

УДК 551.50

А.М. Осипов¹, Д.Ю. Гущина²

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХ ТИПОВ ЭЛЬ-НИНЬО В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ

По данным реанализа GLORYS2v4 на основании расчета бюджета тепла верхнего перемешанного слоя океана проведена оценка вклада горизонтальной и вертикальной адвекций и нелинейного динамического нагрева в формирование положительной аномалии температуры поверхности океана при двух типах Эль-Ниньо. Выделены процессы в океане, способствующие росту аномалии температуры воды при умеренных (Модоки) и сильных (канонические) Эль-Ниньо в современных климатических условиях (1992–2015 гг.). Установлено, что вне зависимости от типа Эль-Ниньо горизонтальная и вертикальная адвекции приводят к росту теплосодержания верхнего перемешанного слоя тропического Тихого океана в фазу развития Эль-Ниньо. На востоке Тихого океана основной вклад в формирование аномалий теплосодержания при обоих типах Эль-Ниньо вносит вертикальная адвекция, а в центральной части – горизонтальная. Показано, что основное различие механизма формирования аномалий теплосодержания верхнего перемешанного слоя океана между типами Эль-Ниньо заключается в интенсивности роста аномалии температуры. При умеренных Эль-Ниньо более интенсивный нагрев происходит в центре Тихого океана вследствие действия процессов, связанных как с зональной, так и с меридиональной адвекцией; при сильных Эль-Ниньо значительно повышается вклад процессов, связанных с вертикальной адвекцией, особенно на востоке Тихого океана. Нелинейный динамический нагрев не способствует росту положительной аномалии температуры или вовсе приводит к ее уменьшению.

Ключевые слова: каноническое и Модоки Эль-Ниньо, механизм генерации Эль-Ниньо, бюджет тепла перемешанного слоя океана

Введение. Одной из ключевых проблем, возникающих при изучении и прогнозировании явлений Эль-Ниньо, является их непохожесть друг на друга. Долгое время считалось, что при Эль-Ниньо аномалии температуры поверхности океана (АТПО) сосредоточены на востоке тропического Тихого океана у побережья Южной Америки [Rasmusson, Carpenter, 1982]. Однако позднее было показано, что в ряде случаев максимум положительной АТПО отмечается в центральной части Тихого океана [Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009]. Для событий такого типа было предложено название «Эль-Ниньо Модоки», тогда как первый тип Эль-Ниньо получил название «канонического».

Важность изучения двух типов Эль-Ниньо заключается в том, что для каждого из них характерна своя схема удаленного отклика, возникающих как следствие Эль-Ниньо аномалий режима погоды, в первую очередь приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, в различных районах земного шара [Железнова, 2015].

Таким образом, на настоящий момент актуальной является проблема не просто прогнозирования Эль-Ниньо, а определения типа развивающегося явления. Для решения этой задачи необходимо понимание особенностей механизма формирования каждого из типов Эль-Ниньо.

Изменение температуры верхнего слоя океана может быть описано с помощью бюджета тепла перемешанного слоя, включающего в себя процессы адвекции, потоки тепла и процессы перемешивания и вовлечения на нижней границе перемешанного слоя [Jin et al., 2003]. Интенсивность и локализация АТПО (по сути, тип Эль-Ниньо) определяются соотношением интенсивности этих процессов в верхнем перемешанном слое океана в период формирования и развития Эль-Ниньо. При этом основными процессами, приводящими к возникновению положительной АТПО, т. е. к формированию условий Эль-Ниньо, являются горизонтальная и вертикальная адвекции аномалий температуры [Jin et al., 2003; An, Jin, 2004; Takahashi, Dewitte, 2015; Santoso et al., 2017]. Рост АТПО обеспечивается тремя типами положительных обратных связей [Jin et al., 2006]. Первая из них – зональная адвективная обратная связь – проявляется в возникновении аномальных западных ветров и направленных на восток аномальных течений в океане в ответ на формирование изначальной положительной АТПО на востоке Тихого океана, что приводит к распространению теплых вод на восток и дальнейшему повышению температуры. Экмановская обратная связь проявляется в так называемой Экмановской накачке в океане: начальная положительная аномалия ТПО вызывает ослабление пассатов, то есть западную аномалию ветра,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, аспирант; e-mail: sashaosipov@list.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: dasha155@mail.ru

которая способствует сходимости океанических потоков к экватору и накоплению водных масс в приэкваториальной зоне, что, в свою очередь, вызывает аномальные нисходящие движения, подавляющие апвеллинг. В результате в зоне экватора холодные глубинные воды поднимаются менее интенсивно, и отмечается дальнейший рост АТПО. Бьеркнесова обратная связь [Bjerknes, 1969] проявляется в возникновении западной аномалии ветра в приэкваториальной зоне Тихого океана в ответ на положительную АТПО на востоке Тихого океана и уменьшение западно-восточного градиента температуры и давления. Западная аномалия ветра создает условия для заглубления термоклина на востоке Тихого океана и в результате апвеллинга приводит к подъему у побережья Южной Америки более теплых вод перемешанного слоя. Вследствие этого отмечается дальнейший рост АТПО.

Бюджет тепла перемешанного слоя рассматривался ранее для анализа формирования АТПО в условиях Эль-Ниньо, однако в большинстве исследований не учитывалась дифференциация типов данного явления [Kim et al., 2015; Santoso et al., 2017]. В [Takahashi, Dewitte, 2016] анализировался вклад составляющих бюджета тепла в формирование двух типов Эль-Ниньо по данным реанализа Drakkar, имеющего меньшую точность и худшие схемы усвоения данных наблюдений, чем реанализ, используемый в данной работе.

Текущее исследование служит основой для дальнейшей оценки бюджета тепла перемешанного слоя океана в современном и будущем климате по данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP5 для двух типов Эль-Ниньо. В некоторых предшествующих работах [Santoso et al., 2017] анализ бюджета тепла перемешанного слоя океана по модельным данным проводился для фиксированных районов Niño3 и Niño4. Однако климатические модели воспроизводят пространственную структуру поля ТПО, существенно отличающуюся по локализации аномалий от реально наблюдаемой, особенно в будущем климате [Cai et al., 2018]. При использовании фиксированных в пространстве областей Niño3 и Niño4 велика вероятность того, что районы максимальной изменчивости АТПО в модели окажутся за пределами Niño3 и Niño4. Поэтому в настоящем исследовании для разделения Эль-Ниньо на два типа используется не традиционная методика, основанная на анализе АТПО в фиксированных районах, а новый метод, базирующийся на пространственной структуре АТПО [Takahashi et al., 2011], что позволяет осуществлять сравнение результатов по данным наблюдений и моделирования с учетом сдвига максимума аномалий в моделях.

Таким образом, целью данного исследования является оценка вклада составляющих бюджета тепла в формирование двух типов Эль-Ниньо в условиях современного климата по данным более точного реанализа GLORYS2v4.

Материал и методы исследований. Для анализа вклада горизонтальной и вертикальной адвек-

ций, а также нелинейного динамического нагрева в формирование связанных с циклом ЭНЮК аномалий ТПО использовались данные реанализа GLORYS2V4 (Global Ocean Reanalysis and Simulation) прогностического центра MERCATOR-Ocean о зональной и меридиональной компонентах скорости, а также о температуре воды в пределах верхнего 50-метрового слоя океана. Вертикальная компонента скорости была рассчитана на основе зональной и меридиональной компонент через дивергенцию (на основе уравнения сохранения массы). Горизонтальный шаг сетки координат составляет $0,25 \times 0,25^\circ$, по вертикали 75 уровней, из которых 18 приходится на верхний 50-метровый слой.

Выбор реанализа GLORYS2V4 помимо высокого пространственного разрешения обусловлен достаточно высокой степенью согласованности с данными наблюдений, что достигается системой ассимиляции и коррекции данных при наличии достаточного количества данных наблюдений [Quality information ..., 2019].

Для выявления океанических процессов, способствующих формированию связанных с Эль-Ниньо аномалий ТПО, был рассмотрен бюджет тепла верхнего 50-метрового слоя океана. Выбор слоя обусловлен тем, что в данном регионе уровенная поверхность 50 м достаточно хорошо совпадает с нижней границей перемешанного слоя океана [An, Jin, 2004]. Глубина нижней границы перемешанного слоя принималась постоянной во времени и в пространстве. Аналогичный подход применялся в [Jin et al., 2003; Takahashi, Dewitte, 2016; Santoso et al., 2017; Wang et al., 2019]. Использование фиксированной глубины термоклина позволяет значительно упростить расчеты, т.к. пропадает необходимость учета изменения количества воды в пределах перемешанного слоя; при этом соотношение составляющих бюджета тепла в зависимости от мощности выбранного слоя значительно не меняется [Wang et al., 2019]. Более того, климатические модели имеют вертикальный шаг 10 м, и значения океанологических характеристик относятся ко всему 10-метровому слою в целом, следовательно, точно определить положение термоклина не представляется возможным.

Бюджет тепла верхнего перемешанного слоя океана может быть выражен следующим образом [Jin et al., 2003; Takahashi, Dewitte, 2016]:

$$\frac{\partial [T']}{\partial t} = ADV_{xy} + ADV_z + NDH + Q_{net} + R, \quad (1)$$

где T' – аномалия температуры. Квадратные скобки соответствуют осреднению по верхнему перемешанному слою океана. В формирование аномалий теплосодержания основной вклад вносят адвекция тепла и нелинейный динамический нагрев (NDH). Член Q_{net} описывает потоки тепла на поверхности океана, R представляет собой величину, складывающуюся из процессов перемешивания, не описанных явно в рассматриваемом уравнении, и ошибок расчетов и аппроксимаций, представляющих собой невязку замыкания баланса.

Адвекция разделена на горизонтальную $(ADV)_{xy}$ и вертикальную $(ADV)_z$ составляющие:

$$ADV_{xy} = \left[-u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \bar{u} (\partial T') - \bar{v} (\partial T') \right], \quad (2)$$

$$ADV_z = \left[-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \bar{w} (\partial T') \right]. \quad (3)$$

T , u , v и w представляют собой температуру воды, зональную, меридиональную и вертикальную составляющие скорости движения, соответственно. Черты над членами уравнения означают средние климатические значения, штрихи – аномалии относительно них. Аномалии рассчитывались путем вычитания из значения параметра для конкретного месяца среднего за период 1992–2015 гг. значения для данного месяца. Нелинейный динамический нагрев согласно [Takahashi, Dewitte, 2016] представлен в виде:

$$NDH = \left[-u' \frac{\partial T}{\partial x} - v' \frac{\partial T}{\partial y} - w' \frac{\partial T}{\partial z} + u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right]. \quad (4)$$

Традиционно разделение Эль-Ниньо на два типа (канонический и Модоки) осуществляется на основе пространственного анализа аномалий ТПО. Эль-Ниньо выделяется, когда средние значения АТПО в регионах Niño3 (5° ю. ш. – 5° с. ш., 90° з. д. – 150° з. д.) и Niño4 (5° ю. ш. – 5° с. ш., 160° в. д. – 150° з. д.) превышают 0,5°C [Yeh et al., 2009]. Если при этом АТПО в течение декабря–февраля превышает 0,5°C и при этом в Niño3 больше, чем в Niño4, то событие относится к каноническому типу, если АТПО выше в Niño4, то к Эль-Ниньо Модоки. Однако описанная выше методика разделения Эль-Ниньо на два типа имеет четкую привязку к регионам, в которых аномалии ТПО определяются по данным наблюдений. В моделях пространственная структура АТПО может воспроизводиться с некоторым пространственным сдвигом, при этом значительная доля изменчивости может проявляться за пределами регионов Niño3 и Niño4.

В данном исследовании использовалась иная методика разделения Эль-Ниньо на типы, предложенная в [Takahashi, Dewitte, 2011; Takahashi and Dewitte, 2016; Takahashi et al., 2019]. Разделение Эль-Ниньо на две моды, как и в описанном выше случае, базируется на локализации максимума аномалии ТПО. Первая мода включает в себя явления Ла-Нинья и умеренные Эль-Ниньо, при которых максимум аномалии расположен в центре Тихого океана. Второй моде соответствуют сильные канонические Эль-Ниньо с максимумом аномалий на востоке Тихого океана. Разделение Эль-Ниньо на две моды осуществляется на основе пространственно-временного анализа АТПО. Поле АТПО раскладывается по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). На основе главных компонент ЭОФ-разложения ($PC1$ и $PC2$) рассчитываются временные

ряды индексов для двух типов Эль-Ниньо. Однако в работе [Takahashi et al., 2011] показано, что сами по себе ряды $PC1$ и $PC2$ не являются репрезентативными с точки зрения разделения Эль-Ниньо на два типа. На основании анализа гистограммы рассеяния в координатах $PC1/PC2$ было предложено выражать индексы Эль-Ниньо через линейную комбинацию временных рядов основных компонент первых двух мод ЭОФ разложения:

$$C = \frac{PC_1 + PC_2}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

$$E = \frac{PC_1 - PC_2}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где E -индекс соответствует каноническому Эль-Ниньо, а C -индекс – Эль-Ниньо Модоки. Однако в последующих работах [Takahashi, Dewitte, 2016] было продемонстрировано, что разделение на C - и E -моды позволяет дифференцировать Эль-Ниньо не только по локализации максимумов АТПО, но и по интенсивности аномалий. А именно, C -мода описывает умеренные явления, а E -мода соответствует экстремальным явлениям канонического типа.

Таким образом, Эль-Ниньо можно подразделить также на два режима – сильный и умеренный, в высокой степени совпадающие с каноническим и Модоки типами явления, соответственно. В качестве дополнительного критерия для выделения сильных Эль-Ниньо было выбрано значение индекса E , равное 1,5–1,8°C [Takahashi, Dewitte, 2016], так как кластерный анализ показывает наличие двух кластеров Эль-Ниньо в фазовом пространстве значений индексов E и C по данным наблюдений и моделирования климата, границей между которыми выступают указанные значения индекса E .

На следующем этапе была рассчитана билинейная регрессия пространственного поля АТПО с месячным шагом на временные ряды индексов E и C . Данная процедура позволяет получить пространственные структуры изменчивости АТПО для каждого из двух типов Эль-Ниньо (пространственные моды E и C), то есть выделить районы, в которых возникают наиболее интенсивные АТПО. E -мода описывает значительную долю изменчивости на востоке Тихого океана и связана с сильными Эль-Ниньо. C -мода описывает изменчивость в центре Тихого океана и связана с Ла-Нинья и умеренными Эль-Ниньо. Полученные пространственные моды представлены на рис. 1.

Далее рассчитываются проекции составляющих бюджета тепла, оказывающих максимальное влияние на формирование АТПО (горизонтальной и вертикальной адвекций и нелинейного динамического нагрева), на пространственные моды E и C , что позволяет оценить вклад данных компонент бюджета в формирование положительных аномалий ТПО при определенном типе Эль-Ниньо. Расчет проекций производился по следующей формуле (на примере E -моды):

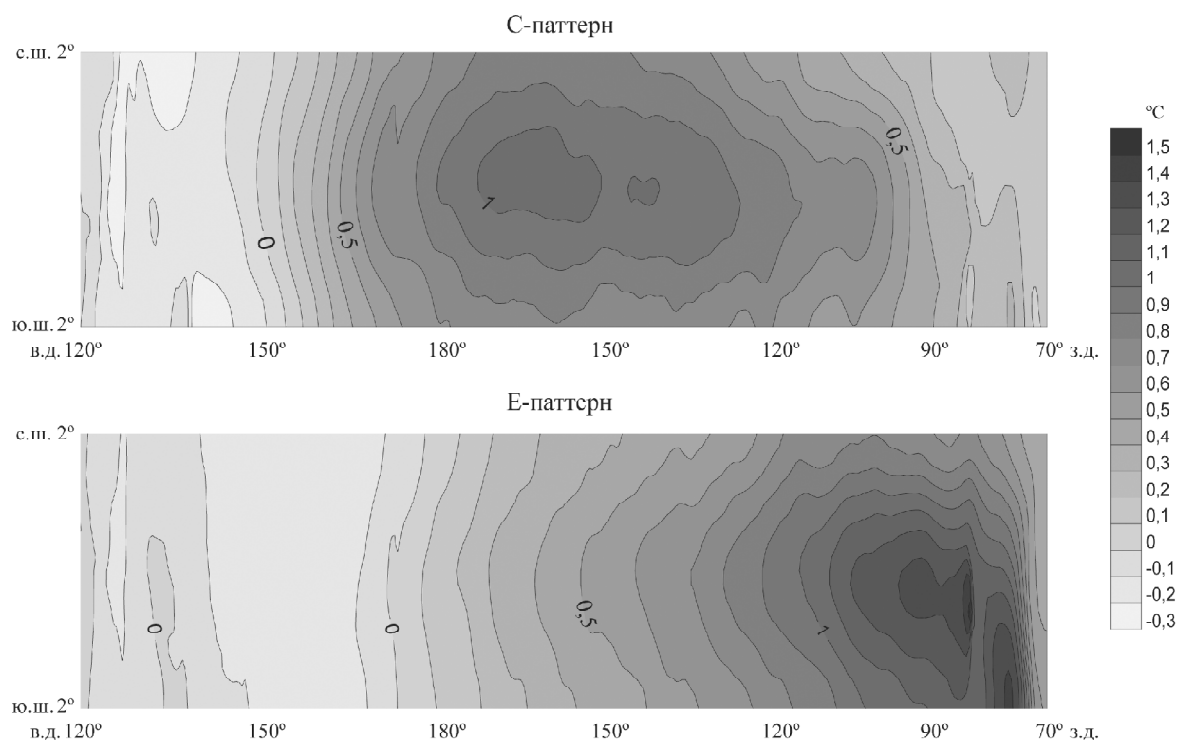


Рис. 1. Пространственные структуры (моды), соответствующие изменчивости АТПО при умеренном (С-мода) и сильном (Е-мода) режимах Эль-Ниньо по данным реанализа GLORYS2v4

Fig.1. Spatial structures (patterns) of sea surface temperature anomalies associated with the moderate (C-pattern) and strong (E-pattern) El Niño regimes based on the GLORYS2v4 reanalysis data

$$\left(\frac{\partial T'}{\partial t} \right) E = \frac{1}{N_x N_y} \int_{120^\circ E}^{290^\circ E} \int_{2^\circ S}^{2^\circ N} \left(\frac{\partial T'}{\partial t(x, y, t)} \cdot E(x, y) \right) dx dy, \quad (7)$$

где $\left(\frac{\partial T'}{\partial t} \right) E$ – это проекция каждой из составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана ($\partial T' / \partial t$), на пространственную моду E ($E(x, y)$); N_x и N_y – число шагов сетки в зональном и меридиональном направлениях, соответственно. Значения проекций затем были осреднены для всего экваториального Тихого океана (2° с. ш. – 2° ю. ш., 120° в. д. – 70° з. д.).

Результаты исследований и их обсуждение.

На первом этапе по данным реанализа CLORYS2v4 были рассчитаны месячные величины составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана – горизонтальной (ADV_{xy}) и вертикальной (ADV_z) составляющих адвекции, а также нелинейного динамического нагрева (NDH) для всего доступного периода реанализа (1992–2015 гг.). Прочие процессы, связанные с перемешиванием и не описываемые явно, малы по сравнению с остальными составляющими бюджета тепла в период развития Эль-Ниньо [Takahashi, Dewitte, 2016].

В пределах рассматриваемого периода для всех случаев Эль-Ниньо в предыдущих исследованиях были определены тип (канонический или Модокки) и

режим (сильный или умеренный), к которым каждое из явлений относится. Так, каноническое Эль-Ниньо 1997–1998 гг. определено как сильное [Takahashi et al., 2011]; явление 2015–2016 гг. ближе к каноническому типу [Осипов, Гущина, 2018] и также относится к режиму сильных явлений [Wang et al., 2019]. Остальные шесть Эль-Ниньо в пределах рассматриваемого периода (1994–1995, 2002–2003, 2004–2005, 2006–2007, 2009–2010, 2014–2015) относятся к типу Модокки и к умеренному режиму [Wang et al., 2019]. Таким образом, для всех рассматриваемых случаев Эль-Ниньо отмечается совпадение канонического типа с сильным режимом и типа Модокки с умеренным режимом.

Заметим, что и при сильных, и при умеренных Эль-Ниньо АТПО проявляются и в центре, и на востоке Тихого океана. При этом росту температуры вне зависимости от типа Эль-Ниньо способствуют и горизонтальная, и вертикальная адвекции (рис. 2). Следует отметить, что роль вертикальных движений значительна на востоке тропического Тихого океана и уменьшается в его центральной части. Таким образом, вклад ADV_z в формирование аномалии температуры в регионе, соответствующем Е-моды, т. е. на востоке Тихого океана, где отмечается интенсивный апвеллинг, превышает вклад ADV_{xy} . Рост АТПО здесь определяется как уменьшением интенсивности апвеллинга, так и более вы-

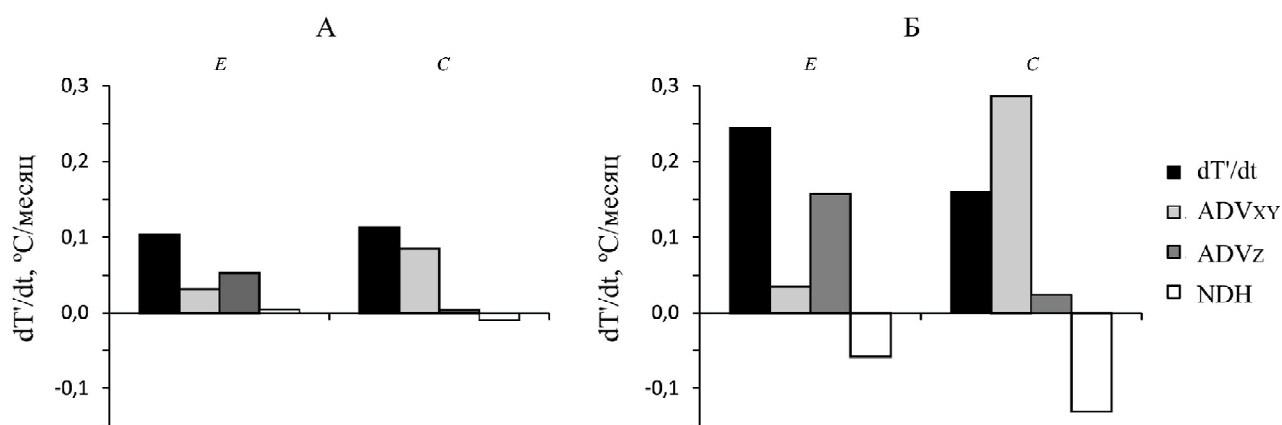


Рис. 2. Проекция изменений теплосодержания и составляющих бюджета тепла перемешанного слоя океана на пространственные моды E и C в периоды зарождения и развития Эль-Ниньо (март–ноябрь); композиционная схема для А – умеренных, Б – сильных Эль-Ниньо

Fig. 2. Projections of temperature tendency and components of the ocean mixed layer heat budget onto E and C patterns during El Niño generation and development phases (March to November); the composite scheme for A – moderate, Б – strong El Niños

сокой температурой поднимающейся при апвеллинге воды. В регионе, соответствующем C -моду, значительную роль играет ADV_{xy} , что связано с невысокой интенсивностью апвеллинга в центральной части тихоокеанского бассейна. В соответствии с теорией загрузки-разгрузки [Jin, 1997] в центральной части тихоокеанского бассейна велика роль межширотного обмена теплом, который, в частности, способствует росту АТПО в период развития Эль-Ниньо. NDH не вносит значительного вклада в рост теплосодержания перемешанного слоя океана или вовсе приводит к уменьшению положительной аномалии температуры.

Основное различие между сильными и умеренными Эль-Ниньо отмечается, прежде всего, в интенсивности роста аномалии температуры. В целом, при сильных Эль-Ниньо отмечаются большие по своей величине изменения аномалий, что и обеспечивает большую интенсивность самого явления по сравнению с

умеренными. Таким образом, режим Эль-Ниньо определяется, в первую очередь, не соотношением горизонтальной и вертикальной адвекций, а скоростью роста аномалии теплосодержания перемешанного слоя океана, которую эти процессы формируют.

Для адвективных членов был проведен более подробный анализ компонент бюджета тепла. Рассмотрена адвекция аномалий температуры средними климатическими течениями, а также адвекция средней климатической температуры и аномалий температуры аномальными течениями. Проекция адвективных членов на пространственные моды E и C при сильных и умеренных Эль-Ниньо представлена на рис. 3.

При умеренных Эль-Ниньо основной вклад в формирование аномалии теплосодержания перемешанного слоя океана на востоке тропического тихоокеанского бассейна (E -мода) вносят адвекция аномалий температуры аномальными горизонтальными

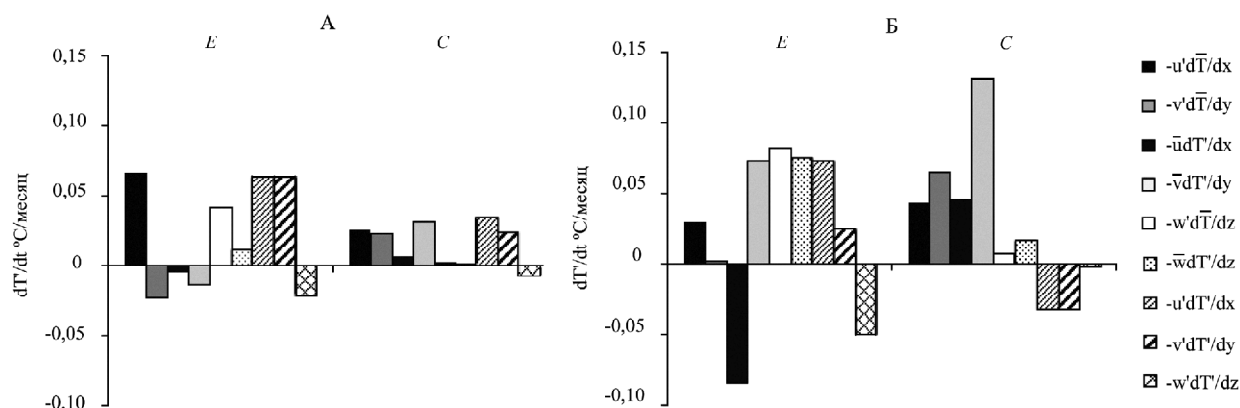


Рис. 3. Проекция адвективных членов на пространственные моды E и C в периоды зарождения и развития Эль-Ниньо (март–ноябрь); композиционная схема для А – умеренных, Б – сильных Эль-Ниньо

Fig. 3. Projection of advective terms onto E and C patterns during El Niño co generation and development phases (March to November); the composite scheme for A – moderate, Б – strong El Niños

ми течениями $\left(-u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}\right)$, а также зональная адвекция среднеклиматической температуры аномальными течениями $\left(-u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}\right)$. Значительный вклад также вносит адвекция средней температуры аномалиями вертикальных движений $\left(-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}\right)$,

что соответствует ослаблению интенсивности апвеллинга. В центре Тихого океана адвективные члены вызывают меньшие по своей амплитуде изменения АТПО, однако здесь практически все члены приводят к росту положительной аномалии температуры, в то время как на востоке ряд адвективных членов способствует ее уменьшению.

В период формирования сильных Эль-Ниньо резко повышается роль меридиональной адвекции аномалий температуры $-\bar{v}(\partial T')$, что свидетельствует

об усилении межширотного обмена теплом. На востоке Тихого океана росту теплосодержания способствует вертикальная адвекция $-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ и $\frac{\bar{w}(\partial T')}{\partial z}$,

т. е. отмечается синхронное действие ослабления апвеллинга и подъема при апвеллинге более теплых

вод. Члены $-w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ и $-\bar{u}(\partial T')$, напротив, способствуют уменьшению аномалии температуры. В центре Тихого океана все члены, кроме представляющих собой адвекцию аномальной температуры аномалиями течений, способствуют росту температуры.

Таким образом, при умеренных Эль-Ниньо отмечается более интенсивный, чем при сильных, нагрев в центре Тихого океана вследствие действия членов, связанных с зональной и меридиональной адвекцией. При сильных Эль-Ниньо на востоке тихоокеанского бассейна значительно возрастает роль членов, связанных с вертикальной адвекцией; роль горизонтальной адвекции температуры, напротив, снижается. Отметим, что при сильных Эль-Ниньо адвекция аномалий температуры аномальными зональными, меридиональными и вертикальными движениями препятствует росту положительной АТПО.

Выводы:

– в современных климатических условиях вне зависимости от типа Эль-Ниньо горизонтальная и вертикальная адвекции приводят к росту теплосодержания верхнего перемешанного слоя тропического Тихого океана в период развития Эль-Ниньо, причем на востоке Тихого океана основной вклад в формирование аномалий теплосодержания вносит вертикальная адвекция, а в его центральной части – горизонтальная;

– основные различия механизма формирования аномалий температуры верхнего перемешанного слоя при двух типах Эль-Ниньо заключаются в соотношении интенсивности роста аномалии температуры за счет горизонтальной и вертикальной адвекций;

– при анализе адвективных членов было выявлено, что при умеренных Эль-Ниньо отмечается более интенсивный нагрев вследствие действия процессов, связанных с зональной и меридиональной адвекциями в центре Тихого океана; при сильных Эль-Ниньо значительно повышается вклад процессов, связанных с вертикальной адвекцией, особенно на востоке Тихого океана, в то время как адвекция аномалий температуры аномальными движениями препятствует росту положительной АТПО в центральной части Тихого океана.

Благодарности. Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы НИР АААА-А16-116032810086-4 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00767).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Железнова И.В. Отклик в системе океан–атмосфера на каноническое Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модокки : дис. ... кан. геогр. наук. М., 2015. 264 с.

Осипов А.М., Гущина Д.Ю. Эль-Ниньо 2015–2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. № 3. С. 54–81.

Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, iss. C11, C11007.

An S.-I., Jin F.-F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, p. 2399–2412.

Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 1969, vol. 97, p. 163–172.

Cai W., Borlace S., Lengaigne M., van Rensch P., Collins M., Vecchi G., Timmermann A., Santoso A., McPhaden M.J., Wu L., England M.H., Wang G., Guilyardi E., Jin F.F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, p. 111–116.

Cai W., Wang G., Dewitte B., Wu L., Santoso A., Takahashi K., Yang Y., Carreric A., McPhaden M.J. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 2018, vol. 564, p. 201–206.

- Jin F.F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, vol. 54, no. 7, p. 811–829.
- Jin F.-F., An S.-I., Timmermann A., Zhao J. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, 1120.
- Jin, F.-F., Kim, S.T., Bejarano L. A coupled-stability index for ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L23708.
- Kao H.Y., Yu J.Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 3, p. 615–632.
- Kim W., Cai W., Kug J.-S. Migration of atmospheric convection coupled with ocean currents pushes El Niño to extremes. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, p. 3583–3590.
- Kug J.S., Jin F.F., An S.I. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 6, p. 1499–1515.
- Rasmusson E.M., Carpenter T.H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 1982, vol. 110, p. 354–384.
- Santoso A., McPhaden M.J., Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, p. 1079–1129.
- Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, no. 10, L10704.
- Takahashi K., Dewitte B. Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2016, vol. 46, p. 1627–1645.
- Takahashi K., Karamperidou C., Dewitte B. A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2019, vol. 52, p. 7477–7493.
- Wang B., Luo X., Yang Y.-M., Sun W., Cane M.A., Cai W., Yeh S.-W., Liu J. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *PNAS*, 2019, vol. 116(45), p. 22512–22517.
- Yeh S.-W., Kug J.-S., Dewitte B., Kwon M.-H., Kirtman B.P., Jin F.F. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, vol. 461, p. 511–514.

Электронные ресурсы

Quality information document for global ocean reanalysis products global-reanalysis-PHY-001-025. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: <https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-025.pdf> (дата обращения 04.10.2019).

Поступила в редакцию 13.01.2020

После доработки 16.07.2020

Принята к публикации 25.08.2020

A.M. Osipov¹, D.Yu. Gushchina²

MECHANISM OF GENERATING TWO TYPES OF EL NIÑO UNDER MODERN CLIMATIC CONDITIONS

The contribution of horizontal and vertical advection and nonlinear dynamic heating to the formation of positive sea surface temperature anomaly during two types of El Niño is evaluated from the analysis of the ocean upper mixed layer heat budget using the GLORYS2v4 reanalysis data. The oceanic processes responsible for the increasing temperature anomaly during canonical and Modoki El Niños were identified for the modern climatic conditions (1992–2015). It is demonstrated that during the development phase of both types of El Niño the vertical and horizontal advection results in the growth of the upper mixed layer heat budget in the tropical parts of the Pacific. The vertical advection plays the key role in the formation of heat anomaly in the eastern tropical Pacific for both El Niños while the horizontal advection prevails in the central tropical Pacific. The difference between the mechanism of heat content anomaly formation for canonical and Modoki El Niño is due to the different intensity of temperature growth. Moderate El Niños are characterized by intensive heating in the central tropical Pacific caused by zonal and meridional advection. During strong El Niños the contribution of vertical advection increases, especially in the eastern Pacific. Nonlinear dynamic heating is not supportive of the positive temperature anomaly growth, even causing the anomaly decrease in some cases.

Key words: canonical and Modoki El Niño, El Niño generation mechanism, heat budget of the upper mixed layer of ocean

Acknowledgements. The study was undertaken within the scientific research topic AAAA-A16-116032810086-4 and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00767).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, post-graduate student; e-mail: sashaosipov@list.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: dasha155@mail.ru

REFERENCES

- Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, iss. C11, C11007.
- An S.-I., Jin F.-F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, p. 2399–2412.
- Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 1969, vol. 97, p. 163–172.
- Cai W., Borlace S., Lengaigne M., van Rensch P., Collins M., Vecchi G., Timmermann A., Santoso A., McPhaden M.J., Wu L., England M.H., Wang G., Guilyardi E., Jin F.F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, p. 111–116.
- Cai W., Wang G., Dewitte B., Wu L., Santoso A., Takahashi K., Yang Y., Carreric A., McPhaden M.J. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 2018, vol. 564, p. 201–206.
- Jin F.F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, vol. 54, no. 7, p. 811–829.
- Jin F.-F., An S.-I., Timmermann A., Zhao J. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, 1120.
- Jin F.-F., Kim S.T., Bejarano L. A coupled-stability index for ENSO. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, L23708.
- Kao H.Y., Yu J.Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 3, p. 615–632.
- Kim W., Cai W., Kug J.-S. Migration of atmospheric convection coupled with ocean currents pushes El Niño to extremes. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, p. 3583–3590.
- Kug J.S., Jin F.F., An S.I. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 6, p. 1499–1515.
- Osipov A.M., Gushchina D.Yu. El Niño 2015–2016 gg.: evoljucija, mehanizmy, soputstvujushhie udalennye anomalii [El Niño 2015–2016: evolution, mechanisms and related anomalies]. *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2018, vol. 3, p. 54–81. (In Russian)
- Rasmusson E.M., Carpenter T.H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 1982, vol. 110, p. 354–384.
- Santoso A., McPhaden M.J., Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, p. 1079–1129.
- Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38, no. 10, L10704.
- Takahashi K., Dewitte B. Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2016, vol. 46, p. 1627–1645.
- Takahashi K., Karamperidou C., Dewitte B. A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 52, p. 7477–7493.
- Wang B., Luo X., Yang Y.-M., Sun W., Cane M.A., Cai W., Yeh S.-W., Liu J. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *PNAS*, 2019, vol. 116, p. 22 512–22 517.
- Yeh S.-W., Kug J.-S., Dewitte B., Kwon M.-H., Kirtman B.P., Jin F.F. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, vol. 461, p. 511–514.
- Zheleznova I.V. Otklik v sisteme okean-atmosfera na canonicheskoe El Niño i El Niño Modoki [The response of the ocean-atmosphere system to canonical and Modoki El Niño]. PhD Thesis in Geography, Moscow, 2015, 264 p. (In Russian)
- Web resource
Quality information document for global ocean reanalysis products global-reanalysis-PHY-001-025. Copernicus Marine Environment Monitoring Service, URL: <https://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-025.pdf> (access date 04.10.2019).

Received 13.01.2020

Revised 16.07.2020

Accepted 25.08.2020