Нелинейные волны.
Солитоны. Автоволны. Самоорганизация

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 1
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(1)

Научная статья
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003083
EDN: YYDPVE

Воздействие аддитивного шума на химерные и уединенные состояния в нейронных ансамблях

А. Д. Рябченко, Е. В. Рыбалова✉*, Г. И. Стрелкова*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия
E-mail: andreyryabchenko.2003@gmail.com, ✉rybalovaev@gmail.com, strelkovagi@sgu.ru
Поступила в редакцию 15.08.2023, принята к публикации 3.10.2023,
опубликована онлайн 21.12.2023, опубликована 31.01.2024

Аннотация. *Цель.* Работа направлена на исследование влияния аддитивного белого гауссовского шума на динамику ансамбля нелокально связанных моделей нейронов, в качестве которых взяты осцилляторы ФитцХью–Нагумо. В таком ансамбле в зависимости от значений параметров связи между парциальными элементами могут наблюдаться различные пространственно-временные структуры (химерные состояния, уединенные состояния, режим сосуществования этих состояний (комбинированная структура)), которые по-разному реагируют на добавление в систему аддитивного шума. *Методы.* Для изучения динамики исследуемой сети строятся мгновенные пространственные профили, пространственно-временные диаграммы, проекции многомерных аттракторов, профили средней фазовой скорости, пространственные профили значений коэффициента взаимной корреляции. Также рассчитываются значения усредненного по ансамблю коэффициента взаимной корреляции, среднее количество уединенных узлов и вероятность установления пространственно-временных структур в присутствии аддитивного шума. *Результаты.* Показано, что аддитивный шум способен уменьшить вероятность установления режима уединенных состояний и режима комбинированной структуры, при этом вероятность появления только химерных состояний возрастает до 100%. При воздействии шума на ансамбль связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо, находящийся в режиме только уединенных состояний, увеличение интенсивности шума ведет, в общем случае, к уменьшению среднего количества уединенных узлов и интервала значений параметров связи, в котором реализуются уединенные состояния. Однако существует область по параметрам связи парциальных элементов, в которой под воздействием аддитивного шума количество уединенных выбросов увеличивается. *Заключение.* Исследовано изменение вероятности установления в ансамбле осцилляторов ФитцХью–Нагумо химерных состояний, уединенных состояний и режима комбинированной структуры, которые наблюдаются в области мультистабильности, под действием аддитивного шума. Показано, что химерные состояния проявляют себя как более устойчивые и доминирующие структуры среди всех остальных, сосуществующих в ансамбле. В то же время вероятность установления только уединенных состояний, область их существования по параметрам связи и количество уединенных узлов, в общем случае, уменьшается с увеличением интенсивности шума.

Ключевые слова: нелокальная связь, аддитивный шум, химерные состояния, уединенные состояния, осциллятор ФитцХью–Нагумо.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00119, https://www.rscf.ru/project/20-12-00119/).

Для цитирования: *Рябченко А. Д., Рыбалова Е. В., Стрелкова Г. И.* Воздействие аддитивного шума на химерные и уединенные состояния в нейронных ансамблях // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 1. С. 121–140. DOI: 10.18500/0869-6632-003083. EDN: YYDPVE

Influence of additive noise on chimera and solitary states in neural networks

A. D. Ryabchenko, E. V. Rybalova✉, G. I. Strelkova

Saratov State University, Russia
E-mail: andreyryabchenko.2003@gmail.com, ✉rybalovaev@gmail.com, strelkovagi@sgu.ru
Received 15.08.2023, accepted 3.10.2023, available online 21.12.2023, published 31.01.2024

Abstract. The *purpose* of this work is to study numerically the influence of additive white Gaussian noise on the dynamics of a network of nonlocally coupled neuron models which are represented by FitzHugh–Nagumo oscillators. Depending on coupling parameters between the individual elements this network can demonstrate various spatio-temporal structures, such as chimera states, solitary states and regimes of their coexistence (combined structures). These patterns exhibit different responses against additive noise influences. *Methods.* The network dynamics is explored by calculating and plotting snapshots (instantaneous spatial distributions of the coordinate values at a fixed time), space-time diagrams, projections of multidimensional attractors, mean phase velocity profiles, and spatial distributions (profiles) of cross-correlation coefficient values. We also evaluate the cross-correlation coefficient averaged over the network, the mean number of solitary nodes and the probability of settling spatio-temporal structures in the neuronal network in the presence of additive noise. *Results.* It has been shown that additive noise can decrease the probability of settling regimes of solitary states and combined structures, while the probability of observing chimera states arises up to 100%. In the noisy network of FitzHugh–Nagumo oscillators exhibiting the regime of solitary states, increasing the noise intensity leads, in general case, to a decrease of the mean number of solitary nodes and the interval of coupling parameter values within which the solitary states are observed. However, there is a finite region in the coupling parameter plane, inside which the number of solitary nodes can grow in the presence of additive noise. *Conclusion.* We have studied the impact of additive noise on the probability of observing chimera states, solitary states and combined structures, which coexist in the multistability region, in the network of nonlocally coupled FitzHugh–Nagumo neuron models. It has been established that chimera states represent more stable and dominating structures among the other patterns coexisting in the studied network. At the same time, the probability of settling regimes of solitary states only, the region of their existence in the coupling parameter plane and the number of solitary nodes generally decrease when the noise intensity increases.

Keywords: nonlocal coupling, additive noise, chimera state, solitary state, FitzHugh–Nagumo model.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-12-00119, https://www.rscf.ru/project/20-12-00119/).

For citation: Ryabchenko AD, Rybalova EV, Strelkova GI. Influence of additive noise on chimera and solitary states in neural networks. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(1):121–140. DOI: 10.18500/0869-6632-003083

Введение

В реальных системах неизбежно присутствуют различные неоднородности и шумы, которые могут оказывать как конструктивное, так и деструктивное влияние на пространственно-временную динамику сложных систем [1–8]. Источники шума могут использоваться для стабилизации и/или эффективного управления режимами работы систем [2–4, 9–13], а также для улучшения ряда характеристик их функционирования. К таким эффектам относятся, например, стохастический резонанс [1, 6, 14] и когерентный резонанс [5, 15]. В последнее время вопросам влияния шумов и неоднородностей на динамику сетей уделяется особое внимание в связи с открытием новых режимов частичной синхронизации в сетях связанных систем, а именно химерных состояний [16–20] и уединенных состояний [21, 22].

Химерные состояния впервые были обнаружены в ансамблях нелокально связанных идентичных фазовых осцилляторов [16, 17]. Этот особый пространственно-временной режим динамики представляет собой промежуточный этап при переходе от режима когерентной динамики (синхронизации) к некогерентной (пространственно-временной хаос) и соответствует сосуществованию локализованных в пространстве ансамбля кластеров с когерентной (синхронизированной) и некогерентной (десинхронизированной) динамикой осцилляторов ансамбля. Теоретические и численные исследования показали, что химеры могут возникать в сетях с парциальными элементами различной природы и при различной топологии связей между ними [16–20, 23–31]. Этот режим кластерной синхронизации наблюдается не только в компьютерных экспериментах, но и в реальных системах, например, в сетях электроснабжения [32–34], в социальных системах [35, 36], а также в нейробиологии [37–39]. Показано, что состояния, подобные химерным, возникают в мозге при болезни Паркинсона [40], во время сна одним полушарием у птиц и млекопитающих [41], во время движения глаз [42, 43], при эпилептических приступах [44]. Устойчивость химерных состояний к шумовым возмущениям исследовалась в нелокально связанных сетях осцилляторов с дискретным [45–51] и непрерывным временем [52–55].

Уединенные состояния представляют собой еще один важный режим пространственно-временной динамики, который наблюдается в ансамблях связанных осцилляторов [21, 22]. Для этого режима характерно то, что большинство элементов системы находится в некотором типичном состоянии, а остальные принадлежат другим состояниям (уединенным), которых в общем случае может быть несколько. При этом элементы, принадлежащие уединенным состояниям (уединенные узлы), распределены по всему ансамблю случайно, но достаточно равномерным образом, то есть не сбиваются в кластеры (если не использованы специальные начальные условия), как это происходит при химерном режиме. Отметим, что количество уединенных узлов увеличивается при уменьшении силы связи между элементами сети. Исследования показали, что возникновение уединенных состояний связано с появлением бистабильности в системе за счет нелокального взаимодействия парциальных элементов [21, 22]. Уединенные состояния были обнаружены в сетях моделей Курамото–Сакагути и осцилляторов Курамото с инерцией [21, 22, 56–58], системах с дискретным временем [28, 59, 60], системах осцилляторов ФитцХью–Нагумо [61–64], моделях электрических сетей [65–67] и даже в экспериментальных установках связанных маятников [68]. Режимы, подобные уединенным состояниям, также встречаются в нейронных ансамблях головного мозга. Примером может служить реакция только отдельных нейронов на определенные стимулы [69, 70], в том числе так называемые нейроны бабушки [71, 72], динамика ансамбля нейронов при задаче категоризации [73]. В отличие от химерных состояний, устойчивость уединенных состояний по отношению к шуму очень мало изучена. Например, в работе [74] было показано, что наличие шума в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо приводит к переходу от уединенных состояний к «пятнистой» синхронизации (patched synchrony). Авторами работы [48] было установлено, что в кольце нелокально связанных отображений Лози введение аддитивного шума приводит к уменьшению интервала по параметрам ансамбля, в котором наблюдаются уединенные состояния, и к уменьшению количества уединенных узлов, но преимущественно на границах области существования этих режимов. К качественно подобному эффекту ведет шумовая модуляция управляющих параметров, что показано в работе [75].

Настоящая работа направлена на расширение знаний об эффектах, которые возникают при воздействии аддитивного шума на химерные и уединенные состояния, реализующиеся в ансамблях связанных нелинейных осцилляторов. В данной работе исследуется динамика кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо, которые являются классическими моделями нейронной активности. В работах [63, 76] было показано, что в такой системе возможно установление множества пространственно-временных режимов при вариации параметров связи между парциальными элементами. В частности, могут наблюдаться химерные и уединенные состояния, а также режим их сосуществования — комбинированная структура — в пространстве ансамбля. Проводится анализ влияния аддитивного шума на режим только уединенных состояний, а также на режимы, наблюдающиеся в области мультистабильности: химерные состояния, уединенные состояния и комбинированные структуры.

1. Исследуемая модель и используемые методы

В данной работе исследуется динамика кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо [77, 78] в колебательном режиме с добавлением в медленную переменную (ингибитор) аддитивного белого гауссовского шума. Изучаемая сеть описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \varepsilon\frac{du_i}{dt} &= u_i - \frac{u_i^3}{3} - v_i + \frac{\sigma}{2R}\sum_{j=i-R}^{i+R}[b_{uu}(u_j - u_i) + b_{uv}(v_j - v_i)], \\ \frac{dv_i}{dt} &= u_i + a + \frac{\sigma}{2R}\sum_{j=i-R}^{i+R}[b_{vu}(u_j - u_i) + b_{vv}(v_j - v_i)] + \sqrt{2A}\xi_i(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где u_i и v_i — переменные, описывающие динамику во времени активатора (быстрой переменной) и ингибитора (медленной переменной), соответственно, $i = 1, 2, \ldots, N = 300$ — номер элемента в кольце. Малый параметр $\varepsilon > 0$ отвечает за разделение временных масштабов быстрого активатора от медленного ингибитора (в данной работе значение фиксируется $\varepsilon = 0.05$), а параметр a определяет порог возбудимости. В работе значение данного параметра принимается равным для всех элементов $a = 0.5$, что соответствует колебательному режиму динамики в одиночном элементе. Параметр R определяет количество ближайших соседей справа и слева, с которыми связан каждый i-й элемент. Данный параметр является радиусом нелокальной связи и в проводимых исследованиях фиксирован $R = 105$. Способ задания нелокальной связи между осцилляторами в ансамбле (1) был предложен в работе [76] и характеризуется силой связи σ. Последнее слагаемое во втором уравнении соответствует введению в систему аддитивного шума с интенсивностью A, ξ_i — независимые источники белого гауссовского шума. Начальные условия всех элементов случайно и равномерно выбраны внутри круга $u^2 + v^2 \leqslant 2^2$.

Система (1) содержит не только прямые связи между элементами, но и перекрестные между активатором (u) и ингибитором (v), которые устанавливаются в соответствии с вращательной матрицей связи [76]:

$$B = \begin{pmatrix} b_{uu} & b_{uv} \\ b_{vu} & b_{vv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $\phi \in [-\pi, \pi)$. В работе [76] было показано, что в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо в колебательном режиме могут наблюдаться химерные состояния при $\phi = \pi/2 - 0.1$. В работе [53] данный результат был распространен на парциальные элементы в возбудимом режиме при наличии аддитивного шума в системе.

В работе [63] было изучено влияние параметров связи σ и ϕ на динамику кольца (1) в отсутствие аддитивного шума ($A = 0$) и была построена карта динамических режимов (рис. 1). Аббревиатурами на карте обозначены все режимы, наблюдающиеся в различных областях пространства параметров. Первая диаграмма (рис. 1, *a*) построена для случая слабой связи, при которой в системе в области малых значений ϕ наблюдается два режима: режим синхронизации всех элементов в кольце (SYN) и уединенные состояния (SS). Второй фрагмент карты режимов соответствует случаю сильной связи (рис. 1, *b*). В этой области, помимо уже упомянутых режимов полной синхронизации (SYN) и уединенных состояний (SS), наблюдаются также режимы классической химерной структуры (CS) и химеры уединенных состояний двух типов (SSC-1, SSC-2). SSC-1 имеет некогерентный кластер, состоящий из равномерно распределенных уединенных узлов. Химера уединенных состояний 2-го типа (SSC-2) также характеризуется кластером некогерентности, включающим равномерно распределенные уединенные узлы. Однако на его границах

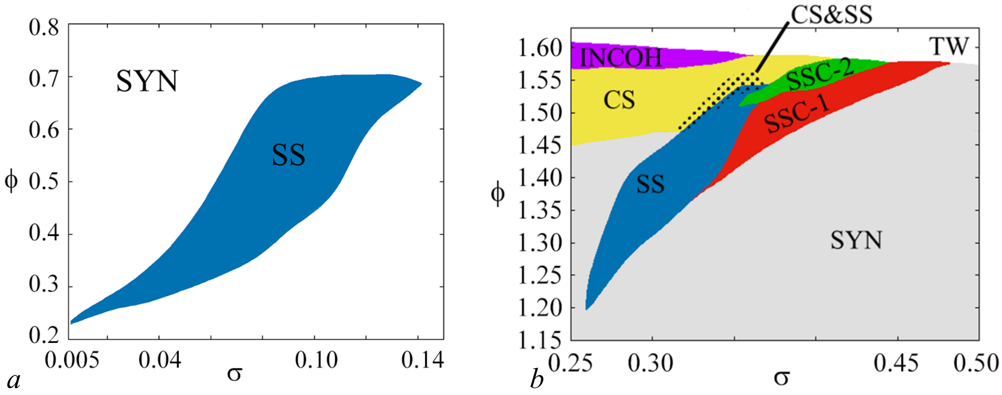

Рис. 1. Карты динамических режимов в системе (1) в отсутствие аддитивного шума для слабой (a) и сильной (b) связей. SYN — режим синхронизации; SS — уединенное состояние; CS — химерное состояние; INCOH — некогерентный режим; TW — режим бегущих волн; SSC-1 и SSC-2 — различные типы химеры уединенного состояния; CS&SS — сосуществование химерных и уединенных состояний на профиле кольца (комбинированная структура). Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$, $A = 0$ (цвет онлайн)

Fig. 1. Diagrams of dynamical regimes in the network (1) without additive noise for weak (a) and strong (b) coupling. SYN — synchronization regime, SS — solitary state, CS — chimera state, INCOH — incoherence regime, TW — traveling wave regime, SSC-1 and SSC-2 — two different types of a solitary state chimera, CS&SS — coexistence of chimera and solitary states (combined structure). Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$, $A = 0$ (color online)

образуются «ступеньки», представляющие собой группы уединенных узлов. Помимо областей, в которых наблюдаются только химерные состояния и только уединенные состояния, существует область с комбинированной динамикой, соответствующей сосуществованию химерных и уединенных состояний (CS&SS). В дальнейшем данный режим будем называть комбинированной структурой. В области INCOH динамика кольца характеризуется некогерентным мгновенным пространственным профилем и отвечает режиму рассинхронизации всех элементов ансамбля. Область TW соответствует режиму бегущих волн. Более подробный анализ динамики кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо при параметрах из всех перечисленных областей представлен в работе [63].

Для анализа пространственно-временной динамики ансамбля нелокально связанных элементов строятся мгновенные профили (пространственное распределение значений всех динамических переменных в фиксированный момент времени), пространственно-временные диаграммы (на плоскости параметров «номер элемента (i) – время (t)» цветом отображаются амплитуды парциальных элементов) и проекции многомерных аттракторов системы на плоскость динамических переменных. Однако для получения полной картины эволюции различных пространственно-временных режимов ансамбля в присутствии шумовых воздействий представляется целесообразным расчет коэффициента взаимной корреляции между элементами ансамбля и построение пространственного распределения его значений. Коэффициент взаимной корреляции между первым элементом ансамбля и всеми остальными вычисляется по следующей формуле:

$$C_{1i} = \frac{\langle \tilde{u}_1 \tilde{u}_i \rangle}{\sqrt{\langle (\tilde{u}_1)^2 \rangle \langle (\tilde{u}_i)^2 \rangle}}, \quad i = 2, 3, \ldots, N, \tag{3}$$

где $\tilde{u}_i = u_i - \langle u_i \rangle$, $\langle u_i \rangle$ — усреднение значений u_i по ансамблю реализаций, которое в численных экспериментах заменялось усреднением по времени. Величина (3) показывает степень корреляции или синхронизации между первым элементом ансамбля и всеми остальными и изменяется от -1 до 1, где «1» соответствует полной синфазной синхронизации, «-1» — противофазной синхронизации. При отсутствии корреляции между элементами данный коэффициент равен 0. В связи с тем, что коэффициент корреляции у уединенных узлов меньше, чем у осцилляторов, принадлежащих когерентной части профиля, данный коэффициент помогает автоматически обнаруживать уединенные состояния и подсчитывать количество уединенных узлов.

Кроме расчета коэффициента взаимной корреляции для каждого элемента (3) используется также усредненный по всем элементам ансамбля коэффициент взаимной корреляции

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\langle \tilde{u}_1 \tilde{u}_i \rangle}{\sqrt{\langle (\tilde{u}_1)^2 \rangle \langle (\tilde{u}_i)^2 \rangle}}, \tag{4}$$

где выражение под знаком суммы соответствует коэффициенту взаимной корреляции между 1-м и i-м элементами (3). Как было показано в работе [75], усредненный коэффициент взаимной корреляции можно использовать в качестве дополнительной величины для оценки количества уединенных узлов в системе. В случае когерентной динамики имеем $C \to 1$, для режима уединенных состояний значение усредненного коэффициента взаимной корреляции уменьшается.

Для иллюстрации различий между наблюдаемыми пространственно-временными структурами в ансамбле нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо также вычисляется средняя фазовая скорость каждого элемента в ансамбле по формуле

$$w_i = 2\pi M_i / \Delta T, \tag{5}$$

где M_i — число полных оборотов вокруг начала координат, выполняемых i-м осциллятором ФитцХью–Нагумо за интервал времени ΔT [76]. В данных расчетах переходное время бралось равным $T_0 = 1000$ единиц безразмерного времени, а время, на котором рассчитывались коэффициенты взаимной корреляции и значения средней фазовой скорости, $T = 2000$.

В некоторых случаях наряду с усредненным коэффициентом взаимной корреляции напрямую подсчитывается количество уединенных узлов и используется такая характеристика, как «среднее нормированное количество уединенных узлов», которая определяется следующим образом:

$$N_\mathrm{S} = \frac{1}{M} \sum_{M} S/N, \tag{6}$$

где S — число уединенных узлов, наблюдаемых при каждой исходной реализации начальных условий динамических переменных и реализации генератора шума, N — общее количество элементов в ансамбле, M — общее количество используемых реализаций.

2. Воздействие шума на режимы в области мультистабильности

В данном случае при исследовании динамики кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо параметры системы выбирались такими, чтобы в отсутствие шума в системе могла наблюдаться комбинированная структура (см. рис. 1, *b*, область «CS&SS», выделенная точками). Кроме комбинированной структуры в данной области параметров в зависимости от начальных условий могут также реализоваться только химерные состояния или режимы только уединенных состояний. При этом вероятность установления режимов комбинированной структуры и чисто химерных состояний выше, чем режима уединенных состояний. На рис. 2 проиллюстрированы все эти три режима в отсутствие аддитивного шума в ансамбле (1).

В случае установления в системе только химерных состояний, в пространстве ансамбля сосуществуют кластеры с когерентной и некогерентной динамикой осцилляторов (рис. 2, *a*),

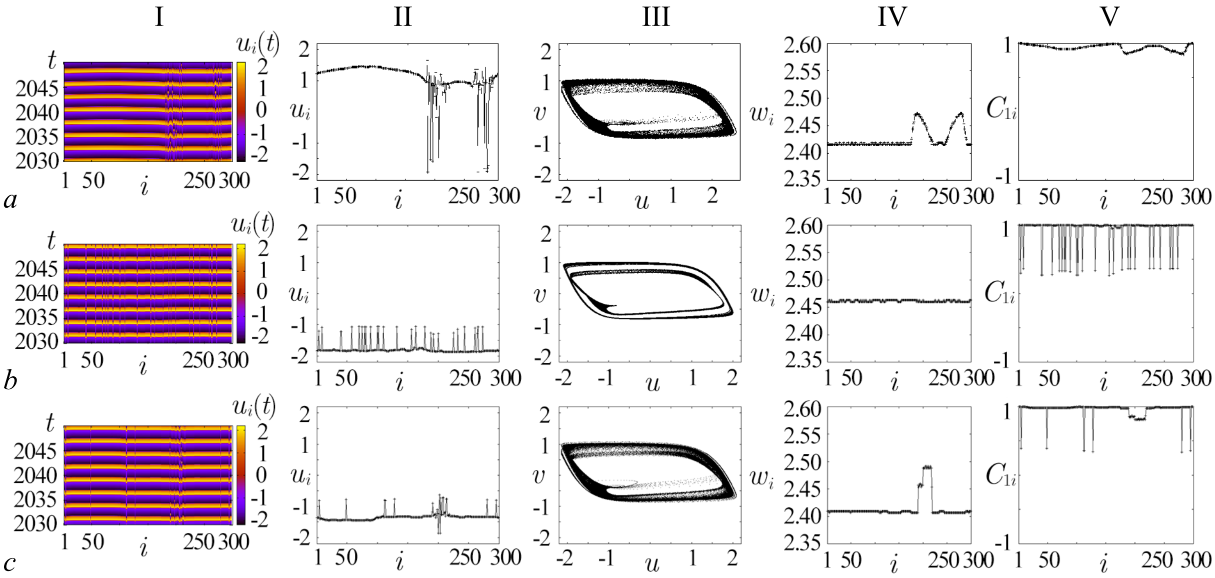

Рис. 2. Динамика кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо (1) при параметрах связи $\sigma = 0.325$, $\phi = 1.48$ и различных начальных распределений динамических переменных в отсутствие аддитивного шума ($A = 0$): химерное состояние (a), уединенное состояние (b), комбинированная структура (c). Пространственно-временные диаграммы (столбец I), мгновенные профили (столбец II), проекции многомерного аттрактора на плоскость (u, v) (столбец III), профили средних фазовых скоростей (столбец IV), профили коэффициентов взаимной корреляции (столбец V). Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (цвет онлайн)

Fig. 2. Dynamics of the noise-free ring network of nonlocally coupled FitzHugh–Nagumo oscillators (1) for the coupling parameters $\sigma = 0.325$, $\phi = 1.48$ and different initial distributions of dynamical variables: chimera state (a), solitary state (b), and combined structure (c). Space-time diagrams (column I), snapshots (column II), projections of a multidimensional attractor on the (u, v) plane (column III), mean phase velocity profiles (column IV), cross-correlation coefficient profiles (column V). Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$, $A = 0$ (color online)

проекция многомерного аттрактора на плоскость (u, v) качественно совпадает с аттрактором, типичным для осциллятора ФитцХью–Нагумо, но имеют место небольшие колебания амплитуды (рис. 2, *a*, III). На профиле средних фазовых скоростей наблюдаются две куполообразных зависимости в области некогерентных кластеров (рис. 2, *a*, IV), а коэффициент взаимной корреляции в области некогерентных кластеров принимает значения меньше единицы (рис. 2, *a*, V). При установлении в системе режима только уединенных состояний (рис. 2, *b*, I, II) на фазовом портрете всех элементов можно различить два аттрактора, где меньший соответствует уединенным узлам (рис. 2, *b*, III). При этом значения средних фазовых скоростей для всех элементов почти равны (рис. 2, *b*, IV), а значения коэффициента взаимной корреляции элементов, соответствующих уединенным узлам, значительно меньше, чем у остальных элементов (рис. 2, *b*, V). В случае реализации комбинированной структуры (сосуществования химер и уединенных состояний) имеют место все вышеописанные особенности (рис. 2, *c*).

При добавлении аддитивного шума в ансамбль (1) вероятность установления (со случайных начальных условий) режима уединенных состояний и режима комбинированной структуры стремится к нулю, и все рассмотренные начальные условия приводят к реализации химерных состояний (рис. 3). Так, в присутствии шума даже достаточно малой интенсивности $A < 2 \cdot 10^{-7}$ в системе перестают устанавливаться режимы уединенных состояний, а при $A > 7 \cdot 10^{-6}$ больше не наблюдаются и режимы комбинированных структур. Отметим, что существует значение интенсивности шума, $A = 5 \cdot 10^{-6}$, при котором установление только химерных состояний и режима комбинированной структуры равновероятно.

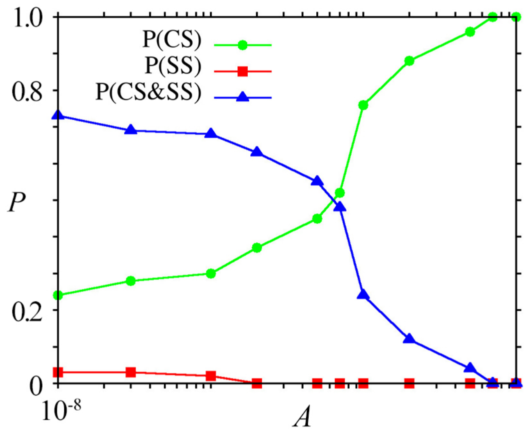

Рис. 3. Зависимости вероятностей установления химерных структур P(CS), режима уединенных состояний P(SS) и режима комбинированной структуры P(CS&SS) в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо от интенсивности аддитивного шума A. Для построения зависимостей использовалось 100 различных начальных распределений динамических переменных. Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (цвет онлайн)

Fig. 3. Probabilities of settling chimera states P(CS), solitary state regime P(SS), and combined structure regime P(CS&SS) in the network of FitzHugh–Nagumo oscillators versus the noise intensity A. The dependences are plotted using 100 different sets of initial conditions. Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (color online)

На рис. 4 приведены результаты расчетов характеристик, иллюстрирующие динамику кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо при добавлении аддитивного шума разной интенсивности. При малой интенсивности шума в системе еще могут иметь место режимы комбинированных структур, однако в этом случае в ансамбле наблюдается только несколько уединенных узлов (примерно 1...3), что отражено на рис. 4, *a*. Дальнейшее увеличение интенсивности шума ведет к установлению в ансамбле только химерных состояний (рис. 4, *b*, *c*).

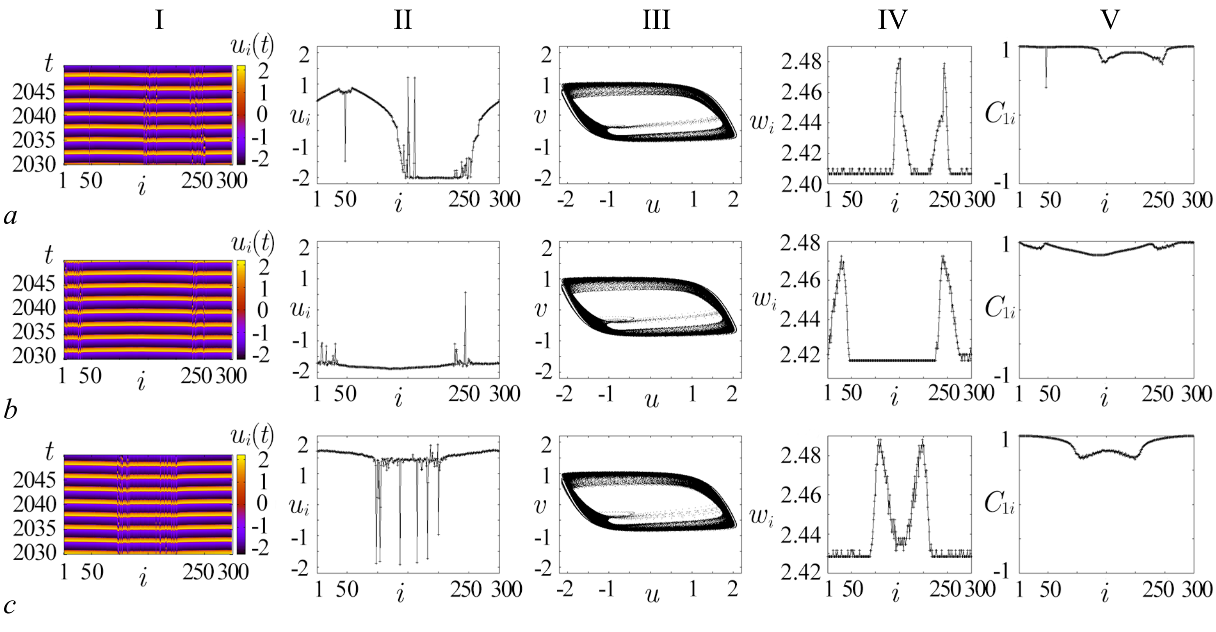

Рис. 4. Динамика кольца нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо при различных значениях интенсивности шума: $A = 10^{-7}$ (*a*), 10^{-6} (*b*), 10^{-5} (*c*). Пространственно-временные диаграммы (столбец I), мгновенные профили (столбец II), проекции многомерного аттрактора на плоскость (u, v) (столбец III), профили средних фазовых скоростей (столбец IV), профили коэффициентов взаимной корреляции (столбец V). Другие параметры и начальные условия соответствуют рис. 2, *c* (цвет онлайн)

Fig. 4. Dynamics of the network of nonlocally coupled FitzHugh–Nagumo oscillators for different values of the noise intensity: $A = 10^{-7}$ (*a*), 10^{-6} (*b*), 10^{-5} (*c*). Space-time diagrams (column I), snapshots (column II), projections of a multidimensional attractor on the (u, v) plane (column III), mean phase velocity profiles (column IV), cross-correlation coefficient profiles (column V). Other parameters and initial conditions corresponds to the structure in Fig. 2, *c* (color online)

3. Воздействие шума на режим уединенных состояний

Проанализируем влияние независимых источников аддитивного нормального белого шума на динамику ансамбля осцилляторов ФитцХью–Нагумо (1) при значениях управляющих параметров ансамбля, которые соответствуют установлению режима уединенных состояний в области слабой и сильной связи (см. рис. 1, синие области).

На рис. 5 представлены распределения значений коэффициента корреляции (4) в соответствии с картами режимов, которые приведены на рис. 1. Видно, что в области, которая соответствует наличию в системе уединенных узлов, коэффициент взаимной корреляции, усредненный по ансамблю, $C \approx 0.96$ (сравните рис. 1 и рис. 5). Такое значение C соответствует наличию в системе небольшого количества уединенных узлов. Как уже говорилось ранее, коэффициент корреляции может только качественно отобразить изменения количества уединенных узлов при увеличении интенсивности аддитивного шума, однако он позволяет проследить за изменением области существования уединенных состояний.

В связи с этим было построено распределение значений усредненных коэффициентов взаимной корреляции при различной интенсивности аддитивного шума для одной реализации случайных начальных условий элементов ансамбля (рис. 6). Как можно видеть, обе области существования уединенных состояний уменьшаются с увеличением интенсивности шума. Однако область, которая находится в интервале слабой связи, более устойчива к внешнему воздействию (рис. 6, *a*–*d*), чем та, которая находится в интервале сильной связи (рис. 6, *e*–*h*). Исследования показали, что область, в которой наблюдаются режимы уединенных состояний при слабой связи, полностью исчезает при $A \approx 7 \cdot 10^{-4}$, в то время как в случае сильной связи достаточно интенсивности шума на один порядок меньше $A \approx 7 \cdot 10^{-5}$, чтобы в ансамбле не наблюдались уединенные узлы.

Для более детального исследования влияния аддитивного шума на уединенные состояния в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо была проанализирована зависимость среднего количества уединенных узлов от силы связи между элементами и интенсивности аддитивного шума при фиксированных значениях параметра φ в интервале слабой (рис. 7, *a*) и сильной связи (рис. 7, *b*). В данном случае использовалась одна реализация случайно распределенных начальных значений динамических переменных и десять различных реализаций независимых источников белого гауссовского шума. Как можно видеть, при слабой связи количество уединенных узлов меньше, чем при сильной связи (сравните разброс на цветовой шкале N_{S} на рис. 7, *a* и 7, *b*). При этом зависимость количества уединенных узлов от σ и A в интервале слабой связи, имея куполообразную форму, качественно напоминает зависимости, которые

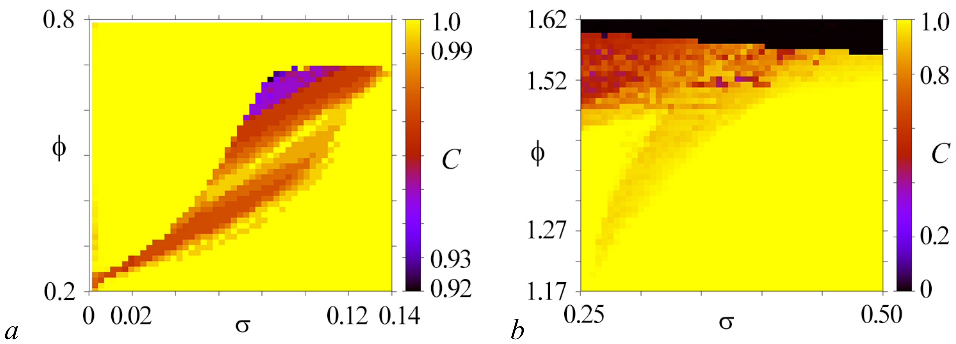

Рис. 5. Распределения значений усредненного коэффициента взаимной корреляции (4) в ансамбле (1) для слабой (*a*) и сильной (*b*) связей в отсутствие шума. Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$, $A = 0$ (цвет онлайн)

Fig. 5. Distributions of averaged cross-correlation coefficient (4) values in the noise-free network (1) for weak (*a*) and strong (*b*) coupling. Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$, $A = 0$ (color online)

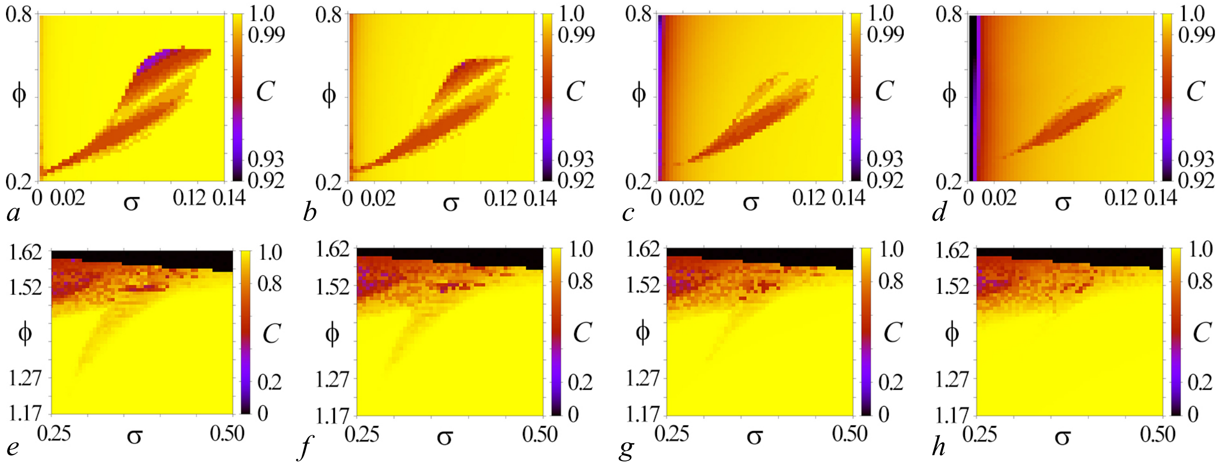

Рис. 6. Карты распределений значений усредненного коэффициента взаимной корреляции (4) в ансамбле (1) на плоскости параметров (σ, ϕ) для слабой (*a–d*) и сильной (*e–h*) связи в присутствии аддитивного шума различной интенсивности: $A = 0.000005$ (*a*), 0.000025 (*b*), 0.000100 (*c*), 0.000200 (*d*), 0.000005 (*e*), 0.000010 (*f*), 0.000025 (*g*), 0.000050 (*h*). Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (цвет онлайн)

Fig. 6. Distribution diagrams for the averaged cross-correlation coefficient (4) in the network (1) in the (σ, ϕ) parameter plane for weak (*a–d*) and strong (*e–h*) coupling for different values of the noise intensity: $A = 0.000005$ (*a*), 0.000025 (*b*), 0.000100 (*c*), 0.000200 (*d*), 0.000005 (*e*), 0.000010 (*f*), 0.000025 (*g*), 0.000050 (*h*). Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (color online)

наблюдались в кольцах нелокально связанных отображений Лози, исследованных в работе [48]. Область существования уединенных состояний в случае сильной связи имеет более линейную левую границу (см. рис. 7, *b*). Однако во всех случаях увеличение интенсивности шума ведет преимущественно к уменьшению количества уединенных узлов и интервала значений параметра σ, в котором они наблюдаются. Только в случае слабой связи при $\sigma \approx 0.119$ можно наблюдать, что при $A = 0$ количество уединенных узлов стремится к 0, а при $A > 0$ может находиться на уровне $P \approx 0.006$ (что соответствует наличию двух–трех уединенных узлов в ансамбле), однако при $A > 0.002$ значение N_S вновь уменьшается до 0 (см. рис. 7, *a*). То же самое наблюдается

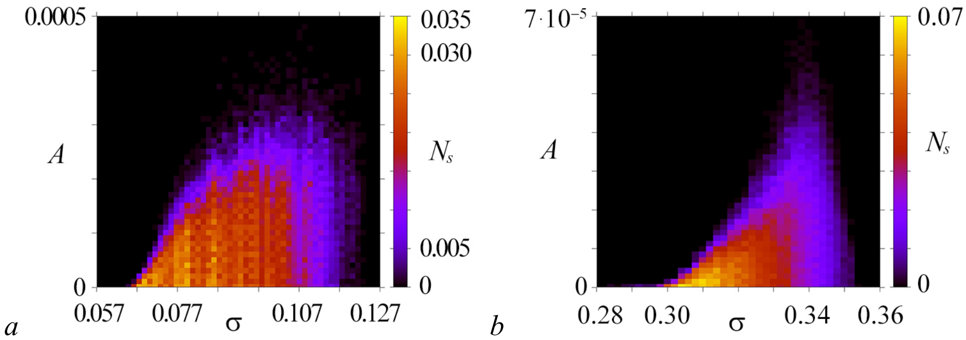

Рис. 7. Среднее нормированное количество уединенных узлов N_S в ансамбле нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо при изменении силы связи σ и интенсивности шума A в интервале слабой (*a*) и сильной (*b*) связи при фиксированных значениях параметра ϕ: 0.52 (*a*), 1.4 (*b*). Расчеты проводились для одной реализации случайно распределенных начальных значений динамических переменных и десяти различных реализаций шума ($M = 10$). Другие параметры: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (цвет онлайн)

Fig. 7. Mean normalized number of solitary nodes N_S in the network of coupled FitzHugh–Nagumo oscillators in the (σ, A) parameter plane for weak (*a*) and strong (*b*) coupling and for fixed values of the parameter ϕ: 0.52 (*a*), 1.4 (*b*). Calculations were performed for a single realization of randomly distributed initial conditions of the dynamical variables and 10 different noise realizations ($M = 10$). Other parameters: $\varepsilon = 0.05$, $a_0 = 0.5$, $R = 105$, $N = 300$ (color online)

на картах распределения усредненного коэффициента взаимной корреляции для случая слабой связи, когда при увеличении интенсивности шума область существования уединенных состояний уменьшалась и слегка сдвигалась вправо в сторону больших значений σ (см. рис. 6, *a–d*).

Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования динамики ансамбля нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо в присутствии аддитивного шума. Для анализа влияния шума выбирались значения управляющих параметров связи, соответствующие области мультистабильности, в которой в зависимости от начальных условий могут наблюдаться химерные состояния, режимы уединенных состояний и комбинированные структуры, а также соответствующие реализации в ансамбле только режима уединенных состояний (в интервале слабой и сильной связи).

Показано, что в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо воздействие аддитивного шума на режимы, реализующиеся в области мультистабильности, ведет к увеличению вероятности установления только химерных структур, при этом вероятности наблюдения других режимов уменьшаются до нуля при увеличении интенсивности шума. Таким образом, при наличии аддитивного шумового воздействия химерные состояния проявляют себя как более устойчивые и доминирующие структуры среди всех остальных, сосуществующих в ансамбле.

При введении аддитивного шума в исследуемый ансамбль, который в отсутствие шума демонстрирует режимы только уединенных состояний, увеличение интенсивности шума в общем случае ведет к уменьшению области значений параметров связи, в которой наблюдаются уединенные состояния, и к уменьшению количества уединенных узлов, что также имело место в кольцах нелокально связанных отображений Лози [48]. Однако в кольце нелокально связанных осцилляторов ФитцХью–Нагумо в случае слабой связи введение аддитивного шума может способствовать появлению уединенных состояний при силе связи примерно на 0.04 больше, чем максимальная сила связи, при которой наблюдались уединенные узлы в ансамбле без шума.

Список литературы

1. *Benzi R., Sutera A., Vulpiani A.* The mechanism of stochastic resonance // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1981. Vol. 14, no. 11. P. L453–L457. DOI: 10.1088/0305-4470/14/11/006.
2. *Horsthemke W., Lefever R.* Noise-induced transitions in physics, chemistry, and biology // In: Noise-Induced Transitions. Vol. 15 of Springer Series in Synergetics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1984. P. 164–200. DOI: 10.1007/3-540-36852-3_7.
3. *Neiman A.* Synchronizationlike phenomena in coupled stochastic bistable systems // Physical Review E. 1994. Vol. 49, no. 4. P. 3484–3487. DOI: 10.1103/PhysRevE.49.3484.
4. *Arnold L.* Random dynamical systems // In: Johnson R. (eds) Dynamical Systems. Vol. 1609 of Lecture Notes in Mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995. P. 1–43. DOI: 10.1007/BFb0095238.
5. *Pikovsky A. S., Kurths J.* Coherence resonance in a noise-driven excitable system // Physical Review Letters. 1997. Vol. 78, no. 5. P. 775–778. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.775.
6. *Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л.* Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // УФН. 1999. Т. 169, № 1. С. 7–38. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199901c.0007.
7. *Goldobin D. S., Pikovsky A.* Synchronization and desynchronization of self-sustained oscillators by common noise // Physical Review E. 2005. Vol. 71, no. 4. P. 045201. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.045201.
8. *McDonnell M. D., Ward L. M.* The benefits of noise in neural systems: bridging theory and experiment // Nature Reviews Neuroscience. 2011. Vol. 12, no. 7. P. 415–425. DOI: 10.1038/nrn3061.

9. *Schimansky-Geier L., Herzel H.* Positive Lyapunov exponents in the Kramers oscillator // Journal of Statistical Physics. 1993. Vol. 70, no. 1–2. P. 141–147. DOI: 10.1007/BF01053959.
10. *Shulgin B., Neiman A., Anishchenko V.* Mean switching frequency locking in stochastic bistable systems driven by a periodic force // Physical Review Letters. 1995. Vol. 75, no. 23. P. 4157–4160. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.4157.
11. *Arnold L., Namachchivaya N. S., Schenk-Hoppé K. R.* Toward an understanding of stochastic Hopf bifurcation: A case study // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1996. Vol. 6, no. 11. P. 1947–1975. DOI: 10.1142/S0218127496001272.
12. *Han S. K., Yim T. G., Postnov D. E., Sosnovtseva O. V.* Interacting coherence resonance oscillators // Physical Review Letters. 1999. Vol. 83, no. 9. P. 1771–1774. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1771.
13. *Bashkirtseva I., Ryashko L., Schurz H.* Analysis of noise-induced transitions for Hopf system with additive and multiplicative random disturbances // Chaos, Solitons & Fractals. 2009. Vol. 39, no. 1. P. 72–82. DOI: 10.1016/j.chaos.2007.01.128.
14. *Gammaitoni L., Marchesoni F., Menichella-Saetta E., Santucci S.* Stochastic resonance in bistable systems // Physical Review Letters. 1989. Vol. 62, no. 4. P. 349–352. DOI: 10.1103/PhysRevLett.62.349.
15. *Lindner B., Schimansky-Geier L.* Analytical approach to the stochastic FitzHugh-Nagumo system and coherence resonance // Physical Review E. 1999. Vol. 60, no. 6. P. 7270–7276. DOI: 10.1103/PhysRevE.60.7270.
16. *Kuramoto Y., Battogtokh D.* Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2002. Vol. 5, no. 4. P. 380–385.
17. *Abrams D. M., Strogatz S. H.* Chimera states for coupled oscillators // Physical Review Letters. 2004. Vol. 93, no. 17. P. 174102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.174102.
18. *Omelchenko I., Maistrenko Y., Hövel P., Schöll E.* Loss of coherence in dynamical networks: Spatial chaos and chimera states // Physical Review Letters. 2011. Vol. 106, no. 23. P. 234102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.234102.
19. *Panaggio M. J., Abrams D. M.* Chimera states: coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators // Nonlinearity. 2015. Vol. 28, no. 3. P. R67. DOI: 10.1088/0951-7715/28/3/R67.
20. *Zakharova A.* Chimera Patterns in Networks: Interplay between Dynamics, Structure, Noise, and Delay. Cham: Springer, 2020. 233 p. DOI: 10.1007/978-3-030-21714-3.
21. *Maistrenko Y., Penkovsky B., Rosenblum M.* Solitary state at the edge of synchrony in ensembles with attractive and repulsive interactions // Physical Review E. 2014. Vol. 89, no. 6. P. 060901. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.060901.
22. *Jaros P., Maistrenko Y., Kapitaniak T.* Chimera states on the route from coherence to rotating waves // Physical Review E. 2015. Vol. 91, no. 2. P. 022907. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.022907.
23. *Bogomolov S. A., Slepnev A. V., Strelkova G. I., Schöll E., Anishchenko V. S.* Mechanisms of appearance of amplitude and phase chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic systems // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2017. Vol. 43. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.06.024.
24. *Panaggio M. J., Abrams D. M.* Chimera states on a flat torus // Physical Review Letters. 2013. Vol. 110, no. 9. P. 094102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.094102.
25. *Sawicki J., Omelchenko I., Zakharova A., Schöll E.* Chimera states in complex networks: interplay of fractal topology and delay // The European Physical Journal Special Topics. 2017. Vol. 226, no. 9. P. 1883–1892. DOI: 10.1140/epjst/e2017-70036-8.
26. *Schöll E.* Synchronization patterns and chimera states in complex networks: Interplay of topology and dynamics // The European Physical Journal Special Topics. 2016. Vol. 225, no. 6–7. P. 891–919. DOI: 10.1140/epjst/e2016-02646-3.

27. *Schöll E.* Chimeras in physics and biology: Synchronization and desynchronization of rhythms // In: Hacker J., Lengauer T. (Eds.) Zeit in Natur und Kultur: Vorträge anlässlich der Jahresversammlung am 20. und 21. September 2019 in Halle (Saale). Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2021. P. 67–95. DOI: 10.26164/leopoldina_10_00275.
28. *Semenova N., Zakharova A., Schöll E., Anishchenko V.* Does hyperbolicity impede emergence of chimera states in networks of nonlocally coupled chaotic oscillators? // Europhysics Letters. 2015. Vol. 112, no. 4. P. 40002. DOI: 10.1209/0295-5075/112/40002.
29. *Shima S., Kuramoto Y.* Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators // Physical Review E. 2004. Vol. 69, no. 3. P. 036213. DOI:10.1103/PhysRevE.69.036213.
30. *Ulonska S., Omelchenko I., Zakharova A., Schöll E.* Chimera states in networks of Van der Pol oscillators with hierarchical connectivities // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2016. Vol. 26, no. 9. P. 094825. DOI: 10.1063/1.4962913.
31. *Zakharova A., Kapeller M., Schöll E.* Chimera death: Symmetry breaking in dynamical networks // Physical Review Letters. 2014. Vol. 112, no. 15. P. 154101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.154101.
32. *Menck P. J., Heitzig J., Kurths J., Schellnhuber H. J.* How dead ends undermine power grid stability // Nature Communications. 2014. Vol. 5, no. 1. P. 3969. DOI: 10.1038/ncomms4969.
33. *Motter A. E., Myers S. A., Anghel M., Nishikawa T.* Spontaneous synchrony in power-grid networks // Nature Physics. 2013. Vol. 9, no. 3. P. 191–197. DOI: 10.1038/nphys2535.
34. *Wang B., Suzuki H., Aihara K.* Enhancing synchronization stability in a multi-area power grid // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, no. 1. P. 26596. DOI: 10.1038/srep26596.
35. *Hong S., Chun Y.* Efficiency and stability in a model of wireless communication networks // Social Choice and Welfare. 2010. Vol. 34, no. 3. P. 441–454. DOI: 10.1007/s00355-009-0409-1.
36. *González-Avella J. C., Cosenza M. G., San Miguel M.* Localized coherence in two interacting populations of social agents // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2014. Vol. 399. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.physa.2013.12.035.
37. *Bansal K., Garcia J. O., Tompson S. H., Verstynen T., Vettel J. M., Muldoon S. F.* Cognitive chimera states in human brain networks // Science Advances. 2019. Vol. 5, no. 4. P. eaau8535. DOI: 10.1126/sciadv.aau8535.
38. *Majhi S., Bera B. K., Ghosh D., Perc M.* Chimera states in neuronal networks: A review // Physics of Life Reviews. 2019. Vol. 28. P. 100–121. DOI: 10.1016/j.plrev.2018.09.003.
39. *Schöll E.* Partial synchronization patterns in brain networks // Europhysics Letters. 2022. Vol. 136, no. 1. P. 18001. DOI: 10.1209/0295-5075/ac3b97.
40. *Levy R., Hutchison W. D., Lozano A. M., Dostrovsky J. O.* High-frequency synchronization of neuronal activity in the subthalamic nucleus of parkinsonian patients with limb tremor // J. Neurosci. 2000. Vol. 20, no. 20. P. 7766–7775. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.20-20-07766.2000.
41. *Rattenborg N. C., Amlaner C. J., Lima S. L.* Behavioral, neurophysiological and evolutionary perspectives on unihemispheric sleep // Neurosci. Biobehav. Rev. 2000. Vol. 24, no. 8. P. 817–842. DOI: 10.1016/s0149-7634(00)00039-7.
42. *Funahashi S., Bruce C. J., Goldman-Rakic P. S.* Neuronal activity related to saccadic eye movements in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex // J. Neurophysiol. 1991. Vol. 65, no. 6. P. 1464–1483. DOI: 10.1152/jn.1991.65.6.1464.
43. *Swindale N. V.* A model for the formation of ocular dominance stripes // Proc. R. Soc. Lond. B. 1980. Vol. 208, no. 1171. P. 243–264. DOI: 10.1098/rspb.1980.0051.
44. *Andrzejak R. G., Rummel C., Mormann F., Schindler K.* All together now: Analogies between chimera state collapses and epileptic seizures // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, no. 1. P. 23000. DOI: 10.1038/srep23000.
45. *Malchow A.-K., Omelchenko I., Schöll E., Hövel P.* Robustness of chimera states in nonlocally coupled networks of nonidentical logistic maps // Physical Review E. 2018. Vol. 98, no. 1. P. 012217. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.012217.

46. *Bukh A. V., Slepnev A. V., Anishchenko V. S., Vadivasova T. E.* Stability and noise-induced transitions in an ensemble of nonlocally coupled chaotic maps // Regular and Chaotic Dynamics. 2018. Vol. 23, no. 3. P. 325–338. DOI: 10.1134/S1560354718030073.
47. *Rybalova E. V., Klyushina D. Y., Anishchenko V. S., Strelkova G. I.* Impact of noise on the amplitude chimera lifetime in an ensemble of nonlocally coupled chaotic maps // Regular and Chaotic Dynamics. 2019. Vol. 24, no. 4. P. 432–445. DOI: 10.1134/S1560354719040051.
48. *Rybalova E., Schöll E., Strelkova G.* Controlling chimera and solitary states by additive noise in networks of chaotic maps // Journal of Difference Equations and Applications. 2022. P. 1–22. DOI: 10.1080/10236198.2022.2118580.
49. *Rybalova E., Muni S., Strelkova G.* Transition from chimera/solitary states to traveling waves // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2023. Vol. 33, no. 3. P. 033104. DOI: 10.1063/5.0138207.
50. *Нечаев В. А., Рыбалова Е. В., Стрелкова Г. И.* Влияние неоднородности параметров на существование химерных структур в кольце нелокально связанных отображений // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 6. С. 943–952. DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-943-952.
51. *Nikishina N. N., Rybalova E. V., Strelkova G. I., Vadivasova T. E.* Destruction of cluster structures in an ensemble of chaotic maps with noise-modulated nonlocal coupling // Regular and Chaotic Dynamics. 2022. Vol. 27, no. 2. P. 242–251. DOI: 10.1134/S1560354722020083.
52. *Omelchenko I., Provata A., Hizanidis J., Schöll E., Hövel P.* Robustness of chimera states for coupled FitzHugh-Nagumo oscillators // Physical Review E. 2015. Vol. 91, no. 2. P. 022917. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.022917.
53. *Semenova N., Zakharova A., Anishchenko V., Schöll E.* Coherence-resonance chimeras in a network of excitable elements // Physical Review Letters. 2016. Vol. 117, no. 1. P. 014102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.014102.
54. *Zakharova A., Loos S., Siebert J., Gjurchinovski A., Schöll E.* Chimera patterns: influence of time delay and noise // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, no. 18. P. 7–12. DOI: 10.1016/j.ifacol. 2015.11.002.
55. *Loos S. A. M., Claussen J. C., Schöll E., Zakharova A.* Chimera patterns under the impact of noise // Physical Review E. 2016. Vol. 93, no. 1. P. 012209. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.012209.
56. *Wu H., Dhamala M.* Dynamics of Kuramoto oscillators with time-delayed positive and negative couplings // Physical Review E. 2018. Vol. 98, no. 3. P. 032221. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.032221.
57. *Jaros P., Brezetsky S., Levchenko R., Dudkowski D., Kapitaniak T., Maistrenko Y.* Solitary states for coupled oscillators with inertia // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2018. Vol. 28, no. 1. P. 011103. DOI: 10.1063/1.5019792.
58. *Berner R., Polanska A., Schöll E., Yanchuk S.* Solitary states in adaptive nonlocal oscillator networks // The European Physical Journal Special Topics. 2020. Vol. 229, no. 12–13. P. 2183–2203. DOI: 10.1140/epjst/e2020-900253-0.
59. *Semenova N. I., Rybalova E. V., Strelkova G. I., Anishchenko V. S.* "Coherence–incoherence" transition in ensembles of nonlocally coupled chaotic oscillators with nonhyperbolic and hyperbolic attractors // Regular and Chaotic Dynamics. 2017. Vol. 22, no. 2. P. 148–162. DOI: 10.1134/S156035 4717020046.
60. *Semenova N., Vadivasova T., Anishchenko V.* Mechanism of solitary state appearance in an ensemble of nonlocally coupled Lozi maps // The European Physical Journal Special Topics. 2018. Vol. 227, no. 10–11. P. 1173–1183. DOI: 10.1140/epjst/e2018-800035-y.
61. *Schülen L., Ghosh S., Kachhvah A. D., Zakharova A., Jalan S.* Delay engineered solitary states in complex networks // Chaos, Solitons & Fractals. 2019. Vol. 128. P. 290–296. DOI: 10.1016/j.chaos. 2019.07.046.
62. *Mikhaylenko M., Ramlow L., Jalan S., Zakharova A.* Weak multiplexing in neural networks:

Switching between chimera and solitary states // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2019. Vol. 29, no. 2. P. 023122. DOI: 10.1063/1.5057418.
63. *Rybalova E., Anishchenko V. S., Strelkova G. I., Zakharova A.* Solitary states and solitary state chimera in neural networks // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2019. Vol. 29, no. 7. P. 071106. DOI: 10.1063/1.5113789.
64. *Schülen L., Janzen D. A., Medeiros E. S., Zakharova A.* Solitary states in multiplex neural networks: Onset and vulnerability // Chaos, Solitons & Fractals. 2021. Vol. 145. P. 110670. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110670.
65. *Taher H., Olmi S., Schöll E.* Enhancing power grid synchronization and stability through time-delayed feedback control // Physical Review E. 2019. Vol. 100, no. 6. P. 062306. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.062306.
66. *Hellmann F., Schultz P., Jaros P., Levchenko R., Kapitaniak T., Kurths J., Maistrenko Y.* Network-induced multistability through lossy coupling and exotic solitary states // Nature Communications. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 592. DOI: 10.1038/s41467-020-14417-7.
67. *Berner R., Yanchuk S., Schöll E.* What adaptive neuronal networks teach us about power grids // Physical Review E. 2021. Vol. 103, no. 4. P. 042315. DOI: 10.1103/PhysRevE.103.042315.
68. *Kapitaniak T., Kuzma P., Wojewoda J., Czolczynski K., Maistrenko Y.* Imperfect chimera states for coupled pendula // Scientific Reports. 2014. Vol. 4, no. 1. P. 6379. DOI: 10.1038/srep06379.
69. *Fried I., MacDonald K. A., Wilson C. L.* Single neuron activity in human hippocampus and amygdala during recognition of faces and objects // Neuron. 1997. Vol. 18, no. 5. P. 753–765. DOI: 10.1016/s0896-6273(00)80315-3.
70. *Kreiman G., Koch C., Fried I.* Category-specific visual responses of single neurons in the human medial temporal lobe // Nature Neuroscience. 2000. Vol. 3, no. 9. P. 946–953. DOI: 10.1038/78868.
71. *Rose D.* Some reflections on (or by?) grandmother cells // Perception. 1996. Vol. 25, no. 8. P. 881–886. DOI: 10.1068/p250881.
72. *Quiroga R. Q., Reddy L., Kreiman G., Koch C., Fried I.* Invariant visual representation by single neurons in the human brain // Nature. 2005. Vol. 435, no. 7045. P. 1102–1107. DOI: 10.1038/nature03687.
73. *Xin Y., Zhong L., Zhang Y., Zhou T., Pan J., Xu N.-L.* Sensory-to-category transformation via dynamic reorganization of ensemble structures in mouse auditory cortex // Neuron. 2019. Vol. 103, no. 5. P. 909–921. DOI: 10.1016/j.neuron.2019.06.004.
74. *Franović I., Eydam S., Semenova N., Zakharova A.* Unbalanced clustering and solitary states in coupled excitable systems // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2022. Vol. 32, no. 1. P. 011104. DOI: 10.1063/5.0077022.
75. *Rybalova E., Strelkova G.* Response of solitary states to noise-modulated parameters in nonlocally coupled networks of Lozi maps // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2022. Vol. 32, no. 2. P. 021101. DOI: 10.1063/5.0082431.
76. *Omelchenko I., Omel'chenko O. E., Hövel P., Schöll E.* When nonlocal coupling between oscillators becomes stronger: Patched synchrony or multichimera states // Physical Review Letters. 2013. Vol. 110, no. 22. P. 224101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.224101.
77. *FitzHugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical Journal. 1961. Vol. 1, no. 6. P. 445–466. DOI: 10.1016/s0006-3495(61)86902-6.
78. *Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S.* An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, no. 10. P. 2061–2070. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288235.

References

1. Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance. Journal of Physics A: Mathematical and General. 1981;14(11):L453–L457. DOI: 10.1088/0305-4470/14/11/006.

2. Horsthemke W, Lefever R. Noise-induced transitions in physics, chemistry, and biology. In: Noise-Induced Transitions. Vol. 15 of Springer Series in Synergetics. Berlin, Heidelberg: Springer; 1984. P. 164–200. DOI: 10.1007/3-540-36852-3_7.
3. Neiman A. Synchronizationlike phenomena in coupled stochastic bistable systems. Physical Review E. 1994;49(4):3484–3487. DOI: 10.1103/PhysRevE.49.3484.
4. Arnold L. Random dynamical systems. In: Johnson R, editor. Dynamical Systems. Vol. 1609 of Lecture Notes in Mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer; 1995. P. 1–43. DOI: 10.1007/BFb0095238.
5. Pikovsky AS, Kurths J. Coherence resonance in a noise-driven excitable system. Physical Review Letters. 1997;78(5):775–778. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.775.
6. Anishchenko VS, Neiman AB, Moss F, Shimansky-Geier L. Stochastic resonance: noise-enhanced order. Phys. Usp. 1999;42(1):7–36. DOI: 10.1070/PU1999v042n01ABEH000444.
7. Goldobin DS, Pikovsky A. Synchronization and desynchronization of self-sustained oscillators by common noise. Physical Review E. 2005;71(4):045201. DOI: 10.1103/PhysRevE.71.045201.
8. McDonnell MD, Ward LM. The benefits of noise in neural systems: bridging theory and experiment. Nature Reviews Neuroscience. 2011;12(7):415–425. DOI: 10.1038/nrn3061.
9. Schimansky-Geier L, Herzel H. Positive Lyapunov exponents in the Kramers oscillator. Journal of Statistical Physics. 1993;70(1–2):141–147. DOI: 10.1007/BF01053959.
10. Shulgin B, Neiman A, Anishchenko V. Mean switching frequency locking in stochastic bistable systems driven by a periodic force. Physical Review Letters. 1995;75(23):4157–4160. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.4157.
11. Arnold L, Namachchivaya NS, Schenk-Hoppé KR. Toward an understanding of stochastic Hopf bifurcation: A case study. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1996;6(11):1947–1975. DOI: 10.1142/S0218127496001272.
12. Han SK, Yim TG, Postnov DE, Sosnovtseva OV. Interacting coherence resonance oscillators. Physical Review Letters. 1999;83(9):1771–1774. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1771.
13. Bashkirtseva I, Ryashko L, Schurz H. Analysis of noise-induced transitions for Hopf system with additive and multiplicative random disturbances. Chaos, Solitons & Fractals. 2009;39(1):72–82. DOI: 10.1016/j.chaos.2007.01.128.
14. Gammaitoni L, Marchesoni F, Menichella-Saetta E, Santucci S. Stochastic resonance in bistable systems. Physical Review Letters. 1989;62(4):349–352. DOI: 10.1103/PhysRevLett.62.349.
15. Lindner B, Schimansky-Geier L. Analytical approach to the stochastic FitzHugh-Nagumo system and coherence resonance. Physical Review E. 1999;60(6):7270–7276. DOI: 10.1103/PhysRevE.60.7270.
16. Kuramoto Y, Battogtokh D. Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators. Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2002;5(4):380–385.
17. Abrams DM, Strogatz SH. Chimera states for coupled oscillators. Physical Review Letters. 2004;93(17):174102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.174102.
18. Omelchenko I, Maistrenko Y, Hövel P, Schöll E. Loss of coherence in dynamical networks: Spatial chaos and chimera states. Physical Review Letters. 2011;106(23):234102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.234102.
19. Panaggio MJ, Abrams DM. Chimera states: coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators. Nonlinearity. 2015;28(3):R67. DOI: 10.1088/0951-7715/28/3/R67.
20. Zakharova A. Chimera Patterns in Networks: Interplay between Dynamics, Structure, Noise, and Delay. Cham: Springer; 2020. 233 p. DOI: 10.1007/978-3-030-21714-3.
21. Maistrenko Y, Penkovsky B, Rosenblum M. Solitary state at the edge of synchrony in ensembles with attractive and repulsive interactions. Physical Review E. 2014;89(6):060901. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.060901.

22. Jaros P, Maistrenko Y, Kapitaniak T. Chimera states on the route from coherence to rotating waves. Physical Review E. 2015;91(2):022907. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.022907.
23. Bogomolov SA, Slepnev AV, Strelkova GI, Schöll E, Anishchenko VS. Mechanisms of appearance of amplitude and phase chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic systems. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2017;43:25–36. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.06.024.
24. Panaggio MJ, Abrams DM. Chimera states on a flat torus. Physical Review Letters. 2013;110(9):094102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.094102.
25. Sawicki J, Omelchenko I, Zakharova A, Schöll E. Chimera states in complex networks: interplay of fractal topology and delay. The European Physical Journal Special Topics. 2017;226(9):1883–1892. DOI: 10.1140/epjst/e2017-70036-8.
26. Schöll E. Synchronization patterns and chimera states in complex networks: Interplay of topology and dynamics. The European Physical Journal Special Topics. 2016;225(6–7):891–919. DOI: 10.1140/epjst/e2016-02646-3.
27. Schöll E. Chimeras in physics and biology: Synchronization and desynchronization of rhythms. In: Hacker J, Lengauer T, editors. Zeit in Natur und Kultur: Vorträge anlässlich der Jahresversammlung am 20. und 21. September 2019 in Halle (Saale). Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; 2021. P. 67–95. DOI: 10.26164/leopoldina_10_00275.
28. Semenova N, Zakharova A, Schöll E, Anishchenko V. Does hyperbolicity impede emergence of chimera states in networks of nonlocally coupled chaotic oscillators? Europhysics Letters. 2015;112(4):40002. DOI: 10.1209/0295-5075/112/40002.
29. Shima S, Kuramoto Y. Rotating spiral waves with phase-randomized core in nonlocally coupled oscillators. Physical Review E. 2004;69(3):036213. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.036213.
30. Ulonska S, Omelchenko I, Zakharova A, Schöll E. Chimera states in networks of Van der Pol oscillators with hierarchical connectivities. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2016;26(9):094825. DOI: 10.1063/1.4962913.
31. Zakharova A, Kapeller M, Schöll E. Chimera death: Symmetry breaking in dynamical networks. Physical Review Letters. 2014;112(15):154101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.154101.
32. Menck PJ, Heitzig J, Kurths J, Schellnhuber HJ. How dead ends undermine power grid stability. Nature Communications. 2014;5(1):3969. DOI: 10.1038/ncomms4969.
33. Motter AE, Myers SA, Anghel M, Nishikawa T. Spontaneous synchrony in power-grid networks. Nature Physics. 2013;9(3):191–197. DOI: 10.1038/nphys2535.
34. Wang B, Suzuki H, Aihara K. Enhancing synchronization stability in a multi-area power grid. Scientific Reports. 2016;6(1):26596. DOI: 10.1038/srep26596.
35. Hong S, Chun Y. Efficiency and stability in a model of wireless communication networks. Social Choice and Welfare. 2010;34(3):441–454. DOI: 10.1007/s00355-009-0409-1.
36. González-Avella JC, Cosenza MG, San Miguel M. Localized coherence in two interacting populations of social agents. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2014;399:24–30. DOI: 10.1016/j.physa.2013.12.035.
37. Bansal K, Garcia JO, Tompson SH, Verstynen T, Vettel JM, Muldoon SF. Cognitive chimera states in human brain networks. Science Advances. 2019;5(4):eaau8535. DOI: 10.1126/sciadv.aau8535.
38. Majhi S, Bera BK, Ghosh D, Perc M. Chimera states in neuronal networks: A review. Physics of Life Reviews. 2019;28:100–121. DOI: 10.1016/j.plrev.2018.09.003.
39. Schöll E. Partial synchronization patterns in brain networks. Europhysics Letters. 2022;136(1):18001. DOI: 10.1209/0295-5075/ac3b97.
40. Levy R, Hutchison WD, Lozano AM, Dostrovsky JO. High-frequency synchronization of neuronal activity in the subthalamic nucleus of parkinsonian patients with limb tremor. J. Neurosci. 2000;20(20):7766–7775. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.20-20-07766.2000.

41. Rattenborg NC, Amlaner CJ, Lima SL. Behavioral, neurophysiological and evolutionary perspectives on unihemispheric sleep. Neurosci. Biobehav. Rev. 2000;24(8):817–842. DOI: 10.1016/s0149-7634(00)00039-7.
42. Funahashi S, Bruce CJ, Goldman-Rakic PS. Neuronal activity related to saccadic eye movements in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. J. Neurophysiol. 1991;65(6):1464–1483. DOI: 10.1152/jn.1991.65.6.1464.
43. Swindale NV. A model for the formation of ocular dominance stripes. Proc. R. Soc. Lond. B. 1980;208(1171):243–264. DOI: 10.1098/rspb.1980.0051.
44. Andrzejak RG, Rummel C, Mormann F, Schindler K. All together now: Analogies between chimera state collapses and epileptic seizures. Scientific Reports. 2016;6(1):23000. DOI: 10.1038/srep23000.
45. Malchow A-K, Omelchenko I, Schöll E, Hövel P. Robustness of chimera states in nonlocally coupled networks of nonidentical logistic maps. Physical Review E. 2018;98(1):012217. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.012217.
46. Bukh AV, Slepnev AV, Anishchenko VS, Vadivasova TE. Stability and noise-induced transitions in an ensemble of nonlocally coupled chaotic maps. Regular and Chaotic Dynamics. 2018;23(3):325–338. DOI: 10.1134/S1560354718030073.
47. Rybalova EV, Klyushina DY, Anishchenko VS, Strelkova GI. Impact of noise on the amplitude chimera lifetime in an ensemble of nonlocally coupled chaotic maps. Regular and Chaotic Dynamics. 2019;24(4):432–445. DOI: 10.1134/S1560354719040051.
48. Rybalova E, Schöll E, Strelkova G. Controlling chimera and solitary states by additive noise in networks of chaotic maps. Journal of Difference Equations and Applications. 2022:1–22. DOI: 10.1080/10236198.2022.2118580.
49. Rybalova E, Muni S, Strelkova G. Transition from chimera/solitary states to traveling waves. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2023;33(3):033104. DOI: 10.1063/5.0138207.
50. Nechaev VA, Rybalova EV, Strelkova GI. Influence of parameters inhomogeneity on the existence of chimera states in a ring of nonlocally coupled maps. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6):943–952 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-943-952.
51. Nikishina NN, Rybalova EV, Strelkova GI, Vadivasova TE. Destruction of cluster structures in an ensemble of chaotic maps with noise-modulated nonlocal coupling. Regular and Chaotic Dynamics. 2022;27(2):242–251. DOI: 10.1134/S1560354722020083.
52. Omelchenko I, Provata A, Hizanidis J, Schöll E, Hövel P. Robustness of chimera states for coupled FitzHugh-Nagumo oscillators. Physical Review E. 2015;91(2):022917. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.022917.
53. Semenova N, Zakharova A, Anishchenko V, Schöll E. Coherence-resonance chimeras in a network of excitable elements. Physical Review Letters. 2016;117(1):014102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.014102.
54. Zakharova A, Loos S, Siebert J, Gjurchinovski A, Schöll E. Chimera patterns: influence of time delay and noise. IFAC-PapersOnLine. 2015;48(18):7–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.11.002.
55. Loos SAM, Claussen JC, Schöll E, Zakharova A. Chimera patterns under the impact of noise. Physical Review E. 2016;93(1):012209. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.012209.
56. Wu H, Dhamala M. Dynamics of Kuramoto oscillators with time-delayed positive and negative couplings. Physical Review E. 2018;98(3):032221. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.032221.
57. Jaros P, Brezetsky S, Levchenko R, Dudkowski D, Kapitaniak T, Maistrenko Y. Solitary states for coupled oscillators with inertia. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2018;28(1):011103. DOI: 10.1063/1.5019792.
58. Berner R, Polanska A, Schöll E, Yanchuk S. Solitary states in adaptive nonlocal oscillator networks. The European Physical Journal Special Topics. 2020;229(12–13):2183–2203. DOI: 10.1140/epjst/e2020-900253-0.

59. Semenova NI, Rybalova EV, Strelkova GI, Anishchenko VS. “Coherence–incoherence” transition in ensembles of nonlocally coupled chaotic oscillators with nonhyperbolic and hyperbolic attractors. Regular and Chaotic Dynamics. 2017;22(2):148–162. DOI: 10.1134/S1560354717020046.
60. Semenova N, Vadivasova T, Anishchenko V. Mechanism of solitary state appearance in an ensemble of nonlocally coupled Lozi maps. The European Physical Journal Special Topics. 2018;227(10–11):1173–1183. DOI: 10.1140/epjst/e2018-800035-y.
61. Schülen L, Ghosh S, Kachhvah AD, Zakharova A, Jalan S. Delay engineered solitary states in complex networks. Chaos, Solitons & Fractals. 2019;128:290–296. DOI: 10.1016/j.chaos.2019.07.046.
62. Mikhaylenko M, Ramlow L, Jalan S, Zakharova A. Weak multiplexing in neural networks: Switching between chimera and solitary states. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2019;29(2):023122. DOI: 10.1063/1.5057418.
63. Rybalova E, Anishchenko VS, Strelkova GI, Zakharova A. Solitary states and solitary state chimera in neural networks. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2019;29(7):071106. DOI: 10.1063/1.5113789.
64. Schülen L, Janzen DA, Medeiros ES, Zakharova A. Solitary states in multiplex neural networks: Onset and vulnerability. Chaos, Solitons & Fractals. 2021;145:110670. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110670.
65. Taher H, Olmi S, Schöll E. Enhancing power grid synchronization and stability through time-delayed feedback control. Physical Review E. 2019;100(6):062306. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.062306.
66. Hellmann F, Schultz P, Jaros P, Levchenko R, Kapitaniak T, Kurths J, Maistrenko Y. Network-induced multistability through lossy coupling and exotic solitary states. Nature Communications. 2020;11(1):592. DOI: 10.1038/s41467-020-14417-7.
67. Berner R, Yanchuk S, Schöll E. What adaptive neuronal networks teach us about power grids. Physical Review E. 2021;103(4):042315. DOI: 10.1103/PhysRevE.103.042315.
68. Kapitaniak T, Kuzma P, Wojewoda J, Czolczynski K, Maistrenko Y. Imperfect chimera states for coupled pendula. Scientific Reports. 2014;4(1):6379. DOI: 10.1038/srep06379.
69. Fried I, MacDonald KA, Wilson CL. Single neuron activity in human hippocampus and amygdala during recognition of faces and objects. Neuron. 1997;18(5):753–765. DOI: 10.1016/s0896-6273(00)80315-3.
70. Kreiman G, Koch C, Fried I. Category-specific visual responses of single neurons in the human medial temporal lobe. Nature Neuroscience. 2000;3(9):946–953. DOI: 10.1038/78868.
71. Rose D. Some reflections on (or by?) grandmother cells. Perception. 1996;25(8):881–886. DOI: 10.1068/p250881.
72. Quiroga RQ, Reddy L, Kreiman G, Koch C, Fried I. Invariant visual representation by single neurons in the human brain. Nature. 2005;435(7045):1102–1107. DOI: 10.1038/nature03687.
73. Xin Y, Zhong L, Zhang Y, Zhou T, Pan J, Xu N-L. Sensory-to-category transformation via dynamic reorganization of ensemble structures in mouse auditory cortex. Neuron. 2019;103(5):909–921. DOI: 10.1016/j.neuron.2019.06.004.
74. Franović I, Eydam S, Semenova N, Zakharova A. Unbalanced clustering and solitary states in coupled excitable systems. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2022;32(1):011104. DOI: 10.1063/5.0077022.
75. Rybalova E, Strelkova G. Response of solitary states to noise-modulated parameters in nonlocally coupled networks of Lozi maps. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2022;32(2):021101. DOI: 10.1063/5.0082431.
76. Omelchenko I, Omel’chenko OE, Hövel P, Schöll E. When nonlocal coupling between oscillators becomes stronger: Patched synchrony or multichimera states. Physical Review Letters. 2013;110(22):224101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.224101.

77. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. Biophysical Journal. 1961;1(6):445–466. DOI: 10.1016/s0006-3495(61)86902-6.
78. Nagumo J, Arimoto S, Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon. Proceedings of the IRE. 1962;50(10):2061–2070. DOI: 10.1109/JRPROC.1962.288235.

Рябченко Андрей Дмитриевич — родился в Саратове (2003). Окончил МОУ «Лицей № 47». Студент 3 курса бакалавриата Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Научные интересы: нелинейная динамика, численное моделирование, влияние флуктуаций.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: andreyryabchenko.2003@gmail.com

Рыбалова Елена Владиславовна — окончила физический факультет Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского по направлению «Радиофизика» (2020), поступила в аспирантуру СГУ по направлению «Физика и астрономия». С 2018 года работает на кафедре радиофизики и нелинейной динамики СГУ в должности инженера, а с 2020 — в должности ассистента. Научные интересы: нелинейная динамика и теория колебаний, синхронизация, влияние флуктуаций, ансамбли связанных осцилляторов, химерные и уединенные состояния. Имеет более 25 научных публикаций в центральных реферируемых отечественных и зарубежных журналах по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: rybalovaev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3008-1078
AuthorID (eLibrary.Ru): 1109908

Стрелкова Галина Ивановна — окончила Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского (1993). Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1998) и доктора физико-математических наук (2020). С 1994 года работает на кафедре радиофизики и нелинейной динамики СГУ: ведущим инженером (1994–2008), доцентом кафедры (2008–2021), заведующим кафедрой (с июня 2021 по настоящее время). Область научных интересов: нелинейная динамика, теория колебаний, химерные состояния, синхронизация сложных структур, многослойные сети. В соавторстве опубликовано 3 монографии, 3 учебных пособия и более 100 научных статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных журналах по указанным направлениям.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: strelkovagi@sgu.ru
ORCID: 0000-0002-8667-2742
AuthorID (eLibrary.Ru): 34836