

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Грицуна Андрея Сергеевича

на диссертационную работу 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 – радиопизика.

Диссертационная работа Гаврилова Андрея Сергеевича посвящена анализу поведения сложных пространственно распределенных хаотических систем на основе эмпирического подхода. Основной объект анализа - данные о поведении климатической системы Земли, полученные с помощью наблюдений и численного моделирования. В работе решаются задачи выявления скрытых нелинейных взаимодействий в системе, аппроксимации крупномасштабной динамики системы с помощью малоразмерных нелинейных эмпирических моделей и прогноза ее эволюции. При этом широко используются идеология Такенса об аппроксимации исходной динамики с помощью наблюдаемой переменной, взятой с различными запаздываниями, и методы оптимизации нелинейных ценовых функционалов для определения параметров эмпирических моделей и их обоснованности.

Основной целью работы является создание новых методов эмпирической реконструкции и прогноза поведения многомерных многомасштабных хаотических систем, способных одновременно адекватно выделить информацию о нелинейных связях в системе и учесть характерные временные масштабы процессов, ответственных за эти взаимодействия. Другой целью является получение новых знаний о динамике Земной климатической системы с помощью разработанных методов.

Актуальность исследования диктуется необходимостью математически обоснованного анализа достаточно коротких рядов данных наблюдений, способного выявлять сложные нелинейные взаимодействия в климатической системе. Также следует отметить необходимость развития методов верификации климатических моделей по отношению к данным наблюдений с точки зрения их предсказуемости, внутренней структуры аттракторов и т.п. Повышение достоверности прогноза состояния

климатической системы на сезонных и более длинных временных интервалах также является весьма актуальной задачей.

Диссертационная работа изложена на 148 страницах, включая 44 рисунка и 3 таблицы, состоит из введения, четырех глав и заключения. Основной список литературы содержит 138 ссылок, список публикаций автора – 71 источник.

Во введении приведен достаточно полный обзор состояния исследований по проблематике диссертации, сформулированы цели работы, кратко изложено содержание глав, сформулирован вклад автора в представленные результаты, приведены данные об их апробации.

В первой главе формулируется метод эмпирической реконструкции разрешающего оператора исследуемой системы по временному ряду некоторой наблюдаемой величины. При построении используется подход из теоремы Такенса о реконструкции динамики (использование наблюдений, взятых с запаздываниями), реконструкция осуществляется с помощью искусственных нейронных сетей, параметры которых определяются с помощью байесова подхода. Разработанный метод тестируется на классической системе Лоренца и применяется для анализа данных климатической модели INMCM4 ИВМ РАН. В случае модели используется дополнительная редукция фазового пространства – проектирование в базис ведущих мод изменчивости модели (т.н. ЕОФ), а также предложены модификации алгоритма, учитывающие нестационарность ряда данных и его автокорреляционные свойства. Показана эффективность алгоритма при описании и краткосрочном прогнозе поведения наблюдаемой системы.

Вторая глава посвящена описанию нового метода выделения нелинейных динамических мод системы по рядам данных. Нелинейные моды являются обобщением ЕОФ, будучи нелинейными и не ортогональными и учитывающими временные масштабы определяющих их процессов. Задача сводится к поиску набора нелинейных отображений одного аргумента из малоразмерного пространства скрытых переменных с заданной автокорреляционной функцией, наилучшим образом (в вероятностном смысле) аппроксимирующих ряд наблюдаемой величины. Параметры отображений снова определяются с помощью байесова подхода минимизацией нелинейных ценовых функционалов. Подход тестируется на модельном примере, где показывается его эффективность. Далее метод используется для реконструкции эволюции температуры поверхности океана (ТПО) по данным наблюдений (1981-2014гг) и модели климата INMCM4 (250лет, фиксированные внешние воздействия). В первом случае получены три нелинейные моды, описывающие годовой ход, явление Эль-Ниньо, ТДК (Тихоокеанское декадное колебание) и АМК (Атлантическое мультидекадное колебание). В модели

выделяются пять мод, описывающих те же процессы, из них 4 оказываются линейными. В реконструкции реальной системы в 1997-98гг. детектируется «климатический сдвиг» - резкое изменение фазы ТДК. Продемонстрировано преимущество использования нелинейных мод по сравнению с ЕОФ.

Третья глава посвящена обобщению метода поиска нелинейных мод второй главы на многомерный случай. Необходимость такого подхода актуальна в том случае, если искомые нелинейные многообразия не есть суперпозиция одномерных, а имеют существенно многомерную структуру. Метод реализован и протестирован для модельной задачи и применен для анализа ТПО по данным наблюдений (1981-2014гг, тот же ряд, что и во второй главе) и данным реконструкции ТПО за 1870-2014. Было показано, что метод дает лучшую реконструкцию фазового пространства, чем методика второй главы. Показано, что для двух рассмотренных архивов данных, результаты реконструкции нелинейных мод для интервала 1981-2014гг. практически идентичны, что свидетельствует о численной устойчивости алгоритма к возмущениям данных. В данных реконструкции ТПО за 1870-2014 дополнительно выделены 3 климатических перехода, аналогичных случаю 1997-98гг, выявлены изменения характера нелинейности связей между реконструированными модами.

Четвертая глава посвящена использованию разработанных методик для прогноза индекса Эль-Ниньо на временных масштабах 1 – 15 месяцев. С этой целью разработаны две методики – методика, аналогичная используемой в первой главе (редукция в пространство ведущих ЕОФ + эмпирическая прогностическая модель на ИНС) и комбинация многомерной декомпозиции (вместо проецирования на ЕОФ) из главы три и эмпирической прогностической модели на ИНС главы 1. Анализ результатов прогнозов показал, что прогностические способности разработанной модели соответствуют мировому уровню и включены в оперативный ансамбль по прогнозу явления. При этом, использование предложенной многомерной декомпозиции значительно улучшает результаты прогнозов.

В заключении сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая ценность.

Диссертационная работа хорошо написана, текст свидетельствует о высокой эрудиции автора и подтверждает его высокую научную квалификацию, знание научной проблематики по теме исследования и смежным областям знания, способность формулировать задачи и получать значимые научные результаты.

Достоверность подтверждается проведенным тестированием методов на модельных задачах, использованием различных данных наблюдений и моделирования,

показавших согласованные результаты. Отмечу, также, высокий уровень научных журналов, в которых опубликованы результаты работы.

Новизна результатов не вызывает сомнений – автором разработаны и реализованы новых три вычислительных технологии анализа и прогноза многомерных нелинейных хаотических систем с использованием эмпирического подхода, создана прогностическая модель для явления Эль-Ниньо мирового уровня, получены новые данные о характере взаимодействий долгопериодных колебаний в климатической системе.

При всех достоинствах работы следует отметить некоторые недочеты и задать вопросы, на которые хотелось бы получить комментарии автора (сразу отмечу, что сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы).

Вопросы к автору.

1. На Рис.1.9А показано влияние явного учета автоковариаций при построении прогностической модели. А что дает явный учет годового хода? Медленного воздействия? Как выглядит медленное воздействие в зависимости от года интегрирования, есть ли связь с реальным форсингом?
2. Рис.1.10. Делается вывод, что отсутствие зависимости стохастической части от состояния системы обусловлено коротким рядом данных. Может быть, климатическая система (или модель INMCM4) так и устроена? Мелкомасштабный форсинг слабо зависят от состояния крупномасштабной динамики?
3. Почему анализ главы 2.4 для модели INMCM4 сделан для доиндустриального эксперимента, а не для 1981-2014, как и в 2.3? Можно было бы провести идентификацию модели по отношению к данным, сравнить дальние связи и т.д.
4. Стр. 96, 100-101. Как физически можно интерпретировать изменение сложности динамики и характера связей (переход от линейных связей к нелинейным) между регионами? Может ли это быть следствием неучета в явном виде антропогенного форсинга при построении НДМ?
5. Стр.109. Из текста непонятно для, каких дат делается прогноз, с каких начальных дат стартует модель, сколько всего сделано прогнозов для СКО на Рис 4.2.
6. Стр.104. Хорошо бы пояснить, что такое «возникают проблемы с ресурсоемкостью». Какой компьютер используется, сколько ядер, сколько реального времени занимает расчет НДМ и построение модели прогноза Эль-Ниньо? Вообще, в работе почти ничего не сказано про численную реализацию алгоритмов.
7. Естественным базисом для аппроксимации хаотических динамических систем традиционно считаются неустойчивые периодические траектории. Проводились ли

попытки использовать другие базисы для построения НДМ (помимо полиномов Эрмита).

Недочеты по тексту работы.

1. Стр.12. В списке литературы 138 наименований, а не 127.
2. В главе 1.2 происходит путаница с обозначением нижнего индекса. На стр.20 он обозначает момент времени у векторных величин, номер компоненты вектора, номер вектора-выхода в определении ИНС
3. Фраза на стр.17 «...модель неизбежно строится лишь в некотором подпространстве (проекции) размерности D_u , элементы которого конструируются из наблюдаемых данных X » вызывает путаницу. Создается впечатление, что размерность редуцированного пространства (D_u) меньше, чем D (размерность пространства данных), поскольку никаких других пространств до этого не определено.
4. При общем хорошем стиле изложения слова «эквидистантный» и «паттерн» смотрятся нехорошо (стр.17,36,72,75 и т.д.).
5. Стр.39. Почему у модели INMCM4 нет ЕОФ годового хода? Анализируются данные с отфильтрованным годовым ходом, как далее в главе 1.4.4?
6. Стр.90 «по последнему фрагменту рассматриваемого временного ряда». О каком фрагменте идет речь?
7. Стр.93. вместо «грубость» лучше «устойчивость». Вообще, этот результат стоило бы выделить как важный.

Содержание диссертации соответствует п.4 (полностью) и (частично) п.5 паспорта специальности 01.04.03 – радиофизика. Автореферат работы Гаврилова А.С. соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и дает возможность сделать заключение о ее высоком научном уровне. Диссертационная работа в целом выполнена на очень высоком уровне и представляет собой законченный научный труд. Основные положения диссертации опубликованы в научных изданиях. Список публикаций по теме диссертации содержит 71 источник, включая 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК (и относящихся к первому квартилю SJR) и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Гаврилова Андрея Сергеевича «Методы эмпирической реконструкции пространственно распределенных динамических систем и их приложение к изучению климатических процессов» соответствует требованиям п.9 «Положения о

порядке присуждения ученых степеней» утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. №842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Официальный оппонент,
Ведущий научный сотрудник ИВМ РАН
Доктор физико-математических наук



Грицун А.С.

Адрес места работы: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д.8, Институт вычислительной математики РАН им. Г.И.Марчука
e-mail: asgrit@mail.ru
Тел: +7 (916) 116-9993

Я, Грицун Андрей Сергеевич, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Подпись Грицуна А.С. заверяю
Ученый секретарь ИВМ РАН



Шут'яев В.П.

01 октября 2019 г.



Приложение – Список публикаций

1. Грицун А.С. 2019. Потенциальная предсказуемость и прогноз состояния поля аномалий полной электронной концентрации по данным наблюдений, Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т.59. №1. 98-109.
2. Perezhogin, P.A., Glazunov, A.V., Gritsun, A.S. 2019, Stochastic and deterministic kinetic energy backscatter parameterizations for simulation of the two-dimensional turbulence, *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 34, Issue 4, 197–213
3. A. Gritsun, 2018, Low frequency variability and sensitivity of the Atlantic meridional overturning circulation in selected IPCC climate models, *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 33, Issue 6, 341–350
4. E. Volodin, E. Mortikov, S. Kostykin, V. Galin, V. Lykossov, A. Gritsun, N. Diansky, A. Gusev, N. Iakovlev, A. Shestakova, S. Emelina, 2018, Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model, *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 33, Issue 6, 367–374
5. Iakovlev, N.G., Volodin, E.M., Sidorenko, D.V., Gritsun A.S., 2018, Role of Penetrative Convection under the Ice in the Formation of the State of the World Ocean, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 54, N6, 594-607
6. A. Gritsun, 2018, Potential Predictability of Multidecadal Oscillations of Sea Surface Temperature in the Arctic and Their Sensitivity to External Forcings, *Russ. Meteorology and Hydrology*, 43, N11, 763-772
7. E. Volodin, A. Gritsun, 2018, Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5, *Earth Syst. Dynam.*, 9, 1235-1242,
8. E. Volodin, A. Gritsun, 2018, Nature of the Decrease in Global Warming at the Beginning of the 21st Century, *Doklady Earth Sciences*, 482, Issue 1, 1221–1224
9. M. Pieroth, S.I. Dolaptchiev, M. Zacharuk, T. Heppelmann, A. Gritsun, U. Achatz, 2018, Climate-Dependence in Empirical Parameters of Subgrid-Scale Parameterizations using the Fluctuation-Dissipation Theorem, *J. Atmos. Sci.*, 75, 3843–3860, doi:10.1175/JAS-D-18-0022.1
10. A. Gritsun, V. Lucarini, 2017, Fluctuations, response, and resonances in a simple atmospheric model, *Physica D*, 349, 62-76
11. E. Volodin, E. Mortikov, S. Kostykin, V. Galin, A. Gritsun, N. Diansky, A. Gusev, N. Iakovlev, 2017, Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5, *Climate dynamics*, 49, Issue 11–12, 3715–3734
12. E.M. Volodin, E.V. Mortikov, S.V. Kostykin, V. Ya. Galin, A.S. Gritsun, N.A. Diansky, A.V. Gusev, N.G. Iakovlev, 2017, Simulation of the present-day climate with the new version of INM RAS model of the climate system, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, N2, 142-155
13. N. Iakovlev, E. Volodin, A. Gritsun, 2016, Simulation of the Spatiotemporal Variability of the World Ocean Sea Surface Height by the INM Climate Models, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 52, N4, 376–385.
14. Gritsun A., Branstator G., 2016, Numerical aspects of applying the fluctuation dissipation theorem to study climate system sensitivity to external forcings, *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, v.31, N6, pp.339-354.