

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Осипов Александр Михайлович

**МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХ ТИПОВ ЭЛЬ-НИНЬО
И ИХ МОДИФИКАЦИЯ В МЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

– *Гуцина Дарья Юрьевна, доктор географических наук, доцент, профессор РАН*

Официальные оппоненты

– *Семёнов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, и.о. директора Института физики атмосферы РАН*

– *Гулёв Сергей Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. лабораторией взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

– *Воскресенская Елена Николаевна, доктор географических наук, профессор, зам. директора Института природно-технических систем*

Защита диссертации состоится «16» мая 2024 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836)

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2963>

Автореферат разослан «11» апреля 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Явление Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) – это значительная флуктуация температуры поверхности океана (ТПО) в приэкваториальной части тихоокеанского бассейна, являющееся одним из наиболее сильных проявлений изменчивости межгодового масштаба в тропиках. Вызываемые аномалиями ТПО (АТПО) изменения атмосферной циркуляции приводят к возникновению большого числа погодных аномалий как непосредственно в районе формирования данного явления, так и в достаточно удалённых регионах земного шара, вызывая засухи и лесные пожары в одних, а в других провоцируя интенсивные ливневые осадки и наводнения. Эти природные катастрофы приводят к человеческим жертвам и наносят значительный ущерб экономике многих государств. Таким образом, проблема выявления механизма формирования Эль-Ниньо важна не только с точки зрения фундаментального понимания особенностей взаимодействия океана и атмосферы в тропическом тихоокеанском регионе, но и для улучшения возможностей прогнозирования Эль-Ниньо и минимизации возможного ущерба, связанного с последствиями данного явления.

Ключевым вопросом теории Эль-Ниньо является вопрос о механизме формирования данного явления. Исследователями проводились многочисленные попытки дать описание данного механизма. Так, ещё Бьеркнесом [Bjerknes, 1969] была описана система обратных связей в системе океан-атмосфера между интенсивностью пассатов, АТПО и глубиной залегания термоклина, приводящих к росту аномалии ТПО на востоке Тихого океана. Появившаяся в конце XX века группа теорий основана на свободном распространении в океане экваториальных волн. В частности, в рамках теории запаздывающего осциллятора [Suarez and Schopf, 1988] Эль-Ниньо рассматривается как результат эволюции пассатов и океанических волн. Одной из наиболее совершенных является теория «загрузки-разгрузки» [Jin et al., 2007], в которой помимо распространения волн учитывается накопление тепла в океане в районе экватора или отток его во внетропические широты. Перечисленные теории не описывают механизм формирования Эль-Ниньо в полной мере, однако к настоящему моменту в научном сообществе сформировалась более-менее единая точка зрения о процессах, генерирующих Эль-Ниньо, и о процессах, ответственных за его развитие.

Триггером развития Эль-Ниньо являются атмосферные компоненты внутрисезонной тропической изменчивости (ВТИ) – колебания Маддена-Джулиана (Madden-Julian Oscillation – MJO) и экваториальные волны Россби, которые приводят к возникновению так называемого всплеска западных ветров. Он способствует формированию в океане аномалий глубины термоклина, которые распространяются посредством волны Кельвина в восточную часть тихоокеанского бассейна, вызывая рост ТПО у побережья Южной Америки [McPhaden et al., 2006; Hendon et al., 2007; Gushchina and Dewitte, 2011, 2012]. Основными процессами, приводящими к дальнейшему нелинейному росту положительной АТПО, соответствующей Эль-Ниньо, являются процессы в верхнем перемешанном слое океана, в частности, горизонтальная адвекция тепла и вертикальная адвекция аномалий температуры [Jin et al., 2003; Takahashi and Dewitte, 2015; Santoso et al., 2017].

Отдельно следует отметить проблему непохожести Эль-Ниньо друг на друга. В последнее время было установлено [Ashok et al., 2007; Kug et al., 2009], что существует два типа Эль-Ниньо – канонический (Восточнотихоокеанский), при котором максимальные аномалии ТПО отмечаются в восточной части Тихого океана, и Эль-Ниньо Модоки (Центральнотихоокеанский), при котором аномалии смещены в центральную часть тихоокеанского бассейна. Удалённый отклик в режиме погоды на два типа Эль-Ниньо неодинаков, а в некоторых районах земного шара может быть даже противоположным, что обуславливает актуальность исследования специфики каждого из типов Эль-Ниньо, включая механизмы их формирования.

Традиционно разделение Эль-Ниньо на два типа осуществляется на основе анализа аномалий ТПО в географически фиксированных районах экваториального Тихого океана по данным наблюдений и систем реанализов. Однако в климатических моделях структура АТПО может воспроизводиться с некоторым пространственным сдвигом. Более того, в меняющемся климате возможно смещение районов максимальной изменчивости АТПО. Поэтому в данном исследовании рассматривается иная методика разделения ЭНЮК на два режима, предложенная в [Takahashi and Dewitte, 2011; Takahashi and Dewitte, 2016; Takahashi et al., 2018], основанная на разложении аномалий ТПО на эмпирические ортогональные функции. В рамках этого метода учитывается не только локализация, но и интенсивность аномалий.

В последнее время отмечается рост повторяемости Эль-Ниньо с максимумом АТПО в центральной части экваториального Тихого океана, что некото-

рые исследователи [Yeh et al., 2009; Kug et al., 2009] связывают с влиянием глобального потепления. Однако модельные оценки изменений характеристик двух типов Эль-Ниньо в условиях меняющегося климата до конца XXI в. [Lee and McPhaden, 2010; Cai et al., 2014] весьма неоднозначны, что может быть связано с изменением характера обратных связей в системе океан-атмосфера. В связи с этим, важной является проблема оценки модификации процессов в атмосфере и океане, связанных с формированием Эль-Ниньо каждого из двух типов, в условиях более теплого климата.

Объект исследования – два типа явления Эль-Ниньо.

Предмет исследования – характеристики и механизмы формирования аномалий теплосодержания верхнего перемешанного слоя океана для двух типов Эль-Ниньо.

Целью работы является оценка модификации механизма формирования Эль-Ниньо двух типов в современном и будущем климате по данным реанализа и ансамбля климатических моделей.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы **основные задачи исследования**:

- создать алгоритм расчёта составляющих бюджета тепла с разделением Эль-Ниньо на две моды;
- определить вклад различных составляющих бюджета тепла в формирование аномалий теплосодержания верхнего перемешанного слоя океана для двух типов Эль-Ниньо в современном климате;
- оценить воспроизведение составляющих бюджета тепла верхнего перемешанного слоя океана в моделях проекта CMIP5 в современном климате по данным сценария «Historical»;
- оценить модификацию механизмов формирования Эль-Ниньо двух типов в условиях потепления климата по данным ансамбля климатических моделей.

Положения, выносимые на защиту

- Два типа Эль-Ниньо, определенные по интенсивности (сильные/умеренные) или локализации (ВТ/ЦТ) существенно не различаются по характеру процессов, ответственных за рост температуры перемешанного слоя: по данным реанализа ВТ Эль-Ниньо соответствуют сильным событиям, а ЦТ – умеренным. По данным климатических моделей для более длинной выборки отмечаются также умеренные события на востоке Тихого океана и сильные в центре.
- Основные различия механизмов формирования двух типов Эль-Ниньо заключаются в интенсивности нагрева океана под действием различных со-

ставляющих бюджета тепла перемешанного слоя. Сходство проявляется в доминирующем вкладе в повышение температуры вертикальной адвекции на востоке Тихого океана, горизонтальной адвекции тепла – в центре Тихого океана; в уменьшение температуры – отрицательной обратной связи «ТПО – облачность».

- Наиболее успешными в воспроизведении Эль-Ниньо в современном климате являются модели, которые корректно моделируют вклад линейной океанической адвекции, в особенности термоклинной обратной связи.

- Согласно оценкам климатических моделей CMIP5 в будущем климате ожидается ослабление вклада горизонтальной адвекции и усиление роли нелинейной адвекции в формировании Эль-Ниньо вне зависимости от типа явления.

Научная новизна работы

Впервые с использованием более точного реанализа (GLORYS2V4) проведена оценка механизма формирования Эль-Ниньо с его дифференциацией по типам на основе двух классификаций и проведено их сравнение между собой.

Впервые проведена комплексная оценка способности ансамбля климатических моделей воспроизводить процессы, протекающие в перемешанном слое океана, в период формирования Эль-Ниньо двух типов.

Впервые проведена оценка изменений механизма формирования двух типов Эль-Ниньо в условиях потепления климата по данным ансамбля климатических моделей.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритма, предназначенного для оценки процессов в океане, ответственных за формирование двух типов Эль-Ниньо. Результаты исследования будут способствовать лучшему пониманию механизмов формирования Эль-Ниньо, а также повышению точности его моделирования и прогноза, в том числе пространственной локализации и интенсивности Эль-Ниньо, а также связанных с ним экстремальных погодных явлений на региональном и глобальном масштабах.

Личный вклад автора

Все основные научные результаты, представленные в работе, были получены автором лично или в соавторстве с доктором географических наук, профессором кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ Дарьей Юрьевной Гущиной.

Личный вклад автора состоит в самостоятельной разработке алгоритма и проведении всех необходимых расчетов, в частности, создании программного

кода расчёта бюджета тепла перемешанного слоя океана, оценке вклада компонент бюджета тепла в формирование аномалий теплосодержания верхнего перемешанного слоя океана при двух типах Эль-Ниньо в современном и будущем климате.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались соискателем лично и в соавторстве на конференциях: 1-й Всероссийской научной конференции школьников, студентов и молодых ученых «Морские исследования и рациональное природопользование» (Севастополь, Россия, 2018); всероссийской конференции «М.А. Петросянц и отечественная метеорология» (Москва, Россия, 2019); всероссийской научной конференции с международным участием «Экология и климат» (Санкт-Петербург, Россия, 2020).

По теме диссертации опубликовано **пять статей** в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации.

Объём и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 129 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и приложений и содержит 157 страниц компьютерного текста, включая 36 рисунков и 6 таблиц в основном тексте, а также 4 рисунка в приложениях.

Благодарности

Автор диссертации выражает благодарность научному руководителю, д.г.н. Гушиной Дарье Юрьевне за многолетнюю совместную работу и неоценимую помощь в подготовке диссертации; д.г.н. Кислову Александру Викторовичу, д.б.н. Ольчеву Александру Валентиновичу, к.г.н. Платонову Владимиру Сергеевичу, д.г.н. Сурковой Галине Вячеславовне, к.г.н. Железновой Ирине Владимировне и всем сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова за обсуждение результатов работы, ценные советы и замечания. Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Дианскому Николаю Ардальяновичу за научные консультации по ходу выполнения работы, доктору Борису Девитту за предоставление данных реанализа и научные консультации. Автор признателен Лобову Михаилу Анатольевичу и Осипову Дмитрию Михайловичу за техническую помощь при подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, её практическая значимость; показаны научная новизна и личный вклад автора, представлены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации работы, о структуре и объёме диссертации.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена существующим подходам к классифицированию Эль-Ниньо, современным методам оценки вклада различных процессов в формирование Эль-Ниньо.

В **разделе 1.1** введено определение явления Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК), приведена краткая история исследования данного явления. Обозначены основные проблемы, возникающие при изучении данного явления, такие как его нерегулярность, различия в основных характеристиках и др. Рассмотрено среднее климатическое состояние экваториального Тихого океана.

В **разделе 1.2** приведены основные индексы, используемые для характеристики состояния экваториального Тихого океана, а также методики их расчёта.

В **разделе 1.3** приведены основные классификации Эль-Ниньо. Первоначально считалось, что Эль-Ниньо проявляется исключительно в восточной части Тихого океана. Однако затем было обнаружено, что существуют Эль-Ниньо с максимумом АТПО в центре Тихого океана [Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009]; такие Эль-Ниньо было предложено называть «Модоки» или Центральнотихоокеанскими (ЦТ). Более привычный тип Эль-Ниньо с максимумом АТПО на востоке Тихого океана получил название канонического [Rasmusson and Carpenter, 1982] или Восточнотихоокеанского (ВТ). Помимо локализации максимума АТПО, Эль-Ниньо могут различаться с точки зрения интенсивности. В [Takahashi et al., 2011; Takahashi and Dewitte, 2016] было предложено разделять Эль-Ниньо на сильные и умеренные. В рамках данной классификации сильные Эль-Ниньо – это не просто явления с высокими значениями АТПО; для них характерно также значительное нелинейное усиление глубокой конвекции на востоке Тихого океана [Takahashi and Dewitte, 2016].

В **разделе 1.4** приведён обзор теорий, описывающих механизм формирования Эль-Ниньо. Одна из первых теорий была предложена Якобом Бьеркнесом [Bjerknes, 1969]. Она представляет развитие АТПО в экваториальном Тихом океане, как результат действия положительных обратных связей в системе океан-атмосфера между АТПО, интенсивностью пассатов и глубиной залега-

ния термоклина. Теория «запаздывающего осциллятора» [Suarez and Schopf, 1988] основана на распространении свободных волн в океане. Теория «загрузки – разгрузки» [Jin, 1997] связывает цикл ЭНЮК с перераспределением тепла в меридиональном направлении. В работах [Gushchina and Dewitte, 2011, 2012] показано, что ключевую роль в механизме генерации Эль-Ниньо играют возмущения внутрисезонного масштаба в тропической атмосфере, а именно колебания Маддена-Джулиана и экваториальные волны Россби, которые генерируют в атмосфере «всплески западных ветров». Они, в свою очередь возбуждают океаническую волну Кельвина внутрисезонного масштаба, посредством которой аномально глубокий термоклин распространяется из западного в восточный Тихий океан, приводя к возникновению положительной АТПО у берегов Южной Америки.

В разделе 1.5 более подробно рассмотрены механизмы роста положительной аномалии температуры верхнего перемешанного слоя океана при Эль-Ниньо. Эволюция аномалий температуры в экваториальном Тихом океане обеспечивается действием в верхнем перемешанном слое океана двух основных процессов: зональной адвекции и изменениями положения термоклина. Этим процессам соответствует три типа положительных обратных связей [Jin et al., 2006]:

- зональная адвективная связь;
- экмановская связь через интенсивность апвеллинга;
- бьеркнесова связь через глубину термоклина (термоклинная).

Зональная адвективная связь обеспечивается адвекцией средней температуры аномальными зональными течениями ($-u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}$) и проявляется в возникновении аномальных западных ветров в ответ на изначальную положительную АТПО, что приводит к дальнейшему росту температуры.

Экмановская связь ($-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$) проявляется в ослаблении апвеллинга, происходящем в ответ на вызываемое возникновением аномалии температуры ослабление пассатов, что приводит к ослаблению отгона воды на запад у побережья Южной Америки; это, в свою очередь, приводит к ослаблению подъёма холодных глубинных вод и способствует усилению аномалии температуры.

Термоклинная связь ($-\bar{w} \frac{\partial T'}{\partial z}$) характеризуется заглублением термоклина на востоке экваториального Тихого океана в ответ на возникновение аномалии температуры, что приводит к подъёму более тёплой, чем обычно, воды в ходе апвеллинга и дальнейшему росту температуры.

Интенсивность и локализация аномалий ТПО определяется интенсивностью проявления перечисленных процессов в период формирования Эль-

Ниньо. Таким образом, тип самого явления будет определяться соотношением перечисленных процессов. Положительные обратные связи способствуют продолжающемуся росту положительной (или отрицательной в случае Ла-Нинья) АТПО, и должны были бы приводить к постоянному тёплому (холодному) состоянию экваториального Тихого океана. В действительности такого не происходит благодаря действию отрицательных обратных связей, сдерживающих рост аномалии, таких как разгрузка тепла от экватора, связи «ТПО – облачность» и «ТПО – испарение».

Вторая глава посвящена описанию материалов и методики исследования механизмов формирования Эль-Ниньо двух типов. В **разделе 2.1** рассмотрены используемые в работе данные. Для расчёта компонент бюджета тепла использовались месячные данные о потенциальной температуре, зональной и меридиональной компонентах скорости течений океанологического реанализа GLORYS2V4 и 16 климатических моделей проекта CMIP5, согласно [Cai et al., 2018] способных разделять два типа Эль-Ниньо (BCC-CSM1-1, CCSM4, CESM1-BGC, CESM1-CAM5, CMCC-CESM, CMCC-CM, CMCC-CMS, CNRM-CM5, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5B-LR, MIROC5, MRI-CGCM3); также были использованы данные российской модели INM-CM5-0, которая показала себя успешной в воспроизведении двух типов Эль-Ниньо. Вертикальная компонента скорости была рассчитана на основе зональной и меридиональной компонент скорости с помощью уравнения неразрывности. Выбор реанализа GLORYS2V4 обусловлен его высоким пространственным разрешением ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) и высокой степенью согласованности с данными наблюдений [Garric et al., 2017]. Ранее расчётов бюджета тепла перемешанного слоя океана по данному реанализу не проводилось. Для расчёта потока тепла между океаном и атмосферой использовались данные реанализа ERA-Interim о потоках коротковолновой радиации, уходящей длинноволновой радиации, потоках явного и скрытого тепла; ERA-Interim выбран потому, что на основе его данных задаётся атмосферный форсинг для GLORYS2V4.

Раздел 2.2 посвящён описанию критериев выделения явлений Эль-Ниньо. Согласно принятой в мировой практике методике, Эль-Ниньо выделяют на основе значений АТПО в географически фиксированных районах экваториального Тихого океана. В данной работе применялся иной критерий, использовавшийся, например, в [Takahashi and Dewitte, 2016; Carreric et al., 2020], в основе которого лежит анализ главной компоненты (PC1) ЭОФ-разложения

(по эмпирическим ортогональным функциям) поля АТПО в тропическом Тихом океане (10° ю.ш. – 10° с.ш., 120° в.д. – 70° з.д.). В случаях, когда РС1 оказывается выше своего 75-го перцентиля в течение как минимум 5 последовательных месяцев, отмеченное тёплое событие определяется как Эль-Ниньо.

В разделе 2.3 описана методика разделения Эль-Ниньо на два типа согласно двум классификациям. **Первая классификация** разделяет Эль-Ниньо на сильные и умеренные в зависимости от интенсивности явлений. На основе первых двух главных компонент ЭОФ-разложения (РС₁ и РС₂) поля АТПО в тропическом Тихом океане (10° с.ш. – 10° ю.ш., 120° в.д. – 70° з.д.) рассчитываются индексы Е и С, по формулам: $C = \frac{PC_1 - PC_2}{\sqrt{2}}$, $E = \frac{PC_1 + PC_2}{\sqrt{2}}$. Индексы Е и С характеризуют аномальное термическое состояние на востоке (Е-индекс) и в центре (С-индекс) экваториального Тихого океана, описывая две основные моды изменчивости в данном регионе. Эль-Ниньо разделяются на сильные и умеренные на основе значений индекса Е, при этом по данным наблюдений и климатической модели GFDL CM2.1 в [Takahashi et al., 2016] было предложено пороговое значение 1,5–1,8, при превышении которого индексом Е явление следует определять как сильное; в остальных случаях Эль-Ниньо относится к умеренным. Указанное пороговое значение индекса Е было получено с помощью кластерного анализа значений индексов Е и С в месяц кульминации Эль-Ниньо методом k-средних [Hartigan et al., 1979] при числе кластеров k=2. Физический смысл порогового значения заключается в том, что при превышении его индексом Е достигается такой уровень АТПО на востоке Тихого океана, при котором происходит значительное усиление отклика глубокой конвекции и западного напряжения ветра на потепление в данном регионе [Takahashi and Dewitte, 2016]. Таким образом, происходит нелинейное усиление Бьеркнесовой связи, что обеспечивает дальнейшее потепление восточного Тихого океана и возникновение Эль-Ниньо большой интенсивности.

В рамках **второй классификации** Эль-Ниньо разделяются на два типа в зависимости от локализации максимума АТПО. Согласно критерию, предложенному в [Yeh et al., 2009], явление относят к Восточнотихоокеанскому (ВТ)/каноническому типу в случае, когда аномалия ТПО в течение декабря-января-февраля превышает $0,5^\circ\text{C}$ в регионе Niño3 (5° ю.ш. – 5° с.ш., 90° з.д. – 150° з.д.), и при этом больше, чем в регионе Niño4 (5° ю.ш. – 5° с.ш., 160° в.д. – 150° з.д.). При обратном соотношении между аномалиями в указанных регионах Эль-Ниньо относят к Центральнотихоокеанскому (ЦТ)/Мо-

доки типу. В климатических моделях основные моды изменчивости ТПО могут воспроизводиться со значительным пространственным сдвигом [Cai et al., 2018], и при использовании фиксированных регионов Niño3 и Niño4 основная аномалия ТПО может оказаться за их пределами; в таком случае возможно неверное определение типа Эль-Ниньо. Поэтому в данном исследовании применялся критерий, основанный на индексах Е и С, описывающих аномальное состояние восточного и центрального экваториального Тихого океана соответственно. Эль-Ниньо определялось как ВТ когда значение индекса Е превышало значение индекса С в течение как минимум трёх последовательных месяцев, включая месяц кульминации явления; в противоположной ситуации Эль-Ниньо относилось к типу ЦТ. В случаях, когда не отмечалось преобладания одного индекса над другим, явление определялось как смешанное, и далее не рассматривалось в рамках композиционного анализа.

В разделе 2.4 описана методика выделения пространственных структур (мод) АТПО в экваториальном Тихом океане, соответствующих двум основным модам изменчивости, на основе двумерной линейной регрессии поля АТПО на временные ряды индексов Е и С. Полученная Е-мода объясняет большую часть изменчивости АТПО в восточной части Тихого океана (восточнее 120° з.д.), в то время как С-мода имеет максимальную амплитуду в центре Тихого океана.

Раздел 2.5 посвящён описанию уравнения бюджета тепла верхнего перемешанного слоя океана, представленного в виде:

$$\frac{\partial [T']}{\partial t} = ADV_{XY} + ADV_Z + NDH + Q'_{net} + R, \quad (1)$$

где $\frac{\partial [T']}{\partial t}$ – изменения аномалии температуры (°С/месяц), ADV_{XY} , ADV_Z – горизонтальная и вертикальная адвекция температуры соответственно, NDH – нелинейный динамический нагрев, Q'_{net} – аномальный тепловой баланс верхнего слоя океана, R – остаточный член уравнения, представляющий собой невязку уравнения вследствие ошибок расчётов и не учитываемых явным образом процессов. Члены уравнения (1) представляются следующим образом:

$$\frac{\partial [T']}{\partial t} = ADV_{XY} + ADV_Z + NDH + Q'_{net} + R, \quad (2)$$

$$ADV_Z \equiv [-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \bar{w} \frac{\partial T'}{\partial z}], \quad (3)$$

$$NDH \equiv [-u' \frac{\partial T'}{\partial x} - v' \frac{\partial T'}{\partial y} - w' \frac{\partial T'}{\partial z} + \overline{u' \frac{\partial T'}{\partial x}} + \overline{v' \frac{\partial T'}{\partial y}} + \overline{w' \frac{\partial T'}{\partial z}}], \quad (4)$$

где u , v и w – зональная, меридиональная и вертикальная составляющие скорости (м/с). Квадратные скобки соответствуют вертикальному осреднению по

всей толще перемешанного слоя. Горизонтальные черты над членами уравнения соответствуют климатическим средним значениям, вертикальные штрихи соответствуют аномалиям относительно климата. Климатическое осреднение для каждого массива данных проводилось по всему доступному периоду: 1992–2015 гг. для реанализа, 1850–2005 гг. и 2006–2100 гг. для моделей по сценариям Historical и RCP8.5 соответственно.

Для осреднения составляющих бюджета тепла по вертикали в связи с неравномерным шагом сеток координат по глубине проводилась переинтерполяция данных на сетку с равномерным шагом по вертикали.

Также описаны подходы к расчёту адвективных составляющих бюджета тепла в зависимости от типа сетки координат реанализа и океанологического блока каждой из моделей. Вне зависимости от исходной сетки, компоненты скорости и значения градиентов температуры определялись в тех же узлах, что и температура, что позволило применять единую методику для всех моделей.

В разделе 2.6 описаны подходы к определению вертикальной мощности перемешанного слоя океана. Глубина нижней границы перемешанного слоя в данном исследовании принималась постоянной во времени и пространстве и приравнивалась к 50 м. Аналогичный подход применялся в широком ряде исследований, например [Jin et al., 2003; Takahashi and Dewitte, 2015; Santoso et al., 2017; Wang et al., 2019]. Для проверки гипотезы о незначительном влиянии выбора толщины перемешанного слоя на оценки составляющих бюджета тепла по данным реанализа GLORYS2V4 были рассчитаны составляющие бюджета тепла для слоёв мощностью 50 и 100 м, и показано, что значительных различий в величинах и соотношениях компонент уравнения бюджета тепла при использовании указанных двух слоёв не наблюдается.

Раздел 2.7 посвящён описанию расчёта проекций составляющих бюджета тепла на пространственные моды E и C, представленных в виде (на примере моды E):

$$\langle \frac{\partial T'}{\partial t} | E \rangle = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=120^\circ E}^{290^\circ E} \sum_{y=2^\circ S}^{2^\circ N} \left(\frac{\partial T'}{\partial t}(x, y, t) \cdot E(x, y) \right), \quad (5)$$

где $\langle \frac{\partial T'}{\partial t} | E \rangle$ – это проекция каждой из составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана, обозначенных как $\frac{\partial T'}{\partial t}$, на моду E ($E(x, y)$), выраженная в терминах эволюции аномалии температуры ($^\circ\text{C}/\text{месяц}$). N_x , N_y соответствуют числу узлов сетки координат в зональном и меридиональном направлениях в пределах обозначенного региона. Аналогичным образом рассчитывались проекции на моду C. Значения проекций затем были осреднены для эквато-

риального Тихого океана (2° с.ш. – 2° ю.ш., 120° в.д. – 70° з.д.). Наибольший вклад при осреднении по всему экваториальному региону вносят районы с большими значениями пространственных мод, поэтому при расчете проекций для Е-моды более значимыми оказываются процессы на востоке Тихого океана, для С-моды – в центре. Такой подход к оценке бюджета тепла, основанный на анализе районов максимальной изменчивости АТПО, позволяет провести объективную оценку изменений вклада различных процессов в рост аномалий температуры в зависимости от региона Тихого океана. Необходимо подчеркнуть, что районы максимальной изменчивости не привязаны к конкретным географическим координатам, а выделяются на основе анализируемого массива данных. Это позволяет проводить сравнение данных наблюдений с данными моделей, в которых возможен пространственный сдвиг районов максимальной изменчивости АТПО [Kug et al. 2010; Capotondi 2013; Stevenson et al. 2017]. Аналогичным образом решается проблема возможного изменения положения этих районов в будущем климате.

Третья глава¹ посвящена оценке вклада составляющих бюджета тепла в эволюцию аномалий температуры перемешанного слоя океана в современном климате по данным реанализа GLORYS2V4. В **разделе 3.1** проводится определение типов наблюдавшихся за анализируемый период (1992–2015 гг.) восьми явлений Эль-Ниньо по двум классификациям (таблица 1).

В **разделе 3.2** по данным реанализа на основе композиционного анализа проведена оценка вклада компонент бюджета тепла перемешанного слоя океана в формирование двух типов Эль-Ниньо. Проекции анализировались отдельно для двух периодов: фазы зарождения (январь(0) – июль(0)) и фазы развития (июль(0) – январь (1)); индексы в названии периодов обозначают номер года: 0 – год перед кульминацией явления, 1 – год после кульминации.

На рисунке 1 представлены проекции для сильных и умеренных Эль-Ниньо. Рост аномалии температуры наблюдается в течение обеих рассматриваемых фаз явления (зарождения и развития). Линейная океаническая адвекция, представляющая собой сумму горизонтальной (ADV_{XY}) и вертикальной (ADV_Z) адвекции, выступает как основной источник эволюции АТПО в экваториаль-

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Osipov A., Gushchina D. The heat budget of the tropical pacific mixed layer during two types of El Niño based on reanalysis and global climate model data // Atmosphere. 2023. V. 15. № 1, 47. P. 1–18, доля участия 1/2.

Таблица 1.

Типы Эль-Ниньо по двум классификациям по данным реанализа GLORYS2V4

Явление	Тип	
	Сильное/ Умеренное	ВТ/ЦТ
1994–1995	Умеренное	ЦТ
1997–1998	Сильное	ВТ
2002–2003	Умеренное	ЦТ
2004–2005	Умеренное	ЦТ
2006–2007	Умеренное	смешанное
2009–2010	Умеренное	ЦТ
2014–2015	Умеренное	ЦТ
2015–2016	Сильное	смешанное

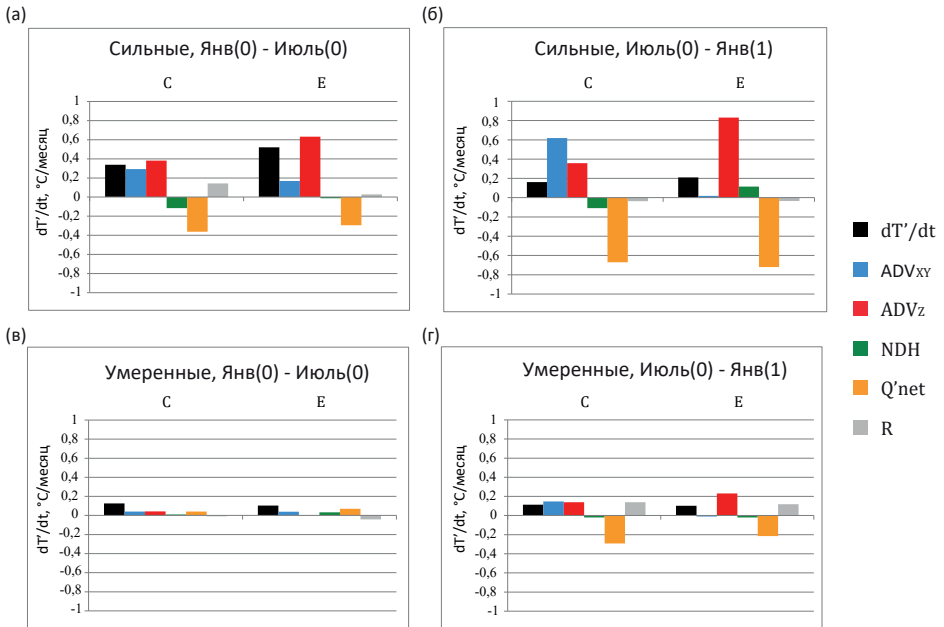


Рис. 1. Проекция составляющих бюджета тепла верхнего перемешанного слоя экваториального (2° ю.ш. – 2° с.ш., 120° в.д. – 70° з.д.) Тихого океана ($^{\circ}\text{C}/\text{месяц}$) на пространственные моды Е и С; композиционные схемы для сильных (верхняя панель) и умеренных (нижняя панель) Эль-Ниньо в период зарождения (январь(0) – июль(0)) (левая панель) и развития (июль(0)–январь(1)) (правая панель) по данным реанализа GLORYS2V4.

ном Тихом океане. При этом горизонтальная адвекция вносит больший вклад в С-моду, максимум интенсивности которой проявляется в центре Тихого океана, а вертикальная – в Е-моду, проявляющуюся преимущественно на востоке. Аномальный тепловой баланс обеспечивает значительный демпинг температуры. В стадии развития Эль-Ниньо эффект ослабления нагрева за счёт потоков тепла на поверхности океана усиливается по сравнению с фазой зарождения, что связано с увеличением балла облачности вслед за ростом ТПО, что приводит к ослаблению радиационного нагрева поверхности океана [Lloyd et al., 2012].

Главное различие между сильными и умеренными Эль-Ниньо состоит именно в амплитуде роста аномалий температуры: для сильных явлений она ожидаемо выше. При сильных Эль-Ниньо также значительно интенсифицируется нагрев за счёт главного для каждой из пространственных мод процесса – вертикальной адвекции в Е-моду (на востоке) и горизонтальной адвекции в С-моду (в центре) экваториального Тихого океана. Показано, что соотношение

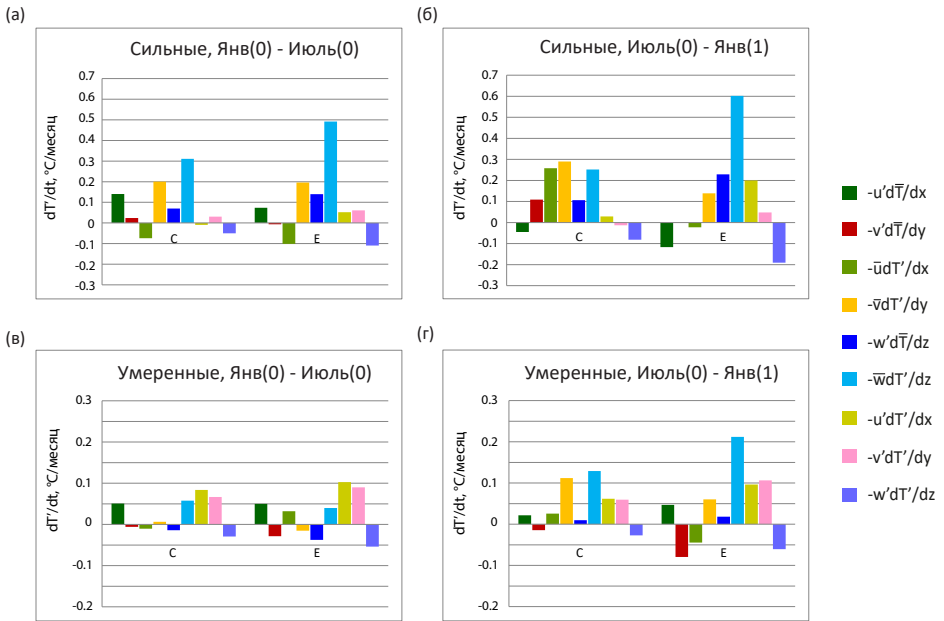


Рис. 2. Проекция адвективных составляющих бюджета тепла верхнего перемешанного слоя экваториального (2° ю.ш. – 2° с.ш., 120° в.д. – 70° з.д.) Тихого океана (°C/месяц) на пространственные моды Е и С; композиционные схемы для сильных (верхняя панель) и умеренных (нижняя панель) Эль-Ниньо в период зарождения (январь(0) – июль(0)) (левая панель) и развития (июль(0)-январь(1)) (правая панель) по данным реанализа GLORYS2V4.

составляющих бюджета тепла при ВТ и ЦТ Эль-Ниньо по данным реанализа практически не отличается от наблюдаемого при сильных и умеренных явлениях соответственно, что частично может быть связано с малым числом анализируемых по данным реанализа явлений.

В разделе 3.3 проведён анализ проекций отдельных адвективных членов в период формирования двух типов Эль-Ниньо и оценён их вклад в эволюцию аномалий температуры перемешанного слоя. Вне зависимости от типа Эль-Ниньо ключевым процессом, обеспечивающим рост аномалии, является термоклинная связь ($-\bar{w}' \frac{\partial T'}{\partial z}$), сильнее проявляющаяся в Е-моде, что обусловлено заглублением термоклина на востоке Тихого океана, где в ходе апвеллинга происходит подъём аномально тёплой воды в условиях Эль-Ниньо. Важную роль играет меридиональная адвекция аномального тепла средними течениями ($-\bar{v}' \frac{\partial T'}{\partial y}$) (особенно в С-модe), формирующаяся за счёт распространения воды с максимальными аномалиями температуры от экватора на север и юг, что приводит к росту температуры в полосе широт 2° ю.ш. – 2° с.ш. Среди адвективных процессов основным источником демпинга положительной аномалии является нелинейная вертикальная адвекция ($-w' \frac{\partial T'}{\partial z}$), поскольку ослабляется подъём аномально тёплой воды к поверхности, в то время как при Эль-Ниньо максимум аномалии температуры находится в основании перемешанного слоя.

Различия между двумя типами Эль-Ниньо проявляются в интенсификации ряда процессов при определённом типе явлений. При сильных Эль-Ниньо значительно возрастает роль Экмановской связи ($-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$) между ТПО и интенсивностью апвеллинга вследствие больших аномалий вертикальных движений. При умеренных Эль-Ниньо сильнее проявляется отток тепла от экватора посредством аномальных меридиональных течений ($-v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}$), в особенности в Е-модe. При умеренных явлениях отмечается повышение вклада зонального ($-u' \frac{\partial T'}{\partial x}$) и меридионального ($-\bar{v}' \frac{\partial T'}{\partial y}$) нелинейных членов в рост температуры вследствие усиления адвекции аномально тёплой воды аномальными течениями. Также при сильных Эль-Ниньо по данным GLORYS2V4 отмечается смещение зоны аномальных течений, направленных на восток, на север от экватора, вследствие чего при оценке по области 2° с.ш. – 2° ю.ш. вклад зональной адвективной связи несколько уменьшается по сравнению с результатами других исследований (например, [Santoso et al., 2017; Pan et al., 2019]).

В разделе 3.4 показано, что оценки бюджета тепла в период Эль-Ниньо по данным GLORYS2V4 согласуются с полученными в предшествующих исследованиях

на основе других реанализов. Такая проверка проводилась вследствие малого числа рассматриваемых по реанализу явлений, а также из-за возможных отклонений в оценках средних климатических значений переменных, рассчитанных по короткому анализируемому периоду. В частности, проведено сравнение адвективных членов с полученными в [Abellán et al., 2017] по данным реанализов GODAS, PEODAS и ORA-S4 в регионе Niño 3.4 для сильных Эль-Ниньо 1997–1998 и 2015–2016 гг. Проекция составляющих бюджета тепла сравнивались с полученными ранее в [Takahashi and Dewitte, 2016] по данным реанализа Drakkar. На основании согласованности оценок бюджета тепла перемешанного слоя с другими более длинными реанализами было принято решение использовать именно реанализ GLORYS2V4 для дальнейшей валидации моделей, вследствие его более детального пространственного разрешения и лучшей согласованности с данными наблюдений *in situ* по сравнению с другими реанализами.

В **четвёртой главе**² проведена оценка механизмов формирования двух типов Эль-Ниньо по данным климатических моделей в современном климате (сценарий Historical). Поскольку в пределах периода, охваченного данными реанализа, событий Эль-Ниньо достаточно мало, для получения результатов с большей статистической достоверностью необходимо использовать долгопериодные реализации климатических моделей атмосферы и океана, что позволяет получить большее число явлений в выборке.

В **разделе 4.1** приведена статистика по числу выделенных в каждой из моделей явлений Эль-Ниньо и их принадлежности к двум типам по обоим рассматриваемым классификациям. Показано, что практически все модели воспроизводят больше сильных явлений по сравнению с умеренными; соотношение между ВТ и ЦТ Эль-Ниньо меняется от модели к модели. Явлений, тип которых однозначно определить невозможно, меньше отмечается в рамках классификации сильные/умеренные, что определило выбор этой классификации в качестве основной при валидации моделей.

Показано, что практически все сильные Эль-Ниньо относятся к типу ВТ; обратное не всегда верно. Среди умеренных Эль-Ниньо в моделях отмечаются явления с различной локализацией максимума АТПО (и в центре, и на востоке

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

Osipov A. , Gushchina D. The heat budget of the tropical pacific mixed layer during two types of El Niño based on reanalysis and global climate model data // Atmosphere. 2023. V. 15. № 1, 47. P. 1–18, доля участия 1/2.

Тихого океана), на долю ЦТ событий приходится, как правило, около половины случаев.

Раздел 4.2 посвящён оценке составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана по данным моделей в период формирования Эль-Ниньо. Для оценки процессов на разных стадиях эволюции Эль-Ниньо рассматривалось два периода аналогично выделенным по реанализу. Все анализируемые модели, кроме MIROC5, адекватно воспроизводят соотношения между основными процессами, демонстрируя ключевой вклад горизонтальной и вертикальной адвекции в рост аномалии температуры. В MIROC5 Эль-Ниньо формируются в первую очередь за счёт нелинейного динамического нагрева, в то время как горизонтальная линейная адвекция препятствует росту положительной аномалии температуры, что противоречит данным наблюдений. Данная модель была исключена из последующего анализа.

В разделе 4.3 на основании композиционного анализа проекций составляющих бюджета тепла на Е и С моды проведена оценка вклада различных процессов в перемешанном слое океана в эволюцию аномалии температуры в период формирования Эль-Ниньо двух типов по данным ансамбля климатических моделей. На основе сравнения полученных результатов с данными GLORYS2V4 осуществлялась валидация моделей с точки зрения их способности воспроизводить основные процессы, ответственные за рост аномалии температуры в условиях Эль-Ниньо. Показано, что ряд моделей недооценивает вклад океанической адвекции, в особенности вертикальной, в рост температуры. На основании проведенной валидации были определены модели, лучше всего воспроизводящие основные особенности механизма формирования Эль-Ниньо двух типов: CCSM4, CESM1-BGC, CMCC-CMS, CNRM-CM5, GFDL-ESM2M и IPSL-CM5B-LR. Критерии, применявшиеся для оценки успешности моделей, приведены в таблице 2. В качестве ключевого критерия рассматривалось корректное воспроизведение ведущего вклада вертикальной адвекции (преимущественно за счёт термоклинной связи) в формирование положительной аномалии температуры.

На данном этапе было также проведено сравнение составляющих бюджета тепла для композитов двух типов Эль-Ниньо, выделенных по двум классификациям. Даже несмотря на неполное совпадение двух классификаций между собой, значительных различий в оценках вклада составляющих бюджета тепла в формирование сходных типов Эль-Ниньо (сильных и ВТ; умеренных и ЦТ) выявлено не было. Таким образом, две классификации практически экви-

Таблица 2.

Оценка успешности воспроизведения процессов в верхнем 50-метровом слое океана анализируемыми моделями. Плюсы соответствуют высокой степени согласованности с наблюдениями (два плюса – наибольшая согласованность), минусы – её отсутствию. Цветом выделены наиболее значимые для отбора параметры: зелёным цветом – высокая согласованность с наблюдениями (тёмно-зелёным – наилучшая), розовым – низкая согласованность с наблюдениями (тёмно-розовым – наименьшая). Жирным шрифтом выделены отобранные модели

Модель	Доминирующий вклад линейной адвекции	Вклад ADVz	Термоклинная связь	Экмановская связь	Зональная адвективная связь	$(-\bar{v} \frac{\partial T'}{\partial y})$	Нелинейные члены
BCC-CSM1-1	-	-	-	+	+	±	±
CCSM4	+	+	++	+	+	+	-
CESM1-BGC	+	+	++	+	++	+	-
CESM1-CAM5	+	-	+	+	+	+	-
CMCC-CESM	+	-	±	+	+	+	-
CMCC-CM	±	+	++	+	+	+	+
CMCC-CMS	+	+	++	+	+	++	-
CNRM-CM5	+	+	++	+	+	+	-
FIO-ESM	-	±	++	+	+	+	-
GFDL-CM3	±	±	+	+	+	+	-
GFDL-ESM2M	+	+	+	+	++	++	+
GISS-E2-H	±	-	±	+	+	+	+
GISS-E2-R	-	-	+	+	±	+	-
INM-CM5-0	±	±	-	±	+	±	-
IPSL-CM5B-LR	+	+	++	+	++	+	++
MRI-CGCM3	+	±	++	+	+	+	++

валентны друг другу. Для анализа механизма формирования Эль-Ниньо в современном климате по данным моделей использовалось разделение явлений на сильные и умеренные, поскольку для данной классификации характерно более чёткое разделение явлений на типы.

В разделе 4.4 проведено сравнение механизмов формирования сильных и умеренных Эль-Ниньо по данным моделей и реанализа (рисунок 3). В главе 3 было показано, что значения остаточного члена уравнения бюджета тепла R , как правило, невелики по сравнению с потоками тепла Q'_{net} . Из-за использования разных источников данных для задания атмосферного форсинга и различных способов его усвоения в моделях может значительно различаться достоверность воспроизведения потоков тепла. Поскольку основной фокус при оценке моделей был сделан на оценке океанической адвекции, для упрощения

расчётов члены R и Q'_{net} были объединены в остаточный член Res , описывающий суммарный вклад всех неадвективных процессов. По данным моделей на основании анализа большей выборки событий каждого типа подтверждены основные выводы, полученные по данным реанализа:

- в период формирования сильных Эль-Ниньо по сравнению с умеренными в каждом из регионов экваториального Тихого океана возрастает интенсивность доминирующего здесь процесса (горизонтальной адвекции в центре, вертикальной адвекции на востоке Тихого океана);
- основные различия в механизмах формирования сильных и умеренных Эль-Ниньо проявляются в амплитуде изменений аномалии температуры под воздействием компонент бюджета тепла, при этом соотношение между вкла-

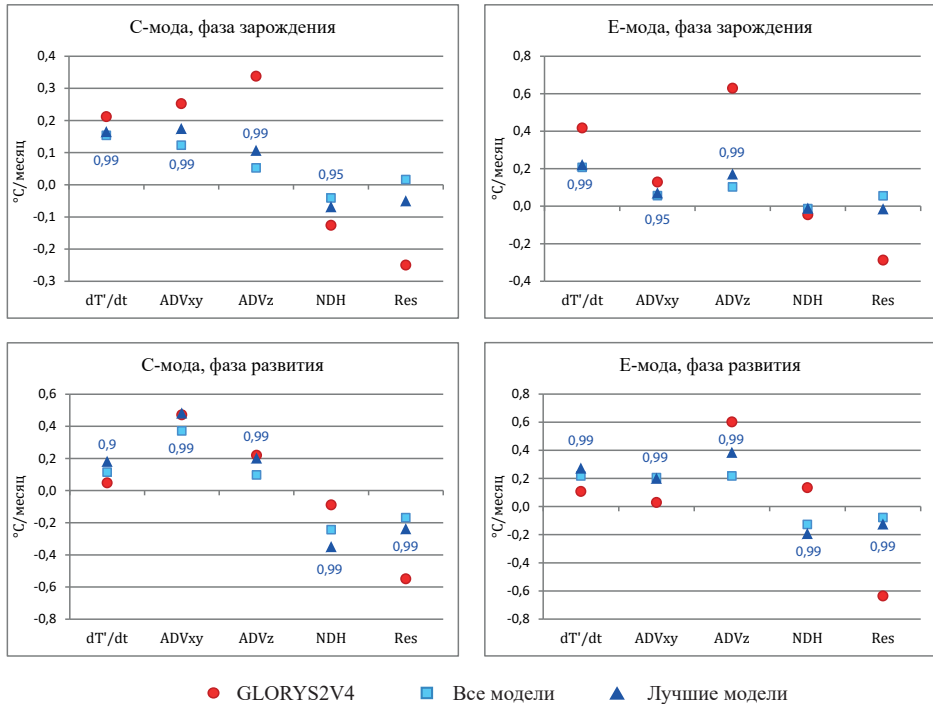


Рис. 3. Разности проекций составляющих бюджета тепла ($^{\circ}\text{C}/\text{месяц}$) в экваториальном Тихом океане (2° с.ш. – 2° ю.ш., 120° в.д. – 70° з.д.) между сильными и умеренными Эль-Ниньо в современном климате для фаз зарождения и развития. Красные круги соответствует реанализу, голубые квадраты – полному ансамблю моделей, синие треугольники – ансамблю лучших шести моделей. Цифрами указана доверительная вероятность разностей, полученных по полному ансамблю моделей, оценённая по парному t-критерию Стьюдента; отсутствие цифры указывает на отсутствие значимых различий на уровне доверительной вероятности 0,9.

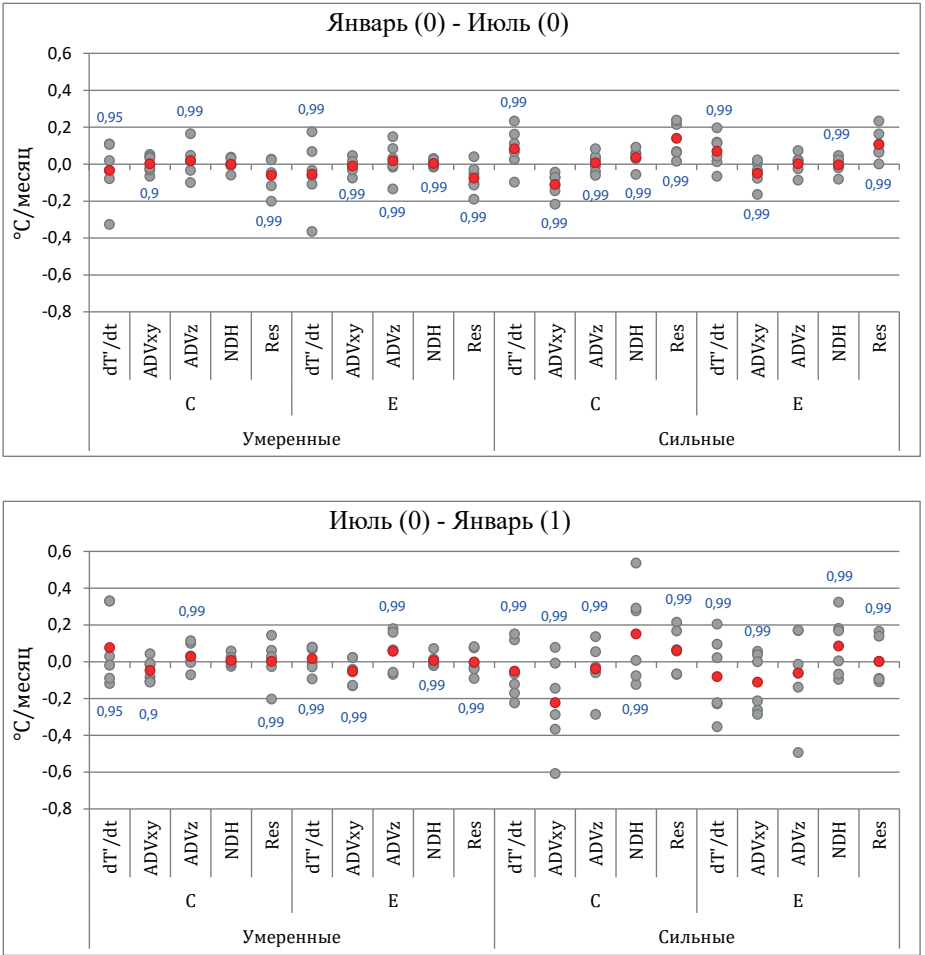


Рис. 4. Разности проекция составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана в будущем и современном климате для фазы зарождения (сверху) и развития (снизу) Эль-Ниньо по данным ансамбля шести климатических моделей. Серые круги соответствует отдельным моделям, красные – средним по ансамблю значениям. Цифрами указана доверительная вероятность разностей, полученных по полному ансамблю моделей, оценённая по парному t-критерию Стьюдента; отсутствие цифры указывает на отсутствие значимых различий на уровне доверительной вероятности 0,9.

дами различных компонент существенно не изменяется между сильными и умеренными событиями.

В **пятой главе** представлены результаты оценки модификации механизмов формирования двух типов Эль-Ниньо в условиях потепления климата по данным климатических моделей. В **разделе 5.1** по данным отобранных ранее ше-

сти климатических моделей представлена оценка изменения статистических характеристик Эль-Ниньо в будущем климате (сценарий RCP8.5). В целом в XXI в. отмечается увеличение повторяемости Эль-Ниньо по сравнению с современным климатом. Отмечается увеличение повторяемости сильных, и снижение повторяемости умеренных Эль-Ниньо; для соотношения между ЦТ и ВТ явлениями зависимости от роста глобальной температуры не выявлено. Отмечено увеличение доли сильных явлений с максимумом АТПО за пределами восточного Тихого океана.

В разделе 5.2 приведены оценки проекций составляющих бюджета тепла для двух типов Эль-Ниньо в моделях по данным сценария RCP8.5. Показано, что в будущем климате сохраняются характерные для современных условий особенности распределения составляющих бюджета тепла в период формирования и развития сильных и умеренных Эль-Ниньо, в частности, ключевая роль вертикальной адвекции в Е-моде и горизонтальной адвекции в С-моде, а также усиление демпинга температуры за счёт связи «ТПО-облачность» по мере развития Эль-Ниньо.

Раздел 5.3 посвящён оценке модификации механизмов формирования сильных и умеренных Эль-Ниньо в условиях потепления климата. Для этого рассчитаны разности проекций составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана между будущим и современным климатом (рисунок 4); статистическая значимость полученных разностей оценивалась при помощи парного *t*-критерия Стьюдента. В целом в будущем климате отмечается ослабление вклада горизонтальной адвекции, что проявляется в основном для сильных явлений, и лучше выражено в С-моде. Для вертикальной адвекции модельные оценки не столь однозначны, при этом прогнозируется увеличение вклада термоклинной связи в рост аномалий температуры. При сильных Эль-Ниньо отмечается ускорение развития положительной аномалии под действием NDH, однако оно не проявляется во всех моделях. Большая амплитуда таких изменений в целом характерна для сильных Эль-Ниньо по сравнению с умеренными. Прогнозируется также изменение динамики роста аномалии температуры: для умеренных Эль-Ниньо он будет происходить позднее, чем в современных условиях, для сильных, напротив, сместится в фазу зарождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **заключении** диссертации по результатам исследования механизмов формирования двух типов Эль-Ниньо сформулированы следующие выводы:

1. Механизмы формирования соответствующих типов Эль-Ниньо из разных классификаций (умеренных и ЦТ; сильных и ВТ) не имеют значительных отличий друг от друга. При этом полного соответствия между классификациями по данным как наблюдений, так и климатических моделей, не отмечается: хотя сильные явления в большинстве случаев совпадают с ВТ, обратное не всегда верно; среди умеренных отмечаются явления с различной локализацией максимума АТПО.

2. Вне зависимости от типа Эль-Ниньо основной вклад в генерацию положительной аномалии температуры перемешанного слоя вносят адвективные процессы, причём преобладает вклад линейной адвекции. На востоке экваториального Тихого океана ключевым процессом является вертикальная адвекция, что обеспечивается более сильным действием положительных обратных связей: термоклинной (через заглубление термоклина) и Экмановской (через ослабление апвеллинга); в центре Тихого океана преобладает вклад горизонтальной адвекции за счёт усиления здесь зональной адвективной обратной связи, а также переноса тепла аномальными меридиональными течениями. Нелинейная адвекция не играет значительной роли в формировании положительной аномалии температуры. Тем не менее, горизонтальные нелинейные члены способствуют некоторому росту температуры, а вертикальный нелинейный член, напротив, замедляет нагрев. Значительный вклад в эволюцию аномалии температуры вносит демпинг положительной аномалии за счёт отрицательной обратной связи «ТПО – облачность».

3. Механизмы формирования двух типов Эль-Ниньо (сильных и умеренных) различаются преимущественно с точки зрения скорости роста аномалий температуры. Для сильных Эль-Ниньо характерна более высокая амплитуда нагрева/охлаждения, обеспечиваемого действием составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана. Соотношения между компонентами бюджета тепла при сильных и умеренных явлениях меняются незначительно. Наиболее сильные различия прослеживаются в интенсивности нагрева, связанного с линейной океанической адвекцией, которая значительно возрастает в период формирования сильных Эль-Ниньо по сравнению с умеренными. При этом отмечается пространственная неоднородность этих различий: на востоке экваториального

Тихого океана они обеспечиваются в первую очередь за счёт вертикальной адвекции, в центре ключевая роль достаётся горизонтальной адвекции. Таким образом, при сильных Эль-Ниньо в каждой из пространственных мод происходит усиление действия доминирующей в ней компоненты адвекции.

4. Оценка вклада различных составляющих бюджета тепла верхнего перемешанного слоя позволила выявить модели, наилучшим (наиболее близким к реанализу) образом воспроизводящие механизмы формирования сильных и умеренных Эль-Ниньо. К числу лучших относятся те модели, в которых успешно воспроизводится ведущий вклад линейной океанической адвекции в формирование положительной аномалии температуры, с преобладанием в Е-моде вертикальной адвекции, в первую очередь за счёт положительной термоклинной обратной связи. В число таких моделей входят CCSM4, CESM1-BGC, CMCC-CMS, CNRM-CM5, GFDL-ESM2M и IPSL-CM5B-LR.

5. В будущем климате согласно данным климатических моделей отмечается рост доли сильных Эль-Ниньо. Ожидается также повышение доли ВТ Эль-Ниньо, однако это подтверждается не всеми анализируемыми моделями.

6. В условиях потепления климата, несмотря на меньшее соответствие двух классификаций между собой, механизмы формирования соответствующих типов Эль-Ниньо (умеренных и ЦТ; сильных и ВТ) по-прежнему не имеют значительных различий. Это позволяет использовать одну из классификаций для характеристики различий между двумя типами Эль-Ниньо.

7. Механизмы формирования двух типов Эль-Ниньо (сильных и умеренных) в будущем климате значительно не изменятся. Согласно данным выбранных климатических моделей, соотношения между составляющими бюджета тепла перемешанного слоя океана в период формирования Эль-Ниньо сохраняются. Однако в будущем климате ожидаются изменения амплитуды компонент бюджета тепла, в частности, ослабление вклада в рост аномалий температуры горизонтальной линейной адвекции, в то время как роль нелинейной адвекции и неадвективных процессов в генерации Эль-Ниньо повысится. Более сильные изменения отмечаются для сильных Эль-Ниньо. Тем не менее, среди моделей отмечается значительный разброс в оценках изменения амплитуды аномалий температуры в будущем климате.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Осипов А.М.** Эль-Ниньо 2015–2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии / Осипов А.М., Гущина Д.Ю. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 3. С. 54–81. 3,23 п.л. ИФ РИНЦ = 0.85, доля участия 1/2.

2. **Osipov A.** Effects of the 2015–2016 El Niño event on energy and CO₂ fluxes of a tropical rainforest in central Sulawesi / Gushchina D., Heimsch F., Osipov A., June T., Rauf A., Kreilein H., Panferov O., Olchev A., Knohl A. // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. № 2. P. 183–196. 1,62 п.л. SJR = 0.31, доля участия 1/9.

3. **Osipov A.** Effect of various types of ENSO events on moisture conditions in the humid and sub-humid tropics / Gushchina D., Zheleznova I., Osipov A., Olchev A. // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 12, 1354. P. 1–24. 2,77 п.л. SJR = 0.66, доля участия 1/4.

4. **Осипов А.М.** Механизм формирования двух типов Эль-Ниньо в современном климате / Осипов А.М., Гущина Д.Ю. // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2021. № 1. С. 128–134. 0,81 п.л. SJR = 0.20, доля участия 1/2.

5. **Osipov A.** The heat budget of the tropical pacific mixed layer during two types of El Niño based on reanalysis and global climate model data / Osipov A., Gushchina D. // *Atmosphere*. 2023. V. 15. № 1, 47. P. 1–18. 2,08 п.л. SJR = 0.66, доля участия 1/2.
