

На правах рукописи

ЛУБКОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ЯВЛЕНИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Специальность 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем», в лаборатории крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата

Научный руководитель: **Воскресенская Елена Николаевна**
доктор географических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Институт природно-
технических систем»

Официальные оппоненты: **Дианский Николай Ардадьевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»

Переведенцев Юрий Петрович
доктор географических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «01» апреля 2025 г. в 16 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эль-Ниньо и Ла-Нинья – важнейшие глобальные климатические явления межгодового масштаба в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана, которые обуславливают формирование катастрофических аномалий климата и окружающей среды в разных регионах Земного шара в, частности, в виде засух, наводнений, пожаров, а также приводят к возникновению колоссальных социальных и экономических проблем [Philander, 1989; Voskresenskaya, Polonsky, 1993; Larkin, Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Yuan et al., 2012]. Так засухи, вызванные Эль-Ниньо 2015 года, создали острую нехватку продовольствия в южной части Африки [IPCC, 2022]. Глобальный ущерб от Эль-Ниньо 1982 и 1997 годов составил 4.1 и 5.7 трлн. \$. Ожидаемый в XXI веке суммарный глобальный ущерб от всех событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по оценкам экспертов может составить 84 трлн. \$ [Callahan, Mankin, 2023]. Заблаговременный прогноз этих событий позволит принять превентивные меры для максимально возможного сокращения социально-экономического ущерба. Следовательно, одним из важнейших направлений современных климатических исследований является изучение и прогноз этих событий.

События Эль-Ниньо и Ла-Нинья являются эпизодами климатического процесса Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). ЭНЮК включает в себя теплую фазу – Эль-Ниньо, холодную фазу – Ла-Нинья, и нейтральную фазу между ними. К настоящему времени получена достаточно подробная характеристика этих событий, проведена классификация каждой фазы ЭНЮК, в результате чего выделено, как минимум, по два пространственных типа, как среди Эль-Ниньо, так и Ла-Нинья. При этом каждому типу присущи свои особенности, которые имеют характерные глобальные проявления. К настоящему времени уже достигнуты определенные успехи в моделировании и прогнозировании событий и их типов. Однако в условиях меняющегося климата чрезвычайно важно продолжение этих исследований и совершенствование прогноза.

Современные динамические и статистические модели многочисленных мировых климатических центров, применяемые для прогноза состояния ЭНЮК в рамках проектов Всемирной метеорологической организации (ВМО), ограничены весенним порогом предсказуемости, а их эффективная заблаговременность составляет 6-12 месяцев [Wang B., Fang Z., 1996; Tippett et al., 2012; Qi et al., 2017]. При этом уточнение типа событий ЭНЮК ограничено буквально несколькими месяцами [Ren et al., 2019; Zhang et al., 2021; Gao et al., 2024]. Однако перед мировым сообществом ученых и специалистов сохраняется проблема создания такого прогноза с максимально возможной заблаговременностью и высокой оправдываемостью.

Объект исследования – События Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Предмет исследования – Прогностическое моделирование событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их пространственных типов.

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание модели долгосрочного прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их

пространственных типов и нейтральной фазы ЭНЮК с заблаговременностью до 12 месяцев и более на основе искусственных нейронных сетей.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Провести анализ глобальных гидрометеорологических полей с целью выбора климатических сигналов в системе океан-атмосфера, которые наряду с традиционно известными сигналами будут использоваться при прогностическом моделировании Эль-Ниньо/Ла-Нинья в качестве предикторов.

2. Разработать модель долгосрочного прогнозирования Эль-Ниньо, Ла-Нинья и нейтральной фазы ЭНЮК на основе метода искусственных нейронных сетей (ИНС) с привлечением климатических сигналов глобальной системы океан-атмосфера в качестве предикторов.

3. Применить разработанную модель для прогнозирования Эль-Ниньо, Ла-Нинья и нейтральной фазы ЭНЮК с заблаговременностью более 12 мес.

4. Оценить качество прогностических характеристик разработанной модели и сопоставить его с возможностями современных динамических моделей и моделей, основанных на алгоритмах глубокого обучения.

Данные и методы исследования. В работе к анализу привлекался большой объем массивов данных, которые для удобства восприятия представим в виде следующих групп.

Реконструированные массивы среднемесячных данных температуры поверхности океана (ТПО):

– HadISST Метеорологического офиса Гадлея (Великобритания), с пространственным разрешением узлов сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с 1870 по 2023 гг.;

– COBE SST2 Японского метеорологического агентства с пространственным разрешением узлов сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с 1850 по 2023 гг.;

Данные разных типов реанализа:

– среднемесячные поля скорости ветра и геопотенциала на изобарических уровнях из атмосферного реанализа NCEP/NCAR с пространственным разрешением узлов сетки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ с 1948 по 2023 гг.;

– среднемесячные поля температуры воздуха и геопотенциала на изобарических уровнях из атмосферного реанализа 20 столетия (20th Century Reanalysis V2c) с пространственным разрешением узлов сетки $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ с 1870 по 2015 гг.;

Данные наблюдений:

– среднемесячные данные ТПО с буев проекта TOGA-TAO с 1981 по 2019 гг.;

– ежедневные данные аэрологического зондирования Объединенного глобального архива радиозондирования IGRA v2.1 (International Global Radiosound Archive) Национального центра климатических данных США (NCDC).

Спутниковые данные:

– ежемесячные данные ТПО спутника MODIS (Terra Global Level 3) с разрешением 9 км с 2001 по 2019 гг.;

– ежемесячный массив ТПО NOAA IO SST v2 (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature v2), полученный путем интерполяции данных сенсора

AVHRR (серия спутников NOAA), с пространственным разрешением узлов сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ за период 1982-2018 гг.

Разработана уникальная методика усвоения данных и применения группы простейших многослойных нейронных сетей для долгосрочных климатических прогнозов, что послужило основой прогностической модели. Разработанная модель использует в качестве предикторов глобальные климатические индексы системы океан-атмосфера, для расчета которых применяются атмосферные и океанические поля.

Научная новизна. Созданная модель нейросетевого долгосрочного прогноза событий Эль-Ниньо, Ла-Нинья и нейтральной фазы ЭНЮК впервые обеспечила возможность их эффективного прогноза с заблаговременностью более 1 года. При этом четыре из пяти Эль-Ниньо спрогнозированы успешно с учетом типов событий.

На основе сравнения ретроспективных прогнозов показано, что эффективная продолжительность прогноза полученной модели превосходит по качеству классические гидродинамические, статистические модели и модели, основанные на искусственном интеллекте. Такая возможность обеспечена способностью модели к преодолению весеннего порога предсказуемости.

В 2022 году полученная модель одна из первых в мире указала на приближение Эль-Ниньо восточного типа в 2023 году.

Научная и практическая значимость результатов. Полученные в работе результаты направлены на решение фундаментальной научной проблемы в области теории климата, связанной с долгосрочным прогнозированием.

Разработанная модель показала высокую способность прогнозирования явлений Эль-Ниньо, Ла-Нинья и нейтральных условий ЭНЮК. Ее эффективная продолжительность прогноза существенно лучше современных динамических и статистических моделей. При этом модель позволяет предупредить не только о начале большинства событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, но и определить их тип, что имеет, несомненно, большое практическое значение для развития климатических прогнозов и минимизации возможных негативных последствий. Поскольку анализ прогнозов предложенной модели показал ее преимущество относительно динамических и современных статистических моделей, в основе которых лежат алгоритмы глубокого обучения, в последующем модель может быть предложена для внедрения в Росгидрометцентре.

Кроме этого, результаты работы могут быть использованы для решения многих прикладных задач, в частности, в практической работе учреждений, связанных с выпуском долгосрочных гидрометеорологических прогнозов, а также могут быть включены в образовательные программы ВУЗов гидрометеорологического и географического профиля.

Полученные результаты включены в отчеты по государственным научным темам, а также в отчеты по грантам РФФИ и РГО, что подтверждает их научную и практическую значимость. В частности, результаты работы вошли в отчет тем госзадания Института природно-технических систем по разделу темы (*№ 0012-2014-0013*): «Исследование закономерностей и механизмов формирования региональных параметров природной среды Черноморского региона под

влиянием естественных и региональных факторов», № 0012-2019-0007 «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия», № 0012-2021-0007 (121122300072-3) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия»; гранта РФФИ № 14-45-01549 «Исследование изменчивости гидрофизических и гидробиологических процессов в севастопольском морском районе»; гранта РФФИ № 16-05-00231 «События Эль-Ниньо и Ла-Нинья: классификация, особенности и проявления в погодно-климатических аномалиях в Черноморском регионе»; гранта РФФИ № 16-35-00186 «Исследование климатических условий Черноморского побережья России в связи с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья»; гранта РФФИ № 18-35-00325 «Исследование биоклиматического потенциала курортов Крымского полуострова»; гранта РФФИ № 18-45-920063 «Медио-климатическая характеристика туристско-рекреационного региона Севастополя в условиях наблюдаемых изменений климата»; гранта РФФИ № 18-45-920068 «Закономерности формирования экстремальных штормовых условий в Севастопольском регионе и изменчивости параметров морских экосистем»; гранта РФФИ № 20-45-920015 «Оценка антициклонической активности и сопутствующих гидрометеоусловий для решения проблемы водных ресурсов Севастопольского региона»; гранта РГО «Комплексный анализ природно-климатического потенциала и его будущих изменений на территории Крыма и в прибрежной зоне Черного моря для перспективного планирования устойчивого развития региона».

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана модель долгосрочного прогноза аномалий температуры поверхности океана в экваториальной зоне Тихого океана на основе ИНС, в которой в качестве предикторов используются индексы, характеризующие процессы крупномасштабного взаимодействия в глобальной системе океан-атмосфера.

2. Предложен алгоритм пространственно-временного отбора предикторов, полученных на основе комплексного анализа архивных гидрометеорологических и океанологических полей и атмосферных реанализов, которые наряду с широко известными климатическими индексами отражают связь с аномалиями температуры поверхности океана в экваториальной зоне Тихого океана.

3. Полученная модель обладает минимальной чувствительностью к весеннему порогу предсказуемости, что обеспечивает ее преимущество по сравнению с современными динамическими и статистическими моделями прогноза Эль-Ниньо/Ла-Нинья и позволяет существенно увеличить эффективную заблаговременность прогноза, в особенности теплой фазы ЭНЮК.

Личный вклад автора. В ходе выполнения диссертационной работы автор активно участвовал в постановке задач, их решении, интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Им самостоятельно были проведены

обработка, анализ и верификация всех массивов данных, написаны программные коды для решения поставленных задач, выполнено сопоставление с международным уровнем. Автором лично были подготовлены материалы к научным публикациям в рецензируемых изданиях, представлены результаты на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность расчетов подтверждается наличием верификационной выборки, обеспечивающей независимую проверку результатов моделирования. Новизна научных результатов подтверждена публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах, размещенных в наукометрических базах РИНЦ, SCOPUS и Web of Science.

Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах Лаборатории крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата Института природно-технических систем в период 2015 по 2024 гг. и на семинаре в Гидрометцентре России в 2023 году. Кроме этого, полученные результаты были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях: Международная научная конференции «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала Юга России» (пгт. Кацивели, 2014); Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современная гидрометеорология: актуальные проблемы и пути их решения» (Одесса, 2014); XX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2014); Научно-практическая молодежная конференция «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами» (Севастополь, Ялта, 2014–2017); «International Geographical Union Regional Conference. Geography, Culture and Society for our Future Earth – IGU» (Москва, 2015); Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2015–2023); Научная конференция "Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология" (Севастополь, 2016); Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии-2016» (Севастополь, 2016); Всероссийская научная конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (Севастополь, 2016); I Черноморская научно-практическая конференция МГУ «Проблемы безопасности в современном мире» (Севастополь, Санкт-Петербург, Москва, 2016, 2018, 2019, 2023); Международная научная конференция памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова «Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии» (Ростовна-Дону, 2016, 2020); V Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование – MARESEDU» (Москва, 2016); XXV международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (Севастополь, 2017); Всероссийская конференция "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития" (Санкт-Петербург, 2017); Всероссийская научная конференция «Моря России» (Севастополь, 2017–2019); International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences (Moscow, 2019); Всероссийская научная

конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, Севастополь, Санкт-Петербург, 2018–2020); международная научно-практическая конференция «Здоровье и окружающая среда» (Минск, 2019); V Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 2019, 2023); Международная молодежная школа и конференция «по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде» (Томск, 2019); Международная конференция и школа молодых ученых «по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2020» (Томск, 2020); Международная конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023» (Москва, 2023).

Публикации по теме диссертации. Результаты настоящей диссертационной работы опубликованы в 23 научных статьях и 4 сборниках конференций «IOP Conference Series». Требованиям ВАК при Минобрнауки Российской Федерации соответствует 11 статей в рецензируемых российских научных изданиях. Из них 9 научных статей входят в наукометрические базы SCOPUS и Web of Science.

Кроме этого, опубликовано 60 тезисов докладов, размещенных в сборниках материалов конференций, входящих в систему РИНЦ, а результаты работы апробированы на всероссийских и международных научных конференциях. По результатам настоящей работы опубликован 1 РИД. Требования к публикациям основных научных результатов диссертации, предусмотренных в п. 11 и 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, соблюдены.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и четырех приложений. Объем работы составляет 182 страниц. Текст исследования иллюстрирован 36 рисунками. Библиографический список включает в себя 194 наименований, в том числе, 168 на английском языке.

Благодарности. Автор искренне благодарит своего научного руководителя, доктора географических наук, профессора Е.Н. Воскресенскую за предоставленную тему и идею диссертации, грамотное руководство и ценные рекомендации. Автор признателен Марчуковой О.В. за активное взаимодействие коллеге и соавтору многих публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена актуальность выбранной темы исследования, поставлены цель и задачи, описаны новизна, практическая и теоретическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту,

личный вклад автора, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

В **Главе 1** на основе анализа литературных источников представлено современное состояние изученности ЭНЮК, рассмотрены схемы эволюции, возможные причины интенсификации, обсуждаются две противоположные фазы этого феномена, в том числе, в контексте их пространственной типизации, проанализированы глобальные климатические отклики и рассматривается проблема прогноза.

Особое внимание было уделено вопросу прогнозирования событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов. В **параграфе 1.2** отмечено, что прогнозы, предлагаемые рядом динамических и статистических моделей, используемых мировыми климатическими центрами под эгидой ВМО, ограничены весенним порогом предсказуемости (ВПП), а их эффективная продолжительность прогноза (ЭПП) равна 6-12 месяцам. Заблаговременность определения типа событий ЭНЮК и вовсе ограничена всего лишь несколькими месяцами.

В связи с этим в **параграфе 1.3** детально были рассмотрены современные физико-статистические модели на основе ИНС. Оказалось, что модели ИНС с использованием алгоритмов глубокого обучения в настоящее время имеют заметное преимущество в сравнении с классическими гидродинамическими и статистическими подходами к моделированию. Эффект ВПП для таких моделей смягчается, а ЭПП превышает 17 месяцев [Nam et al., 2019; Petersik, Dijkstra, 2020; Cachay et al., 2021; Mu et al., 2021; Hu et al., 2021; Wang et al., 2023]. Однако существенным недостатком указанного сравнительно нового подхода является обязательное использование данных климатических моделей. Это связано с особенностями алгоритмов глубокого обучения, требующего весьма продолжительного ряда данных (порядка 10000 уникальных наборов). И, хотя такой подход помогает увеличить способности моделей прогноза ЭНЮК, остается опасение, связанное с достижением некоторого предела точности, который не удастся преодолеть, не заменив входные данные климатических моделей на наборы оригинальных данных. В то же время, более простые ИНС, для обучения которых применялись данные наблюдений, показали промежуточный результат, который не достиг успехов подхода с применением глубокого обучения, но незначительно улучшил прогнозы по сравнению с гидродинамическими моделями.

Основной вывод главы можно сформулировать следующим тезисом. Гидродинамические и статистические модели ограничены ВПП, а современные ИНС глубокого обучения – качеством входных данных. Следовательно, существует необходимость создания модели, менее чувствительной к ВПП, для

обучения которой будут использоваться надежные ряды данных наблюдений (или их вторичные продукты: реанализы, реконструкции).

В **Главе 2** сформулированы основные требования к массивам данных, которые использовались для моделирования, а именно: достаточная продолжительность, однородность и оперативное обновление. В результате сравнительного анализа современных доступных международных баз данных были отобраны отвечающие отмеченным требованиям следующие массивы данных: атмосферный реанализ NCEP/NCAR и реконструкция данных ТПО COBESST2.

В **параграфе 2.1** выполнен сравнительный анализ качества реанализов NCEP/NCAR, ERA-Interim и 20CR на основе данных геопотенциала на изобарической поверхности 500мб. Показано, что реанализ NCEP/NCAR пригоден для расчета климатических индексов атмосферной циркуляции. В ходе сравнительного анализа ТПО оценивалось качество данных трех реконструкций: ERSSTv5, COBESST2 и HadISST показал, что массивы HadISST и COBESST2 предпочтительны для расчетов индексов Nino и других океанических индексов.

В качестве входных в модель данных были использованы как известные индексы системы океан атмосфера, так и дополнительно рассчитанные в работе индексы. **Параграф 2.2** посвящен описанию пространственно-временного алгоритма, с помощью которого были получены дополнительные климатические индексы. На первом этапе изучалась возможная статистическая взаимосвязь между моделируемым параметром (то есть индексами Nino 3, Nino 4, Nino 3.4) и глобальными метеорологическими (геопотенциал на изобарических уровнях 500 гПа и 1000 гПа, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра на изобарическом уровне 500 гПа) и океанологическими (ТПО) полями. На следующем этапе экспертным путем определялись прямоугольные широтно-долготные области, в которых обнаружены наиболее часто повторяющиеся статистические связи. На заключительном этапе проводился анализ предположительной взаимосвязи соседних областей (только для полей геопотенциала), и рассчитывались климатические индексы. В результате было выявлено более 100 областей (см. рис. 1), имеющих статистическую связь индексов Nino с гидрометеорологическими полями, на основе которых выбрано 58 климатических индексов. Далее, с использованием известных из литературных источников и дополнительно посчитанных климатических индексов отбиралось ограниченное число индексов, которые составляли входной вектор модели.

Таким образом, были выбраны наиболее подходящие для анализа массивы данных и разработан алгоритм отбора входных в модель предикторов, что послужило основой для дальнейшей разработки модели на основе ИНС.

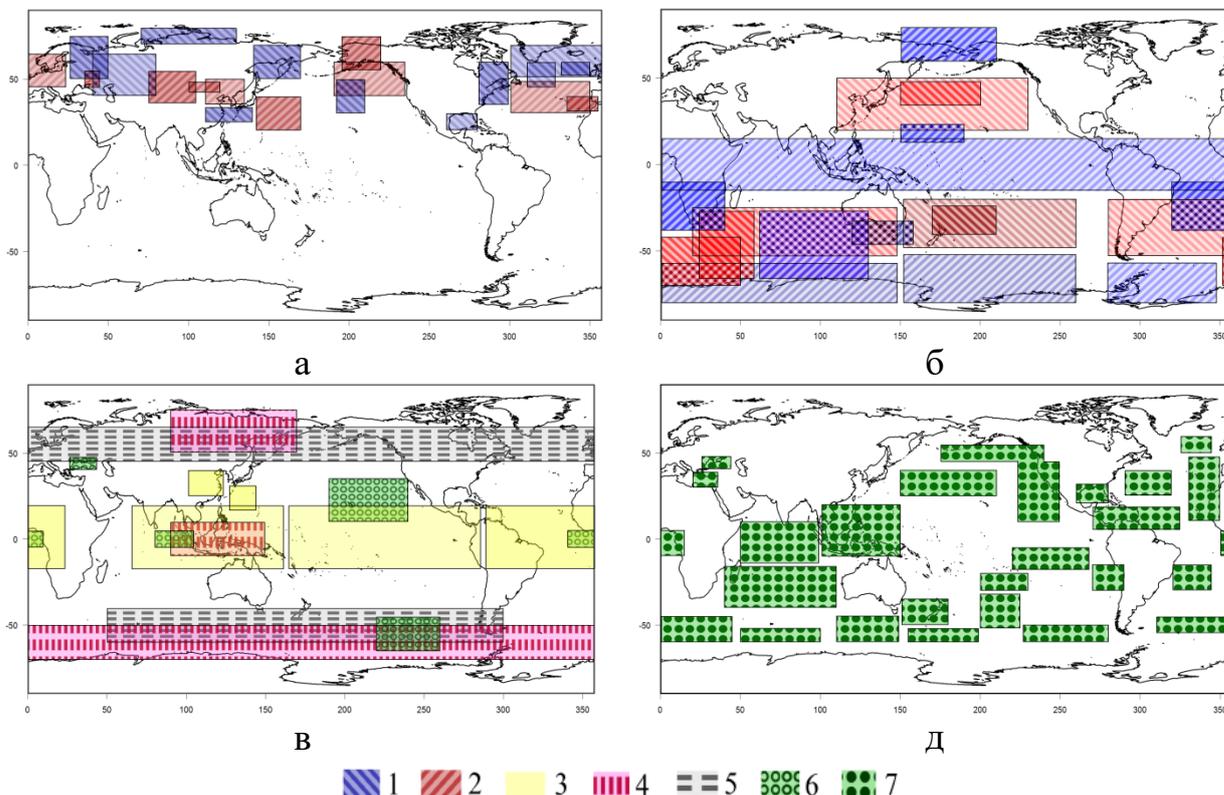


Рисунок 1 – Области, используемые для расчета атмосферных и океанических индексов. Области геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 500 мб отмечены как 1 и 2; области геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 1000 мб отмечены как 3; области меридиональной и зональной составляющих вектора ветра на изобарической поверхности 500 мб отмечены как 4 и 5, соответственно; области ТПО отмечены как 6; низкочастотные области ТПО отмечены как 7 (рассчитанные с применением 9-летнего среднего скользящего сглаживания)

Глава 3 посвящена описанию разработанной модели, основанной на ИНС. В ней подробно описаны тесты модели на основе искусственно созданных рядах данных, эмитирующих климатические колебания, и реальных данных наблюдений, для примера, за стоком р. Дунай, произведена оптимизация модели.

В **параграфе 3.1** подробно описано ядро модели – многослойный перцептрон, приводится математический алгоритм обучения с обратным распространением ошибки и рассматривается метод поиска локального максимума обучения для случаев с короткой обучающей выборкой.

Тесты модели на искусственно созданных рядах данных, описанные в **параграфе 3.2**, указали на корректное математическое описание ядра модели и алгоритмов обучения. Отмечено, что НС способна фильтровать шум, присутствующий в моделируемой характеристике, но шум, добавленный к предикторам НС, не фильтруется. При отсутствии одного из входных сигналов

качество моделирования уменьшается, а отсутствующий сигнал не восполняется. В связи с этим отмечена важность верного отбора входных в модель предикторов.

Тестирование модели на основе реальных данных, описанное в **параграфе 3.3**, указало на необходимость проводить моделирование с перебором всех возможных комбинаций предикторов на входе, выбранных на предварительном этапе, что подробно рассмотрено в **параграфе 3.4**. Усложнение модели привело к увеличению времени расчетов. Поэтому **параграфы 3.5 и 3.6** посвящены сокращению вычислительного времени путем оптимизации модели и декомпозиции прогностического ряда.

В результате декомпозиции, описанной в **параграфе 3.6**, было получено две компоненты: низкочастотная и высокочастотная. Дисперсионный вклад низкочастотной компоненты индексов Niño относительно невелик и варьируется от 2% в январе до 13% в весенний сезон. По этой причине низкочастотная компонента моделировалась с помощью более простой и быстрой модели – множественной линейной регрессии (МЛР). Предикторами МЛР служили сглаженные 9-летним фильтром индексы ТПО (рис. 1г), имеющие статистическую связь с моделируемым параметром со сдвигом от 1 месяца до 10 лет.

Обобщенная схема полученной модели подробно охарактеризована в **параграфе 3.7** и изображена на рис. 2. Алгоритм модели можно описать следующим образом. На первом этапе производилась декомпозиция исходных индексов Niño3, Niño4 и Niño3.4 на низкочастотную (более 9 лет) и высокочастотную (до 9 лет) компоненты. Эти компоненты были приведены к климатическим аномалиям и нормированы на СКО, после чего компоненты моделировались различными методами. Высокочастотная компонента моделировалась с использованием множества комбинаций НС, а низкочастотная – МЛР.

Результат моделирования низкочастотной компоненты представлен функциональной зависимостью, полученной с использованием МЛР. Результат моделирования высокочастотной компоненты рассчитывался как среднее значение, полученное из 20 лучших конструкций НС. Результаты моделирования двух компонент складывались и рассчитывались прогностические индексы Niño. Качество расчета модели оценивалось в сравнении с контрольной выборкой (2007-2023 гг.). Для такой оценки использовались корреляция Пирсона и среднеквадратическое отклонение модельных данных от действительных (Root-Mean-Square-Error или RMSE).

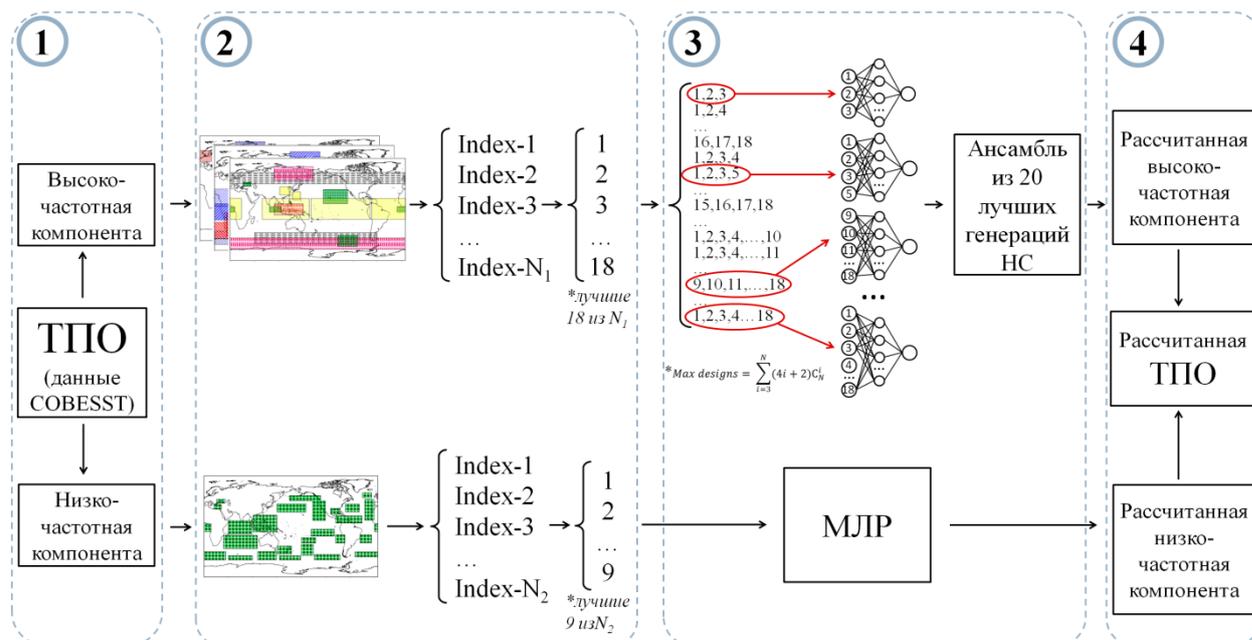


Рисунок 2 – Схема предлагаемой модели: 1) декомпозиция моделируемого ряда; 2) предварительная обработка данных; 3) моделирование; 4) Результаты моделирования и проверка

В **Главе 4** рассмотрены эксперименты моделирования ЭНЮК, оценена воспроизводимость явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов, выполнены сравнения с ретроспективными прогнозами ведущих климатических центров и передовыми моделями искусственного интеллекта и дан успешный прогноз последнего Эль-Ниньо 2023 года.

В **параграфе 4.1** приведены результаты моделирования с использованием только атмосферных предикторов и двух реанализов: NCEP/NCAR и 20CR. Ретроспективный прогноз в период 2010–2019 гг. показал, что модель с такими предикторами чувствительна к ВПП, однако само влияние ВПП несколько сглажено: практически все месяцы воспроизводятся моделью с корреляцией выше 0.5 (кроме июня и июля в случае заблаговременного прогноза за 9 месяцев). Оценка воспроизводимости событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их классификации на Центрально- и Восточно-Тихоокеанский типы показала, что модель лучше воспроизводит события Эль-Ниньо. События Ла-Нинья моделируются несколько хуже.

Ретроспективный прогноз в период 1872-1947 гг. проводился с привлечением данных атмосферного реанализа 20CR. Для этого эксперимента было показано, что на качественном уровне возможно прогнозировать до 75% событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью 3 месяца, до 66% с заблаговременностью 5 месяцев, а с заблаговременностью 7 месяцев – всего до 52%. При этом вновь обнаружено, что события Ла-Нинья воспроизводятся заметно хуже событий Эль-Ниньо.

В параграфе 4.2 описан основной прогностический эксперимент с применением данных атмосферы и океана в качестве предикторов. Получено, что вероятность верного определения термических условий, характерных для событий Эль-Ниньо, практически не зависит от заблаговременности прогноза до года и варьируется от 76 до 83%. В то же время успешность воспроизведения термических условий Ла-Нинья сильно зависит от заблаговременности прогноза. Вероятность верного определения условий Ла-Нинья уменьшается с ростом заблаговременности прогноза от 85 до 31%. Ложные случаи условий Ла-Нинья встречаются с вероятностью 8-28%, и случаи условий Эль-Ниньо – с вероятностью 8-23%. При этом предложенная модель достаточно хорошо воспроизводит события Эль-Ниньо и их тип (см. рис. 3). С годовой заблаговременностью прогноза четыре Эль-Ниньо из пяти были определены верно с учетом пространственного типа событий. При этом прогностическая модель с небольшой заблаговременностью более точно определяет месяц начала события, но занижают амплитуду максимальной фазы интенсивных событий, а с более высокой заблаговременностью менее точно определяет месяц начала, но более точно – амплитуду максимальной фазы интенсивных событий. События Ла-Нинья хорошо воспроизводятся с небольшой заблаговременностью. Только два события Ла-Нинья (2017 и 2020) из восьми с годовой заблаговременностью были определены верно, включая их пространственный тип.

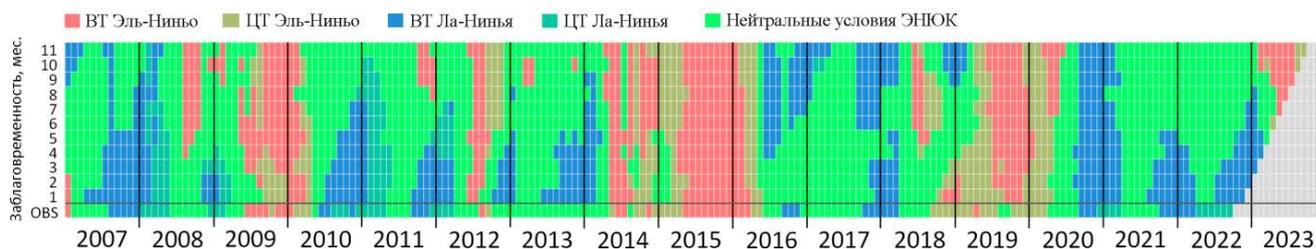


Рисунок 3 – Состояние ЭНЮК с учетом типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья по данным COBESST и модельным расчетам с заблаговременностью до 11 месяцев.

Предложенная модель отличается низкой чувствительностью к ВПП, особенно для индекса Nino 4. С заблаговременностью более 6 месяцев прогностические способности модели превосходят способности динамических моделей Североамериканского мультимодельного ансамбля (рис. 4).

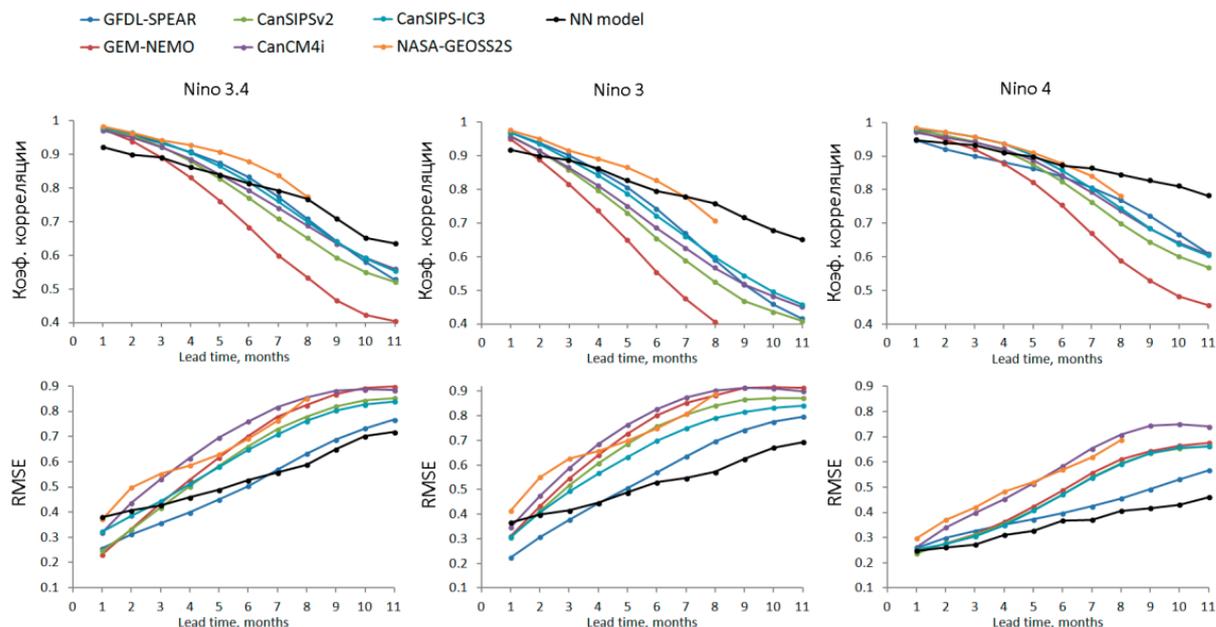


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки прогнозов трехмесячных скользящих средних индексов Nino3.4, Nino3 и Nino4 для предлагаемой модели и ансамбля моделей проекта NMME за период 2007-2017.

Отдельным **подпараграфом 4.2.2** вынесено сравнение предложенной модели с современными моделями искусственного интеллекта, основанными на алгоритмах глубокого обучения. На рис. 5 приведено сопоставление коэффициентов корреляции модельных расчетов и наблюдаемого трехмесячного скользящего среднего индекса Nino 3.4 на контрольных выборках из разных исследований [Ham et al., 2019; Petersik and Dijkstra, 2020; Cachay et al., 2021; Mu et al., 2021; Hu et al., 2021; Wang et al., 2023]. Предложенная модель заметно лучше воспроизводит индекс Nino 3.4 в сравнении со всеми современными моделями глубокого обучения. С заблаговременностью от 5 месяцев навыки предложенной модели заметно выше моделей глубокого обучения, а время эффективного прогноза равно 21-22 месяца, что на 2-4 месяца лучше аналогов. Стоит отметить, что с заблаговременностью до 5 месяцев модель в целом показывает себя хуже большинства моделей глубокого обучения. Предполагается, что это связано с отсутствием в качестве предикторов полей теплосодержания океана.

Анализ часто используемых предикторов проведен в **параграфе 4.3**. Особое внимание уделено сезону май-июнь-июль, за пределами которого динамические модели ощущают влияние ВПП. С заблаговременностью до 3 месяцев отмечена высокая повторяемость предикторов в тропических широтах, что, вероятно, связано интенсификаций совместного влияния событий западных ветров и колебания Маддена – Джулиана [Chiodi et al., 2014; Puy et al., 2016; Liang,

Fedorov, 2021] и аномалиями в объеме накопленной теплой воды в экваториальной части Тихого океана [McPhaden, Yu, 1999; Vecchi, Harrison, 2000; Fedorov et al., 2015]. С заблаговременностью 4-6 месяцев наблюдается увеличение повторяемости индексов Северного полушария и, в частности, индекса меридионального ветра, который, по сути, является индикатором типа атмосферной циркуляции (меридиональный или зональный). Такое поведение предикторов согласуется с предположенной ранее связью Северного полушария с муссонами Индийского океана [Yang, Xu, 1994; Sankar-Rao et al., 1996; Bamzai, Shukla, 1999]. Особое внимание уделяется Североатлантическому колебанию (САК). С заблаговременностью от 3 до 9 месяцев этот предиктор выбирался моделями довольно часто, что подтверждает высказанный ранее тезис о возможном влиянии Северной Атлантики на ЭНЮК посредством передачи климатического сигнала через Евразию [Полонский и др., 2004]. Отмечается заметное увеличение повторяемости областей, характеризующих Южноатлантическое колебание (ЮАК), с заблаговременностью 10-12 месяцев. Роль ЮАК в схеме интенсификации ЭНЮК на сегодня еще не определена, однако предполагается наличие связи САК и ЮАК с задержкой в несколько месяцев.

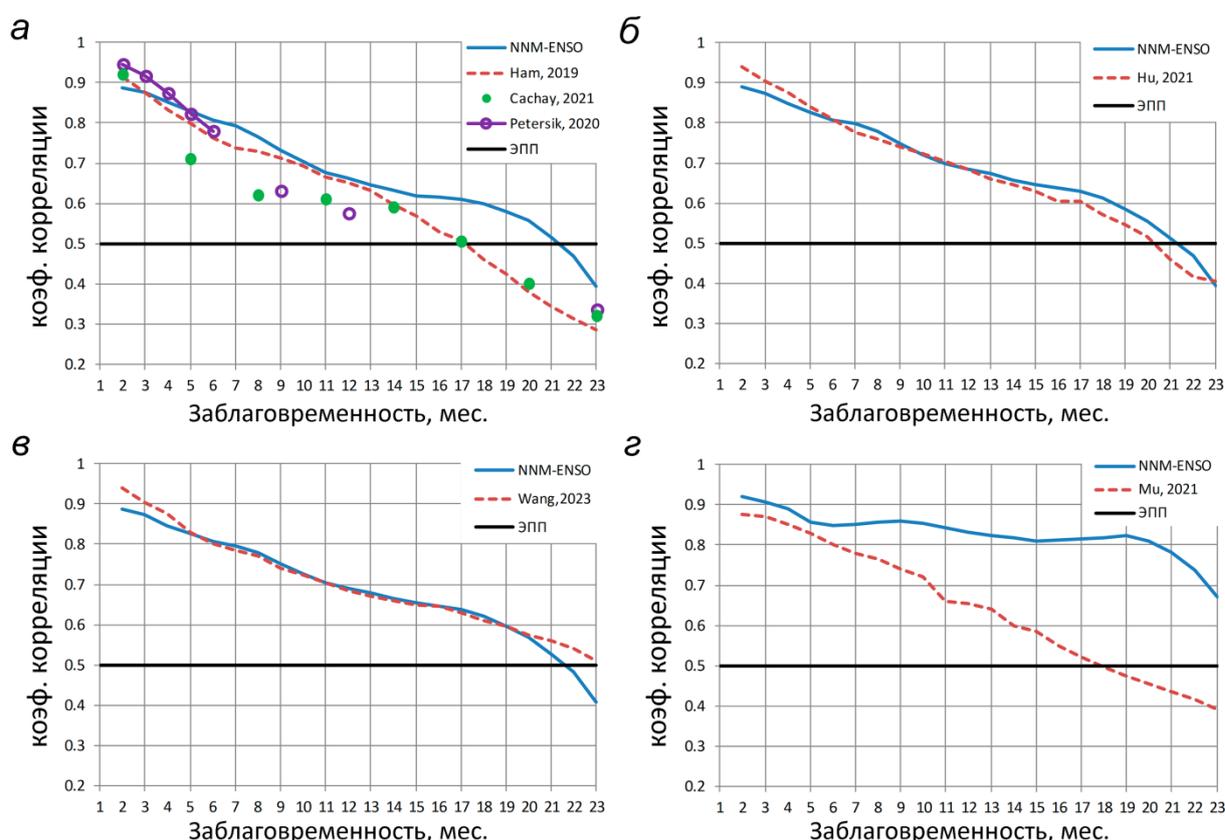


Рисунок 5 – Сравнение способностей прогнозировать трехмесячное скользящее среднее индекса Niño 3.4 моделями глубокого обучения в сравнении с предложенной моделью за временные периоды *а* – 1984-2017гг., *б* – 1982 – 2017гг., *в* – 1982-2020гг., *г* – 2014-2020гг.

В параграфе 4.4 приведен прогноз состояния ЭНЮК на 2023 г., рассчитанный разработанной моделью в 2022 г. Рассчитанный моделью прогноз в ноябре 2022 г [Лубков, 2022] одним из первых в мире предупредил о начале Эль-Ниньо с точностью до месяца. Таким образом, прогноз предлагаемой модели опередил на 4 месяца официальное сообщение ВМО о вероятности наступления этого события. Затем в параграфе приведен прогноз будущего Ла-Нинья, которое может начаться осенью 2024 г и продлится до февраля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Комплексный анализ глобальных полей из современных массивов гидрометеорологических характеристик позволил выбрать набор индексов, характеризующих процессы в системе океан-атмосфера, которые, наряду с известными климатическими индексами, использовались в качестве предикторов при прогностическом моделировании Эль-Ниньо/Ла-Нинья.

2. Разработана модель заблаговременного прогноза среднемесячных аномалий климатических характеристик на основе искусственных нейронных сетей, которая была успешно адаптирована для прогноза явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов. Модель осуществляет последовательный перебор множества конструкций нейронных сетей и выбор 20 наилучших. Ансамбль из отобранных ею 20 конструкций нейронных сетей соответствует прогностической функции модели, которая позволяет обеспечить расчеты с заблаговременностью более 12 месяцев.

3. Предложенная модель хорошо воспроизводит события Эль-Ниньо и их тип и с несколько меньшей заблаговременностью - события Ла-Нинья. На контрольной выборке с годовой заблаговременностью прогноза были спрогнозированы четыре события Эль-Ниньо из пяти с учетом из пространственного типа аномалии. События Ла-Нинья хорошо воспроизводятся с меньшей заблаговременностью: только два события Ла-Нинья (2017 и 2020) из восьми с годовой заблаговременностью были определены верно, включая их пространственный тип. Вероятность верного определения термических условий, характерных для событий Эль-Ниньо, с заблаговременностью до одного года существенно не зависит от количества месяцев заблаговременности прогноза и варьируется от 76 до 83%. В то же время, успешность воспроизведения термических условий Ла-Нинья уменьшается с ростом заблаговременности прогноза от 85 до 31%.

4. Полученная модель обладает минимальной чувствительностью к весеннему порогу предсказуемости, что обеспечивает ее преимущество по сравнению с современными динамическими и статистическими моделями прогноза Эль-Ниньо/Ла-Нинья и позволяет существенно увеличить эффективную заблаговременность прогноза, в особенности теплой фазы ЭНЮК. При этом прогноз состояния ЭНЮК на 2023 г., рассчитанный в ноябре 2022 г. с точностью до месяца успешно показал начало Эль-Ниньо, опередив на несколько месяцев официальный прогноз мировых климатических центров.

Ежемесячные прогнозы состояния ЭНЮК, построенные в рамках расчетов разработанной модели в режиме реального времени доступны на сайте <http://neuroclimate.com/enso.html>

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С. Метод восстановления среднемесячных значений прозрачности воды на примере северо-западной части Черного моря. // Оптика атмосферы и океана, 2016. Т. 29. № 04. С. 343–350. DOI:10.15372/AOO20160413
2. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Прогнозирование индекса Южного колебания // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о земле: СПбГУ, 2017. № 4(62). С. 370–388. DOI:10.21638/11701/spbu07.2017.404
3. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Применение нейронных сетей для модельного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья, включая их типы // Метеорология и гидрология, 2020. №11 С. 111–121
4. Марчукова О.В., **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н. Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана // Вестник СПбГУ. Науки о Земле, 2020. Т. 1. № 1. С. 97–120. DOI: 10.21638/spbu07.2020.106
5. **Лубков А.С.**, Стефанович А.А., Воскресенская Е.Н., Вышкваркова Е.В. Биоклиматические условия на курортах Крыма: состояние и прогноз // Использование и охрана природных ресурсов в России, 2020. № 1(161). С. 60–65
6. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Сухонос О.Ю. Прогноз выпадения осадков в районе Ай-Петри на основе модели искусственной нейронной сети // Водные ресурсы, 2022. Т. 49. № 4. С. 517–526. DOI:10.31857/S0321059622040137
7. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Новый подход к использованию нейронных сетей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Фундаментальная и прикладная климатология, 2023. Т. 9. № 4. С. 432–466. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-432-466
8. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., **Lubkov A.S.**, Yurovsky A.V., Zhuravskiy V.Y., Evstigneev V.P. Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability, 2020. V. 12 (11). P. 4468. DOI:10.3390/su12114468
9. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., **Lubkov A.S.**, Yurovsky A.V. Temporal Variability and Predictability of Intense Cyclones in the Western and Eastern Mediterranean // Atmosphere, 2021. V. 12. P. 1218. DOI: 10.3390/atmos12091218

10. **Lubkov A.S.**, Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. A New Approach to Using Neural Networks for Long-Term El Nino and La Nina Forecasting // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024. V. 60. Suppl. 1. P. S46–S61. DOI:10.1134/S0001433824700555

11. **Lubkov A. S.**, Vyshkvarkova E. V., Voskresenskaya E. N., Shchodro A. E. Forecasting Catastrophic Floods in Crimean Territory // *Water Resources*, 2024. V. 51(6). P. 960–967. DOI:10.1134/S0097807824701197

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство 2021668360. Программа поиска статистических связей «NeuroClim-Correlation» системы комплексного климатического прогнозирования: программа для ЭВМ / **А.С. Лубков** (RU); правообладатель ФГБНУ ИПТС. № 2021667541; заявл. 02.11.2021; опубли. 15.11.2021, Бюл. № 11. 10 Кб.

Другие статьи по теме диссертационной работы, в том числе публикации в сборниках конференций «IOP Conference Series»:

1. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С. Восстановление климатических данных гидрооптических характеристик на основе моделирования // *Системы контроля окружающей среды*, 2013. № 19. С. 162–165.

2. Воскресенская Е.Н., **Лубков А. С.**, Марчукова О.В. Пространственная классификация Эль-Ниньо и условия формирования события 2015 года // *Системы контроля окружающей среды*, 2015. № 2(22). С. 80–90.

3. Марчукова О. В., Воскресенская Е. Н., **Лубков А. С.** Статистический прогноз Эль-ниньо 2015-2016 годов и его верификация // *Системы контроля окружающей среды*, 2016. № 4(24). С. 80–90.

4. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Современная классификация Эль-Ниньо и сопоставление соответствующих климатических откликов в Атлантико-Евразийском регионе // *Системы контроля окружающей среды*, 2017. № 7(27). С. 94–100.

5. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Объективная классификация явлений Эль-Ниньо // *Использование и охрана природных ресурсов в России*, 2017. № 1(149). С. 41–44.

6. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В., Журавский В.Ю. Проявление событий Эль-Ниньо в Черноморском регионе // *Системы контроля окружающей среды*, 2018. № 4 (34). С. 94–101. DOI:10.33075/2220-5861-2018-4-94–101. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-94-101

7. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Прогнозирование наступления событий Эль-Ниньо // Процессы в геосредах, 2018. № 3(17). С. 265–267.
8. Марчукова О.В., Воскресенская Е.Н., **Лубков А.С.** К вопросу о физическом механизме формирования двух типов Ла-Нинья // Процессы в геосредах, 2018. № 3(17). С. 267–268.
9. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Температурные аномалии в Европе в холодный период в связи с ЭНЮК // Системы контроля окружающей среды, 2019. № 2 (36). С. 73–80. DOI:10.33075/2220-5861-2019-2-73-80
10. **Лубков А.С.**, Воскресенская Е.Н. Метод нейронных сетей для климатического прогнозирования водности Чернореченского водохранилища // Системы контроля окружающей среды, 2021. № 2(44). С. 16–28. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-16-28
11. **Лубков А.С.** Научный прогноз: Начнется ли Эль-Ниньо в 2023 году? // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 4(50). С. 143–144.
12. Марчукова О.В., Воскресенская Е.Н., **Лубков А.С.** Явление Ла-Нинья 2020–2021 гг. и его проявления в Европейском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 1(51). С. 7–14. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-1-7-14
13. Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V., Maslova V.N., **Lubkov A.S.** Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2018. V.107. P. 012043. DOI:10.1088/1755-1315/107/1/012043
14. **Lubkov A.S.**, Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2019. V. 386. P. 012040. DOI:10.1088/1755-1315/386/1/012040
15. Marchukova O.V., Voskresenskaya E.N., **Lubkov A.S.** Diagnostics of the La Niña events in 1900–2018 // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020. V. 606. P. 012036 DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012036
16. **Lubkov A.S.**, Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V., Evstigneev V.P. European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020. V. 606. P. 012031. DOI:10.1088/1755-1315/606/1/012031