

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Селезнева Алексея Федоровича «Развитие методов эмпирической реконструкции распределенных систем с внешними воздействиями и их приложение к исследованию динамики явления Эль-Ниньо», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Тематика диссертационной работы А.Ф. Селезнева лежит в рамках важного направления в радиофизике и нелинейной динамике – реконструкции динамических систем по временным рядам. При всем многообразии работ, эта тематика остается актуальной, т.к. во многих областях практики нужны прогнозы нерегулярных временных рядов, так что желательны модели высокой размерности со сложными нелинейными функциями, зависящими от многих свободных параметров. Это приводит к требованию очень больших объемов данных при тех или иных условиях стационарности, что практически всегда не выполняется. В диссертации автором развивается метод реконструкции для высокоразмерных систем определенного вида, а именно, для распределенных систем под внешними воздействиями, когда наблюдаемую динамику удается эффективно редуцировать к низкоразмерному описанию путем выделения главных компонент многомерного временного ряда, а временные ряды внешних воздействий также наблюдаются или имеют априори известный характер. Эта особенность работы позволяет повысить эффективность методов реконструкции для указанного круга систем и ситуаций и обещает практически полезные результаты в разных областях приложений, т.к. автором уже продемонстрированы примеры таких приложений к климатическим и социологическим данным. Из представленных приложений особенно ярким является результат по снижению весеннего барьера предсказуемости процесса Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), который играет очень важную роль в климатической системе Земли, а крупные события Эль-Ниньо имеют отклики по всей планете, так что их более точные прогнозы имеют и высокую социальную значимость. В целом в диссертации получены новые, значимые для радиофизики и нелинейной динамики результаты, которые продвигают вперед имеющиеся методы решения обратных задач (реконструкции динамических систем) и могут быть основой для разнообразных приложений на практике. Диссертация представляет интерес для широкого круга физиков, особенно специалистов в области радиофизики и нелинейной динамики. Тема диссертации актуальна и соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика.

Единство и цельность диссертационной работы обусловлены поставленной задачей по развитию метода реконструкции систем определенного вида и его приложениям. Выполнен большой объем работы, связанный с анализом большого набора наблюдаемых данных при различных параметрах методов анализа и проведением тестов с суррогатными данными, представляющими собой ансамбли из многих сотен временных рядов от построенных эмпирических моделей. При этом личный вклад автора состоит как в разработке программ и проведении расчетов и анализа, так и в активном участии в выборе и постановке задач. Автор демонстрирует высокую квалификацию в области радиофизики и нелинейной динамики, анализа временных рядов, математической статистики, что видно по его свободному оперированию основными понятиями и методами этих дисциплин. Результаты диссертации подробно проиллюстрированы и хорошо обоснованы, в ряде случаев дана их физическая интерпретация и обсуждается соответствие результатам и гипотезам, представленным в научной литературе. Все это свидетельствует о достоверности результатов, которые состоят в следующем.

В первой главе развивается метод реконструкции распределенных систем, с помощью которого в качестве примера строятся прогностические модели потребительской активности населения РФ в условиях пандемии. При разработке метода автор опирается на такие идеи, как выделение главных компонент для редукции размерности описания, аппроксимация нелинейных функций искусственными нейронными сетями, учет внешних воздействий в модели, байесовский формализм для оценки параметров и гиперпараметров, тестирование моделей с использованием суррогатных данных. Представленная методика является развитием и совершенствованием подхода, который на протяжении последних лет разрабатывается в научном коллективе проф. А.М. Фейгина. К оригинальным чертам предложенной в диссертационной работе реализации подхода следует отнести учет вклада менее значимых компонент (1.12) в модели с их описанием простыми уравнениями красного шума (1.13), добавление внешних воздействий в модельные уравнения (1.2) и (1.3), проверки моделей с использованием суррогатных данных. Эти моменты повышают эффективность подхода, как продемонстрировано автором на примере моделирования потребительской активности населения РФ в условиях пандемии по реальным данным от банка Тинькофф. А именно, показано, что более точные прогнозы достигаются при учете в модели ограничительных мер в виде сигнала внешнего воздействия, который носит приближенно ступенчатый характер.

Во второй главе строятся прогностические модели явления ЭНОК на внутригодовых масштабах по имеющимся в свободном доступе многомерным временным рядам температуры поверхности океана (ТПО), давления на уровне моря (ДУМ) и теплосо-

держания океана (ТО). Автором найден предиктор в данных ДУМ, который назван Гавайским индексом. Показано, что учет такого предиктора в прогностической модели позволяет снизить ошибку прогноза следующего цикла ЭНЮК по данным за февраль – март (т.е. через весенний барьер). Далее автором найден дополнительный предиктор в данных по теплосодержанию океана и показано, что наиболее целесообразно вводить его в качестве дополнительной переменной в модель и получать совместную модель для ТПО и ТО. Это также позволяет снизить весенний барьер для ТПО (и соответствующий зимний барьер для ТО).

В третьей главе исследуется процесс Эль-Ниньо – Южное колебание на межгодовых и вековых масштабах, в том числе строятся прогностические модели при учете форсингов солнечной активности и содержания углекислого газа в атмосфере. Во-первых, автором исследуются связи между амплитудами сезонных циклов ТПО и ТО и показано, что эта зависимость линейна в первой половине XX века и нелинейна – во второй, что в диссертации объяснено увеличением амплитуды явлений Эль-Ниньо во второй половине XX века. Во-вторых, по данным палеореконокструкций за 850 лет автором получена прогностическая модель, в которой обоснована статистическая значимость зависимости ТПО от индекса солнечной активности и концентрации углекислого газа в атмосфере, причем зависимость от солнечной активности более заметна в наблюдаемом временном ряде (рис.3.8), что проявляется в наличии 200-летней компоненты как в ряде ТПО, так и в ряде значений индекса солнечной активности.

Все основные результаты работы являются новыми. К наиболее ценным и интересным результатам следует отнести, по моему мнению, предложенную процедуру реконструкции в целом, повышающую эффективность имеющегося подхода в случае многомерных данных и известных внешних воздействий; отыскание двух новых предикторов явления Эль-Ниньо, позволяющих снизить весенний барьер предсказуемости; модели совместной динамики Эль-Ниньо и двух внешних форсингов, полученные по данным наблюдений и палеореконокструкций за последние 850 лет, с демонстрацией заметной, достаточно простой зависимости среднего значения индекса Эль-Ниньо от солнечной активности на масштабах порядка 200 лет. Эти результаты имеют потенциальное прикладное значение для анализа многомерных колебательных систем различной природы и могут иметь фундаментальное значение для науки о климате, во всяком случае, обнаруживая хороший потенциал для дальнейшего развития исследований климатических процессов.

В качестве замечаний по диссертационной работе отмечу следующее.

1) В главе 1 остается вопрос о том, важно ли в итоговой прогностической модели трех компонент с форсингом учитывать взаимодействие между этими компонентами. По рис.1.6 возникает такое впечатление, что почти то же самое получится при использовании для моделирования каждой из трех старших ГК индивидуальной модели авторегрессии (1.13) с внешним воздействием (т.е. (1.2) с  $l = d = 1$ ), т.к. практически не отличаются друг от друга первая и вторая колонки на рис.1.6. Верно ли это впечатление? Если учет взаимодействия трех компонент в модели все же статистически значим, то это само по себе интересно в познавательном плане, но следующий вопрос – насколько это ощутимо в терминах точности прогноза? Сравнение таких моделей напрашивается для полноты исследования, и было бы полезно, т.к. статистически значимый результат (улучшение прогноза) – еще не обязательно значимый результат для решения практической задачи, для которой строится модель и делаются прогнозы.

В связи с тем что модели в этой главе строятся только линейные, представляется недостаточно обоснованным утверждение в заключении главы 1, что «в основе динамики системы лежит более сложная, чем тривиальный красношумовой процесс, динамическая модель». Если речь идет о том, что есть именно три взаимодействующих компоненты, а не каждая отдельно, как в (1.13), то в случае небольших коэффициентов связи и такой трехкомпонентный процесс имеет спектральную плотность мощности, спадающую от низких частот к высоким примерно так же, как и в случае процесса (1.13). Тогда его тоже вполне можно назвать красным шумом, т.к. это название связано, вообще говоря, с характером спектра мощности, а не с видом уравнения. Кроме того, остается неясным, важен ли вообще учет взаимодействия между тремя компонентами.

2) В главе 2 в рамках предобработки данных автор удаляет из рядов ТПО составляющую, связанную с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере, путем вычитания из каждого наблюдаемого ряда его регрессии на ряд концентрации  $\text{CO}_2$ . Это соответствует предположению о том, что эта составляющая лишь аддитивно добавляется к данным ТПО и не влияет на параметры эволюционных уравнений, т.е. на динамику. В главе 3 это не допускается, и автор вносит зависимость от  $\text{CO}_2$  в модельный оператор эволюции. Оба варианта имеют право на существование и проверку. Но автор не поясняет, почему в одном случае используется один, а во втором – другой, что видится как некоторое противоречие и оставляет вопрос, а что будет, если в каждом случае попробовать альтернативный вариант. Это вопрос усиливается из-за того, что автором показано в п.3.2, что роль нелинейности в динамике Эль-Ниньо заметна. Тогда тем более можно ожидать зависимости динамики от внешнего воздействия – сигнала  $\text{CO}_2$ .

3) В главе 2 показано, что прогноз Эль-Ниньо улучшается статистически значимо при учете двух найденных новых предикторов. Это само по себе интересно с фундаментальной точки зрения, т.к. указывает на взаимосвязи соответствующих процессов в системе ЭНЮК. Однако не обсуждается, насколько это важно с практической точки зрения, т.е. насколько велико улучшение прогноза и насколько это важно для приложений. При данном представлении результатов (например, на рис.2.2,с) остается впечатление, что из всех прогнозов на один месяц вперед изменилась только одна точка на графике (прогноз июньского значения), причем относительная дисперсия ошибки прогноза была 0.3, а стала 0.25 (по амплитуде это 0.55 и 0.5, соответственно). Аналогично, и панели на рис.2.4,а показывают слабо уменьшающиеся при учете форсинга ошибки прогноза. Дает ли это уменьшение что-то уже сейчас в практическом плане? Или это только показывает, что в перспективе тут есть еще, что поискать для более существенного улучшения прогнозов?

4) В главе 3 при обсуждении разного поведения моделей ЭНЮК, построенных по разным наборам данных, при росте концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, говорится, что есть «... разброс средних откликов моделей в конце рассматриваемого интервала, примерно с 1950 года. Это связано с большой неопределенностью отклика моделей на аномальный рост  $\text{CO}_2$ , случившийся на относительно коротком временном интервале в результате антропогенных выбросов. Причина такой неопределенности – незначительность вклада этого интервала в ценовую функцию при моделировании 850-летней динамики, а также единичность этого события». Однако насколько можно судить по графикам на рис.3.8, причину можно сформулировать более определенно: коэффициенты моделей перед значениями форсинга  $\text{CO}_2$  отрицательны («в основном», т.к. коэффициентов несколько) для двух моделей и положительны для модели, полученной по данным ERSST. Поскольку отрицательные значения едва ли имеют смысл, то это может означать, что коэффициенты при  $\text{CO}_2$  статистически незначимы, а их отрицательные значения – флуктуация оценки, т.е. не виден статистически значимый вклад  $\text{CO}_2$  в динамику ЭНЮК на всем интервале 1150-2000 гг. в целом. Для данных ERSST этот вывод может быть другим, т.е. что вклад  $\text{CO}_2$  фиксируется значимо, например, из-за большей точности этой палеорекострукции (по каким-то причинам). Уместно было бы привести в тексте значения коэффициентов для форсинга  $\text{CO}_2$  и провести сопоставление моделей с учетом только солнечной активности и с добавлением  $\text{CO}_2$ , чтобы оценить вклад последнего. Автором представлены лишь результаты, когда добавлены оба форсинга.

5) Неудачно сформулировано положение 1, выносимое на защиту. Утверждение, что «развитые в диссертации методы позволяют восстанавливать эмпирические моде-

ли...» ни к чему не обязывает. Ведь они могут давать такие модели, которые предсказывают с очень низкой точностью, а про это ничего не говорится. Тут уместно было бы конкретизировать, чего позволяют достичь получаемые модели. Кроме того, желательно было бы более точно указать оригинальные черты метода, внесенные автором. Видимо, это тесты на суррогатных данных, использование различных компонент ЭОФ-разложения в качестве динамических переменных и аддитивной добавки (1.13), учет внешних воздействий.

б) В работе очень мало технических и терминологических погрешностей, так что на них можно не останавливаться. Укажу лишь две.

Представляются неудачными словесные формулировки нулевых гипотез во всех трех главах. Автор дает длинное описание, например, в главе 1: «нулевая гипотеза, которая отвергается в данном статистическом тесте, предполагает, что модель, учитывающая информацию об ограничительных мерах, обладает не лучшей предсказательной способностью, чем модель, не учитывающая эту информацию». Однако в математической статистике нулевая гипотеза – это гипотеза об однозначно определенном распределении (или некоторых его параметрах) наблюдаемых величин или некоторых полученных из них статистик. Например, в указанном случае нулевая гипотеза, по-видимому, должна иметь вид: коэффициенты при форсингах в эволюционном уравнении (1.1) равны нулю (другими словами, форсинги отсутствуют). При этом условии (и конкретных значениях остальных модельных параметров, полученных при реконструкции) и генерируется автором ансамбль суррогатных временных рядов. Отличие реальных данных от этого ансамбля оценивается по значению ошибки прогноза эмпирической модели с форсингом, т.е. эта ошибка является решающей статистикой. Поскольку она оказывается меньше для реальных данных, то опровергается гипотеза о независимости наблюдаемых величин от форсинга, а соответственно и обосновывается статистическая значимость уменьшения ошибки прогноза при учете форсинга в модели.

На рис.3.3 (с.72) приведены 10 % и 90 % квантили распределений оценки коэффициента при квадратичном члене. Поскольку тест, по-видимому, двусторонний, то опровержение нулевой гипотезы о линейной зависимости имеет место на уровне значимости 0.2, а не 0.1, как это указано в тексте на с.73.

Все эти замечания непринципиальны и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы А.Ф. Селезнева, которая содержит решение научных задач, имеющих существенное значение для развития радиофизики и нелинейной динамики. Работа хорошо оформлена и изложена грамотным научным языком, автореферат соответствует содержанию диссертации. В заключение еще раз отмечу высокий научный

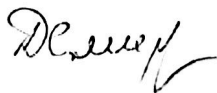


уровень работы в целом, актуальность тематики, определяющий личный вклад автора, большой объем проведенных исследований, внутреннее единство и обоснованность выводов работы, достоверность, новизну, научную значимость и практическую ценность результатов. Это подтверждается и высоким уровнем публикаций по результатам диссертации – 6 статей в изданиях из Web of Science/Scopus, включая такие авторитетные журналы, как Известия ВУЗов. Радиофизика, Climate Dynamics, Geophysical Research Letters, Chaos. Результаты работы представлены на многочисленных конференциях. В рамках работы получены свидетельства о государственной регистрации четырех программ для ЭВМ. Полученные в диссертационной работе результаты могут найти приложения при прогнозе многомерных нерегулярных временных рядов из различных отраслей практики, при исследованиях сложных колебательных систем из области радиофизики, науки о климате, биомедицины в академических НИИ (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ИПФ РАН и др.) и при преподавании радиофизики и теории колебаний в Саратовском госуниверситете, Нижегородском госуниверситете и других вузах.

Все сказанное позволяет заключить, что диссертационная работа А.Ф. Селезнева «Развитие методов эмпирической реконструкции распределенных систем с внешними воздействиями и их приложение к исследованию динамики явления Эль-Ниньо» 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, Селезнев Алексей Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

21.11.2022

Ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 – радиофизика),  
профессор РАН



Смирнов Дмитрий Алексеевич

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

Почтовый адрес: 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38, СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Телефон: +7-8452-391255. E-mail: [smirnov.dk@yandex.ru](mailto:smirnov.dk@yandex.ru).

Подпись Смирнова Дмитрия Алексеевича  
зам. директора СФИРЭ им. В.А.



Фатеев Д.В.