi_Z(t))$, которые зависят только от фаз $\phi_k(t)$ и $\phi_j(t)$. Частичная норма $N_{j \rightarrow k}$ для парной связи вычисляется по формуле [18]:

$$N_{j \rightarrow k}^2 = \sum_{l_k, l_j=0} |A_{0, \dots, 0, l_k, 0, \dots, 0, l_k, 0, \dots}|^2. \quad (11)$$

Совместное действие осцилляторов j и m на осциллятор k определяется членами перекрестной связи, содержащими три фазы $\phi_k(t), \phi_j(t), \phi_m(t)$ [18]:

$$N_{j, m \rightarrow k}^2 = \sum_{l_k, l_j=0, l_m=0} |A_{0, \dots, 0, l_k, 0, \dots, 0, l_k, 0, \dots, l_m, 0, \dots}|^2. \quad (12)$$

Вычисленные частичные нормы записываются как элементы матрицы C , определяющей структуру связности трехосцилляторной сети:

$$\begin{pmatrix} C(X, X) & C(X, Y) & C(X, Z) \\ C(Y, X) & C(Y, Y) & C(Y, Z) \\ C(Z, X) & C(Z, Y) & C(Z, Z) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Недиагональные элементы $C(k, j)$ этой матрицы представляют частичные нормы $N_{j \rightarrow k}$, полученные по формуле (11). Диагональные элементы $C(k, k)$ определяют частичные нормы $N_{j, m \rightarrow k}$, вычисленные по формуле (12). Например, максимальное значение элемента $C(X, Y) = N_{Y \rightarrow X}$ матрицы определяет однонаправленную связь $Y \rightarrow X$. Максимальное значение члена перекрестной связи, определяемого элементом $C(X, X) = N_{Y, Z \rightarrow X}$, задает совместное влияние осцилляторов Y и Z на осциллятор X [18].

Оценка направленности связи между взаимодействующими осцилляторами проводилась для данных в несинхронном режиме, для которых показатель синхронизации между анализируемыми $x(t)$ и $y(t)$, вычисляемый в скользящем окне шириной Δt и сдвигом, равным интервалу дискретизации, по формуле [29]:

$$\rho = |1/N \sum_{j=1}^k \exp(2\pi i(\phi_X(t + j\Delta t/N) - \phi_Y(t + j\Delta t/N)))|, \quad (14)$$

меньше 0.6.

Для оценки статистической значимости вычисленных максимальных элементов $C(i, j)$ матрицы связи C мы применили статистический тест с созданием 100 суррогатных временных рядов. Суррогатные данные генерировались для каждого анализируемого сигнала методом, основанным на рекуррентности [30]. Нулевая гипотеза заключалась в том, что анализируемые сигналы имеют независимые рекуррентные структуры, приводящие к отсутствию возможных вариантов связности. Обозначим $M = C(i, j)$ для исходного сигнала. Величина M_{sur_k} вычислялась для суррогатов X_{sur_k} , Y_{sur_k} и Z_{sur_k} . Затем проверялось соответствие нормальному распределению соответствующих значений M_{sur} и 95%-й квантиль этого распределения $Z = |M - \overline{M_{\text{sur}}}| / \sigma_{\text{sur}} > 1.96$, при выполнении которого значение $C(i, j)$ считалось статистически значимым ($\overline{M_{\text{sur}}}$ – среднее и σ_{sur} – стандартное отклонение). То есть нулевая гипотеза об отсутствии связи между исходными временными рядами отвергалась при значении тестовой статистики $Z > 1.96$, и вычисленное значение элемента $C(i, j)$ матрицы связи считалось статистически значимым.

2. Результаты

2.1. Определение конфигурации связей для трех хаотических осцилляторов. Проанализируем компоненты x_2 , y_2 , z_2 трех однонаправленно связанных осцилляторов Ресслера (X , Y и Z):

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1}{dt} &= -x_2 - x_3, \\
 \frac{dx_2}{dt} &= x_1 + ax_2 + \mu_{YX}(y_2 - x_2) + \mu_{ZX}(z_2 - x_2) + \mu_{XX}y_2z_2, \\
 \frac{dx_3}{dt} &= b + x_3(x_1 - c), \\
 \frac{dy_1}{dt} &= -(1 + v)y_2 - y_3, \\
 \frac{dy_2}{dt} &= (1 + v)y_1 + ay_2 + \mu_{XY}(x_2 - y_2) + \mu_{ZY}(z_2 - y_2) + \mu_{YY}x_2z_2, \\
 \frac{dy_3}{dt} &= b + y_3(y_1 - c), \\
 \frac{dz_1}{dt} &= -(1 - v)z_2 - z_3, \\
 \frac{dz_2}{dt} &= (1 - v)z_1 + az_2 + \mu_{XZ}(x_2 - z_2) + \mu_{YZ}(y_2 - z_2) + \mu_{ZZ}x_2y_2, \\
 \frac{dz_3}{dt} &= b + z_3(z_1 - c)
 \end{aligned} \tag{15}$$

с параметрами $a = 0.16$, $b = 0.1$, $c = 8.5$, задающими хаотический режим, с параметром $v = 0.08$ рассогласования частот и параметрами линейных μ_{jk} и нелинейных связей μ_{kk} . Уравнения (15) проинтегрированы с использованием метода Рунге–Кутты с шагом 0.003 с и временем интегрирования 6000 с и удалением первых 50000 точек как возможного переходного процесса.

Вариант однонаправленных связей, для которых осциллятор X является общим управляющим для Y и Z , а осциллятор Y является посредником получения информации от осциллятора X и передачи информации осциллятору Z ($X \rightarrow Y$, $Y \rightarrow Z$, $X \rightarrow Z$), параметры линейных связей $\mu_{XY} = \mu_{YZ} = \mu_{XZ} = 0.07$ и параметр нелинейной связи $X, Y \rightarrow Z$ $\mu_{ZZ} = 0.03$, представлен на рис. 1. Остальные значения параметров связи для этого варианта равны нулю.

На рис. 1 изображены короткие фрагменты анализируемых временных рядов $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (синие кривые) и фрагменты действительной части восстановленных комплексных аналитических временных рядов, полученных с помощью синхросжатого вейвлет-преобразования исходных временных рядов в полосе частот $[0.12, 0.2]$ Гц (черные кривые) (рис. 1, $a-c$), а также спектры Фурье для исходных временных рядов (рис. 1, $d-f$) и глобальные вейвлетные спектры для

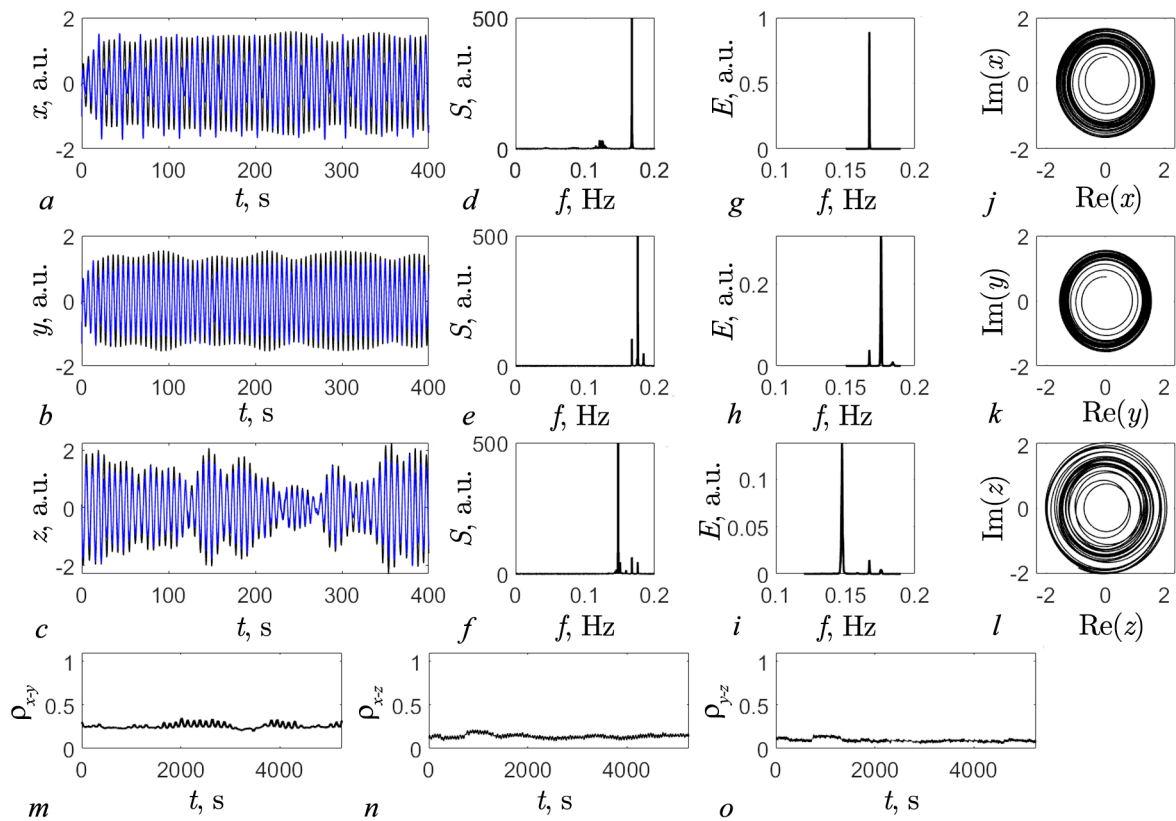


Рис. 1. Фрагменты временных рядов $x(t), y(t), z(t)$. $a-c$ – Исходные временные ряды (синие кривые), восстановленные аналитические временные ряды (черные кривые), $d-f$ – спектры Фурье для исходных временных рядов, $g-i$ – вейвлетные спектры для восстановленных временных рядов, $j-l$ – траектории восстановленных временных рядов на комплексной плоскости, $m-o$ – показатели фазовой синхронизации $\rho_{x-y}(t), \rho_{x-z}(t), \rho_{y-z}(t)$ (цвет онлайн)

Fig. 1. Fragments of time series $x(t), y(t), z(t)$. $a-c$ – Original time series (blue curves), reconstructed analytical time series (black curves), $d-f$ – Fourier spectra for the original time series, $g-i$ – wavelet spectra for the reconstructed time series, $j-l$ – trajectories of the reconstructed time series on the complex plane, $m-o$ – phase synchronization indices $\rho_{x-y}(t), \rho_{x-z}(t), \rho_{y-z}(t)$ (color online)

восстановленных временных рядов (рис. 1, $g-i$). Траектории восстановленных временных рядов на комплексной плоскости (рис. 1, $j-l$) показывают, что для этих восстановленных рядов происходит вращение радиус-вектора вокруг начала координат, так что мгновенные фазы этих рядов могут быть хорошо определены [29]. Показатели фазовой синхронизации между анализируемыми $x(t)$ и $y(t)$, $x(t)$ и $z(t)$, и $z(t)$ и $y(t)$ меньше 0.5, поэтому эти ряды соответствуют несинхронным режимам.

Значения элементов матрицы связи C , определяющей структуру связности трех осцилляторов Ресслера, то есть частичных норм реконструированных функций связи, для различных конфигураций модели представлены на рис. 2. Максимальные значения элементов матрицы связи показаны в прямоугольниках жирным цветом и соответствуют направленным связям, указанным стрелками.

В первом варианте конфигурации, в котором осциллятор Z управляется X и Y , а осциллятор Y управляется X , получены максимальные элементы $C(Z, X) = N_{X \rightarrow Z} = 0.027$, $C(Z, Y) = N_{Y \rightarrow Z} = 0.026$, $C(Y, X) = N_{X \rightarrow Y} = 0.011$, определяющие связи $X \rightarrow Z$, $X \rightarrow Y$ и $Y \rightarrow Z$ (рис. 2, a) для параметров линейных связей $\mu_{XY} = \mu_{YZ} = \mu_{XZ} = 0.05$ и нулевых параметров нелинейных связей. Все остальные элементы матрицы связи на два порядка меньше. Увеличение

силы связи ($\mu_{XY} = \mu_{YZ} = \mu_{XZ} = 0.07$) привело к повышению значений максимальных элементов $C(Z, X) = N_{X \rightarrow Z} = 0.046$, $C(Z, Y) = N_{Y \rightarrow Z} = 0.050$, $C(Y, X) = N_{X \rightarrow Y} = 0.019$ и появлению члена дополнительной связи $C(Z, Z) = N_{X, Y \rightarrow Z} = 0.018$ (рис. 2, b). Эта дополнительная связь совместного влияния осцилляторов X и Y на осциллятор Z отмечена штрихпунктирной стрелкой. Наличие нелинейной связи осцилляторов X и Y с параметром $\mu_{ZZ} = 0.03$ при тех же значениях параметров $\mu_{XY} = \mu_{YZ} = \mu_{XZ} = 0.07$ привело также к возникновению дополнительной связи $(X, Y \rightarrow Z)$ за счет элемента $C(Z, Z) = N_{X, Y \rightarrow Z} = 0.014$ (рис. 2, c).

Для второго варианта конфигурации осциллятор Y является посредником получения информации от осциллятора X и передачи информации осциллятору Z , ($X \rightarrow Y, Y \rightarrow Z$) при наличии параметров линейных связей $\mu_{XY} = \mu_{YZ} = 0.05$ и параметра нелинейной связи $\mu_{ZZ} = 0.03$ осцилляторов X и Y (рис. 2, d), что соответствует максимальным элементам матрицы связи $C(Y, X) = N_{X \rightarrow Y} = 0.018$, $C(Z, Y) = N_{Y \rightarrow Z} = 0.034$, $C(Z, Z) = N_{X, Y \rightarrow Z} = 0.011$. Увеличение силы связи ($\mu_{XY} = \mu_{YZ} = 0.07$) и сохранение нелинейной связи $\mu_{ZZ} = 0.03$ осцилляторов X и Y позволило выявить дополнительную косвенную связь между осцилляторами X и Z (отмеченную штрихпунктирной стрелкой) за счет появления элемента матрицы $C(Z, X) = N_{X, Z \rightarrow Z} = 0.014$ (рис. 2, e).

Для третьего варианта конфигурации осциллятор Y одновременно управляет осцилляторами X и Z , а осциллятор Z управляет X ($Y \rightarrow X, Y \rightarrow Z, Z \rightarrow X$) с большими значениями параметров линейных связей $\mu_{YX} = \mu_{YZ} = \mu_{ZX} = 0.08$ (рис. 2, f). Также, кроме прямых связей с максимальными элементами матрицы связи $C(X, Y) = N_{Y \rightarrow X} = 0.025$, $C(X, Z) = N_{Z \rightarrow X} = 0.037$, $C(Z, Y) = N_{Y \rightarrow Z} = 0.028$, наблюдается наличие связи $(Y, Z \rightarrow X)$ за счет элемента $C(X, X) = N_{Y, Z \rightarrow X} = 0.017$ (рис. 2, f). То есть значительная сила линейных связей снова привела к появлению дополнительного влияния осцилляторов Y и Z на осциллятор X .

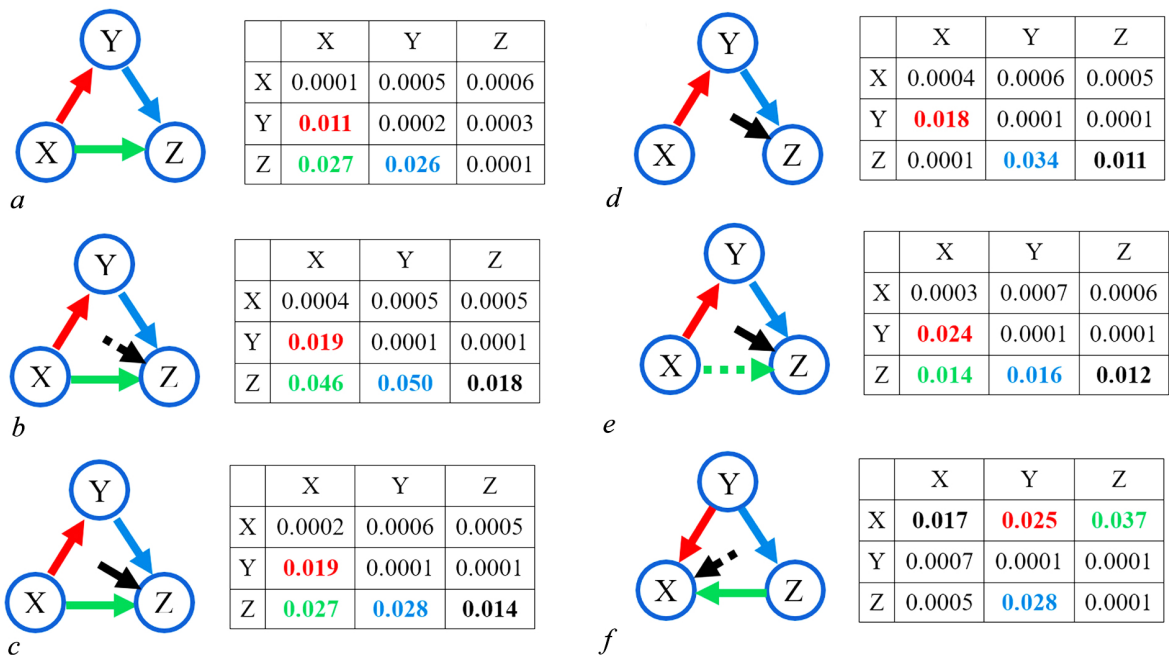


Рис. 2. Варианты конфигурации трех связанных осцилляторов Ресслера (a-f) и элементы матрицы связи, обозначенные жирным цветом, соответствуют цвету стрелки, указывающей направление связи. Косвенные связи и дополнительные связи влияния двух осцилляторов на третий отмечены штрихпунктирными стрелками (цвет онлайн)

Fig. 2. Configurations of three coupled Rössler oscillators (a-f) and the coupling matrix elements, shown in bold, correspond to the color of the arrow indicating the coupling direction. Indirect connections and additional connections of the influence of two oscillators on the third are indicated by dashed-dotted arrows (color online)

Дополнительное влияние двух осцилляторов на третий считается возможным, если диагональные элементы матрицы связи больше, чем заданное (10%) значение от максимальных значений недиагональных элементов матрицы, определяющих направленность прямых связей [18, 19]. Такого типа примеры выявлены для трех незашумленных периодических осцилляторов ван дер Поля. Авторы показали, что не очень слабая попарная связь может привести к дополнительным связям в сети фазовых осцилляторов [18, 19].

2.2. Определение конфигурации связей трех взаимодействующих биологических осцилляторов. В качестве X, Y, Z для элементов матрицы связи в данной секции мы будем рассматривать временные ряды RES, BPV и NAV, то есть применять матрицу в виде

$$\begin{matrix} C(\text{RES}, \text{RES}) & C(\text{RES}, \text{BPV}) & C(\text{RES}, \text{NAV}) \\ C(\text{BPV}, \text{RES}) & C(\text{BPV}, \text{BPV}) & C(\text{BPV}, \text{NAV}) \\ C(\text{NAV}, \text{RES}) & C(\text{NAV}, \text{BPV}) & C(\text{NAV}, \text{NAV}). \end{matrix} \quad (16)$$

На рис. 3 представлены короткие фрагменты колебаний дыхательной системы (RES) (рис. 3, *a*), вариабельности артериального давления (BPV) (рис. 3, *b*) и вариабельности нейрональной активности (NAV) продолговатого мозга крыс (рис. 3, *c*). Штрихпунктирные кривые обозначают исходные временные ряды, сплошные кривые представляют действительную

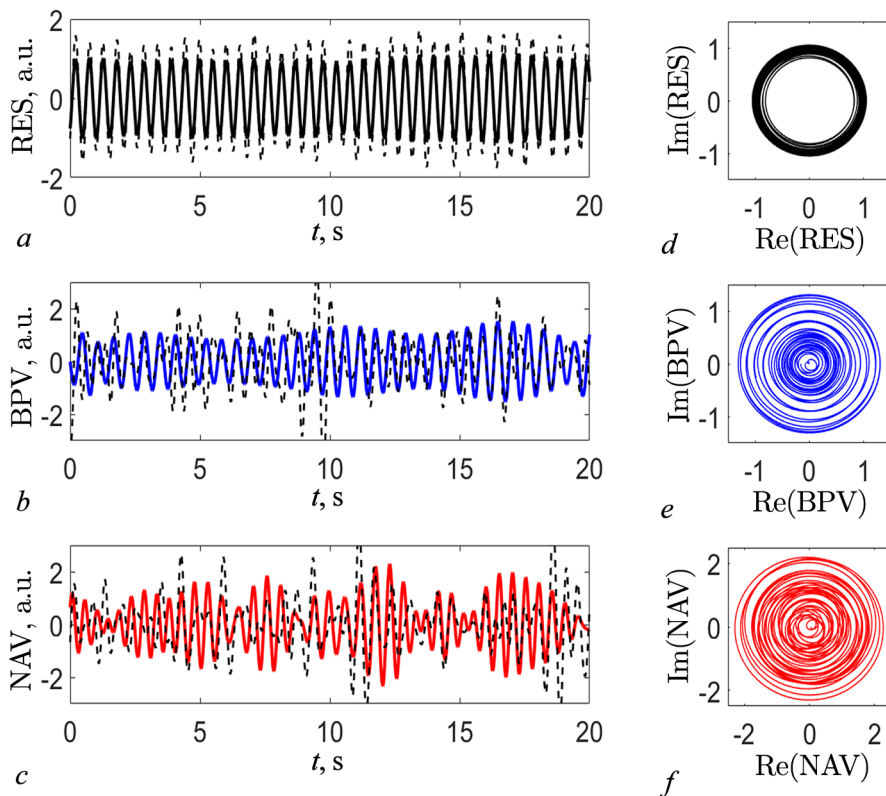


Рис. 3. Фрагменты временных рядов RES, BPV, NAV. *a-c* — Исходные временные ряды (штрихпунктирные кривые), восстановленные аналитические временные ряды (сплошные кривые), *d-f* — траектории восстановленных временных рядов RES, BPV и NAV на комплексной плоскости (цвет онлайн)

Fig. 3. Fragments of time series RES, BPV, NAV. *a-c* — Original time series (dash-dotted curves), reconstructed analytical time series (solid curves), *d-f* — trajectories of the reconstructed time series RES, BPV and NAV on the complex plane (color online)

часть восстановленных комплексных аналитических временных рядов, полученных с помощью синхросжатого вейвлет-преобразования исходных временных рядов в узкополосном диапазоне [1.2, 2.4] Гц с основными частотами BPV и NAV, близкими к частоте дыхательного ритма. Эти временные ряды нормализованы, чтобы иметь нулевое среднее значение и единичное стандартное отклонение. Траектории восстановленных рядов RES, BPV и NAV на комплексной плоскости (рис. 3, *d-f*) с вращением радиус-вектора вокруг начала координат указывают на возможность правильного определения мгновенных фаз [31].

Рис. 4 иллюстрирует характеристики временных рядов RES, BPV и NAV для крысы А из контрольной группы. Глобальные вейвлетные спектры $E(f)$ для восстановленных временных рядов RES, BPV, NAV (рис. 4, *a-c*) имеют максимумы с основными частотами $f = 1.32$ Гц для RES, $f = 1.94$ Гц для BPV и $f = 2.31$ Гц для NAV (рис. 4, *a-c*).

Показатели фазовой синхронизации $\rho_{RES-BPV}(t) < 0.6$, $\rho_{BPV-NAV}(t) < 0.6$, $\rho_{RES-NAV}(t) < 0.6$, что свидетельствует об отсутствии фазовой синхронизации между дыхательными колебаниями (RES) и вариабельностью артериального давления (BPV), между BPV и вариабельностью нейронной активности (NAV) и между временными рядами NAV и RES (рис. 4, *d-f*).

На рис. 4 представлены также значения элементов матрицы связи, для которой максимальные элементы $C(BPV, RES) = N_{RES \rightarrow BPV} = 0.543$ и $C(NAV, RES) = N_{RES \rightarrow NAV} = 0.628$ определяют наличие двух прямых связей $RES \rightarrow BPV$ и $RES \rightarrow NAV$. Значения остальных элементов матрицы связей на порядок меньше, то есть полученные результаты соответствуют варианту конфигурации, в котором колебания дыхательной системы оказывают влияние на вариабельность сердечно-сосудистой и нервной систем.

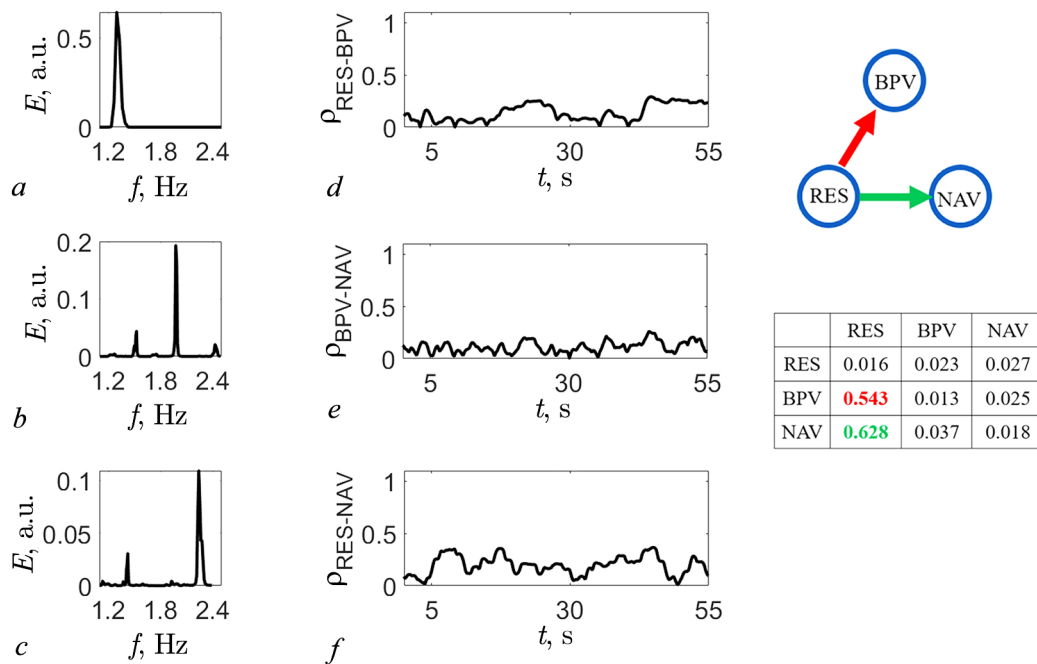


Рис. 4. Характеристики RES, BPV и NAV для крысы А из контрольной группы и элементы матрицы связи для варианта конфигурации $RES \rightarrow BPV$, $RES \rightarrow NAV$. *a-c* – Глобальные вейвлетные спектры $E(f)$ для восстановленных временных рядов RES, BPV, NAV, *d-f* – зависимости от времени показателей фазовой синхронизации $\rho_{RES-BPV}(t)$, $\rho_{BPV-NAV}(t)$, $\rho_{RES-NAV}(t)$ (цвет онлайн)

Fig. 4. RES, BPV and NAV characteristics for rat A from the control group and the elements of the coupling matrix for the configuration $RES \rightarrow BPV$, $RES \rightarrow NAV$. *a-c* – Global wavelet spectra $E(f)$ for reconstructed time series RES, BPV, NAV, *d-f* – time dependence of phase synchronization indicators $\rho_{RES-BPV}(t)$, $\rho_{BPV-NAV}(t)$, $\rho_{RES-NAV}(t)$ (color online)

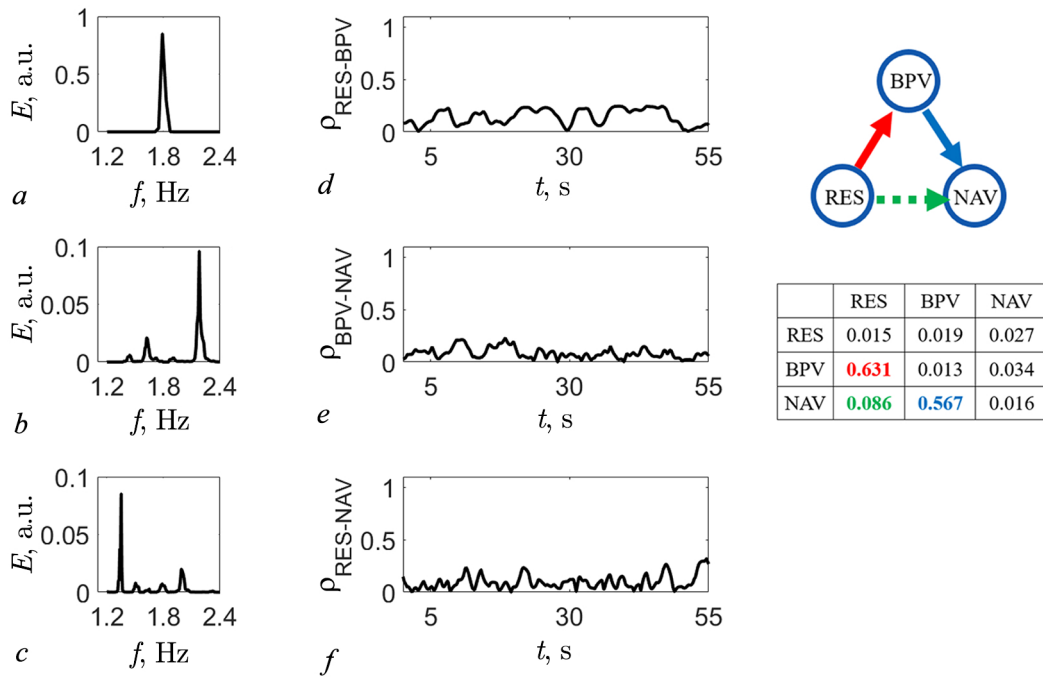


Рис. 5. Характеристики RES, BPV и NAV для крысы В из группы с колитом (цвет онлайн)

Fig. 5. RES, BPV, and NAV characteristics for rat B from the colitis group (color online)

Рис. 5 демонстрирует характеристики временных рядов RES, BPV и NAV для крысы В из группы с колитом. Максимумы глобальных вейвлетных спектров $E(f)$ соответствуют основным частотам $f = 1.76$ Гц для RES, $f = 2.26$ Гц для BPV и $f = 1.28$ Гц для NAV (рис. 5, *a-c*). Фазовая синхронизация между временными рядами отсутствует $\rho_{RES-BPV}(t) < 0.6$, $\rho_{BPV-NAV}(t) < 0.6$, $\rho_{RES-NAV}(t) < 0.6$ (рис. 5, *d-f*).

Значения максимальных элементов матрицы связи равны $C(BPV, RES) = N_{RES \rightarrow BPV} = 0.631$ и $C(NAV, BPV) = N_{BPV \rightarrow NAV} = 0.567$, что соответствует наличию двух прямых связей $RES \rightarrow BPV$ и $BPV \rightarrow NAV$, то есть варианту конфигурации, в котором вариабельность артериального давления является посредником получения информации от осциллятора дыхательной системы и передачи информации нейронам продолговатого мозга.

Однако элемент матрицы связи $C(NAV, RES) = N_{RES \rightarrow NAV} = 0.086 > 0.1C(NAV, BPV)$ указывает на наличие дополнительной косвенной связи между NAV и RES (отмеченной штрихпунктирной стрелкой), поскольку эта связь считается возможной, если определенный элемент матрицы связи больше, чем заданное (10%) значение от максимальных значений элементов матрицы, определяющих направленность прямых связей [18].

На рис. 6 показаны характеристики временных рядов RES, BPV и NAV для крысы С из группы с колитом. Вейвлетные спектры $E(f)$ для восстановленных временных рядов RES, BPV, NAV (рис. 6, *a-c*) характеризуются максимумами с основными частотами $f = 1.83$ Гц для RES, $f = 1.52$ Гц для BPV и $f = 2.06$ Гц для NAV (рис. 6, *a-c*). Фазовой синхронизации между анализируемыми временными рядами нет $\rho_{RES-BPV}(t) < 0.6$, $\rho_{BPV-NAV}(t) < 0.6$, $\rho_{RES-NAV}(t) < 0.6$ (рис. 6, *d-f*).

Максимальными элементами матрицы связи являются $C(NAV, RES) = N_{RES \rightarrow NAV} = 0.738$, $C(BPV, RES) = N_{RES \rightarrow BPV} = 0.413$, $C(NAV, BPV) = N_{BPV \rightarrow NAV} = 0.617$, определяющие наличие трех прямых связей $RES \rightarrow NAV$, $RES \rightarrow BPV$ и $BPV \rightarrow NAV$. Но выявлено также

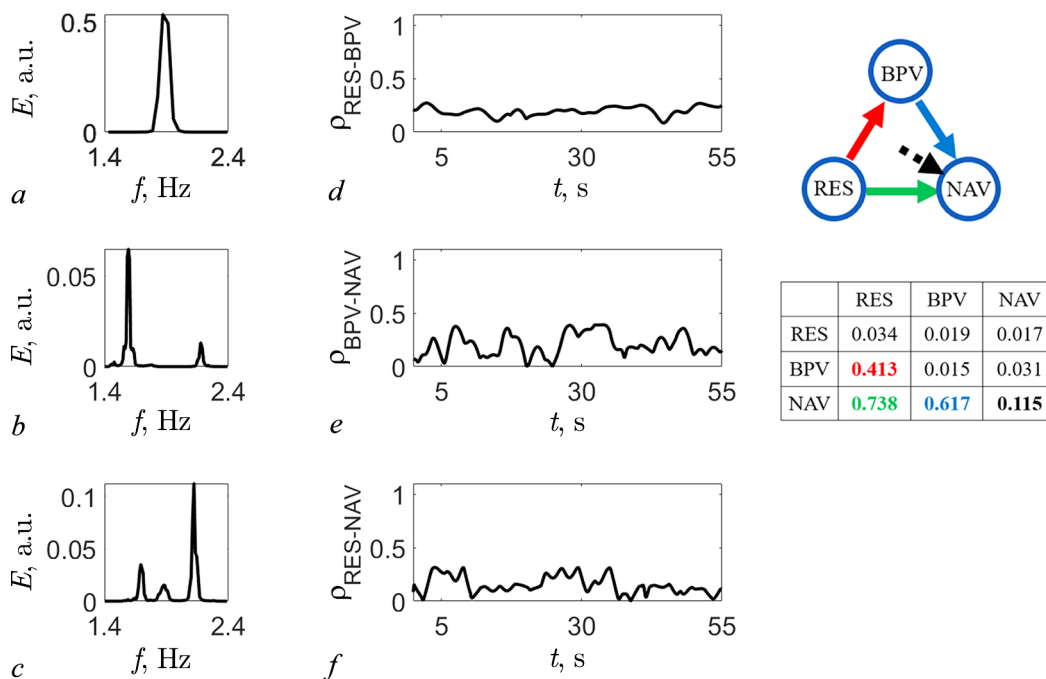


Рис. 6. Характеристики RES, BPV и NAV для крысы С из группы с колитом (цвет онлайн)

Fig. 6. RES, BPV, and NAV characteristics for rat B from the colitis group (color online)

дополнительное влияние BPV и RES на NAV за счет члена $C(\text{NAV}, \text{NAV}) = N_{\text{BPV}, \text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.115 > 0.1C(\text{RES}, \text{BPV})$, превышающего 10% значение среди недиагональных элементов матрицы, определяющих направленность прямых связей. В связи с этим данным, представленным на рис. 6, соответствует вариант конфигурации, в котором наблюдается одновременное совместное действие дыхательных колебаний и вариабельности артериального давления на вариабельность нейронной активности нейронов продолговатого мозга. На рис. 6 на это указывает дополнительная стрелка от центра между RES и BPV к NAV, обозначающая наличие дополнительной связи между анализируемыми временными рядами.

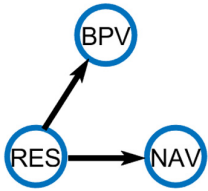
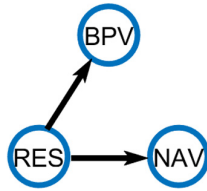
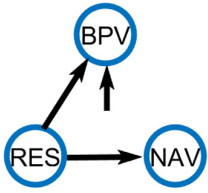
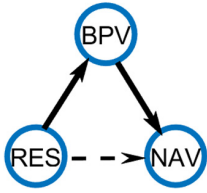
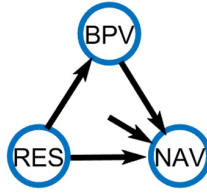
В Таблице представлены усредненные максимальные значения элементов матрицы связи C для полученных вариантов конфигураций связи временных рядов RES, BPV и NAV и количество статистически значимых данных для контрольной группы и группы с колитом. Усреднение проведено по числу статистически значимых вариантов конфигурации, указанных в Таблице.

Использование суррогатов временных рядов RES, BPV и NAV подтвердило статистическую значимость вычисленных максимальных значений элементов матрицы связи, поскольку вычисленные значения статистики $Z_{C(i,j)}$, $i, j = \text{RES}, \text{BPV}, \text{NAV}$ больше, чем 1.96 для указанных в Таблице количестве анализируемых временных рядов, что подтверждает, что полученные значения статистически значимы с 95%-м уровнем значимости.

Для контрольной группы выявлены с подтвержденной статистической значимостью различные варианты конфигурации связей для 6 и 7 данных из 15 соответственно. Средние значения максимальных элементов матрицы связи для первого варианта конфигурации ($\text{RES} \rightarrow \text{BPV}$ и $\text{RES} \rightarrow \text{NAV}$), в котором дыхательная система оказывает влияние на вариабельность сердечно-сосудистой и нервной систем, равны $C(\text{BPV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.58 \pm 0.07$ и $C(\text{NAV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.69 \pm 0.09$, а для второго варианта конфигурации ($\text{RES} \rightarrow \text{NAV}$, $\text{RES} \rightarrow \text{BPV}$ и $\text{BPV} \rightarrow \text{NAV}$), в котором, кроме этих связей, вариабельность сердечно-сосудистой

Таблица. Усредненные максимальные значения элементов матрицы связи C для вариантов конфигураций временных рядов RES, BPV и NAV и количество статистически значимых данных для контрольной группы и группы с колитом

Table. Average maximum values of the elements of the connection matrix C for the variants of the RES, BPV and NAV time series configurations and the number of statistically significant data for the control group and the group with colitis

Контрольная группа			
Вариант			
Количество данных	6 из 15		7 из 15
Элементы матрицы связи	$C(\text{BPV}, \text{RES})=0.58\pm 0.07$ $C(\text{NAV}, \text{RES})=0.69\pm 0.09$		$C(\text{BPV}, \text{RES})=0.64\pm 0.07$ $C(\text{NAV}, \text{RES})=0.47\pm 0.06$ $C(\text{NAV}, \text{BPV})=0.56\pm 0.07$
Группа с колитом			
Вариант			
Количество данных	2 из 15	5 из 15	6 из 15
Элементы матрицы связи	$C(\text{BPV}, \text{RES})=0.71\pm 0.09$ $C(\text{NAV}, \text{RES})=0.53\pm 0.07$ $C(\text{BPV}, \text{BPV})=0.13\pm 0.02$	$C(\text{BPV}, \text{RES})=0.66\pm 0.08$ $C(\text{NAV}, \text{BPV})=0.53\pm 0.06$ $C(\text{NAV}, \text{RES})=0.11\pm 0.03$	$C(\text{BPV}, \text{RES})=0.45\pm 0.07$ $C(\text{NAV}, \text{RES})=0.76\pm 0.09$ $C(\text{NAV}, \text{BPV})=0.55\pm 0.08$ $C(\text{NAV}, \text{NAV})=0.14\pm 0.03$

оказывает еще влияние на вариабельность активности нервной системы, средние значения максимальных элементов равны $C(\text{NAV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.47 \pm 0.06$, $C(\text{NAV}, \text{BPV}) = N_{\text{BPV} \rightarrow \text{NAV}} = 0.56 \pm 0.07$ и $C(\text{BPV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.64 \pm 0.07$.

Для группы с экспериментальным колитом обнаружены видоизмененные варианты: первый (RES \rightarrow NAV, RES \rightarrow BPV и RES, NAV \rightarrow BPV) и второй (RES \rightarrow NAV, RES \rightarrow BPV, BPV \rightarrow NAV и RES, BPV \rightarrow NAV) с подтвержденной статистической значимостью для 2 и 6 данных из 15 соответственно, и дополнительный третий вариант конфигурации (RES \rightarrow BPV, BPV \rightarrow NAV и RES \rightarrow NAV) с подтвержденной статистической значимостью выявлен для 5 данных из 15 (Таблица).

Средние значения максимальных элементов матрицы связи для первого видоизмененного варианта равны $C(\text{BPV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.71 \pm 0.09$, $C(\text{NAV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.53 \pm 0.07$ и $C(\text{BPV}, \text{BPV}) = N_{\text{NAV}, \text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.13 \pm 0.02$. Наличие члена связи $C(\text{BPV}, \text{BPV})$, большего, чем 10% от максимальных значений недиагональных элементов матрицы связи, свидетельствует о том, что в данном случае существует совместное влияние дыхательных колебаний и вариабельности нейрональной активности нейронов продолговатого мозга на вариабельность артериального давления.

Для второго видоизмененного варианта конфигурации для группы с колитом статистически значимые средние значения максимальных элементов матрицы связи равны $C(\text{BPV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.45 \pm 0.07$, $C(\text{NAV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.76 \pm 0.09$, $C(\text{NAV}, \text{BPV}) = N_{\text{BPV} \rightarrow \text{NAV}} = 0.55 \pm 0.08$ и $C(\text{NAV}, \text{NAV}) = N_{\text{BPV}, \text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.14 \pm 0.03$. В связи с этим в этом варианте конфигурации имеется член связи $C(\text{NAV}, \text{NAV})$, величина которого больше, чем 10% от максимальных значений недиагональных элементов матрицы связи. Это подтверждает наличие совместного влияния колебаний дыхательной системы и вариабельности артериального давления на вариабельность нейрональной активности нейронов продолговатого мозга.

Средние значения максимальных элементов матрицы связи для третьего варианта конфигурации равны $C(\text{BPV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{BPV}} = 0.66 \pm 0.08$, $C(\text{NAV}, \text{BPV}) = N_{\text{BPV} \rightarrow \text{NAV}} = 0.53 \pm 0.06$, $C(\text{NAV}, \text{RES}) = N_{\text{RES} \rightarrow \text{NAV}} = 0.11 \pm 0.03 > 0.1C(\text{NAV}, \text{BPV})$, указывающие на наличие дополнительной косвенной связи между NAV и RES [18].

Таким образом, в отличие от данных, извлеченных из биологических осцилляторов контрольной группы здоровых крыс, для группы крыс с патологическим состоянием в форме экспериментально вызванного колита определены дополнительные связи между временными рядами, полученными на основании одновременно зарегистрированных колебаний сердечно-сосудистой, нервной и дыхательной систем. Это может быть связано с большей парной связью по сравнению с временными рядами, полученными для контрольной группы, что, как известно, может привести к дополнительным связям в сети фазовых осцилляторов [18].

Заключение

Цель исследования состояла в применении метода моделирования фазовой динамики для выявления направленности связей временных рядов, извлеченных из физиологических ритмов трех взаимодействующих биологических систем, и зависимости влияния патологического состояния в форме экспериментально вызванного колита на конфигурации однонаправленных тройных связей этих систем.

Этот метод, предварительно примененный к модели трёх осцилляторов Ресслера с параметрами линейных и нелинейных связей, позволил подтвердить правильность выявления прямых связей для модели трёх слабохаотических осцилляторов и выявить возможность появления дополнительного влияния одного осциллятора на другой или совместного влияния двух осцилляторов на третий при увеличении силы связи так же, как ранее это было подтверждено для незашумленных ритмических осцилляторов ван дер Поля [18, 19].

Используя этот метод и оценку статистической значимости полученных данных для временных рядов, соответствующих флуктуациям дыхательного ритма, кривым вариабельности артериального давления и вариабельности интервалов нейрональной активности продолговатого мозга крыс, мы выявили возможность определять наличие статистически значимых вариантов связей в трехосцилляторной сети нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем.

Для меньшего количества данных с экспериментальным колитом установлено также наличие члена перекрестной связи, подтверждающей совместное действие колебаний дыхания и вариабельности нейрональной активности на вариабельность артериального давления.

Выявлено влияние патологического состояния в форме экспериментально вызванного колита на появление дополнительных связей в тройных взаимодействиях этих временных рядов. Примерно в половине данных для патологического состояния, связанного с колитом, выявлено наличие совместного влияния флуктуаций дыхания и вариабельности артериального давления на вариабельность интервалов нейрональной активности нейронов продолговатого мозга. Для меньшего количества данных с экспериментальным колитом установлено также совместное действие колебаний дыхания и вариабельности нейрональной активности на вариабельность артериального давления.

Наблюдаемое увеличение связности систем в состоянии колита может быть обусловлено тем, что усиление взаимодействия между ритмами биологических систем во время возникновения патологического состояния рассматривается как защитный и адаптивный механизм, направленный на устранение функциональной недостаточности.

Список литературы

1. *Мохов И. И., Смирнов Д. А., Наконечный П. И., Козленко С. С., Куртс Ю.* Взаимосвязь явлений Эль-Ниньо/Южное колебание и индийского муссона // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 56–66.
2. *Runge J., Heitzig J., Petoukhov V., Kurths J.* Escaping the curse of dimensionality in estimating multivariate transfer entropy // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108, iss. 25. P. 258701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.258701.
3. *Sysoeva M. V., Sitnikova E., Sysoev I. V., Bezruchko B. P., van Luijelaar G.* Application of adaptive nonlinear Granger causality: Disclosing network changes before and after absence seizure onset in a genetic rat model // J. Neuroscience Methods. 2014. Vol. 226. P. 33–41. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2014.01.028.
4. *Навроцкая Е. В., Караваяев А. С., Шинкин М. В., Боровкова Е. И., Безручко Б. П.* Адаптация метода анализа связанности на основе моделирования фазовой динамики к сигналам ЭЭГ во время эпилептического приступа у пациентов в состоянии комы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, № 1. С. 4–14. DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-1-4-14.
5. *Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Y. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S.* Changes in the power and coupling of infra-slow oscillations in the signals of EEG leads during stress-inducing cognitive tasks // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, iss. 14. P. 8390. DOI: 10.3390/app13148390.
6. *Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Bespyatov A. B., Bodrov M. B., Gridnev V. I.* Deriving main rhythms of the human cardiovascular system from the heartbeat time series and detecting their synchronization // Chaos, Solitons and Fractals. 2005. Vol. 23, iss. 4. P. 1429–1438. DOI: 10.1016/j.chaos.2004.06.041.
7. *Kiselev A. R., Mironov S. A., Karavaev A. S., Kulminskiy D. D., Skazkina V. V., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D.* A comprehensive assessment of cardiovascular autonomic control using photoplethysmograms recorded from the earlobe and fingers // Physiol. Meas. 2016. Vol. 37, no. 4. P. 580–595. DOI: 10.1088/0967-3334/37/4/580.
8. *Dick O. E., Glazov A. L.* Revealing the coupling directionality and synchronization between time series from physiological data by analysis of joint recurrences // Chaos, Solitons and Fractals. 2023. Vol. 173. P. 113768. DOI: 10.1016/j.chaos.2023.113768.
9. *Дик О. Е., Глазов А. Л.* Определение направленности связи между временными рядами, выделенными из биологических данных крыс, методом моделирования фазовой динамики периодических процессов // ЖТФ. 2023. Т. 93, № 10. С. 1520–1528. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56291.144-23.
10. *Chen Y., Rangarajan G., Feng J., Ding M.* Analyzing multiple nonlinear time series with extended Granger causality // Phys. Lett. A. 2004. Vol. 324, iss. 1. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.physleta.2004.02.032.
11. *Quiroga R. Q., Arnhold J., Grassberger P.* Learning driver-response relationships from synchronization patterns // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61, iss. 5. P. 5142–5148. DOI: 10.1103/PhysRevE.61.5142.
12. *Vejmelka M., Paluš M.* Inferring the directionality of coupling with conditional mutual information // Phys. Rev. E. 2008. Vol. 77, iss. 2. P. 026214. DOI: 10.1103/PhysRevE.77.026214.
13. *Stramaglia S., Faes L., Cortes J. M., Marinazzo D.* Disentangling high-order effects in the transfer entropy. Phys. Rev. Res. 2024. Vol. 6, iss. 3. P. L032007. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.L032007.

14. *Rosenblum M. G., Pikovsky A. S.* Detecting direction of coupling in interacting oscillators // *Phys. Rev. E.* 2001. Vol. 64, iss. 4. P. 045202. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.045202.
15. *Romano M. C., Thiel M., Kurths J., Grebogi C.* Estimation of the direction of the coupling by conditional probabilities of recurrence // *Phys. Rev. E.* 2007. Vol. 76, iss. 3. P. 036211. DOI: 10.1103/PhysRevE.76.036211.
16. *Rosenblum M., Pikovsky A.* Inferring connectivity of an oscillatory network via the phase dynamics reconstruction // *Front. Netw. Physiol.* 2023. Vol. 3. P. 1298228. DOI: 10.3389/fnetp.2023.1298228.
17. *Friston K. J.* Functional and effective connectivity: a review // *Brain Connect.* 2011. Vol. 1, iss. 1. P. 13. DOI: 10.1089/brain.2011.0008.
18. *Kralemann B., Pikovsky A., Rosenblum M.* Reconstructing phase dynamics of oscillator networks // *Chaos.* 2011. Vol. 21, iss. 2. P. 025104. DOI: 10.1063/1.3597647.
19. *Kralemann B., Pikovsky A., Rosenblum M.* Reconstructing effective phase connectivity of oscillator networks from observations // *New J. Phys.* 2014. Vol. 16. P. 085013. DOI: 10.1088/1367-2630/16/8/085013.
20. *Дук О. Е.* Анализ синхронизации между временными рядами, полученными от анестезированных крыс во время болевого воздействия // *Известия вузов. ПНД.* 2024. Т. 32, № 2. С. 209–222. DOI: 10.18500/0869-6632-003093.
21. *Дук О. Е.* Применение методов моделирования фазовой динамики и рекуррентности для оценки характеристик взаимосвязи между физиологическими ритмами // *Известия вузов. ПНД.* 2025. Т. 33, № 3. С. 381–398. DOI: 10.18500/0869-6632-003165.
22. *Daubechies I., Lu J., Wu H. T.* Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool // *Appl. Comput. Harmon. Anal.* 2011. Vol. 30. P. 243–261. DOI: 10.1016/j.acha.2010.08.002.
23. *Мохов И. И., Смирнов Д. А.* Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо - Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42, № 5. С. 650–667.
24. *Mokhov I. I., Smirnov D. A.* El Nino Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices // *Geophysical Research Letters.* 2006. Vol. 33, iss. 3. P. L03708. DOI: 10.1029/2005GL024557.
25. *Thakur G., Brevdo E., Fučkar N. S., Wu H.-T.* The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications // *Signal Process.* 2013. Vol. 93, no. 5. P. 1079–1094. DOI: 10.1016/j.sigpro.2012.11.029.
26. *Kralemann B., Cimponeriu L., Rosenblum M., Pikovsky A., Mrowka R.* Phase dynamics of coupled oscillators reconstructed from data // *Phys. Rev. E.* 2008. Vol. 77, iss. 6. P. 66205. DOI: 10.1103/PhysRevE.77.066205.
27. *Smirnov D. A., Bezruchko B. P.* Estimation of interaction strength and direction from short and noisy time series // *Phys. Rev. E.* 2003. Vol. 68, iss. 4. P. 046209. DOI: 10.1103/PhysRevE.68.046209.
28. *Смирнов Д. А., Бодров М. Б., Безручко Б. П.* Оценка связанности между осцилляторами по временным рядам путем моделирования фазовой динамики: пределы применимости метода // *Известия вузов. ПНД.* 2004. Т. 12, № 6. С. 79–92. DOI: 10.18500/0869-6632-2004-12-6-79-92.
29. *Tass P., Rosenblum M. G., Weule J., Kurths J., Pikovsky A., Volkmann J., Schnitzler A., Freund H.-J.* Detection of n:m phase locking from noisy data: application to magnetoencephalography // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, iss. 15. P. 3291–3294. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3291.
30. *Thiel M., Romano M. C., Kurths J., Rolfs M., Kliegl R.* Generating surrogates from recurrences // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2008. Vol. 366, no. 1865. P. 545–557. DOI: 10.1098/rsta.2007.2109.
31. *Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Kiselev A. R., Prokhorov M. D., Penzel T.* Decrease of coherence between the respiration and parasympathetic control of the heart rate with aging // *Chaos.* 2021. Vol. 31. P. 073105. DOI: 10.1063/5.0056624.

References

1. Mokhov II, Kozlenko SS, Smirnov DA, Nakonechny PI, Kurths J. Relationship between El-Niño/Southern oscillation and the Indian monsoon. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;48(1):47–56.
2. Runge J, Heitzig J, Petoukhov V, Kurths J. Escaping the curse of dimensionality in estimating multivariate transfer entropy. *Phys. Rev. Lett.* 2012;108(25):258701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.258701.
3. Sysoeva MV, Sitnikova E, Sysoev IV, Bezruchko BP, van Luijtelaar G. Application of adaptive nonlinear Granger causality: Disclosing network changes before and after absence seizure onset in a genetic rat model. *J. Neuroscience Methods*. 2014;226:33–41. DOI:10.1016/j.jneumeth.2014.01.028.
4. Navrotskaya EV, Karavaev AS, Sinkin MV, Borovkova EI, Bezruchko BP. Adaptation of the method of coupling analysis based on phase dynamics modeling to EEG signals during an epileptic seizure in comatose patients. *Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2022;22(1):4–14. DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-1-4-14.
5. Prokhorov MD, Borovkova EI, Hramkov AN, Dubinkina ES, Ponomarenko VI, Ishbulatov YM, Kurbako AV, Karavaev AS. Changes in the power and coupling of infra-slow oscillations in the signals of EEG leads during stress-inducing cognitive tasks. *Appl. Sci.* 2023;13(14):8390. DOI: 10.3390/app13148390.
6. Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Bespyatov AB, Bodrov MB, Gridnev VI. Deriving main rhythms of the human cardiovascular system from the heartbeat time series and detecting their synchronization. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2005;23(4):1429–1438. DOI: 10.1016/j.chaos.2004.06.041.
7. Kiselev AR, Mironov SA, Karavaev AS, Kulminskiy DD, Skazkina VV, Borovkova EI, Shvartz VA, Ponomarenko VI, Prokhorov MD. A comprehensive assessment of cardiovascular autonomic control using photoplethysmograms recorded from the earlobe and fingers. *Physiol. Meas.* 2016;37(4):580–595. DOI: 10.1088/0967-3334/37/4/580.
8. Dick OE, Glazov AL. Revealing the coupling directionality and synchronization between time series from physiological data by analysis of joint recurrences. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2023;173:113768. DOI: 10.1016/j.chaos.2023.113768.
9. Dik OE, Glazov AL. Determination of the directionality of the relationship between time series extracted from biological data of rats using the method of modeling the phase dynamics of periodic processes. *Tech. Phys.* 2023;93(10):1520–1528. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56291.144-23.
10. Chen Y, Rangarajan G, Feng J, Ding M. Analyzing multiple nonlinear time series with extended Granger causality. *Phys. Lett. A*. 2004;324(1):26–35. DOI: 10.1016/j.physleta.2004.02.032.
11. Quiroga RQ, Arnhold J, Grassberge P. Learning driver-response relationships from synchronization patterns. *Phys. Rev. E*. 2000;61(5):5142–5148. DOI: 10.1103/PhysRevE.61.5142.
12. Vejmelka M, Paluš M. Inferring the directionality of coupling with conditional mutual information. *Phys. Rev. E*. 2008;77(2):026214. DOI: 10.1103/PhysRevE.77.026214.
13. Stramaglia S, Faes L, Cortes JM, Marinazzo D. Disentangling high-order effects in the transfer entropy. *Phys. Rev. Res.* 2024;6(3):L032007. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.L032007.
14. Rosenblum MG, Pikovsky AS. Detecting direction of coupling in interacting oscillators. *Phys. Rev. E*. 2001;64(4):045202. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.045202.
15. Romano MC, Thiel M, Kurths J, Grebogi C. Estimation of the direction of the coupling by conditional probabilities of recurrence. *Phys. Rev. E*. 2007;76(3):036211. DOI: 10.1103/PhysRevE.76.036211.
16. Rosenblum M, Pikovsky A. Inferring connectivity of an oscillatory network via the phase dynamics reconstruction. *Front. Netw. Physiol.* 2023;3:1298228. DOI: 10.3389/fnetp.2023.1298228.
17. Friston KJ. Functional and effective connectivity: a review. *Brain Connect.* 2011;1(1):13. DOI: 10.1089/brain.2011.0008.

18. Kralemann B, Pikovsky A, Rosenblum M. Reconstructing phase dynamics of oscillator networks. *Chaos*. 2011;21(2):025104. DOI: 10.1063/1.3597647.
19. Kralemann B, Pikovsky A, Rosenblum M. Reconstructing effective phase connectivity of oscillator networks from observations. *New J. Phys.* 2014;16:085013. DOI: 10.1088/1367-2630/16/8/085013.
20. Dick OE. Analysis of synchronization between time series obtained from anesthetized rats during pain exposure. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2024;32(2):209–222. DOI: 10.18500/0869-6632-003093.
21. Dick OE. Application of phase dynamics and recurrence modeling methods to assess the characteristics of the relationship between physiological rhythms. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025;33(3):381–398. DOI: 10.18500/0869-6632-003165.
22. Daubechies I, Lu J, Wu HT. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Appl. Comput. Harmon. Anal.* 2011;30:243–261. DOI: 10.1016/j.acha.2010.08.002.
23. Mokhov II, Smirnov DA. A study of the mutual influence of the El Niño-Southern Oscillation and the North Atlantic and Arctic Oscillation processes using nonlinear methods. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006;42(5):598–614.
24. Mokhov II, Smirnov DA. El Nino Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices. *Geophysical Research Letters*. 2006;33:L03708. DOI: 10.1029/2005GL024557
25. Thakur G, Brevdo E, Fučkar NS, Wu H-T. The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications. *Signal Process.* 2013;93(5):1079–1094. DOI: 10.1016/j.sigpro.2012.11.029.
26. Kralemann B, Cimponeriu L, Rosenblum M, Pikovsky A, Mrowka R. Phase dynamics of coupled oscillators reconstructed from data. *Phys. Rev. E*. 2008;77(6):66205.
27. Smirnov DA, Bezruchko BP. Estimation of interaction strength and direction from short and noisy time series. *Phys. Rev. E*. 2003;68(4):046209. DOI: 10.1103/PhysRevE.68.046209.
28. Smirnov DA, Bodrov MB, Bezruchko BP. Estimation of coupling between oscillators from time series via phase dynamics modeling: limits of method's applicability. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2004;12(6):79–92. DOI: 10.18500/0869-6632-2004-12-6-79-92.
29. Tass P, Rosenblum MG, Weule J, Kurths J, Pikovsky A, Volkman J, Schnitzler A, Freund H-J. Detection of n:m phase locking from noisy data: application to magnetoencephalography. *Phys. Rev. Lett.* 1998;81(15):3291–3294. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3291.
30. Thiel M, Romano MC, Kurths J, Rolf M., Kliegl R. Generating surrogates from recurrences. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2008;366:545–557. DOI: 10.1098/rsta.2007.2109.
31. Ponomarenko VI, Karavaev AS, Borovkova EI, Hramkov AN, Kiselev AR, Prokhorov MD, Penzel T. Decrease of coherence between the respiration and parasympathetic control of the heart rate with aging. *Chaos*. 2021;31:073105. DOI: 10.1063/5.0056624.



Дик Ольга Евгеньевна — родилась в Междуреченске (1962). Окончила физический факультет Ленинградского государственного университета по направлению «Биофизика» (1985). Защитила диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям «Биофизика» (1992, МГУ) и диссертацию на соискание учёной степени доктора биологических наук по специальностям «Физиология» (2018, ФИН РАН). С 1988 года работает в лаборатории «Физиология interoцепции» Института физиологии им. И. П. Павлова РАН. Научные интересы — нейронаука, математическое моделирование, нелинейная динамика. Опубликовала свыше 90 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6
 Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
 E-mail: dickviola@gmail.com
 ORCID: 0000-0001-5056-1779
 AuthorID (eLibrary.Ru): 17280