

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Федерального государственного
бюджетного научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)



д.ф.-м.н. Глявин М.Ю.

[Handwritten signature]

«10.02.2007» 09.09.2021 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертационную работу Буха Андрея Владимировича «Автоволновые структуры, включая химерные, в одномерных и двумерных системах связанных осцилляторов. Синхронизация и управление», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. - Радиофизика

Диссертационная работа Буха Андрея Владимировича посвящена детальному изложению результатов исследований процессов формирования и эволюции автоволновых пространственно-временных структур и химерных структур, возникающих на их основе, в одномерных и двумерных ансамблях связанных осцилляторов с периодической и хаотической динамикой, а также выявлению и описанию динамических свойств и статистических характеристик указанных динамических режимов. На протяжении нескольких десятилетий исследование автоволновых процессов (автоволн) представляет собой фундаментально-научную проблему в области теории колебаний и волн, интерес и востребованность которой обусловлена ее важностью и значимостью не только с теоретической, но с прикладной точек зрения. Поставленные и решенные в диссертационной работе основные цели и задачи непосредственно относятся к новому научному направлению, посвященному теоретическим, численным и экспериментальным исследованиям процессов, происходящих в больших ансамблях взаимодействующих колебательных подсистем. Данное научное направление возникло сравнительно недавно и в настоящее время привлекает пристальное внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей, работающих в различных областях современного естествознания. Несмотря на достаточно большое количество научных публикаций по анализу химерных структур, далеко не в полном объеме, а по ряду задач и полностью, не изучены механизмы образования и свойства химерных волновых структур в ансамблях связанных осцилляторов. В диссертации А.В. Буха детально исследуется одна из таких проблем: рождение химерных структур на основе спиральных и концентрических волн в одномерных и двумерных ансамблях (решетках) связанных

осцилляторов с дискретным и непрерывным временем. В диссертационной работе проводится численный анализ пространственно-временной динамики ансамблей нелинейных осцилляторов с периодической и хаотической динамикой индивидуальных элементов, описываются новые типы химерных структур, такие как амплитудные химеры на основе стоячих и бегущих волн, спирально-волновая и концентрическая волновая химеры. Анализируются механизмы их образования, статистические и динамические характеристики, проводится детальный сравнительный анализ динамики осцилляторов когерентных и некогерентных кластеров указанных химерных волновых состояний. Исследуются эффекты вынужденной, взаимной и удаленной синхронизации открытых автором новых типов химерных структур, устанавливаются и анализируются особенности механизмов синхронизации. В качестве индивидуальных осцилляторов в рассматриваемых ансамблях выбираются хорошо известные и классические радиофизические системы, такие как осциллятор Ван-дер-Поля, генератор хаотических автоколебаний с инерционной нелинейностью Анищенко-Астахова, системы с дискретным временем и модели нейронов. Кроме того, в диссертации развиты и усовершенствованы численные методы анализа и графического представления результатов исследования химерных структур. Совокупность полученных результатов представляет большой практический интерес для нейродинамики и медицины (при моделировании передачи импульсов между нейронами в головном мозге и динамики сердечной мышцы), в исследовании процессов передачи информации в инфокоммуникационных системах и системах радиосвязи и ряде других областей современной нелинейной физики. Таким образом, тема диссертационной работы и решаемые автором научные задачи, безусловно, являются актуальными и практически значимыми и удовлетворяют специальности 1.3.4. - Радиофизика.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 225 наименований. Структура работы хорошо продумана, полученные результаты логично и последовательно изложены, отлично и детально проиллюстрированы. Диссертация написана четким научным языком.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель работы и основные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации полученных результатов и о публикациях основных результатов работы.

В **первой главе** диссертации приведены результаты детального численного анализа пространственно-временной динамики одномерного замкнутого в кольцо ансамбля идентичных моделей генератора хаоса Анищенко-Астахова. Показана возможность реализации режимов амплитудных и фазовых химерных состояний, возникновение которых обусловлено негиперболичностью хаотического аттрактора парциального элемента. Проведено сравнение поведения осцилляторов некогерентного кластера в обоих случаях на проекциях фазовых портретов хаотических аттракторов. В работе обнаружены режимы стоячих и бегущих волн и впервые описаны механизмы формирования химер на основе волновых структур. Амплитудные химеры на основе бегущих волн найдены впервые. Некогерентный кластер новой химерной структуры локализован в пространстве ансамбля и

не перемещается вдоль кольца, несмотря на вращение когерентной бегущей волны вдоль него. Бегущая волна, не разрушаясь, проходит через кластер некогерентности.

В данной главе также исследуется влияние трех различных типов топологии связей между элементами (отражающей, нелокальной и комбинации нелокальной с диагональной связью) и типа парциального элемента на динамику одномерных ансамблей. Установлено, что для всех рассмотренных ансамблей тип межэлементной связи оказывает существенное влияние на характер перехода от когерентности к некогерентности. В одних случаях (ансамбль логистических отображений с отражающей связью) число некогерентных кластеров увеличивается при уменьшении силы связи, что соответствует так называемой мультикластерной химере, в других случаях (ансамбль осцилляторов ФитцХью-Нагумо) в зависимости от типа связи наблюдаются либо только стоячие, либо бегущие волны.

В первой главе также приводятся результаты анализа влияния внешнего шумового воздействия на фазовые и амплитудные химерные состояния в ансамблях логистических отображений и модифицированных отображений Рикера с нелокальной связью. Показано, что амплитудные и фазовые структуры в исследуемых системах устойчивы к шуму достаточно большой интенсивности и представляют собой стационарные режимы с точки зрения численного эксперимента. Значительное увеличение интенсивности аддитивного шума может индуцировать переходы между фазовыми и амплитудными химерами, а также приводить к возникновению новых некогерентных кластеров.

В последнем разделе первой главы анализируются особенности эффектов вынужденной и взаимной синхронизации химерных структур в системе двух связанных колец логистических отображений для случаев диссипативного и инерционного типов межслойной связи. Установлено, что диссипативный характер межслойной связи способствует реализации полной синхронизации структур для идентичных ансамблей и эффективной синхронизации (с заданной точностью) для случая неидентичных ансамблей, в то время как при инерционном типе связи между кольцами достичь синхронизации в данном случае практически не удается.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию динамики двумерных ансамблей (решеток) автоколебательных систем и изучению свойств двумерных автоволновых структур и химерных структур, формирующихся на их основе. Проведен детальный анализ динамики решетки связанных генераторов Ван-дер-Поля при локальном и нелокальном характере взаимодействия между элементами и при изменении значений управляющих параметров индивидуальных элементов и параметров связи. Показано, что существуют конечные области значений управляющих параметров, в которых в решетке возникают спиральные и концентрические волновые структуры. Установлено, что увеличение параметра возбуждения приводит к уменьшению длины волны наблюдаемых волновых структур, а увеличение силы локальной связи вызывает увеличение длины волны. Проиллюстрировано явление мультистабильности, когда в зависимости от начальных условий при фиксированных значениях управляющих параметров в ансамбле локально связанных генераторов Ван-дер-Поля могут наблюдаться как спиральные, так и концентрические волны. Показано, что нелокальный характер связи между элементами приводит к возникновению спирально-волновых химерных структур, которые характеризуются сосуществованием в пространстве системы когерентной области (волны) и ядра некогерентности, формирующегося в центре вращения волны. Колебания осцилляторов

из когерентной области являются периодическими, тогда как осцилляторы в некогерентном ядре демонстрируют хаотическую динамику. В работе впервые обнаружена и исследована новая химерная структура — концентрическая волновая химера. Осцилляторы из когерентной области и некогерентного ядра демонстрируют квазипериодическую динамику, однако форма колебаний осцилляторов из некогерентной области заметно отличается от колебаний остальных элементов. На основе детального анализа установлено, что концентрическая волновая химера по своим свойствам подобна химере уединенных состояний. Осцилляторы в некогерентном ядре находятся в режиме уединенного состояния. Исследована роль уединенных состояний в формировании некогерентного ядра концентрической волновой химеры и описан переход от химерной волновой структуры к химере уединенных состояний.

Для анализа поведения осцилляторов из различных областей спирально-волновых и концентрических волновых химер в работе использовалась интересная характеристика — индекс локальной чувствительности. С помощью нее автору удалось установить важные особенности динамического поведения различных элементов ансамблей. В частности, показано, что осцилляторы в некогерентном ядре спирально-волновой химеры проявляют наибольшую чувствительность к внешним воздействиям по сравнению с остальными элементами решетки. Кроме того, индекс локальной чувствительности элементов ансамбля позволяет выявить механизм возникновения спирально-волновых химер, ядро некогерентности которых возникает в центре спиральной волны после увеличения степени неустойчивости соответствующих осцилляторов к линейному возмущению. Отметим, что в работе показана и обоснована общность механизмов возникновения и обнаруженных свойств химерных волновых структур для двумерных ансамблей, состоящих из осцилляторов различного типа, в частности, моделей нейронов ФитцХью-Нагумо, Курбажа-Некоркина и Рутькова.

В третьей главе диссертации представлены результаты численного моделирования пространственно-временной динамики двухслойной и трехслойной сетей двумерных ансамблей связанных нелинейных осцилляторов. Исследуются эффекты вынужденной и взаимной синхронизации волновых структур и соответствующих химерных состояний в случае однонаправленной и симметричной межслойной связи различного типа для системы двух связанных решеток генераторов Ван-дер-Поля. Установлено, что в случае связи по второй переменной во втором уравнении осцилляторов явление межслойной вынужденной синхронизации наблюдается только при достаточно больших значениях силы связи. В случае связи по первой переменной во втором уравнении элементов решеток практически во всех случаях синхронизация наблюдается при некоторых небольших значениях силы связи, но при её дальнейшем увеличении в некотором диапазоне синхронизация нарушается. Результаты детального исследования динамики двух симметрично связанных решеток генераторов Ван-дер-Поля показали, что концентрические химерные состояния с разной длиной волны полностью или частично синхронизируются друг с другом даже при достаточно большой расстройке по параметру нелокальности взаимодействующих решеток. Впервые установлено, что взаимная синхронизация концентрических химерных состояний происходит через синхронизацию её некогерентных осцилляторов.

В третьей главе также приведены результаты численного исследования эффекта вынужденной синхронизации спиральных волн и спирально-волновых химер в мультиплексной сети двух связанных решеток отображений Курбажа-Некоркина. Впервые

установлено, что даже при достаточно сильной межслойной связи наблюдается только частичная синхронизация спирально-волновых структур. Несинхронными всегда остаются центры или некогерентные ядра спирально-волновых структур, при этом ведущими в процессе синхронизации являются осцилляторы когерентных кластеров волновой структуры.

По нашему мнению, очень интересной является задача об эффекте удаленной синхронизации волновых структур в неоднородной трехслойной сети связанных решеток генераторов Ван-дер-Поля и осцилляторов ФитцХью-Нагумо, которая детально и последовательно решается в диссертационной работе. Автор использует в качестве количественной оценки степени синхронности структур коэффициент взаимной корреляции между соответствующими осцилляторами пар взаимодействующих ансамблей. Данная мера позволила обнаружить принципиально новый эффект, впервые установленный в работе, - противофазную удаленную синхронизацию концентрических волновых структур. При этом колебания осцилляторов удаленных ансамблей синхронизируются в противофазе, оставаясь асинхронными с колебаниями осцилляторов промежуточного слоя.

Основные результаты работы и выводы четко сформулированы в **заключении**. Наиболее важными и интересными результатами диссертационной работы на наш взгляд являются следующие:

- приведены результаты детального исследования динамики одномерного кольца нелокально связанных моделей генератора с инерционной нелинейностью Анищенко-Астахова. Впервые обнаружено амплитудное химерное состояние на основе бегущей волны. Выявлены особенности динамики осцилляторов в режимах фазовых и амплитудных химерных состояний, описаны их динамические свойства;
- представлены результаты анализа пространственно-временной динамики двумерного ансамбля (решетки) генераторов Ван-дер-Поля с локальной и нелокальной связью. Обнаружены режимы спиральных и концентрических волн, исследовано влияние управляющих параметров индивидуальных осцилляторов и параметров связи на длины волн структур. Показано, что введение нелокальности связи приводит к образованию спирально-волновых и концентрических волновых химерных структур (последний тип химеры обнаружен впервые в работе), проанализированы свойства этих структур и установлены их принципиальные отличия;
- впервые установлены и исследованы эффекты вынужденной и взаимной синхронизации спиральных и концентрических волн, включая химерные состояния на их основе, в двухслойных сетях связанных двумерных ансамблей нелинейных осцилляторов. Впервые показано, что в случае спиральных волн и спирально-волновых химер имеет место частичная синхронизация, тогда как для режимов концентрических волн и соответствующих химерных состояний характерна полная синхронизация;
- впервые обнаружено и изучено явление противофазной удаленной синхронизации волновых структур в неоднородной трехслойной сети связанных решеток генераторов Ван-дер-Поля и осцилляторов ФитцХью-Нагумо. Показано, что колебания осцилляторов первого и третьего ансамблей синхронизируются в противофазе, оставаясь асинхронными с колебаниями осцилляторов среднего (второго) слоя.

Основные научные результаты являются новыми, оригинальными, что подтверждается публикацией их в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Было бы интересным провести сравнение поведения осцилляторов амплитудной химеры, возникающей на основе бегущей волны в одномерном ансамбле моделей генератора с инерционной нелинейностью Анищенко-Астахова, и осцилляторов из некогерентного кластера спирально-волновой химерной структуры, реализующейся в двумерных ансамблях нелинейных систем. Есть ли какие-либо сходства и различия, и, если есть, в чем они состоят?
2. Является ли амплитудная химера на основе бегущей волны стационарной и долгоживущей структурой и не наблюдались ли переключения в режим фазового химерного состояния? На каком времени наблюдения оценивалась устойчивость амплитудной химеры?
3. В диссертации приведена оценка индекса локальной чувствительности для осцилляторов, принадлежащих области некогерентности спирально-волновых режимов. Однако, этого не проведено для случая концентрической волновой химеры, некогерентные осцилляторы которой, как установлено автором, находятся в режиме уединенных состояний. Проведение соответствующих расчетов и сравнения полученных результатов представляется вполне логичным и последовательным.

В то же время, сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы А.В. Буха, которая выполнена на высоком квалифицированном уровне.

Заключение

В целом диссертационная работа Буха Андрея Владимировича представляет собой законченное исследование, выполненное на актуальную для современной радиофизики и теории колебаний и волн тему, и содержит решение ряда новых радиофизических задач анализа автоволновых структур, включая химерные, в ансамблях взаимодействующих нелинейных осцилляторов. Полученные результаты дополняют и расширяют имеющиеся представления о динамике сложных взаимосвязанных ансамблей, о возможностях реализации новых пространственно-временных волновых химерных структур при различной динамике и типе индивидуальных элементов ансамблей и об особенностях эффектов синхронизации автоволновых структур при различных типах межслойной связи. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4. — Радиофизика (пп. 1, 4 паспорта специальности). Автореферат с достаточной полнотой соответствует основным положениям диссертационной работы.

По результатам диссертационной работы опубликовано 23 статьи в центральных рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные системы научного цитирования Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук: Письма в журнал технической физики, Chaos, Solitons and Fractals, Nonlinear Dynamics, Physics Letters A, Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Regular and Chaotic Dynamics, Известия Сарат. ун-та. Новая серия. Серия Физика

и др. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ на разработанные методы и программные комплексы для исследований динамики сложных систем и ансамблей.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждались на многочисленных международных конференциях и семинарах. Результаты работы получены в рамках выполнения 2 грантов РФФИ, 2 грантов РНФ, Минобрнауки РФ (в рамках Гос. Задания) и Международного гранта SFB 910 при поддержке Немецкого Физического Общества.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проведении научных исследований в академических НИИ (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ИПФ РАН и др.) и при преподавании теории колебаний и нелинейной динамики на факультете фундаментальной медицины и медицинских технологий СГУ имени Н.Г. Чернышевского, в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики, Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А., и других вузах.

Можно заключить, что диссертационная работа Буха Андрея Владимировича по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости полученных результатов полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Бух Андрей Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — Радиофизика.

Отзыв составлен и утвержден на заседании семинара Отдела Нелинейной Динамики (протокол № 2 от 28.09.2021 года).

Председатель семинара



Некоркин Владимир Исаакович
д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом
нелинейной динамики ИПФ РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний
Новгород, ул. Ульянова, 46,
тел. 8 (831) 436-72-91,
e-mail: nekorkin@appl.sci-nnov.ru

Научный секретарь семинара



Клиньшов Владимир Викторович,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИПФ
РАН,
почтовый адрес: 603950, г. Нижний
Новгород, ул. Ульянова, 46,
тел. 8 (831) 416-49-05,
e-mail: vladimir.klinshov@gmail.com