

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт физики атмосферы имени
А.М. Обухова Российской академии наук»,
академик РАН

Семенов В.А.

февраля 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук»
на диссертационную работу
Лубкова Андрея Сергеевича
«Долгосрочное прогнозирование явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья с использованием модели на основе нейронных сетей»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате

Диссертационная работа Лубкова Андрея Сергеевича выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем» (ФГБНУ «ИПТС») и посвящена решению нескольких актуальных и важных научных задач в области исследования одной из основных мод, характеризующих межгодовую изменчивость параметров крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в экваториальной зоне Мирового океана - процесса Эль-Ниньо - Южное колебание (ЭНЮК).

Актуальность темы работы. Процесс Эль-Ниньо - Южное колебание - один из важнейших процессов, определяющих межгодовую (и даже междесятилетнюю за счёт инерционности климата) климатическую изменчивость в ряде регионов мира. Это приводит к необходимости оперативного прогнозирования развития этого процесса. К сожалению, указанный прогноз существенно затрудняется ввиду так называемого весеннего порога предсказуемости, так что практически полезный прогноз в большинстве случаев возможен только после прохождения этого порога, т.е. с недостаточной заблаговременностью. Увеличение заблаговременности прогноза формирования Эль-Ниньо или Ла-Нинья и определяет актуальность представленной диссертации.

Целью работы является создание модели долгосрочного прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их пространственных типов и нейтральной фазы ЭНЮК с заблаговременностью год и более на основе нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели диссертантом был проведён анализ глобальных гидрометеорологических полей, используемых для предикторов модели, разработана соответствующая статистическая модель с её приложением к прогнозированию событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в сравнении с другими моделями соответствующей функциональности.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и четырёх приложений. Общий объем диссертации составляет 182 страниц, включая список литературы из 194 наименований.

Во *введении* дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, приведены цели и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, обсуждены научная новизна и практическая значимость работы, описана апробация результатов исследования.

Первая глава посвящена анализу литературных источников, описывающих явление ЭНЮК, которое представляет собой одну из основных мод, характеризующих межгодовую изменчивость крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в экваториальной зоне Мирового океана. Отдельно обсуждается вопрос весеннего порога предсказуемости развития Эль-Ниньо/Ла-Нинья. Кроме того, проводится детальный обзор статистических моделей предсказания этого процесса на основе нейронных сетей. При этом, в частности, указывается на необходимость наличия достаточно длительных рядов для качественного обучения модели развития ЭНЮК. Кроме того, отдельно отмечается необходимость модели, относительно нечувствительной к весеннему порогу предсказуемости, для обучения которой будут использоваться надежные ряды данных наблюдений, а также данные реанализа и реконструкций.

Во *второй главе* сформулированы основные требования к массивам данных, которые использовались в работе, а также проведён анализ рядов данных (инструментальные наблюдения и реанализ), которые могут быть использованы при прогнозировании ЭНЮК. Кроме того, разработан алгоритм отбора входных в модель индексов-предикторов.

В *третьей главе* описывается авторская модель прогнозирования Эль-Ниньо и алгоритм обучения этой модели. В этой же главе модель тестируется на искусственных и реальных данных. Последнее привело к отбору рядов, характеризующих динамику атмосферы и океана в разных регионах и на разных высотах, которые могут быть использованы в модели в качестве входных данных. Для большей компактности модели в ЭНЮК выделены две компоненты: низкочастотная и высокочастотная. Ввиду малости вклада низкочастотной компоненты в общую изменчивость ЭНЮК для неё используется более простая модель, основанная на множественной линейной регрессии, тогда как использование нейронной сети ограничено прогнозированием высокочастотной компоненты в ансамблевом виде.

В *четвертой главе* рассмотрены эксперименты моделирования ЭНЮК, оценена воспроизводимость явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов, выполнены сравнения с ретроспективными прогнозами ведущих климатических центров и дан успешный прогноз последнего Эль-Ниньо 2023 года. В частности, в рамках диссертационной работы проведены ретроспективные прогностические эксперименты с использованием только атмосферных предикторов (заданных по данным реанализа) и с использованием как атмосферных, так океанических предикторов. Дополнительно анализируется влияние отдельных рядов-предикторов на результаты прогнозирования. Наконец, в последнем разделе этой главы описываются успешные прогностические расчёты для Эль-Ниньо 2023 г., проведённые в 2022 г.

В *заключении* представлены основные выводы диссертации.

В *приложениях* к работе приведены классификация явлений Эль-Ниньо, сравнение предложенной в диссертации модели с некоторыми моделями глубокого обучения, влияние учета теплосодержания океана на глубине до 300 м на качество моделирования и воспроизведение событий Эль-Ниньо/Ла-Нинья с заблаговременностью прогноза до 22 мес.

Из результатов работы, научная новизна которых не вызывает сомнений, можно выделить следующие:

- Разработанная автором модель способна воспроизводить и прогнозировать события Эль-Ниньо с оправдываемостью не менее 76%, а также других фаз ЭНЮК, хотя и с меньшей оправдываемостью.
- Разработанная модель обладает относительно малой чувствительностью к весеннему порогу предсказуемости. Таким образом, прогноз событий Эль-Ниньо возможен с заблаговременностью, недоступной большинству других современных моделей аналогичной функциональности.

Степень достоверности результатов и апробация работы. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием современных данных наблюдений и реанализа, а также применением современных методов статистического моделирования. Все полученные в диссертации результаты дополняют друг друга и развивают современные представления о динамике системы «океан-атмосфера» и их региональных проявлениях. Основные результаты докладывались на многочисленных отечественных и зарубежных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях. По теме диссертации опубликовано 13 работ в изданиях, индексируемых международными базами данных и "Белым списком" Минобрнауки РФ, а также ряд тезисов докладов, которые дают полное представление о результатах работы соискателя.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается, во-первых, в анализе связи вариаций характеристик ЭНЮК в тропиках Тихого океана с вариациями гидрометеорологических характеристик в других регионах Земного шара. Во-вторых,

разработанная автором диссертации модель может быть использована при оперативном прогнозировании фаз Эль-Ниньо-Южного колебания.

В качестве замечаний по диссертационной работе и автореферату можно отметить следующее:

1. Выбор предикторов для модели требует дополнительного обоснования. В представленной работе предикторы (гидрометеорологические ряды, осреднённые по разным регионам; см. рис. 2.6 и 4.10 диссертации, рис. 1 автореферата) отбираются с помощью методов лаговой статистики. Целесообразным является хотя бы краткое обсуждение физического смысла отобранных рядов. В частности, подобное обоснование желательно для рядов, характеризующих регионы в средних и высоких широтах, прежде всего для вертикальной скорости ветра на изобарическом уровне 500 гПа.
2. Обоснования требует географическая несвязность регионов, по которым проводится осреднение гидрометеорологических характеристик для вычисления индексов-предикторов для одной и той же переменной состояния климата. Наиболее ярко это проявляется для 9-летних средних значений температуры поверхности океана (ТПО), но хорошо заметно и для других переменных (рис. 2.6 диссертации, рис. 1 автореферата).
3. Наконец, одним из регионов, по которым вычисляется 9-летнее среднее для температуры поверхности океана является регион "тёплого пятна" на западе экваториальной области Тихого океана. Однако изменение ТПО в этом регионе само по себе является частью процесса ЭНЮК и тесно связано с предиктантом - ТПО в регионах Nino-3, Nino-4 и Nino-3.4. Такой подход указывает на частичное использование круговой логики в модели.
4. Детальная верификация модели проведена для относительно короткого периода 2007-2023 гг., содержащего всего 5 событий Эль-Ниньо и 8 событий Ла-Нинья. Как следствие, статистические оценки в работе могут характеризоваться большой неопределённостью. Эти оценки, впрочем, могут быть уточнены при дальнейшем использовании модели.

Отмеченные недостатки несколько ухудшают общее впечатление о диссертационной работе, но главный положительный вывод остается без изменения.

Диссертационная работа была заслушана на семинаре в ФГБУН «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук» 13.02.2025

Заключение. Диссертационная работа «Долгосрочное прогнозирование явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья с использованием модели на основе нейронных сетей» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу и удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор - Лубков Андрей Сергеевич -

заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Отзыв подготовил:

доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник Лаборатории теории климата
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук»,

Елисеев Алексей Викторович

14 февраля 2025 г.

Адрес: Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3стр1

ФГБУН «ИФА им. А.М.Обухова РАН»

Сайт: <http://www.ifaran.ru/>

Эл. почта: ifaran@ifaran.ru

Телефон: +7 (495) 951-55-65

Я, Елисеев Алексей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

____ / Елисеев А.В. /

"Подпись Елисеева А.В заверяю",

Заведующий отделом кадров и делопроизводства ФГБУН «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук»

Орлова Валерия Валентиновна



17.02.2025

