



ГЕНЕРАЦИЯ БЕРСТОВ В АНСАМБЛЯХ СПАЙКОВЫХ НЕЙРОНОВ С НЕЛОКАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

М.В. Иванченко

Исследуется механизм коллективной генерации берстов в ансамблях спайковых нейронов с нелокальными химическими возбуждающими связями. Рассматриваются три типа топологии: (а) цепочки с регулярными ближними нелокальными связями, (б) цепочки с небольшим числом случайных дальних связей на фоне регулярных ближних нелокальных связей, (в) полностью случайные связи со степенным законом распределения степени вершин. Показано наличие единого механизма генерации берстов в результате неустойчивости синхронизации медленных спайков при увеличении силы связи и появления быстрых повторных спайков, изучена зависимость режимов синхронизации и десинхронизации от параметров ансамбля. Обсуждается значение полученных результатов для задач нейродинамики.

Введение

Генерация берстов является одним из основных динамических режимов биологических нейронов. Берсты представляют собой группы спайков (коротких электрических импульсов, так называемых «потенциалов действия»), разделенных периодами покоя (рефрактерности) [1]. Берсты могут различаться частотой появления, числом образующих их спайков, соотношением между длительностью группы спайков и периодом покоя. Проявления берстов в биологических ансамблях разнообразны, и их функциональная роль не всегда до конца понятна. Например, роль Генераторов Центральных Ритмов (эти группы нейронов генерируют берсты, синхронизированные в противофазе) в координации движений хорошо обоснована и изучена [2]. Роль синхронных высокочастотных (более 300 Гц) или низкочастотных (менее 300 Гц) берстов в коре головного мозга бодрствующих или спящих животных [3] менее ясна. Высказываются гипотезы о важности таких колебаний для процессов обучения, мотивации, координации, увеличения надежности синаптической передачи информации [4] и, с другой стороны, о возможном провоцировании эпилепсии и болезни Паркинсона [5].

Генерация берстов может осуществляться в изолированном нейроне как отклик на внешний стимул, а также в результате наличия синаптической связи между несколькими нейронами. В то время как первые два типа механизмов являются хорошо изученными, число экспериментальных и теоретических указаний на существование различных механизмов генерации берстов за счет коллективной динамики ансамблей постоянно увеличивается. Эти механизмы, вероятно, играют значительную

роль в функционировании нейронных систем: они могут обеспечивать надежную генерацию берстов в ансамблях неберстовых нейронов, расширять зону генерации берстовых нейронов, уменьшать чувствительность по отношению к неидентичности нейронов и к различным шумам.

Одним из механизмов генерации берстов с помощью коллективной динамики является так называемая «конкуренция без победителя» [6, 7]. Он заключается в генерации определенной последовательности берстов поочередно во всех нейронах. Необходимым для этого условием является наличие взаимной асимметричной ингибиторной связи между нейронами. Генерация сложных пространственно-временных паттернов в цепочках возбудимых нейроподобных систем наблюдалась в [8].

Ряд исследований указывает на возможность генерации берстов без участия ингибиторной связи и случайных процессов в ансамблях спайковых нейронов с электрической связью [9]. При относительно слабой связи наблюдается синхронизация спайков; если частота спайков в несвязанных нейронах достаточно высока, при увеличении силы связи режим синхронизации спайков становится неустойчивым и сменяется режимом генерации берстов. Берсты генерируются за счет появления **низкочастотной** составляющей в спектре колебаний: высокочастотная последовательность спайков начинает прерываться интервалами покоя, разделяющими ее на отдельные берсты. В то же время, относительно низкочастотные спайки оставались синхронными при увеличении силы связи и берсты не наблюдались.

Явление генерации берстов за счет появления **высокочастотной** составляющей в больших ансамблях нейронов с относительно низкой частотой генерации спайков было обнаружено в [10, 11]. Было показано, что генерация берстов наступает при достаточно большой силе связи; ей предшествует потеря устойчивости режима синхронизации спайков через пространственно-временную перемежаемость. Берсты образуются за счет появления быстрых повторных спайков, вызванных воздействием соседних нейронов. Эти эффекты были подробно исследованы в цепочках нейроноподобных осцилляторов [12] (отображений Рутькова) с электрическим типом связи. Вместе с тем актуальной задачей остается вопрос об универсальности подобного механизма: его присутствие в нейронных ансамблях с более реалистичной топологией связи, химическими синапсами, другими типами нейронных осцилляторов.

Целью данной работы является исследование механизма коллективной генерации берстов в сетях спайковых нейроноподобных осцилляторов при наличии регулярных ближних и случайных дальних нелокальных связей. Моделируемым типом связи в ансамбле будет являться химический возбуждающий. Будет показано, что и в присутствии регулярных ближних нелокальных связей, и при наличии случайных дальних связей реализуется общий механизм генерации берстов через неустойчивость синхронизации медленных спайков при увеличении силы связи. Также будет изучена зависимость основных режимов от топологических характеристик нейронных сетей.

В разделе 1 приводится математическая модель нейрона и химической возбуждающей связи; обсуждается структура фазовой плоскости автономного нейроноподобного осциллятора и механизм генерации быстрого повторного спайка при наличии внешнего стимула. В разделе 2 исследуются динамические режимы и механизм генерации берстов в цепочках с ближними нелокальными связями, а также зависимость от дальности связей и размеров цепочки. В разделе 3 рассматриваются случаи небольшого числа случайных дальних связей на фоне ближних нелокальных связей (small-world) и полностью случайных связей со степенным законом распределения (scale-free). В заключении формулируются основные результаты исследования.

1. Математическая модель

Будем рассматривать ансамбль модельных нейронов, описываемых двумерным нелинейным отображением [12]

$$\begin{cases} x_j^{k+1} = f(x_j^k, x_j^{k-1}, y_j^k) + \sum_i I_{j,i}^k / K_i, \\ y_j^{k+1} = y_j^k + \mu(-x_j^k - 1 + \zeta_j + \sum_i I_{j,i}^k / K_i), \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x, \tilde{x}, y) = \begin{cases} \alpha/(1-x) + y, & \text{if } x \leq 0, \\ \alpha + y, & \text{if } 0 < x < \alpha + y \text{ and} \\ & \tilde{x} \leq 0, \\ -1, & \text{if } x \geq \alpha + y \text{ or } \tilde{x} > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где x_j и y_j – быстрая и медленная переменные, $j = \overline{1, N}$. Параметры $\mu = 10^{-3}$, $\alpha = 3.5$, $\zeta_j \in [0.15, 0.16]$ (равномерное случайное распределение) задают режим хаотических спайков в несвязанных неидентичных отображениях. Здесь K_i – число соседей i -го нейрона. Сумма берется по всем соседям нейрона; связь между нейронами взаимная, симметричная.

Химические синапсы моделировались следующим образом [13]:

$$I_{j,i}^k = \gamma I_{j,i}^{k-1} + \varepsilon(x_{rp} - x_i^k)\chi(x_j^k). \quad (3)$$

Здесь i – индекс пресинаптического (воздействующего) нейрона, j – постсинаптического (испытывающего воздействие) нейрона, ε – сила связи между ними; $\chi(x) = 1$ если $x > 0$, иначе $\chi(x) = 0$; инерционность не учитывается: $\gamma = 0$ (время синапса равно 0), потенциал обращения возбуждающих синапсов $x_{rp} = 1.0$.

Данная модель, как было показано ее автором [12, 13], корректно воспроизводит основные особенности динамики нейронов, в том числе режимы спайков, берстов, покоя. Переменная x имеет смысл потенциала мембраны, переменная y – совокупности медленных процессов активации и деактивации ионных каналов. Основным достоинством модели являются малые затраты машинного времени при численном моделировании.

Для каждого нейрона мы будем вычислять среднюю частоту спайков ω_j и колебаний на медленном временном масштабе (МВМ) Ω_j . Фаза спайков φ_j определяется как кусочно-линейная функция времени, увеличивающаяся на 2π между двумя спайками [14]. Начало каждого периода колебаний на МВМ отсчитывается от спайка, которому предшествовал период покоя длительностью не менее 80 итераций отображения. Соответственно определяется и фаза этих колебаний Φ_j . Заметим, что пока нейроны генерируют спайки на МВМ (то есть с большим межспайковым интервалом, как, например, для $\varepsilon = 0$), оба определения эквивалентны. Если группы быстрых последовательных спайков образуют берсты, то Ω_j будет соответствовать частоте берстов, а ω_j – по-прежнему средней частоте спайков. Такой подход позволит нам разделять колебания на быстром временном масштабе (БВМ) и МВМ. Количественными характеристиками степени синхронизации будут являться дисперсии наблюдаемых частот σ_ω и σ_Ω .

2. Цепочки с ближними нелокальными связями

Многие нейронные группы (особенно в коре головного мозга) имеют преимущественно регулярную структуру с наличием сравнительно небольшого числа «дальних» (и нерегулярных) связей [1]. Поэтому сначала будем рассматривать цепочки нейронов с ближними нелокальными связями. В таких цепочках каждый нейрон связан с M нейронами справа и M слева ($M > 1$).

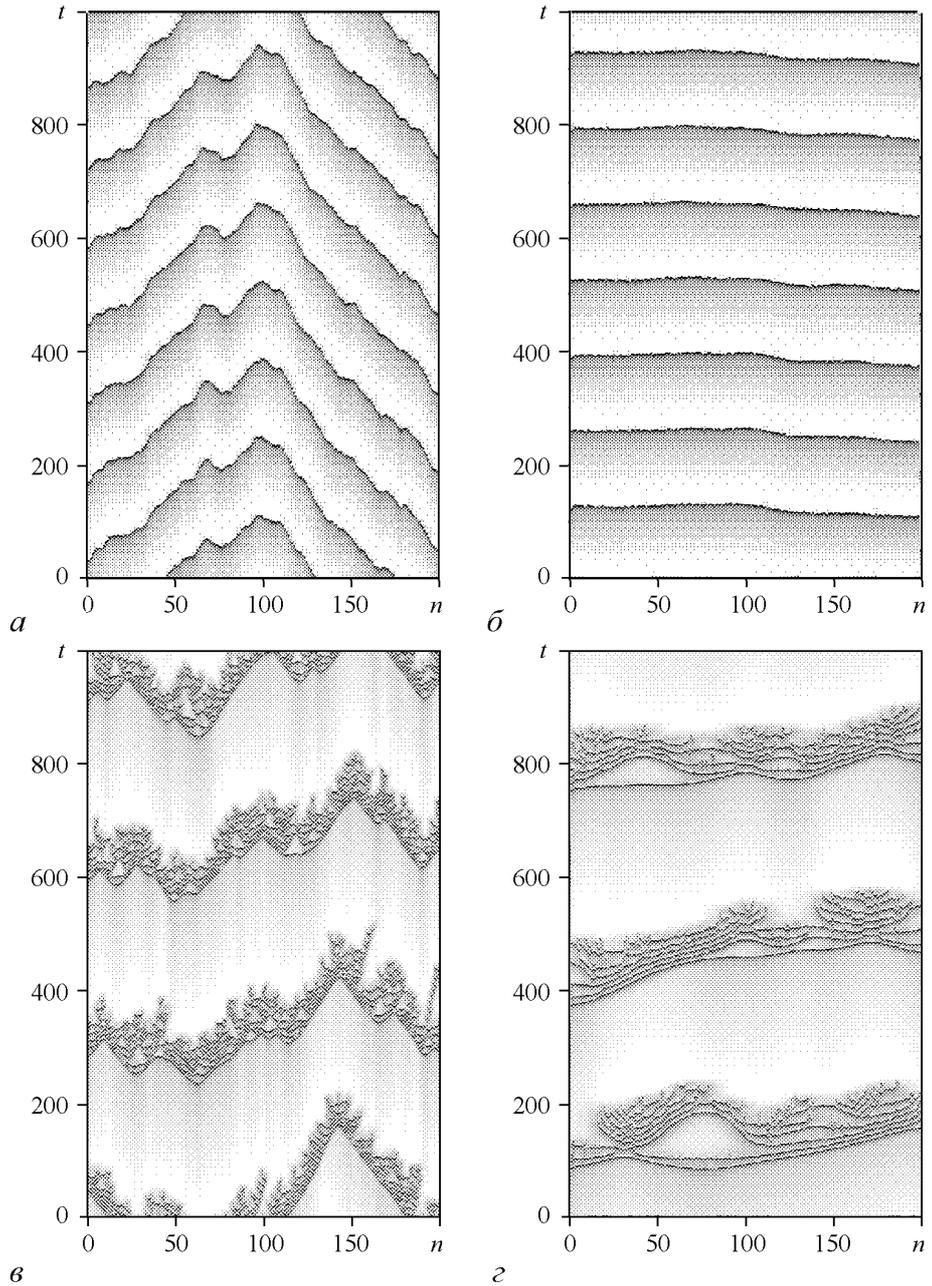


Рис. 1. Пространственно-временные диаграммы: $a - \varepsilon = 0.05, M = 1$, синхронизированные спайки, $\rho \approx 0$; $б - \varepsilon = 0.05, M = 4$, синхронизированные спайки, $\rho \approx 1$; $в - \varepsilon = 0.2, M = 1$, синхронизированные берсты, $\rho \approx 0$; $г - \varepsilon = 0.2, M = 4$, синхронизированные берсты, $\rho \approx 1$

Численные эксперименты показывают, что генерация коллективных берстов происходит как в случае локальных, так и ближних нелокальных связей. Реализуется универсальный сценарий: при сравнительно небольшой связи одиночные спайки синхронизированы (рис. 1, *a, б*); при увеличении связей режим синхронизации теряет устойчивость, что в итоге приводит к генерации регулярных синхронизированных берстов (рис. 1, *в, г*).

Как следует из полученных результатов, для $M > 1$ можно выделить следующие области параметров (рис. 2), аналогичные существующим при $M = 1$ [11]: (i) при $\varepsilon \in [0, \varepsilon_1]$ медленные спайковые колебания не синхронизированы; (ii) при $\varepsilon \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ медленные спайковые колебания синхронизированы; (iii) при $\varepsilon \in [\varepsilon_2, \varepsilon_3]$ возникают быстрые повторные спайки и образуют *нерегулярные несинхронные берсты*; (iv) при сильной связи $\varepsilon > \varepsilon_3$ колебания на МВМ приобретают форму *синхронных квазирегулярных берстов*, при этом колебания на БВМ остаются несинхронными. Для $M = 4$, например, указанные значения равны $\varepsilon_1 \approx 0.015, \varepsilon_2 \approx 0.085, \varepsilon_3 \approx 0.25$.

Принципиально новым свойством синхронных берстовых (а также спайковых) колебаний является их *согласованность*. Легко видеть, что, в то время как фронты синхронных спайков и берстов имеют ломаную, нерегулярную структуру в цепочке с локальными связями (рис. 1, *a, в*), в случае $M = 4$ наблюдаемые фронты практически плоские (рис. 1, *б, г*). Другими словами, фазы колебаний Φ_j на МВМ оказываются согласованными.

Существование различных типов фазовой синхронизации – с несогласованными и согласованными фазами – хорошо известно [14]. Здесь решающей оказывается топология ансамбля: локальные связи не способны упорядочить фазы; классическим

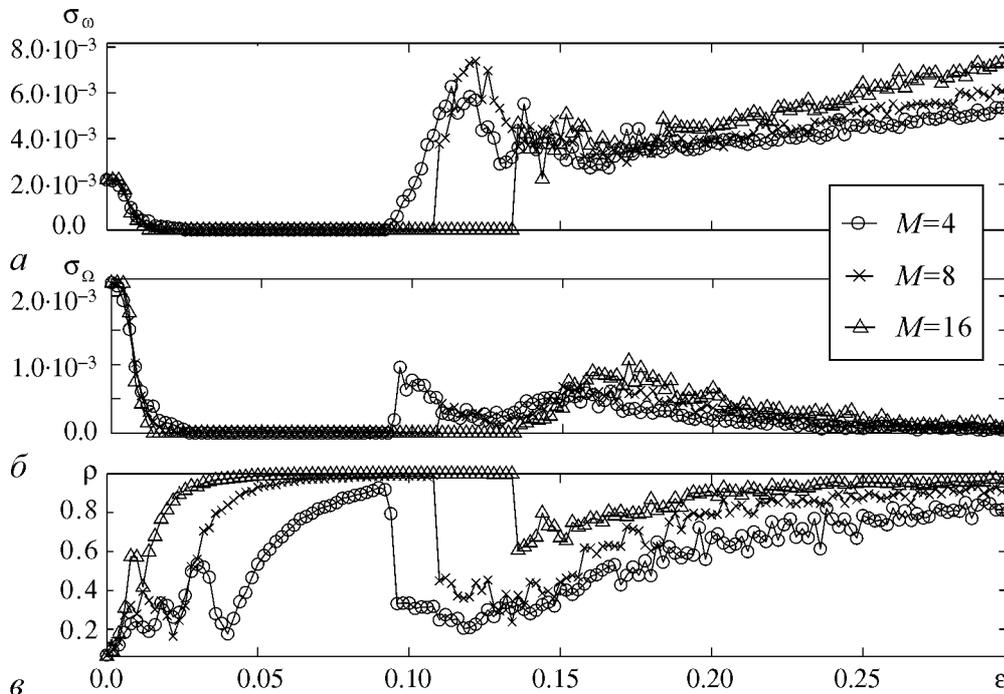


Рис. 2. Характеристики синхронизации в регулярных цепочках с различным радиусом нелокальных связей, $N = 200$

примером синхронизации с упорядоченными фазами является случай глобально связанных осцилляторов [15]. Численной характеристикой степени согласованности фаз является так называемый параметр порядка

$$\rho = \langle |e^{i\Phi}| \rangle = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^N e^{i\Phi_j} \right|, \quad (4)$$

который имеет смысл амплитуды согласованных колебаний в ансамбле. Если фазы колебаний распределены равномерно по единичной окружности, то $\rho = 0$; если все фазы идентичны, то $\rho = 1$. В численных экспериментах параметр порядка всегда отличен от нуля вследствие конечных размеров ансамбля осцилляторов. Если осцилляторы неидентичны, параметр порядка никогда не равен единице, однако может асимптотически приближаться к ней сколь угодно близко. Заметим, что, хотя параметр порядка является функцией мгновенных значений фаз, в подавляющем большинстве случаев после переходного процесса он совершает малые колебания вблизи некоторого хорошо определенного значения. Под этим значением и будем понимать искомое ρ .

Рассмотрим зависимость σ_ω , σ_Ω и ρ от силы связи при различных M, N . Полученные результаты позволяют сформулировать следующие закономерности.

1. При фиксированной длине цепочки и увеличивающейся дальности связи порог неустойчивости синхронизации спайков ε_2 (и, соответственно, генерации берстов) увеличивается (рис. 2, *a*), порог синхронизации берстов ε_3 практически не изменяется (рис. 2, *b*), согласованность синхронных спайков и берстов увеличивается (рис. 2, *в*).

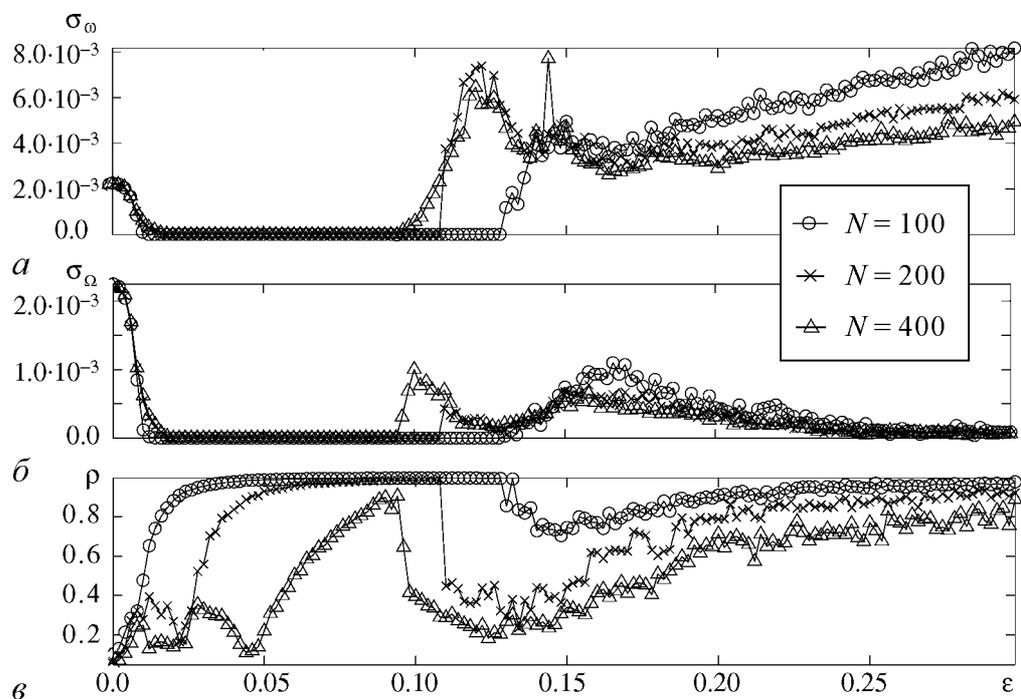


Рис. 3. Характеристики синхронизации в регулярных цепочках различной длины, $M = 8$

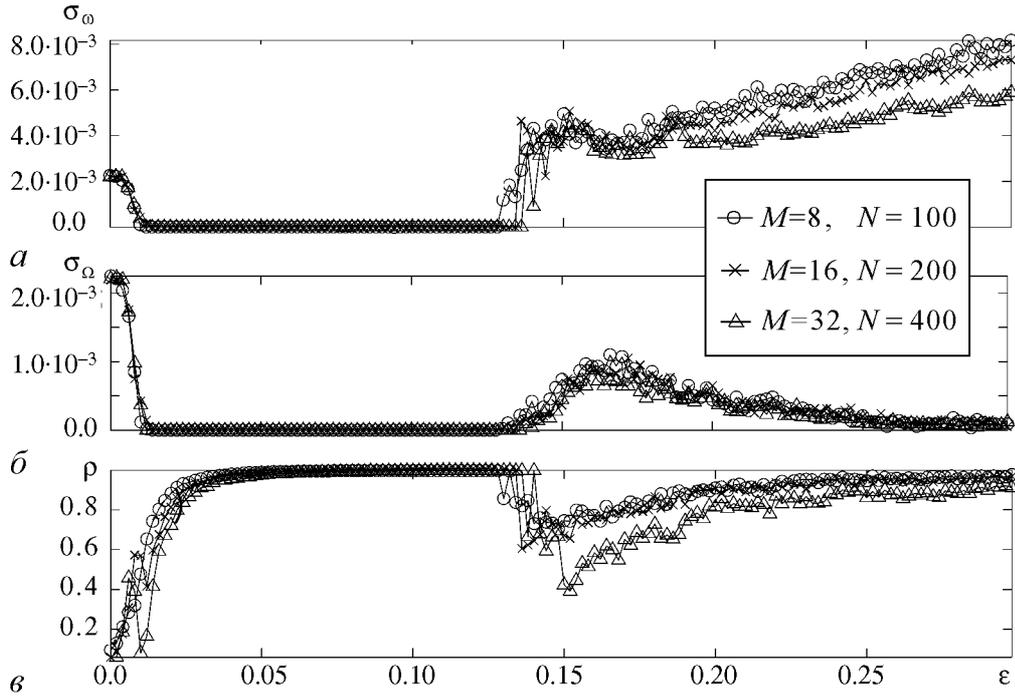


Рис. 4. Характеристики синхронизации в регулярных цепочках с одинаковым соотношением радиуса связи и длины $M : N = 8 : 100$

2. При фиксированной дальности связи и увеличивающейся длине цепочки порог неустойчивости синхронизации спайков ε_2 (и, соответственно, генерации берстов) уменьшается (рис. 3, а), порог синхронизации берстов ε_3 практически не изменяется (рис. 3, б), согласованность синхронных спайков и берстов уменьшается (рис. 3, в). По-видимому, пределом, к которому стремится ε_2 , является его значение при локальной связи.

3. При фиксированном отношении дальности связи к длине цепочки $M : N = 8 : 100$ все характеристики практически не изменяются (рис. 4).

Таким образом, управляющим параметром является отношение дальности связи к длине цепочки M/N . При его уменьшении свойства режимов и границы между ними приближаются к наблюдаемым при локальной связи. Интересно отметить, что даже при относительно небольших M/N (например, 2:100) синхронизированные колебания уже являются согласованными ($\rho \approx 0.9$), как и в случае глобальных связей $M/N = 0.5$.

3. Ансамбли с дальними нерегулярными связями

Следующим свойством нейронных сетей, которое мы будем учитывать, является наличие относительно небольшого числа дальних нерегулярных связей. Структура подобных ансамблей была предложена в [16] и получила название «small-world». Один из возможных путей ее построения является переброска регулярных связей от ближнего соседа к случайно выбранному с заданной вероятностью p . В результате на фоне большого числа ближних связей образуется некоторое число дальних. Харак-

терной особенностью такого графа является то, что при сохранении квазирегулярной структуры ближних связей диаметр графа (то есть максимальное расстояние между двумя узлами) резко уменьшается и становится сравним с диаметром случайного графа с таким же числом связей [17], а также приближается к единичному диаметру графа с глобальными связями.

Результаты численных экспериментов хорошо согласуются с тенденцией, выявленной при увеличении дальности регулярных связей (что также уменьшает диаметр графа). При увеличении доли случайных дальних связей p порог неустойчивости синхронизации спайков ε_2 возрастает (рис. 3., а), появляется согласованность фаз синхронизированных спайков и берстов (рис. 3., в). Небольшое отличие заключается в том, что порог синхронизации берстов ε_3 начинает уменьшаться (рис. 3., б).

В заключение рассмотрим класс случайных графов (то есть тех, в которых наличие связи между узлами и число ребер, принадлежащих узлу, являются случайными величинами), распределение вероятности степени узла (числа ребер, принадлежащих узлу) которого подчиняется степенному закону:

$$P(K) \propto K^{-\gamma} \quad (5)$$

где $\gamma < -1$ (при этих γ среднее число связей $\langle K \rangle$ конечно, $\langle K^2 \rangle$ стремится к бесконечности; при $-1 < \gamma < 0$ среднее число связей $\langle K \rangle$ стремится к бесконечности). Ключевой особенностью таких сетей является относительно высокая вероятность наличия «центральных» узлов в ансамбле, то есть узлов с числом связей много большим $\langle K \rangle$. С другой стороны, большинство узлов имеют число связей заметно меньше среднего. Это свойство является следствием степенного закона спада

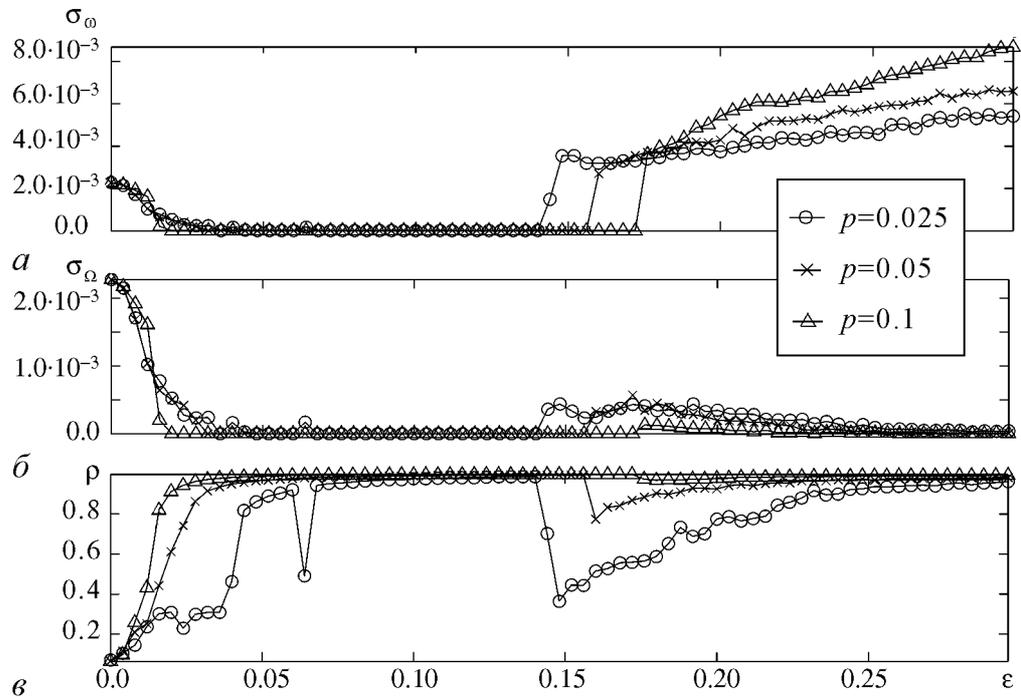


Рис. 5. Характеристики синхронизации в ансамблях со структурой «small-world», $N = 200$

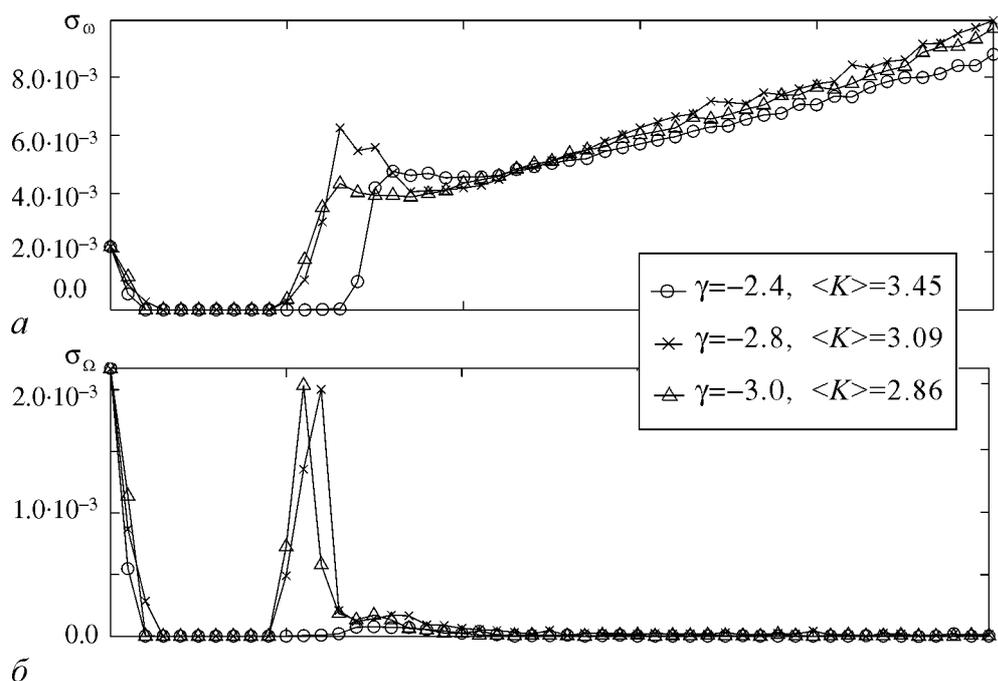


Рис. 6. Характеристики синхронизации в ансамблях со структурой «scale-free», $N = 200$

распределения числа связей, в отличие от экспоненциального, типичного для других классов случайных сетей. Заметим, что недавние эксперименты указывают на наличие степенного закона (6) в структуре функциональных нейронных сетей в головном мозге [18].

Численные эксперименты показывают, что увеличение среднего числа связей $\langle K \rangle$ и уменьшение абсолютной величины показателя $|\gamma|$ (при этом диаметр графа уменьшается) приводят к увеличению порога десинхронизации спайков ε_2 (рис. 3., а) и уменьшению степени несинхронности нерегулярных берстов после того, как режим спайков теряет устойчивость (рис. 3., б). Во всех случаях характерно наличие согласованных фаз колебаний на МВМ ($\rho \approx 1$).

Таким образом, можно констатировать, что при наличии случайных дальних связей сохраняется механизм генерации берстов за счет коллективной динамики. Он имеет следующие особенности, усиливающиеся по мере увеличения доли дальних связей и уменьшения диаметра графа: синхронные берсты (а также и спайки) становятся согласованными, их фронты – практически плоскими; порог неустойчивости синхронизации спайков увеличивается; зона нерегулярных берстов сокращается и степень десинхронизации внутри нее убывает.

Заключение

В развитие полученных ранее результатов о существовании механизма генерации берстов в цепочках спайковых нейроноподобных осцилляторов через неустойчивость режима синхронизации медленных спайков было продемонстрировано на-

личие аналогичного механизма в ансамблях с регулярными и случайными нелокальными связями химического возбуждающего типа, а также исследованы его основные свойства. Для всех исследованных типов сетей была обнаружена единая последовательность режимов синхронизации и десинхронизации при увеличении силы связи: несинхронизированные медленные спайки, синхронизированные медленные спайки, неустойчивость режима синхронизации и генерация быстрых последовательных спайков, составляющих нерегулярные несинхронизированные берсты, регуляризация и синхронизация берстов.

Было обнаружено, что в цепочках с ближними нелокальными связями основным управляющим параметром сети является отношение дальности нелокальных связей к длине цепочки: при его постоянстве границы между различными режимами по параметру силы связи остаются практически неизменными. При фиксированной длине цепочки и увеличивающейся дальности связи порог неустойчивости синхронизации спайков увеличивается, а порог синхронизации берстов практически не изменяется. При фиксированной дальности связи и увеличивающейся длине цепочки порог неустойчивости синхронизации спайков уменьшается, порог синхронизации берстов практически не изменяется.

В ансамблях с дальними нерегулярными связями было выявлено, что по мере увеличения доли дальних связей и уменьшении диаметра графа порог неустойчивости синхронизации спайков увеличивается; зона нерегулярных берстов сокращается и степень десинхронизации внутри нее убывает.

Следует также отметить, что, в отличие от случая цепочки с локальными связями, во всех рассмотренных сетях для различных типов коллективных колебаний – синхронных медленных спайков, нерегулярных несинхронизированных берстов, регулярных берстов – наблюдались согласованность фаз и близкое к единице значение параметра порядка.

Таким образом, полученные результаты указывают на универсальный характер коллективного механизма генерации берстов за счет неустойчивости синхронизации спайков в нейронных ансамблях. Присутствие данного механизма в ансамблях как с регулярными ближними нелокальными связями, так и случайными дальними связями позволяет предположить, что такой сценарий коллективной генерации берстов может наблюдаться и в других регулярных и случайных нейронных ансамблях. Поскольку в данной работе моделировался химический возбуждающий тип связи, а в более ранних исследованиях – электрический, можно ожидать, что аналогичные эффекты будут наблюдаться и в ансамблях с обоими типами связей одновременно и, возможно, при наличии химических ингибиторных связей. Обнаруженная общность исследованного механизма для более биологически реалистичных типов нейронных сетей и распространенных типов связи представляется крайне перспективной с точки зрения нейродинамики.

Автор благодарит Г.В. Осипова, В.Д. Шалфеева и М.И. Рабиновича за плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке Фонда «Династия», РФФИ (05-02-19815-МФ-а, 06-02-16499-а, 06-02-16596-а), НШ 7309-2006.2.

Библиографический список

1. *Николлс Дж., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П.* От нейрона к мозгу. Москва: Едиториал УРСС, 2003.
2. *Marder E. and Calabrese R.L.* Principles of rhythmic motor pattern generation // *Physiol. Rev.* 1996. Vol. 76. P. 687.
3. *Steriade M., McCormick D.A., and Sejnowski T.J.* Thalamocortical oscillations in the sleeping and aroused brain // *Science.* 1993. Vol. 262. P. 679.
4. *Engel A.K., Fries P., and Singer W.* Dynamic predictions: Oscillations and synchrony in top-down processing // *Nat. Rev. Neurosci.* 2001. Vol. 2. P. 704.
5. *Timofeev I. and Steriade M.* Neocortical seizures: Initiation, development and cessation // *Neuroscience.* 2004. Vol. 123. P. 299.
6. *Rabinovich M.I. et al.* Dynamical encoding by networks of competing neuron groups: Winnerless competition // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 87. P. 068102.
7. *Levi R. et al.* The role of sensory network dynamics in generating a motor program // *J. Neurosci.* 2005. Vol. 25. P. 9807.
8. *Kazantsev V.B., Nekorkin V.I., Binczak S. et al.* Spiking patterns emerging from wave instabilities in a one-dimensional neural lattice // *Phys. Rev. E.* 2003. Vol. 68. P. 017201.
9. *Komendantov A.O. and Canavier C.C.* Electrical coupling between model midbrain dopamine neurons: Effects on firing pattern and synchrony // *J. Neurophys.* 2002. Vol. 87. P. 1526
10. *Osipov G.V., Ivanchenko M.V., Kurth J.S., Hu B.* Synchronized chaotic intermittent and spiking behavior in coupled map chains // *Phys. Rev. E.* 2005. Vol. 71. P. 056209.
11. *Ivanchenko M.V., Osipov G.V., Shalfeev V.D., Kurths J.* A network mechanism for burst generation // *Phys. Rev. Lett.*, accepted.
12. *Rulkov N.F.* Modeling of spiking-bursting neural behavior using two-dimensional map // *Phys. Rev. E.* 2002. Vol. 65. P. 041922.
13. *Rulkov N.F., Timofeev I., Bazhenov M.* Oscillations in large-scale cortical networks: Map-based model // *J. Comp. Neuroscience.* 2004. Vol. 17. P. 203.
14. *Пиковский А.С., Розенблюм М.Г., Куртс Ю.* Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
15. *Kuramoto Y.* Chemical Oscillations, Waves and Turbulence. Springer: Berlin, 1984.
16. *Watts D.J., Strogatz S.H.* Collective dynamics of «small-world» networks // *Nature.* 1998. Vol. 393. P. 440.
17. *Strogatz S.H.* Exploring complex networks // *Nature.* 2001. Vol. 410. P. 268
18. *Eguiluz V.M. et al.* Scale-free brain functional networks // *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 94. P. 018102.

Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

Поступила в редакцию 27.02.2007

GENERATION OF BURSTS IN ENSEMBLES OF SPIKING NEURONS WITH NONLOCAL COUPLING

M.V. Ivanchenko

A mechanism of collective generation of bursts in ensembles of spiking neurons with nonlocal excitatory coupling is studied. Three types of the network topology is considered: (a) chains with regular short-range nonlocal coupling, (b) chains with a small number of random long-range connections and dominating regular short-range ones, (c) random ensembles with a power law of node degree distribution. It is shown, that there exists a common mechanism of burst generation resulting from instability of synchronous slow spiking as the coupling strengthens, giving rise to fast repetitive spikes. Dependence upon parameters of the network is analyzed. The relevance of the obtained results to neuroscience is discussed.



Иванченко Михаил Васильевич – родился в 1981 году. Окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (2004). В настоящее время является аспирантом кафедры теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета ННГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика, синхронизация, нейродинамика, локализация энергии в нелинейных решеточных системах. Имеет около 30 печатных работ по данной тематике. Был удостоен медали Российской академии наук в конкурсе 2004 года на лучшие научные работы по направлению «Общая физика и астрономия».
E-mail: ivanchenko@rf.unn.ru