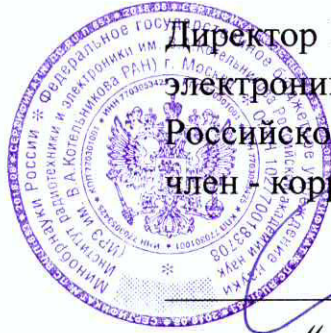


«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Института радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук,
член - корр. РАН

/Никитов С.А.

« 4 » 10 2019 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Гаврилова Андрея Сергеевича «Методы эмпирической реконструкции пространственно распределенных динамических систем и их приложение к изучению климатических процессов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «радиофизика»

Задачи реконструкции динамических систем по наблюдаемым данным относятся к классу обратных задач и имеют большое фундаментальное и практическое значение, т.к. повсеместно возникают при решении задач анализа, прогноза и управления применительно к сложным системам различной природы (из области радиофизики, геофизики, биологии, медицины и т.д.). Ввиду конечной длительности анализируемых сигналов существующие многочисленные подходы к их решению, основанные на идеях реконструкции фазовой траектории и последующей аппроксимации оператора эволюции с помощью универсальных нелинейных функций, позволяют адекватно восстанавливать, как правило, лишь модели сравнительно небольшой размерности. При этом в последнее время особенно актуальной стала реконструкция распределенных в пространстве систем, измеренных с высоким пространственным разрешением. Ввиду очень большой размерности наблюдаемых сигналов, при разработке новых и применении существующих методов реконструкции оператора эволюции к таким системам на первый план выходит задача выбора правильных фазовых переменных, осуществляющих описание пространственно распределенной системы в фазовом пространстве достаточно низкой размерности. К настоящему времени появился ряд методов, в той или иной степени решающих задачу в некоторых конкретных случаях, но при этом имеющих существенные огра-

ничения. В работе А.С. Гаврилова в рамках общего байесова подхода к решению обратных задач предлагаются и основательно прорабатываются новые методы как реконструкции оператора эволюции, так и поиска низкоразмерных фазовых переменных, ориентированные на анализ пространственно распределенных данных, которые затем применяются к исследованию климатической системы Земли, что приводит к ряду интересных и практически важных результатов. Таким образом, рассматриваемые в диссертационной работе задачи актуальны, имеют большое научное и практическое значение и соответствуют специальности 01.04.03 – «радиофизика».

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В первой главе детально излагается и демонстрируется на модельном примере байесов подход к построению стохастических модельных уравнений по временному ряду на основе аппроксимации стохастического оператора эволюции с помощью искусственных нейронных сетей, выбору (путем максимизации байесовой обоснованности) оптимальных структурных параметров строящейся модели (количества задержанных переменных, числа нейронов и др.). Затем предлагается модификация созданной модели, более подходящая для моделирования пространственно распределенных систем, рассматриваемых в работе: данная модель строится в пространстве, полученном другими методами поиска низкоразмерных фазовых переменных, и дополнительно учитывает общие свойства таких переменных, такие как их ненулевое время автокорреляции (гладкость), наличие относительно медленных компонент, которые аппроксимируются в виде слабой линейной зависимости параметров оператора эволюции от времени. Работоспособность подхода демонстрируется на примере распределенных данных, сгенерированных глобальной климатической моделью института вычислительной математики РАН (ИВМ РАН).

Во второй главе рассматривается отдельно задача поиска новых переменных для низкоразмерного описания пространственно распределенной системы на основе наблюдаемых данных. В частности, предлагается метод нелинейных динамических мод (НДМ), представляющий собой обратную задачу по поиску одномерных нелинейных многообразий в многомерном пространстве, которая решается с помощью изложенного в первой главе байесова подхода. Существенными свойствами мето-

да, отличающимися его от других существующих методов в данной области, является возможность одновременного учета нелинейного устройства исследуемой системы и доминирующих в ее динамике временных масштабов, что позволяет физически адекватно регуляризовать обратную задачу. Работоспособность метода демонстрируется на двух модельных примерах, затем он применяется к анализу распределенных спутниковых данных о температуре поверхности океана с 1981 по 2014 год, в результате которого находится три НДМ, описывающие в трехмерном фазовом пространстве эволюцию климатической системы с периодом 1 год (первая НДМ), климатическое явление Эль-Ниньо Южное Колебание (вторая НДМ) и значительную часть динамики системы на масштабе около десяти лет (третья НДМ); кроме того, в результате анализа второй НДМ подтверждается наличие важного климатического сдвига в конце 20 века, ассоциирующегося с изменением фазы Тихоокеанского десятилетнего колебания и последовавшим за ним замедлением потепления атмосферы. В конце второй главы метод НДМ применяется к данным модели ИВМ РАН, сгенерированным ей в «доиндустриальном» режиме конца XIX века. В этом случае найдено пять НДМ, из которых нелинейной является только первая, описывающая годовую динамику, а остальные НДМ описывают Эль-Ниньо Южное Колебание и Тихоокеанское десятилетнее колебание и являются линейными.

В третьей главе разрабатывается модификация созданного во второй главе метода НДМ. Цель модификации - снятие ограничения, связанного с требованием одномерности находимых НДМ и соответствующей итерационностью численного алгоритма, и перехода к поиску «многомерных НДМ». Этот шаг приводит к более адекватному решению задачи нахождения новых переменных, но при этом повышает ее вычислительную ресурсоемкость. Эффективность модификации демонстрируется на модельном примере, а также на спутниковых данных, использованных во второй главе. В конце третьей главы двумерные НДМ применяются к анализу данных с 1870 по 2014 год, главным результатом которого являются нахождение и подтверждение обсуждаемых климатологами четырех климатических переходов, ассоциирующихся со сменой фазы Тихоокеанского десятилетнего колебания, и обнаружение смены линейного характера климатических дальних связей на нелинейный во второй половине XX века. Существенно, что данный вывод согла-

суется с результатами второй главы, полученными с использованием одномерных НДМ и на основе других данных.

Наконец, в четвертой главе разработанные методы выбора переменных и реконструкции оператора эволюции применяются к практически значимой задаче прогноза индексов явления Эль-Ниньо Южное Колебание на основе имеющихся данных наблюдений. Для этого используется модель, предложенная в первой главе, в пространстве переменных, полученных с помощью линейных динамических мод – частного случая многомерных НДМ (глава 3). Показывается, что такие переменные оказываются более эффективными в данной задаче, чем переменные, полученные широко используемым традиционным методом главных компонент. Демонстрируется, что эффективность построенной модели не уступает ведущим мировым моделям явления Эль-Ниньо. Подтверждением значимости данного результата является включение разработанной в диссертации А.С.Гаврилова модели в ансамбль ведущих мировых моделей Эль-Ниньо, прогноз на основе которых ежемесячно публикуется на сайте Колумбийского университета.

К наиболее важным результатам работы можно отнести следующее.

1) В работе детально проработан и применен к существенно различным случаям реконструкции единый метод решения обратных задач на основе байесова формализма, включая как задачу отыскания неизвестных коэффициентов и неизвестных переменных, так и задачу выбора оптимальной структуры строящейся модели, будь то модель оператора эволюции (глава 1) или модель, описывающая нелинейное преобразование пространственно распределенной системы (главы 2,3).

2) Во второй и третьей главах развит существенно новый метод поиска низкоразмерных переменных для описания пространственно распределенных систем, имеющий в перспективе большое количество применений в различных областях науки. Уже в данной работе его эффективность продемонстрирована на большом количестве примеров различной степени сложности.

3) Имеются значительные результаты применения метода нелинейных динамических мод к реальным данным о климатической системе Земли. Сразу несколько распределенных в пространстве явлений глобального масштаба (годовая динамика системы, Эль-Ниньо Южное Колебание, Тихоокеанское десятилетнее колебание)

оказались описаны небольшим (2, 3) количеством переменных. Сделаны важные выводы об устройстве климатической системы и ее эволюции в течение XX века.

4) Имеется доведенное до «конечного продукта» применение созданных методов к конкретной практической задаче – прогнозу динамики индексов Эль-Ниньо, подтвержденное научным сообществом в виде включения разработанной модели в ансамбль ведущих моделей Эль-Ниньо.

В качестве замечаний отметим следующее.

1) В разделе 3.4.1 диссертации указывается, что результат поиска нелинейных мод на одном и том же интервале времени один и тот же, вне зависимости от источника данных (сравниваются спутниковые данные с 1981 по 2014 год и данные реанализа с 1870 по 2014 год), что подчеркивает грубость метода по отношению к «шуму измерений» в данных. Представляется полезным пояснение, насколько результат поиска нелинейных мод устойчив по отношению к слабому изменению границ анализируемого временного интервала: в тексте работы такого пояснения явно не приводится.

2) В главе 3 диссертации развит метод поиска многомерных нелинейных мод, однако при применении его к данным рассматривается лишь частный случай двумерных нелинейных мод, и в данном месте текста отсутствует четкое пояснение, с чем это связано.

3) Применение разработанных в диссертации методов к данным реальных изменений ограничивается анализом лишь одной распределенной климатической величины – температуры поверхности океана. В то же время, представляется целесообразным анализ других характеристик, которые могут содержать информацию о климатической системе на интересующих масштабах. Возможно, такой анализ представляет собой одно из будущих направлений работы автора в данной области.

Указанные замечания не затрагивают основных выводов и результатов работы и не снижают общую высокую ее оценку.

Результаты обладают высокой степенью научной новизны: на основе общего байесова подхода к решению обратных задач предложены как новый метод построения оптимальной модели оператора эволюции системы, пригодный для моделирования пространственно распределенных систем, так и существенно новый метод поиска низкоразмерных переменных для описания пространственно распреде-

ленных данных. С помощью разработанных методов получены новые сведения о сложной реальной (климатической) системе, создана и используется эмпирическая модель для ежемесячного прогноза динамики одного из важнейших климатических явлений – явления Эль-Ниньо. Данные результаты значимы для теории колебаний и радиофизики и практически ценны, т.к. предложенные методы могут иметь большой спектр потенциальных приложений в различных областях науки. Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях, проводящих исследования в области радиофизики, теории колебаний, нелинейной динамики и приложений этих методов для описания реальных сложных систем любой природы, а также в университетах при преподавании курсов радиофизики и теории колебаний: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский государственный университет, ИФА им. А.М. Обухова РАН, МФТИ, МГУ, ННГУ и другие.

Достоверность результатов обоснована теоретическими выкладками и различными тестами на модельных примерах в контролируемых численных экспериментах. Даны четкие интерпретации и объяснения полученных результатов. Высокий уровень и востребованность работы научным сообществом подтверждается активными обсуждениями работ автора на многочисленных российских и международных конференциях и публикациями в ведущих международных журналах (шесть статей в журналах из списка ВАК). Диссертация хорошо оформлена и проиллюстрирована, автореферат правильно отражает ее содержание.

На основании сказанного заключаем, что диссертация А.С. Гаврилова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющая всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – “радиофизика”.

Отзыв составлен Главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, профессором А.С. Дмитриевым.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7.

Телефон: +7 (495) 629 3574, e-mail: ire@cplire.ru.

Проект отзыва одобрен после обсуждения на семинаре Отдела статистической радио-физики (протокол № 1/09/19 от 30 сентября 2019 года).

Главный научный сотрудник,
д.ф.-м.н., профессор,
дважды лауреат Премии СМ СССР



А.С. Дмитриев

Ученый секретарь
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.



И.И. Чусов

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации

д.ф.-м.н.



А.С. Дмитриев