

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»




Остроумов И.Г.


2018 года

О Т З Ы В

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

на диссертацию Шепелева Игоря Александровича
«БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ И СЛОЖНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ
СТРУКТУРЫ В АКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ С
ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика.

Актуальность темы диссертации

Сложные нелинейные пространственно-распределенные системы, к которым относятся ансамбли взаимодействующих нелинейных элементов с пространственно-организованными связями, непрерывные среды и их дискретные аналоги являются одним из наиболее изучаемых объектов в нелинейной динамике. Данное направление исследования является актуальным в силу важности проблемы с фундаментально-теоретической точки зрения, а также в связи с большим количеством практических задач, связанных с исследованием реальных распределенных систем различной природы, от радиофизики и оптики до биологии и экологии. В активных средах и ансамблях, состоящих из активных элементов наблюдаются автоволновые процессы, а также для них типичны такие явления, как мультистабильность, пространственно-временной хаос, образование различных пространственных структур и кластеров. Все эти явления широко изучались и изучаются многими исследователями. Однако многообразие моделей нелинейных распределенных систем и наблюдающихся в них явлений велико. Со временем от-

крываются новые эффекты, новые типы пространственных структур и устанавливаются новые закономерности. Процессы, протекающие в распределенной системе принципиальным образом зависят от характера динамики элементов. Важнейшую роль также играет структура и характер взаимодействия элементов системы. Существенными являются граничные условия, а в случае мультистабильности, также начальные условия. Таким образом, имеется множество факторов, определяющих характер динамики распределенной системы. По этой причине исследование распределенных систем и ансамблей из большого числа активных элементов далеко от своего завершения. С течением времени круг вопросов и нерешенных проблем только увеличивается.

Диссертация И.А. Шепелева находится в русле отмеченного актуального направления. Автор сосредотачивает внимание на сложной динамике и образовании структур в активных распределенных системах с периодическими граничными условиями, особенно на системах, составленных из бистабильных элементов. Хотя ансамбли бистабильных осцилляторов и раньше интенсивно изучались в научной литературе, однако автору удастся установить и исследовать ряд новых эффектов, характерных для моделей бистабильных диффузионных сред, а также для пространственно-организованных ансамблей бистабильных осцилляторов с нелокальным характером связей. Интересным и важным с научной точки зрения является режим бегущих волн, установленный для модели среды с бистабильной динамикой элементов. В качестве таких элементов используются осцилляторы ФитцХью-Нагумо в бистабильном режиме. Периодичность граничных условий в этом случае, как и в случае возбудимых осцилляторов, приводит к возникновению бегущих волн. Установлена связь эволюции волнового режима с изменением динамики элементов и показан автоколебательный характер поведения системы в целом, подтверждаемый эффектом синхронизации волн, распространяющихся в бистабильной среде, внешним гармоническим воздействием.

Большое внимание в работе уделяется такой популярной в настоящее время тематике, как химерные состояния в ансамблях различных нелинейных элементов. Химерные состояния характеризуются сосуществованием кластеров с синхронным поведением и десинхронным. Наблюдаются такие явления в ансамблях элементов с регулярной, а также хаотической динамикой, а также в экспериментах на системах различной природы. Широкая распространенность химерных состояний для ансамблей нелинейных элементов различной природы обуславливает интерес со стороны исследователей. В большинстве случаев химерные состояния наблюдаются в ансамблях с нелокальным характером взаимодействия, однако в диссертационной работе обнаружена и исследована подобная структура и при локальной связи элементов. Если такая связь является однонаправленной и нелинейной, то, при оп-

ределенных условиях, она может приводит к возникновению химерных состояний.

Возникновение химерных состояний в научной литературе часто связывали с эффектами мультистабильности, однако речь шла о так называемой динамической мультистабильности, возникающей в результате взаимодействия элементов, которые сами не обладают мультистабильной динамикой. Роль собственной мультистабильности (в простейшем случае бистабильности) элементов ансамбля в образовании химер ранее в литературе не рассматривалась. В диссертационной работе исследован целый ряд моделей ансамблей, состоящих из бистабильных элементов - дискретных отображений, автогенераторов, осцилляторов ФитцХью-Нагумо в бистабильном режиме. Показано, что для всех типов ансамблей из бистабильных элементов, как с регулярной, так и с хаотической динамикой характерно образование химерных структур особого типа, названных автором двухъямными химерами. В работе выявлены общие свойства таких химер и особенности, связанные с особенностями динамики элементов. В этой связи можно отметить двухъямные химерные состояния в ансамбле бистабильных осцилляторов ФицХью-Нагумо. Интересными свойствами также обладают двухъямные химеры в ансамбле осцилляторов Лоренца.

Кроме одномерных ансамблей бистабильных элементов в работе рассматривается двумерный ансамбль нелокально-связанных кубических отображений. В этой модели также установлены двухъямные и иные химерные структуры, показана их эволюция с ростом параметра связи. При большом радиусе связи, кроме химерных состояний, обнаружены также структуры, известные как уединенные состояния. Оценивается вероятность формирования химер и уединенных состояний при случайном выборе начальных условий. Показано, что при переходе к глобальной связи химерные состояния исчезают, в то время как доля уединенных состояний существенно возрастает.

Важным вопросом, исследованным в работе, является влияние периодического сигнала на ансамбль нелокально-связанных элементов в химерном состоянии или в режиме, близком к формированию химеры. В работе показывается, что с помощью локализованного гармонического воздействия на выбранный кластер элементов ансамбля можно достаточно эффективно управлять формированием той или иной пространственной структуры. При этом, воздействуя на кластеры некогерентности ансамбля в режиме химеры можно устранить этот кластер и добиться когерентного поведения элементов. С другой стороны, при достаточно сильной амплитуде воздействия можно искусственно создать кластер с некогерентным поведением там, где его раньше не было. Последний эффект получил в работе название индуцированной химеры. Установленная возможность управления сложными химерными структурами может быть использована в дальнейшем при решении практических задач.

На основе вышесказанного можно констатировать актуальность и своевременность данной работы и ее соответствие специальности 01.04.03.

**Новизна исследований и полученных результатов,
степень обоснованности используемых подходов и выводов.**

Результаты, приведенные в диссертации, имеют приоритетный характер. Наиболее существенными из них являются следующие:

1. Произведено сравнение бифуркационной диаграммы отдельного осциллятора ФитцХью-Нагумо с картой режимов модели активной среды с диффузионным взаимодействием с элементарной ячейкой в виде осциллятора ФитцХью-Нагумо. Обнаружена область существования бегущих волн в режимах возбудимой и бистабильной динамики элементов среды.

2. Исследованы свойства вынужденной синхронизации бегущих волн в кольце бистабильных осцилляторов. Сопоставлены особенности вынужденной синхронизации бегущих волн в трех различных динамических режимах парциальных осцилляторов при распределенном гармоническом внешнем воздействии.

3. Обнаружено существование химерных состояний в цепочке диссипативных линейных осцилляторов с локальным однонаправленным нелинейным взаимодействием. Химеры в такой системе имеют вид волнового процесса, соответствующего вращению с постоянной скоростью вдоль кольца кластеров с регулярным и хаотическим распределением состояний элементов.

4. Впервые обнаружен и описан особый тип химерных состояний, названный двухъямными химерами. Данный тип химер характерен для широкого класса ансамблей нелокально-связанных бистабильных осцилляторов, как с регулярной, так и с хаотической динамикой. Нелокальная связь элементов с двумя устойчивыми сосуществующими состояниями равновесия приводит к формированию устойчивых химерных состояний, особенностью которых является то, что кластер некогерентности характеризуется нерегулярным распределением мгновенных состояний осцилляторов между окрестностями двух аттракторов, сосуществующих в парциальном элементе ансамбля.

5. В ансамбле связанных осцилляторов Лоренца, параметры которых выбраны в соответствии режиму квазигиперболичности, обнаружены химерные состояния аналогичные двухъямным химерам в ансамбле бистабильных кубических отображений. Показано, что их появление связано со сдвигом эффективных значений параметров осцилляторов ансамбля и последующим переходом к бистабильности. Переход к режиму полной пространственной некогерентности происходит через различными режимами перемежаемости между пространственно-когерентным поведением и режимом полной неко-

герентности, либо режимом с образованием метастабильных химероподобных состояний.

6. Исследован переход от одномерного ансамбля к двумерной решетке нелокально-связанных бистабильных кубических. Переход от режима полной хаотической синхронизации к полной десинхронизации сопровождается образованием различных химер: как двухъямного типа, так и известных ранее амплитудных и фазовых химер. Показано, что общие закономерности перехода, связанные с кластерной синхронизацией и образованием химерных структур в двумерной решетке сохраняются.

7. Был обнаружен режим «solitary states» в двумерной решетке кубических отображений, причем реализуется он только при глобальном и близком к глобальному характере связи элементов.

8. Исследовано влияние внешней гармонической на ансамбль нелокально-связанных осцилляторов Рёсслера. Воздействие на некогерентный кластер фазовой химеры приводит к разрушению химеры, после чего устанавливается режим с кусочно-гладким пространственным профилем. При воздействии на некогерентный кластер амплитудной химеры наблюдается пространственная перестройка – кластер некогерентности возникает в новой области пространства, а в области воздействия элементы начинают вести себя синхронно. В режиме частичной когерентности локализованное воздействие периодическим сигналом на кластер осцилляторов может индуцировать химероподобные структуры с кластером некогерентности в пределах области воздействия. Характеристиками этих состояний легко управлять, меняя параметры внешней гармонической силы.

Рассмотренные автором модели соответствуют кругу исследуемых физических явлений, методы и алгоритмы подтверждаются проверкой точности и сходимости вычислений. Полученные автором теоретические и численные результаты являются последовательным развитием результатов других авторов и находятся в хорошем согласии с ними.

Достоверность результатов работы и обоснованность выводов не вызывает сомнений.

Замечания по работе

Имеются отдельные замечания по содержанию и структуре работы, которые, однако, не затрагивают существа защищаемых положений и выводов диссертации. К таким замечаниям можно отнести следующие:

1. При исследовании бегущих волн в модели активной среды на основе диффузионно-связанных осцилляторов ФитцХью-Нагумо применялся только метод численного моделирования. В то же время для анализа условий возникновения бегущих волн можно было бы использовать аналитические методы.

2. Нет четкого объяснения, с чем связано существование режима бегущих волн в кольце бистабильных осцилляторов ФитцХью-Нагумо с диффузионной связью, в то время как в кольце бистабильных осцилляторов Дуффинга такое поведение не наблюдается.

3. Не сформулированы общие условия, при которых в ансамбле с локальным взаимодействием может возникать химерное состояние. Является ли локальное взаимодействие обязательно однонаправленным и обязательно нелинейным или достаточно одного из этих условий?

4. В разделе, посвященном ансамблю осцилляторов Лоренца, говорится о существовании метастабильных химерных структур. Возникает вопрос, чем такие химеры отличаются от ранее известной пространственно-временной перемежаемости.

5. В последней главе описаны эффекты, вызванные внешним воздействием на группу осцилляторов ансамбля. При этом возможно, как уничтожение части химерной структуры, так и формирование нового химерного кластера. Хотелось бы более детально ознакомиться с механизмами, приводящими к данным эффектам. Какую роль при этом играет синхронизация элементов ансамбля внешним воздействием?

Общая оценка работы

В целом диссертация Шепелева Игоря Александровича представляет собой законченное исследование, внесшее существенный вклад в развитие теории теории динамики сложных систем. Результаты проведенных исследований расширяют представления о динамике сложных пространственно-распределенных систем, возможностях реализации новых динамических режимов и пространственных структур, таких как химерные состояния, при различной динамике активных элементов систем и различном типе их. Решение поставленных в диссертации задач имеет важное значение для развития методов моделирования пространственно-распределенных систем связанных активных элементов различной физической природы, с регулярными и хаотическими аттракторами.

Результаты работы по теме диссертации представлены в 20 научных публикациях, 11 из которых опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, таких, как «Nonlinear Dynamics», «Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation», «Physics Letters A», «Solitons, Fractals and Chaos», «Нелинейная Динамика», «Письма в Журнал Технической Физики», и 9 - в сборниках трудов конференций.

Результаты работы доложены и дискутировались на международных научных конференциях, они использовались при выполнении двух грантов РФФИ и одного гранта РНФ.

Публикации по теме диссертации с полностью отражают основные результаты диссертационной работы. Автореферат с достаточной полнотой соответствует основным положениям диссертационной работы.

Результаты диссертации 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, нелинейной динамики на физическом факультете, факультете нелинейных процессов, факультете нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета, в Нижегородском государственном университете, Московском государственном университете, Саратовском государственном техническом университете, и других вузах.

Можно заключить, что диссертационная работа И.А. Шепелева по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости результатов полностью удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шепелев Игорь Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 -Радиофизика.

Отзыв составили:

Профессор кафедры «Приборостроение»,
СГТУ имени Гагарина Ю.А., д. ф.-м. н.

Купцов П.В.

Доцент кафедры «Радиоэлектроника
и телекоммуникации»,
СГТУ имени Гагарина Ю.А.
к.ф.-м.н.

Балакин М. И.

Отзыв заслушан и одобрен на расширенном заседании кафедры «Приборостроение» СГТУ имени Гагарина Ю.А. протокол № 36 от 26 июня 2018 года.

Почтовый адрес: 410054, г.Саратов, ул.Политехническая, 77
Телефон: 8452-99-88-14
Электронный адрес: p.kuptsov@sstu.ru