

Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана*

О. В. Марчукова, А. С. Лубков, Е. Н. Воскресенская

Институт природно-технических систем,
Российская Федерация, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28

Для цитирования: Марчукова, О. В., Лубков, А. С., Воскресенская, Е. Н. (2020). Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (1), 96–120. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.106>

В настоящей работе исследованы три массива данных реконструированной температуры поверхности океана — HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 за период с 1870 по 2018 г. Проведена оценка качества и пригодности каждого из них для изучения Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показаны различия при выделении событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с их последующим разделением на Восточно-Тихоокеанский (ВТ) и Центрально-Тихоокеанский (ЦТ) типы. Для проверки качества реконструкций температуры поверхности океана в экваториальной зоне Тихого океана привлекались данные с буев проекта TOGA-TAO с 1981 по 2018 г., со спутника Terra (MODIS) за период 2001–2018 гг., а также массив NOAA IO SST v2 за период с 1982 по 2018 г. Полученные в работе результаты демонстрируют различия в количестве ВТ- и ЦТ-типов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья как для раннего периода с 1870 по 1900 г., когда данные были менее надежны, так и для всего временного ряда, включая два последних десятилетия. По результатам исследования показано, что в массиве ERSSTv5 завышено количество событий Эль-Ниньо ЦТ-типа на 42,8% по сравнению с массивом HadISST и на 28,6% — по сравнению с массивом COBE SST2, а также занижено количество Эль-Ниньо ВТ-типа на 23,8% по сравнению с HadISST и на 20% — по сравнению с COBE SST2. Сравнение выделенных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в массивах COBE SST2 и HadISST показало возможность практически равноценного использования обоих массивов для дальнейшего изучения этих явлений.

Ключевые слова: Ла-Нинья, Эль-Ниньо, температура поверхности океана, Тихий океан, классификация событий.

* Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме № 0012-2019-0007 (АААА-А19-119031490078-9) «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», а также частично при финансовой поддержке РФФИ и Севастополя в рамках научного проекта № 18-45-920063.

1. Введение

Одним из основных глобальных процессов межгодового масштаба в системе океан-атмосфера, оказывающего существенное влияние на состояние климата, окружающей среды и мировой экономики, является феномен Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) (Enfield and Mestas-Nunez, 1999; Goddard and Dille, 2005), включающий в себя две фазы: теплую (события Эль-Ниньо) и холодную (события Ла-Нинья). В целом события Эль-Ниньо/Ла-Нинья характеризуются экстремальным повышением/понижением поверхностной температуры воды (ТПО) в экваториальной зоне Тихого океана, падением/ростом индекса южного колебания, ослаблением/усилением пассатных ветров с типичным масштабом изменчивости от двух до семи лет (Philander, 1990).

В последнее десятилетие вырос интерес к классификации и изучению событий Эль-Ниньо (Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009; Takahashi et al., 2011). В зависимости от использованных подходов и массивов данных получены некоторые типы и характеристики этих событий. В качестве примера можно привести работы (Singh et al., 2011; Lubkov et al., 2017), в которых сделан обзор выполненных классификаций Эль-Ниньо и показаны их различия в климатических откликах. Несколько позже появились публикации по классификации событий Ла-Нинья (Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Voskresenskaya and Marchukova, 2017).

В настоящее время большинство авторов отдают предпочтение гипотезе о существовании двух типов событий ЭНЮК — Восточно-Тихоокеанского (ВТ) и Центрально-Тихоокеанского (ЦТ) — как Эль-Ниньо (Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009; Takahashi et al., 2011; Zheleznova and Gushchina, 2016), так и Ла-Нинья (Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Voskresenskaya and Marchukova, 2017). Для ВТ-типа Эль-Ниньо/Ла-Нинья характерно формирование максимально-положительной/максимально-отрицательной аномалии ТПО в восточно-экваториальной части Тихого океана в период зрелой фазы, а для ЦТ-типа — в центрально-экваториальной части. Но существуют и другие точки зрения. К примеру, в работе (Carotondi et al., 2015) высказано предположение, что ЦТ- и ВТ-типы ЭНЮК не являются отдельными событиями, а скорее, это линейная комбинация двух фаз ЭНЮК, которые сами являются результатом баланса неких других физических процессов в системе океан-атмосфера.

В рамках настоящей статьи внимание направлено на разновидность ЭНЮК с точки зрения двух пространственных типов (ВТ и ЦТ) его фаз — Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Приведенные в литературе результаты классификаций на ВТ- и ЦТ-типы, полученные разными авторами, заметно отличаются иногда даже кардинально. Это связано с используемой методологией, а также с типами учитываемых данных и их продолжительностью. К примеру, исследователи работы (Ashok et al., 2007) получили второй тип Эль-Ниньо с помощью разложения аномалий ТПО в период с 1974 по 2004 г. на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), используя данные среднемесячных восстановленных значений ТПО массива HadISST. В работе (Kug et al., 2009) для описания ВТ- и ЦТ-типов Эль-Ниньо авторы использовали массив ERSSTv2 за период с 1970 по 2005 г., рассматривая разницу в аномалиях ТПО в экваториальных районах Тихого океана Nino3 и Nino4. В работе (Takahashi et al., 2011) два типа Эль-Ниньо были получены с помощью метода разложения

аномалий ТПО на ЭОФ по данным HadISST в экваториальной зоне Тихого океана с ограниченной площадкой по широте (10° с. ш. и 10° ю. ш.) за период с 1870 по 2010 г. В настоящее время метод (Takahashi et al., 2011) наиболее широко используется. Он позволяет объективно разделить события Эль-Ниньо на два типа и может применяться для классификаций Эль-Ниньо по данным климатических моделей.

Метод разделения на ЦТ- и ВТ-типы по разнице индексов Nino3 и Nino4 также применялся и для события Ла-Нинья в работе (Yuan and Yan, 2013). В этом исследовании использовался массив HadISST за период с 1950 по 2011 г. В статье (Voskresenskaya and Marchukova, 2017) существование двух типов Ла-Нинья было доказано с помощью кластерного анализа на примере среднемесячных данных аномалий ТПО из массивов HadISST и COBE SST за столетний период.

Но не будем останавливаться на методе классификации, а уделим внимание данным ТПО. За последние 20 лет активно ведутся работы по продлению рядов данных наблюдений на десятилетия назад с помощью методов реконструкции. В этих методах в качестве базовых математических функций для проектирования значений ТПО в более ранние периоды, когда измерений было крайне мало, используются пространственные закономерности в полях ТПО для более обеспеченного наблюдениями периода (с 1970-х гг.). Поскольку эти реконструкции для Тихоокеанского региона включают пространственные структуры ЭНЮК, зафиксированные в последние 30 лет, события Эль-Ниньо и Ла-Нинья в этих реконструкциях могут быть смещены в сторону тенденций последних событий, что приводит к недооценке истинного количества типов этих явлений (Giese et al., 2010). При этом возникает вопрос, какой из массивов лучше, в частности, для классификации явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также для дальнейшего исследования их климатических проявлений.

Цель настоящей работы — проверить, каким образом будет сказываться использование разных массивов данных о реконструированной ТПО при изучении событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их классификации на ВТ- и ЦТ-типы.

Характеристики массивов и методы их реконструкции рассмотрены в разделе 2. Сравнение массивов, выделение и классификация событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья представлены в разделе 3. Основные итоги работы обобщены в разделе 4.

2. Данные и методы исследования

В настоящей работе исследование проводилось на основе использования трех массивов о среднемесячной температуре поверхности океана: HadISST (Великобритания), COBE SST2 (Япония) и ERSSTv5 (США). Выбор именно этих массивов данных был обусловлен тем, что они имеют достаточно длинный исторический ряд, более ста лет, что позволяет на значимом уровне проводить статистический анализ, в особенности для событий ЭНЮК. Период исследования в данной работе — с 1870 по 2018 г. Охарактеризуем каждый выбранный массив, уделив внимание методам их реконструкции.

Данные ТПО в массиве HadISST охватывают период с 1870 по 2018 г. Этот массив включает данные из Морского банка данных Метеорологической службы Великобритании (MDB — Marine Data Bank) в узлах пространственной сетки $1 \times 1^{\circ}$ и начиная с 1982 г. — данные Глобальной системы телекоммуникаций (GTS —

Global Telecommunications System). Для расширения объема информации MDB привлекались среднемесячные данные о ТПО за период с 1871 по 1995 г. из Комплексного массива данных об океане и атмосфере (COADS — Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Кроме того, в массиве использовались спутниковые данные NOAA (сенсор AVHRR), наблюдаемые только в ночное время суток, и был разработан свой алгоритм ассимиляции этих данных (Rayner et al., 2003). Этот алгоритм имеет значительные отличия от алгоритма, применяемого в массиве NOAA IO SST v2 (Reynolds et al., 2002; 2007), который использовался в текущей работе для оценки реконструкционных массивов данных. ТПО в массиве HadISST восстанавливается с использованием интерполяционной процедуры с оптимальным уменьшением по пространству в два этапа, с последующим наложением качественно-улучшенных данных наблюдений с привязкой к сетке, что позволяет восстановить более локальные детали (Rayner et al., 2003). В самой математической модели используется разложение на ЭОФ данных ТПО in situ и данных, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли (Rayner et al., 2003). Массив HadISST нередко используют при анализе, см., например, (Yuan and Yan, 2013; Pascolini-Campbell et al., 2015; Ren et al., 2017). Данные HadISST имеют более высокое пространственное разрешение по сравнению с ERSSTv5, но период восстановленных данных меньше (с 1870 г.), чем у массивов ERSSTv5 (с 1854 г.) и COBE SST2 (с 1850 г.).

COBE SST2 — это массив среднемесячных данных ТПО Японского метеорологического агентства в узлах пространственной сетки $1 \times 1^\circ$ за период с 1850 по 2018 г. (Hirahara et al., 2014). COBE SST2 включает в себя ТПО из Международного комплексного набора данных об океане и атмосфере (ICOADS — International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) версии 2.5, данные японской коллекции Kobe (Ishii et al., 2005) и данные наблюдений с морских судов и разных типов буев (Hirahara et al., 2014). Также в массиве используются данные спутников NOAA (сенсор AVHRR), применяемые для разложения на ЭОФ (Hirahara et al., 2014). Однако в конечном продукте COBE SST2 спутниковые данные не ассимилируются. Это связано с тем, что они увеличивают изменчивость ТПО на 10–20% по пространственной сетке, тем самым искажая реальную картину (Hirahara et al., 2014). Как и в HadISST, данные до 1941 г. скорректированы с использованием метода Фолланда и Паркера (Folland and Parker, 1995). Этот эмпирический метод основан на сравнении результатов специально проведенных измерений ТПО, выполненных на торговых судах ручным термометром при измерении температуры забортной воды в выставленных на палубе ведрах с учетом тепло- и влагообмена. В результате в данные массива внесены географические и сезонные поправки для периода с 1856 по 1941 г. Восстановленные скорректированные данные и данные, прошедшие контроль качества, накладывались на сетку с использованием оптимальной интерполяции (Hirahara et al., 2014).

В 2017 г. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) выпустило пятую версию реконструкционного массива среднемесячных ТПО ERSSTv5 (Huang et al., 2017). Регулярная сетка этого массива имеет пространственное разрешение $2 \times 2^\circ$. Для восстановления ежемесячных данных ТПО в ERSSTv5 использовались измерения ТПО in situ по данным наблюдений на буйках и судах с 1875 г. по настоящее время. Данные о ТПО in situ с 1875 по 2007 г. взяты

из ICOADS R3.0 (Woodruff et al., 2011), а с 2007 г. — из GTS Национального центра прогнозирования окружающей среды (NCEP — National Centers for Environmental Prediction). При этом качество реконструкции полей ТПО до 1875 г. достаточно низкое, что связано со скудностью объема наблюдений в Тихом и Индийском океанах. Особенностью новой версии ERSST стало включение в реконструкцию информации, полученной с буев международного проекта ARGO. Как и в предыдущих версиях, методика реконструкции ТПО основана на работах (Smith et al., 1996; Smith and Reynolds, 2003). Высокочастотная компонента аномалий ТПО, определяемая как разница между естественной аномалией ТПО и ее низкочастотной составляющей, была реконструирована путем применения среднего скользящего трехмесячного фильтра. При этом отсутствующие данные заменялись средним значением между предыдущим и последующим месяцами. Далее отфильтрованные аномалии ТПО использовались для расчета 140 глобальных эмпирических ортогональных дальностей (ЭОД) (van den Dool et al., 2000; Smith et al., 2008), представляющих собой локализованные ЭОФ, ограниченные по пространству на 5000 и 3000 км по долготе и широте. ЭОД обучались ежемесячно с 1982 по 2011 г.:

$$R(x) = \sum_i f_i \psi_i(x), \quad (1)$$

где $R(x)$ — восстановленная аномалия ТПО, $\psi_i(x)$ — i -е ЭОД, а f_i — подобранный коэффициент восстановления путем минимизации ошибки (Huang et al., 2017). Для получения 140 пространственных ЭОД и процедуры контроля качества использовался еженедельный интерполяционный массив NOAA WIO SST (Reynolds et al., 2002), который включает в себя спутниковые данные, однако сами спутниковые данные не были усвоены в ERSSTv5.

Для проверки качества реконструкций ТПО в экваториальном районе Тихого океана привлекались среднемесячные данные с буев проекта TOGA-TAO (Tropical Ocean-Global Atmosphere and Tropical Atmosphere Ocean projects) (McPhaden, 1995; McPhaden et al., 1998) с 1981 по 2018 г. В ходе выбора буев учитывалась их пространственная локализация, обеспеченность и качество измеренных данных, а все данные, имеющие пометку «низкого качества», не использовались в сравнении с реконструкциями. В результате для сравнительного анализа были выбраны только 3 экваториальных буя, расположенных на 95, 125 и 140° з. д.

Дополнительно использовались массивы данных со спутника Terra (сенсор MODIS) и со спутников NOAA (сенсор AVHRR). Массив NOAA IO SST v2 (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature v2) представляет собой интерполяционную базу данных с разрешением $1 \times 1^\circ$ за период 1982–2018 гг. и включает в себя данные сенсора AVHRR, а также данные судовых наблюдений и буев, используемые для корректировки и заполнения пропусков, связанных с облачностью (Reynolds et al., 2002; 2007). Массив данных со спутника Terra представляет собой среднемесячные данные с пространственным разрешением $0,083 \times 0,083^\circ$ за период 2001–2018 гг.

С использованием рассмотренных массивов данных HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 рассчитывались температурные индексы, представляющие собой осредненную ежемесячную температуру поверхности воды в районах: Nino3.4 (5° с. ш. — 5° ю. ш. и 170° з. д. — 120° з. д.), Nino1+2 (0° с. ш. — 10° ю. ш. и 90° з. д. —

80°з. д.), Nino3 (5°с. ш. — 5°ю. ш., 150°з. д. — 90°з. д.) и Nino4 (5°с. ш. — 5°ю. ш., 160°в. д. — 150°з. д.) с исключением линейного тренда и сезонной изменчивости.

Для выделения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья был выбран оптимальный критерий, примененный ранее в работе (Voskresenskaya and Marchukova, 2017), при котором пороговое значение аномалии ТПО для Эль-Ниньо и Ла-Нинья составило +0,5°С и -0,5°С соответственно, а минимальное время существования аномалии (П) — 5 мес. Для Эль-Ниньо критерий имеет вид (2), а для Ла-Нинья — (3):

$$\begin{aligned} \text{АТПО Nino3.4} &\geq +0,5^\circ\text{С}, \\ \text{П} &\geq 5 \text{ мес.}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{АТПО Nino3.4} &\leq -0,5^\circ\text{С}, \\ \text{П} &\geq 5 \text{ мес.} \end{aligned} \quad (3)$$

Аномалии ТПО рассчитывались для всех трех массивов относительно периода с 1870 по 2018 г. с исключением сезонной изменчивости и линейного тренда. Для того чтобы выделить сезонную изменчивость, нужно рассчитать среднемесячные значения $\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau)$ по всему временному ряду для каждого месяца:

$$\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} F(\varphi, \lambda, z_0, \tau + 12i), \quad (4)$$

где φ — широта, λ — долгота, z_0 — глубина, равная 0 м, $\tau = 1, 2, \dots, 12$ — месяцы года, а n — количество лет наблюдений рассматриваемого нами временного интервала (в данном случае 149 лет). Далее можно провести вычисления ежемесячных аномалий $\delta\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t)$ относительно полученной сезонной изменчивости:

$$\delta\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t) = F(\varphi, \lambda, z_0, \tau) - \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau). \quad (5)$$

Принимая во внимание современное понимание о том, что изучение Эль-Ниньо и Ла-Нинья следует проводить с учетом их классификации, в настоящей работе проводилась классификация каждого из этих событий на ВТ- и ЦТ-типы по методу (Yeh et al., 2009). В рамках этой метода сравниваются индексы аномалий ТПО в районах Nino3 (5°с. ш. — 5°ю. ш., 150°з. д. — 90°з. д.) и Nino4 (5°с. ш. — 5°ю. ш., 160°в. д. — 150°з. д.). Это самый простой метод классификации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, который применялся во многих работах (Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Diamond and Bennartz, 2015; Yu and Kim, 2013). Суть метода (Yeh et al., 2009) заключается в том, что если в зимний период значение индекса в районе Nino3 больше по модулю, чем соответствующее значение в районе Nino4, то тип Эль-Ниньо/Ла-Нинья определяется как Восточно-Тихоокеанский, а если наоборот — как Центрально-Тихоокеанский. Поскольку чаще всего максимальная фаза приходится с октября «0» года по январь «+1» года для Эль-Ниньо и Ла-Нинья, в настоящей работе именно в этот период производилось сравнение индексов в районах Nino3 и Nino4.

3. Результаты исследования и обсуждения

Работа выполнялась в несколько этапов. Сначала проводилось сравнение массивов HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2 между собой. Затем эти же массивы сравнивались со спутниковыми и натурными наблюдениями. На заключительном этапе в рамках рассмотренной классификации событий ЭНЮК на BT- и ЦТ-типы оценивалось качество воспроизводимости явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья по анализируемым массивам ТПО.

На *первом этапе* с помощью корреляционного анализа было проведено сравнение массивов HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2. Коэффициенты корреляции между массивами рассчитывались по формуле

$$r = \frac{\text{cov}(x_i y_i)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (6)$$

где σ_x и σ_y — среднеквадратические отклонения массивов, $\text{cov}(x_i y_i)$ — их ковариация. Соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО или RMSE — Root mean square deviation) рассчитывались по формуле

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (7)$$

где x_i и y_i — значения разных массивов.

Поскольку массив данных ERSSTv5 имеет отличную от HadISST и COBE SST2 регулярную сетку координат, для него было выполнено уменьшение размерности в единую одноградусную сетку с помощью сплайн-интерполяции, что позволило обеспечить пространственную сопоставимость массивов.

Результаты рассчитанных полей корреляции и RMSE между сравниваемыми в работе массивами приведены на рис. 1. Можно отметить, что корреляция между COBE SST2 и HadISST (рис. 1, в) в экваториальной зоне несколько выше, чем в случае корреляций между HadISST и ERSSTv5 (рис. 1, а) и между COBE SST2 и ERSSTv5 (рис. 1, д). Этот же вывод подтверждается при оценке корреляционной связи в районе Nino3.4: за весь период сравнений коэффициент корреляции для COBE SST2 — HadISST равен 0,93, в то время как для HadISST — ERSSTv5 и COBE SST2 — ERSSTv5 — 0,90 и 0,89 соответственно. Значения RMSE массивов HadISST и COBE SST2 относительно друг друга не превышают 0,4 °C. Их сходство частично можно объяснить использованием некоторых аналогичных методов при реконструкции данных до 1941 г. (Hirahara et al., 2014). В отличие от тесной связи между HadISST и COBE SST2 массив ERSSTv5 отличается от них больше и RMSE в среднем равняется 0,3–0,5 °C, при этом значения RMSE в районах Nino3 и Nino4 достигают 0,7 °C.

Далее было рассмотрено изменение корреляции и RMSE между тремя массивами во времени. Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляций и RMSE для скользящего 30-летнего периода с 1870 по 2018 г. в районе Nino3.4 (рис. 2). Получено, что пара COBE SST2 — HadISST с 1885 по 1960 г. имеет коэффициенты корреляции 30-летнего скользящего периода выше, чем остальные корреляционные пары (рис. 2, а), а RMSE — ниже (рис. 2, б). При этом с 1905 г. коэффициенты корреляции для всех трех рассмотренных пар массивов уменьшаются синхронно,

а значения RMSE повышаются. Кроме того, для всех трех пар массивов в период с 1900 по 1970 г. данные менее согласованы (корреляции уменьшаются, RMSE растёт) по сравнению с периодом 1986–1900 гг. Это можно объяснить тем, что до 1900 г. в Тихом океане были выполнены единичные измерения ТПО, в основном британскими военными кораблями. Температуру мерили внутри ведра с водой на палубе, которую черпали в океане. Все эти единичные данные содержатся в базе ICOADS, включенной во все три массива (Rayner et al., 2003; Hirahara et al., 2014; Huang et al., 2017), поэтому наблюдается высокая корреляция между ними до 1900 г. в экваториальной зоне Тихого океана. С начала XX века появились новые измерения с японских рыболовных судов и судов ВМС США, возможно, не включенные в некоторые массивы, из-за чего корреляция становится низкой с 1900 по 1970 г. Начиная с 1970-х гг. наблюдается заметное уменьшение различий между реконструкциями, что может быть связано с увеличением обеспеченности банка данных.

По результатам проведенного выше сравнительного анализа для используемых в работе реконструированных данных можно сделать вывод, что наиболее идентичны друг к другу массивы HadISST и COBE SST2. Это можно объяснить тем, что методы их реконструкции достаточно схожи (Hirahara et al., 2014). Особенно это касается реконструкции данных до 1941 г., которые корректировались на основе метода Фолланда и Паркера (Folland and Parker, 1995).

На *втором этапе* проводилось сопоставление реконструированных массивов со спутниковыми данными и натурными наблюдениями. В табл. 1 приведены результаты сравнения массивов HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2 с данными датчика AVHRR (спутники NOAA), скорректированными на основе измерений *in situ* в проекте NOAA OI SSTv2, датчика MODIS (спутник Terra) и измерениями *in situ*, полученными с буев проекта TAO, расположенных на экваторе. Стоит отметить, что периоды сравнений несколько отличаются. Для NOAA OI SSTv2 период составляет 1982–2018 гг., для спутника Terra — 2001–2018 гг. и для буев TAO — 1981–2018 гг., при этом в данных с буев имеются пропуски. В качестве областей, по которым проводилось сравнение рядов данных, для NOAA OI SSTv2 и MODIS-Terra были выбраны регионы Nino3, Nino4 и Nino3.4, а для буев проекта TAO была выполнена сплайн-интерполяция реконструированных массивов в координаты локализации буев (0° ш., 95° з. д., 125° з. д. и 140° з. д.). Из используемых рядов данных исключен тренд и сезонная изменчивость.

По результатам коррекционной оценки из табл. 1 видно, что коэффициенты корреляции с данными NOAA OI SSTv2 для различных реконструкционных массивов практически не отличаются и равны 0,99–0,98. Такая высокая корреляция может быть связана с тем, что массив NOAA OI SSTv2 корректировался с помощью судовых наблюдений и наблюдений с буев (Reynolds et al., 2002), которые также учитывались во всех трех используемых реконструкциях. При этом массив NOAA OI SSTv2 содержит данные с сенсора AVHRR, который использовался в каждом из массивов на различных этапах корректировки. Анализируя взаимосвязь с остальными базами данных, отметим, что наиболее точно отображает динамику изменения температуры массив COBE SST2. Самые низкие коэффициенты корреляции с выбранными базами данных были получены при сравнении с массивом ERSSTv5.

По результатам оценки RMSE в сравнении с данными с буев TAO самое меньшее отклонение наблюдается у массива COBE SST2. В сравнении с данными

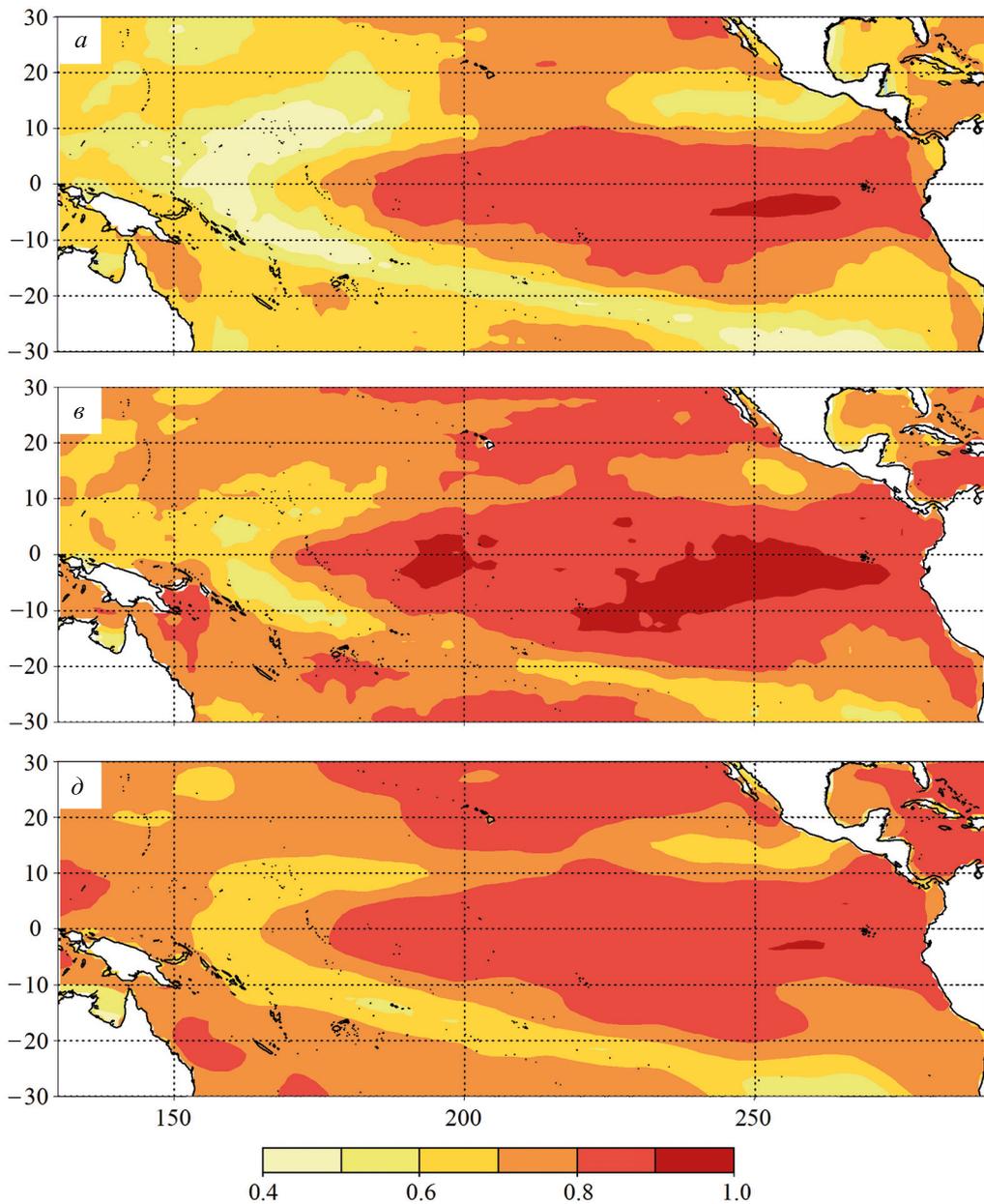


Рис. 1. Коэффициенты корреляции между массивами ERSSTv5 и HadISST (а), COBE SST2 и HadISST (б), ERSSTv5 и COBE SST2 (д); RMSE массивов ERSSTv5 и HadISST (в), COBE SST2 и HadISST (з), ERSSTv5 и COBE SST2 (е)

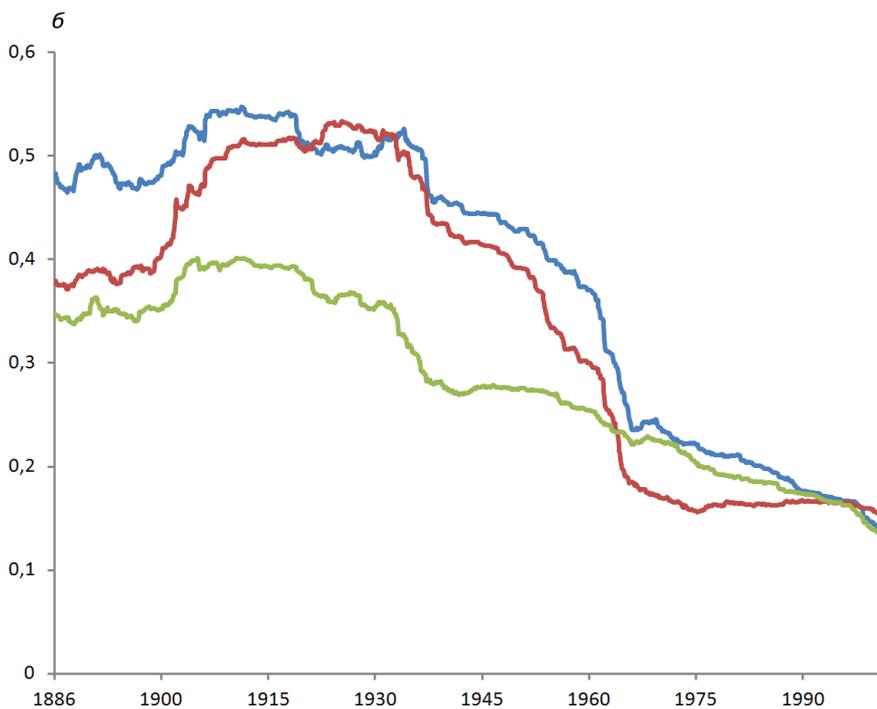
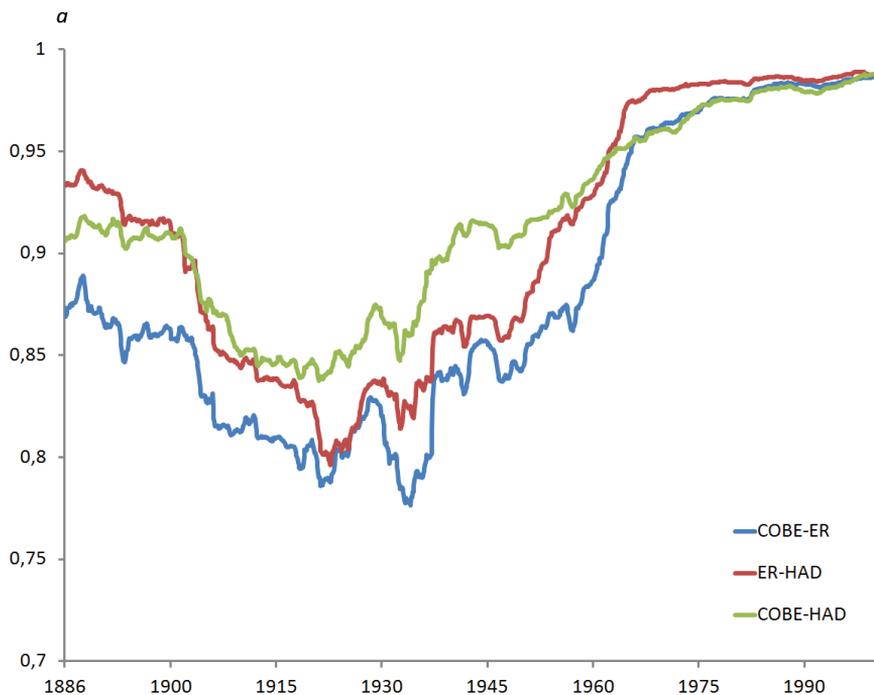


Рис. 2. Коэффициенты корреляции (а) и RMSE (б), рассчитанные для скользящего 30-летнего периода в районе Niño3.4 между массивами данных ERSSTv5 и HadISST (красная линия), COBE SST2 и HadISST (зеленая), ERSSTv5 и COBE SST2 (синяя)

MODIS-Terra и NOAA OI SSTv2 наиболее низкие отклонения имеет массив HadISST. Только в районе Nino3.4 в сравнении с данными MODIS-Terra сравнительно низкое RMSE приурочено массиву COBE SST2. Массив ERSSTv5 показывает относительно максимальные показатели RMSE.

Таблица 1. Сравнение массивов реконструкций COBESST2, HadISST и ERSSTv5 с данными спутника Terra (сенсор MODIS) за период 2001–2018 гг., спутников NOAA (сенсор AVHRR) за период 1982–2018 гг. и буев проекта TAO за период 1981–2018 гг. на основе корреляции и RMSE

Массив	Район	r			RMSE, °C		
		HadISST	COBESST2	ERSSTv5	HadISST	COBESST2	ERSSTv5
Сенсор AVHRR	Nino3	0,99	0,99	0,99	0,24	0,34	0,41
	Nino3.4	0,99	0,99	0,99	0,18	0,27	0,34
	Nino4	0,98	0,99	0,98	0,19	0,31	0,39
Сенсор MODIS	Nino3	0,94	0,94	0,94	0,32	0,45	0,46
	Nino3.4	0,91	0,98	0,89	0,47	0,34	0,65
	Nino4	0,92	0,98	0,98	0,44	0,59	0,68
Буи TAO*	95°з. д.	0,88	0,90	0,89	0,67	0,62	0,66
	125°з. д.	0,94	0,95	0,93	0,51	0,47	0,53
	140°з. д.	0,96	0,96	0,94	0,41	0,37	0,47

*Буи проекта TAO, привязанные к определенной локации, в связи с чем в координаты буев выполнялась сплайн-интерполяция массивов реконструкционных данных.

Таким образом, можно сделать вывод, что реконструкция COBE SST2 лучше остальных массивов усваивает данные с буев проекта TAO, при этом имеет высокую корреляционную связь со спутниковыми данными MODIS-Terra, которые не усваивались в данной реконструкции. В то же время коэффициенты корреляции между индексами HadISST и MODIS-Terra несколько ниже в районах Nino3 и Nino4, однако HadISST имеет сравнительно низкие оценки RMSE относительно этих спутниковых данных. Массив ERSSTv5, несмотря на то что обучение его реконструкционной модели проводилось в период 1982–2011 гг. (Huang et al., 2017), хуже остальных массивов описывает температурные изменения в выбранных регионах, имея сравнительно низкие корреляции и высокие значения RMSE.

Перейдем к *третьему этапу* анализа данных. Сначала по массивам HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 рассчитывались температурные индексы в районах Nino3, Nino4 с 1870 по 2018 г. для описания первичных статистик без исключения линейного тренда и сезонной изменчивости (табл. 2). Длина каждого полученного ряда составила 1788 значений, дискретность — 1 месяц, единица измерения — градусы Цельсия (°C).

Таблица 2. Показатели первичной статистики для индексов Nino3 и Nino4 (без исключения линейного тренда и сезонной изменчивости) массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 с 1870 по 2018 г.

Статистическая характеристика	HadISST		COBE SST2		ERSSTv5	
	Nino3	Nino4	Nino3	Nino4	Nino3	Nino4
Среднее арифметическое значение \bar{x} , °C	25,86	28,41	25,80	28,32	25,88	28,27
Дисперсия D, °C ²	1,33	0,33	1,36	0,39	1,40	0,43
Среднее квадратическое отклонение σ , °C	1,15	0,57	1,16	0,62	1,18	0,66
Коэффициент вариации C, %	4,46	2,02	4,51	2,20	4,57	2,32
Размах вариации R, °C	6,09	3,71	6,30	3,81	6,09	4,75
Минимальное значение, °C	23,13	26,46	22,84	26,48	23,12	25,34
Максимальное значение, °C	29,22	30,16	29,14	30,29	29,21	30,08

На основании данных в табл. 2 можно сказать, что все выборки однородны, так как коэффициент вариации во всех шести случаях меньше 33%, т.е. изменчивость ТПО в экваториальных районах невелика. Однако изменчивость среднемесячных значений ТПО в районе Nino3 примерно на 2,5°C выше по сравнению районом Nino4 во всех трех реконструированных массивах данных. Различия по первичным статистикам между собой не превышают сотых долей значений каждого показателя. Массив ERSSTv5 имеет несколько большие значения СКО индексов Nino3 (1,18°C) и Nino4 (0,66°C) по сравнению с массивами HadISST (1,15°C, 0,57°C) и COBE SST2 (1,16°C, 0,62°C).

По первичным статистикам экваториальных тихоокеанских индексов ТПО массивы HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 явно не отличаются, поэтому полученные ряды данных индексов Nino3 и Nino4 для каждого массива с исключенными значениями линейного тренда и сезонной изменчивости были проверены на соответствие эмпирической функции распределения (ЭФР) нормальному закону.

Приведенные на рис. 3 ЭФР индексов Nino3 и Nino4 показывают, что ЭФР не соответствуют нормальному закону распределения во всех трех массивах. Только изменчивость в районе Nino4 массивов HadISST и COBE SST2 близка к соответствию, так как статистический критерий χ^2 немного больше, чем критический $\chi_{кр}^2$ (25,1 > 22,4 для HadISST (см. рис. 3, а) и 35,8 > 22,4 для COBE SST2 (см. рис. 3, в)). Для массива ERSSTv5 статистический критерий χ^2 индекса Nino4 намного больше критического $\chi_{кр}^2$ (299,5 > 22,4 (см. рис. 3, д)), а гистограмма повторяемости аномалий ТПО смещена в сторону положительных значений. Из этого можно предположить, что по массиву ERSSTv5 будет выделено больше Эль-Ниньо ЦТ-типа.

ЭФР индекса Nino3 массива HadISST не соответствует закону нормального распределения больше, чем в других массивах, так как имеет максимальное значение статистического критерия χ^2 (474,5) по сравнению с COBE SST2 (320,5) и ERSSTv5 (410,9), а повторяемость аномалий ТПО смещена в сторону положительных зна-

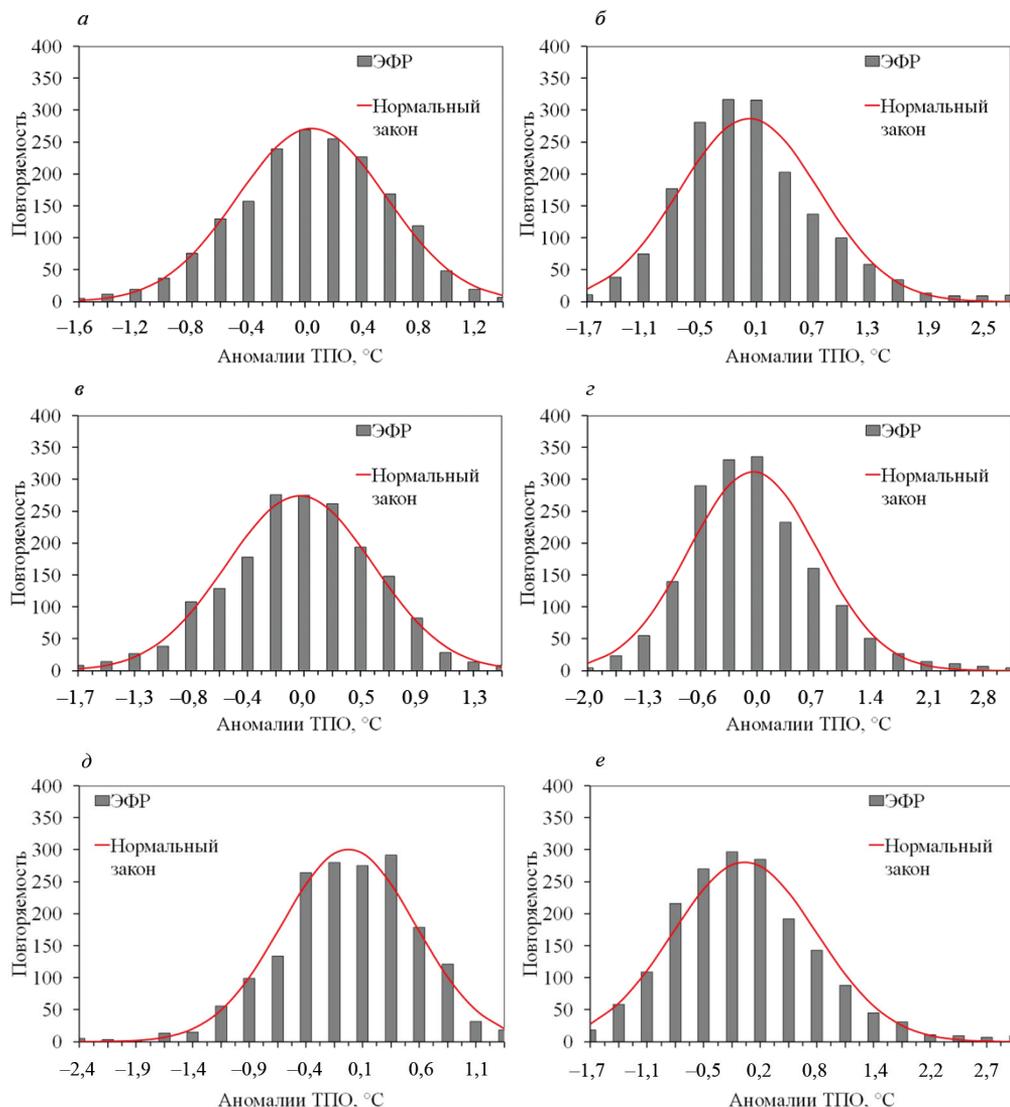


Рис. 3. Эмпирическая функция и соответствующий ей нормальный закон распределения аномалий ТПО с 1870 по 2018 г. (с исключенными эффектом глобального потепления и сезонной изменчивости) в районе Nino4 по массивам HadISST (а), COBE SST2 (б) и ERSSTv5 (д) и в районе Nino3 по массивам HadISST (в), COBE SST2 (г) и ERSSTv5 (е)

чений (рис. 3, б). Отсюда можно предположить, что по HadISST будет выделено больше Эль-Ниньо BT-типа.

Изменчивость за столетний период детрендрованных индексов Nino3 и Nino4 по всем трем массивам, представленная на рис. 4, а, б, выглядит более равномерной, начиная с 1960 г., а до 1960 г. на фоне всех остальных выделяется эволюция индексов ERSSTv5. Особенно ярко это прослеживается в 1940-х гг. в районе Nino3, где значения аномалий пересекают несколько раз отрицательный порог в $-0,5^{\circ}\text{C}$ (порог выделения событий Ла-Нинья).

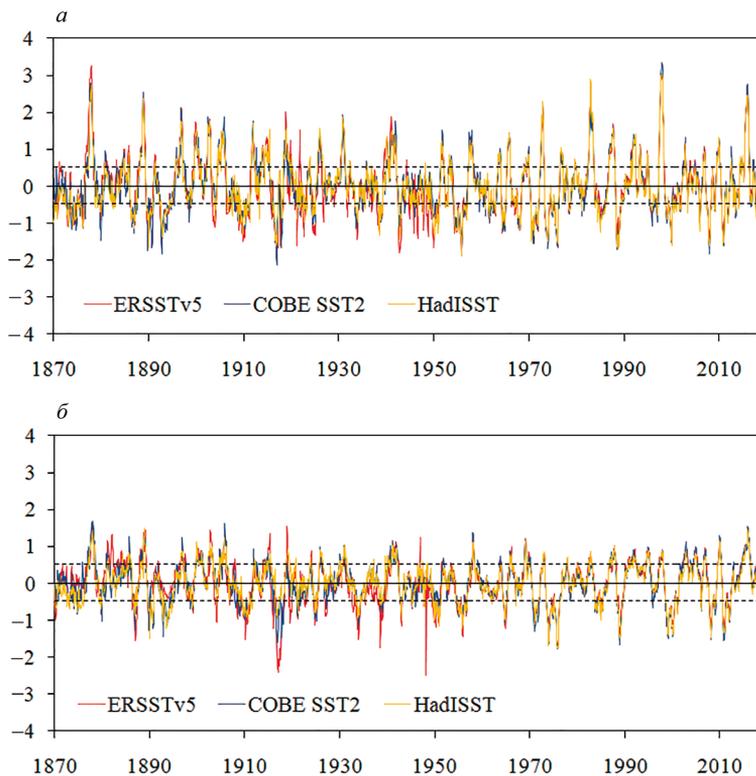


Рис. 4. Эволюция индексов Nino3 (а) и Nino4 (б) с 1870 по 2018 г. по реконструированным данным среднемесячных значений массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5

Перейдем к выделению событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их классификации. С использованием оптимального критерия (2) и (3) по данным массива HadISST было выделено 33 события Эль-Ниньо и 36 событий Ла-Нинья, по COBE SST2 — 35 Эль-Ниньо и 36 Ла-Нинья, по ERSSTv5 — 37 Эль-Ниньо и 38 Ла-Нинья. Два типа для событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья — Центрально-Тихоокеанский и Восточно-Тихоокеанский — были получены в работах (Voskresenskaya and Marchukova, 2017; Lubkov et al., 2017) с помощью объективных методов классификации. В настоящей работе применен более распространенный и несложный метод (Yeh et al., 2009) разделения Эль-Ниньо и Ла-Нинья на ВТ- и ЦТ-типы. Помимо метода (Yeh et al., 2009), где сравниваются индексы Nino3 и Nino4, в данной работе дополнительно был привлечен индекс Nino1 + 2 в случае возникновения спорных ситуаций отнесения события ЭНЮК к ВТ- или ЦТ-типу. В результате было получено: 12 Эль-Ниньо ЦТ-типа, 21 Эль-Ниньо ВТ-типа, 16 Ла-Нинья ЦТ-типа, 20 Ла-Нинья ВТ-типа по массиву HadISST; 15 Эль-Ниньо ЦТ-типа, 20 Эль-Ниньо ВТ-типа, 19 Ла-Нинья ЦТ-типа, 17 Ла-Нинья ВТ-типа по массиву COBE SST2; 21 Эль-Ниньо ЦТ-типа, 16 Эль-Ниньо ВТ-типа, 18 Ла-Нинья ЦТ-типа, 20 Ла-Нинья ВТ-типа по массиву ERSSTv5 (см. табл. 3). Особое внимание стоит обратить на массив ERSSTv5, в котором количество событий Эль-Ниньо ЦТ-типа на 42,8% больше по сравнению с HadISST

и на 28,6 % — по сравнению с COBE SST2, однако количество Эль-Ниньо ВТ-типа на 23,8 % меньше по сравнению с HadISST и на 20 % — по сравнению с COBE SST2. Эти разногласия между массивом ERSSTv5 и другими массивами также подтверждаются высокими значениями RMSE в районах Nino3 и Nino4 (рис. 1, б, е). Такой результат был получен для всего периода исследуемых данных. Далее рассмотрим повторяемость событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья ЦТ- и ВТ-типов для каждого массива данных последовательно по десятилетним промежуткам времени (рис. 5).

Таблица 3. Количество выделенных Эль-Ниньо (ЭН) и Ла-Нинья (ЛН) ЦТ-и ВТ-типов по реконструированным данным ТПО с 1870 по 2018 г.

	ЭН ВТ	ЭН ЦТ	ЛН ВТ	ЛН ЦТ
HadISST	21	12	20	16
COBE SST2	20	15	17	19
ERSSTv5	16	21	20	18

Начнем с Эль-Ниньо ВТ-типа (рис. 5, а). С 1870 по 1880 г. и с 1890 по 1900 г. все три массива воспроизводят одинаковое количество событий Эль-Ниньо ВТ- и ЦТ-типов. С 1880 по 1890 г. по детрендированному критерию Nino3.4 выделяется на одно событие Эль-Ниньо ВТ-типа больше по данным ERSSTv5. Начиная с 1900 г., мы сравнивали воспроизводимость событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с данными Австралийского метеобюро. Такой выбор связан с наличием исторических данных о давлении в архивах метеобюро на метеостанциях «Adelaide West Terrace», «Parramatta», «Port Arthur» «Colombo Creek» и «Darwin». Особое внимание стоит уделить метеостанции «Darwin». Именно ряды наблюдений этой метеостанции используются для расчета индекса Южного колебания (ЮК), который нередко используется для идентификации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Австралийское метеобюро при определении экстремальной фазы ЭНЮК помимо ТПО также учитывают индекс ЮК. С 1900 по 1910 г. на сайте Австралийского метеобюро зафиксировано два события Эль-Ниньо. Количество Эль-Ниньо совпадает во всех трех массивах. Однако у HadISST и COBE SST2 оба события относятся к ВТ-типу (рис. 5, а), а по ERSSTv5 события 1902–1903 гг. и 1904–1906 гг. по классификатору определены как ЦТ-тип (рис. 5, б). С 1910 по 1920 гг. в Австралийском метеобюро зарегистрировано четыре события Эль-Ниньо. Все четыре события Эль-Ниньо также выделяются по всем трем массивам данных ТПО, но по HadISST эти явления классификатор относит к ВТ-типу (рис. 5, а), одно событие Эль-Ниньо по COBE SST2 отнесено к ЦТ-типу, а по ERSSTv5 два события отнесены к ЦТ-типу. С 1920 по 1930 г. по всем трем массивам регистрируется два Эль-Ниньо, как и на сайте Австралийского метеобюро, но по ERSSTv5 они относятся к ВТ-типу (рис. 5, а). С 1930 по 1950 г. все сравниваемые массивы согласуются в количестве выделенных Эль-Ниньо как ВТ-, так и ЦТ-типов (рис. 5, а, б). Важно отметить, что до 1930 г. количество Эль-Ниньо ВТ- и ЦТ-типов для всех трех массивов сильно отличается (рис. 5, а, б). Это можно объяснить не только плохой обеспеченностью данных, но и тем, что в массивах серии ERSST применяются корректировки систематической погрешности рядов данных до и после 1941 г., а в массивах HadISST и COBE SST2 корректировки этой

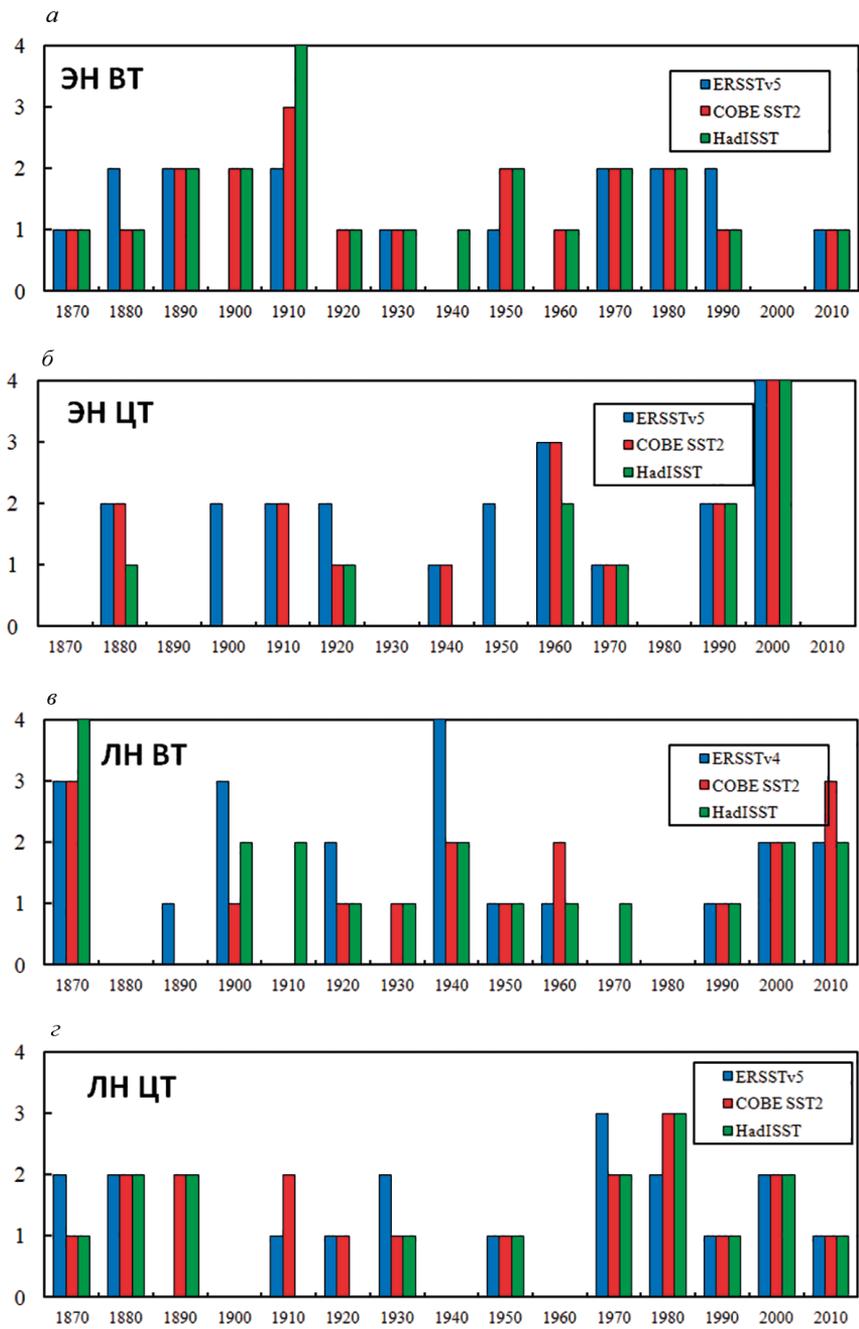


Рис. 5. Гистограмма количества повторений событий Эль-Ниньо ВТ-типа (а) и ЦТ-типа (б) и событий Ла-Нинья ВТ-типа (в) и ЦТ-типа (г) по десятилетиям с 1870 по 2014 г.

погрешности применяются исключительно до 1941 г. (Rayner et al., 2003; Smith et al., 2008; Hirahara et al., 2014; Huang et al., 2017). В период с 1950 по 1960 г. по массиву ERSSTv5 выделяется событие Эль-Ниньо ЦТ-типа 1953–1954 гг. Этого события нет в списке на сайте Австралийского метеобюро, и оно также не выделяется по данным HadISST и COBE SST2. Начиная с 1950 г. появляется дополнительная возможность сверять количество Эль-Ниньо и Ла-Нинья по данным официального сайта NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США). В списке этой организации событие Эль-Ниньо 1953–1954 гг. присутствует. С 1960 по 1970 г. по COBE SST2 выделяется на одно событие Эль-Ниньо ЦТ-типа (1969–1970 гг.) больше по сравнению с другими массивами (рис. 5, а). Это событие есть на сайтах Австралийского метеобюро и NOAA. С 1970 по 1990 г. все события Эль-Ниньо по трем массивам совпадают для двух типов. В период с 1990 по 2000 г. по ERSSTv5 выделяется на одно событие Эль-Ниньо больше, которое определяется как BT-тип. Это Эль-Ниньо 1993 г., которого нет на сайте NOAA.

Выше уже описаны несоответствия для некоторых Эль-Ниньо ЦТ-типа. Рассмотрим те, которые не учтены в предыдущем описании. С 1870 по 1930 г. выделено 8 событий Эль-Ниньо ЦТ-типа по ERSSTv5, т. е. в четыре раза больше относительно HadISST и в два раза больше относительно COBE SST2 (рис. 5, б). Частично это можно объяснить тем, что в ERSSTv5, как и в его предыдущей версии ERSSTv4, заложены модельные данные, для получения которых был увеличен период обучающей выборки с 1982 по 2011 г., включающий в себя известное Эль-Ниньо ЦТ-типа 2009–2010 гг., что, возможно, повлияло на воспроизведение этих событий с 1870 по 1930 г. (Diamond and Bennartz, 2015; Huang et al., 2017). Важно отметить, что повторяемость Эль-Ниньо ЦТ-типа увеличивается с 1990 г., что согласуется с результатами работ (Ashok et al., 2007; Yeh et al., 2009; Lee and McPhaden, 2010) (рис. 5, б).

Теперь проведем сопоставление по десятилетиям событий Ла-Нинья, выделенных по анализируемым массивам реконструированных данных ТПО (рис. 5, в, г). С 1870 по 1890 г. выделяется на одно событие Ла-Нинья меньше по COBE SST2 в отличие от двух других массивов данных. Однако по ERSSTv5 событие Ла-Нинья 1870 г. относится к ЦТ-типу (рис. 5, г), а по HadISST — к BT-типу (рис. 5, в). В период с 1880 по 1890 г. количество Ла-Нинья по всем трем массивам совпадает, и они относятся к ЦТ-типу (рис. 5, г). С 1890 по 1900 г. по массиву ERSSTv5 выделяется на одно событие Ла-Нинья меньше по сравнению с другими массивами (рис. 5, в, г), а Ла-Нинья 1892–1894 гг. относится к BT-типу (рис. 5, в). С 1900 по 1910 г. на сайте Австралийского метеобюро представлено три события Ла-Нинья. Столько же событий Ла-Нинья выделяется по массиву ERSSTv5 в этот период, и все они BT-типа (рис. 5, в). По HadISST не выделяется одно событие Ла-Нинья 1906–1907 гг., а по COBE SST2 — два — 1906–1907 гг. и 1903–1904 гг. В период с 1910 по 1920 г. событие Ла-Нинья 1916–1918 гг. по ERSSTv5 определяется как одно продолжительное событие и относится к ЦТ-типу (рис. 5, г). По массивам COBE SST2 и HadISST — это два отдельных события (1916–1917 и 1917–1918 гг.), но в случае HadISST эти два Ла-Нинья относятся к BT-типу (рис. 5, в). С 1920 по 1930 г. по массиву HadISST не выделяется событие Ла-Нинья 1921 г., хотя по массивам ERSSTv5 и COBE SST2 оно фиксируется и определяется как событие ЦТ-типа (рис. 5, г). Интересно отметить, что для этого периода в Австралийском метеобюро тоже нет описания Ла-Нинья 1921 г., но есть описание Ла-Нинья 1928–1930 гг., хотя по всем трем массивам такое событие не идентифицируется. Для

этого десятилетия также характерно, что по массиву ERSSTv5 выделяется событие Ла-Нинья 1922–1923 гг. ВТ-типа, которое не выделяется по другим массивам данных (рис. 5, в). В период с 1930 по 1940 г. количество событий Ла-Нинья по всем трем массивам совпадает, но по ERSSTv5 явление 1938–1939 гг. относится к ЦТ-типу, а по другим — к ВТ-типу (рис. 5, в, з). С 1940 по 1950 г. по массиву ERSSTv5 выделяется на два события Ла-Нинья ВТ-типа больше, чем по другим массивам (рис. 5, в), которые не отмечены в Австралийском метеобюро. С 1950 по 1960 г. по всем трем массивам разногласий нет. С 1960 по 1970 г. по COBE SST2 выделяется на одно событие Ла-Нинья (1967 г.) ВТ-типа больше (рис. 5, в), которого нет в списке на сайте Австралийского метеобюро. В период с 1970 по 1980 г. по массиву COBE SST2 события Ла-Нинья 1973–1974 гг. и 1974–1976 гг. ЦТ-типа выделяются как одно продолжительное событие. На сайте NOAA эти события зафиксированы как два отдельных. Событие Ла-Нинья 1970–1972 гг. по HadISST относится к ВТ-типу, а по двум остальным массивам — к ЦТ-типу (рис. 5, в, з). По ERSSTv5 не выделяется событие Ла-Нинья ЦТ-типа 1983–1984 гг. В период с 1900 по 2010 г. между тремя массивами нет разногласий в количестве событий Ла-Нинья и их двух типов. В последнее десятилетие по массивам ERSSTv5 и HadISST не выделяется слабое событие Ла-Нинья ЦТ-типа 2016 г., но зато оно фиксируется по данным COBE SST2.

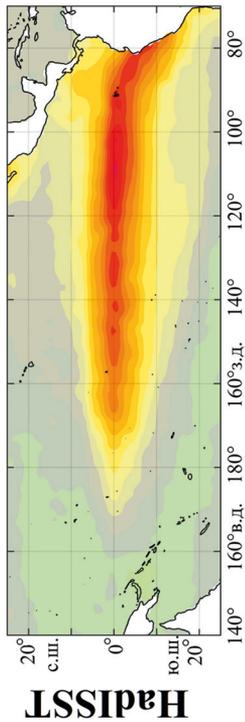
Отсюда можно сделать вывод, что в массиве COBE SST2 события Эль-Ниньо лучше выделяются по индексу Nino3.4, так как в период с 1900 по 2018 г. эпизоды теплой фазы ЭНЮК соответствуют списку событий, представленных на сайтах Австралийского метеобюро и Национального управления океанических и атмосферных исследований в США. В случае анализа Ла-Нинья имеются расхождения в количестве и в типах этих явлений по все трем массивам, как в сравнении между собой, так и в сравнении с данными Австралийского метеобюро. Не рекомендуется использовать массив ERSSTv5 для исследований Ла-Нинья, так как по нему в 1940-е гг. вдвое завышено количество этих событий, которые не были зафиксированы ни в одном источнике информации.

Важно отметить, что различия в количестве событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья ЦТ- и ВТ-типов между разными массивами данных восстановленных значений ТПО не просто приходится на ранний период наблюдений (до 1930 г.), где данные менее надежны, а, наоборот, разбросаны по всему периоду, в том числе включая недавние десятилетия. До 1970 г. практически нет совпадений в повторяемости двух типов Эль-Ниньо всех трех массивов реконструированных данных ТПО (рис. 5), а в случае с Ла-Нинья — вплоть до 1990-х гг. Улучшение воспроизводимости Эль-Ниньо с 1970-х гг. по всем трем массивам можно связать с пополнением банков данных более частыми судовыми измерениями, увеличением количества океанологических буев и с появлением спутниковой информации, частичное усвоение которой заложено в каждый из трех массивов.

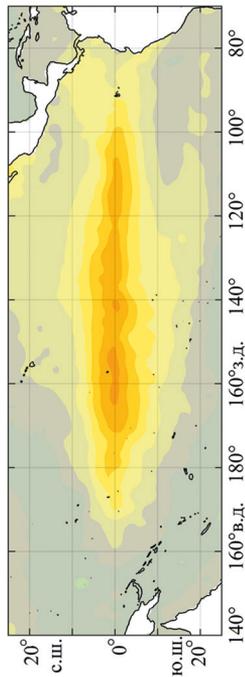
Плохая воспроизводимость событий Ла-Нинья и несогласованность в их типах по HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 до 1990-х гг. как раз может быть связана с плохим представлением о физическом механизме чередования фаз ЭНЮК, которые до сих пор плохо прогнозируются (Glantz, 2015).

Последним этапом данного исследования стал анализ воспроизводимости зрелой фазы развития двух типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья по массивам HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 (рис. 6, 7). За зрелую фазу Эль-Ниньо/Ла-Нинья обычно

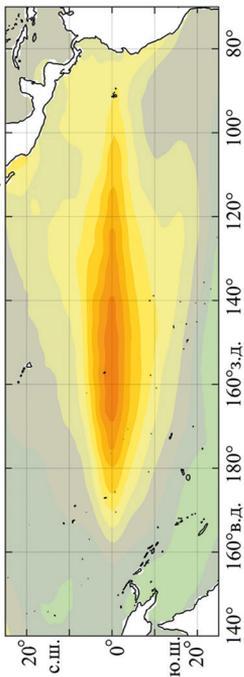
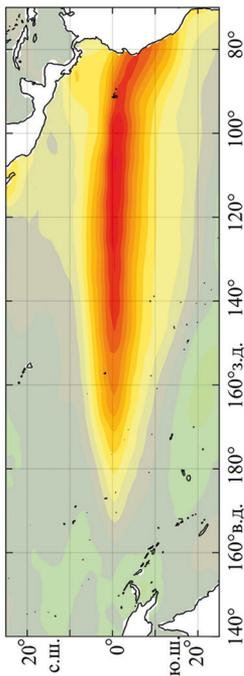
ВТ



ЦТ



COBE SST2



ERSSTv5

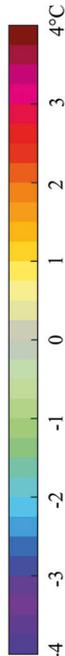
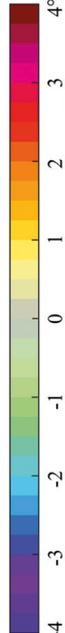
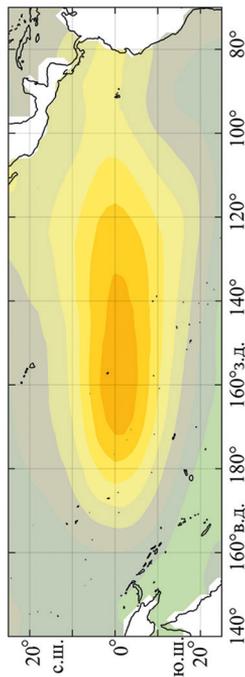
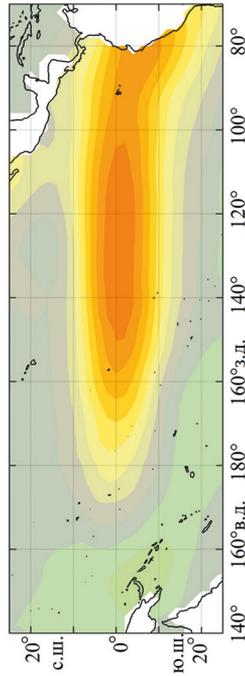
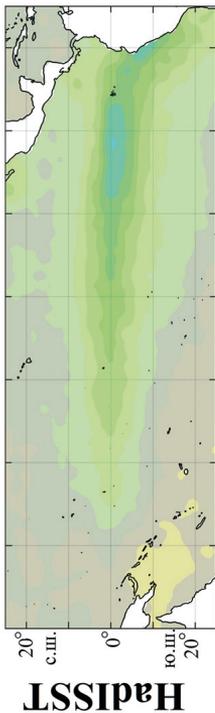
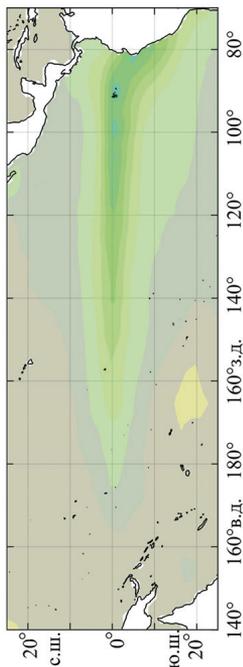


Рис. 6. Воспроизведение фазы максимального развития (ноябрь — январь) двух типов Эль-Ниньо по разным реконструированным данным ТПО

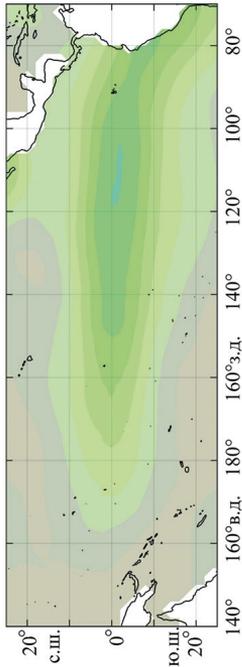
ВТ



COBE SST2



ERSSTv5



ЦТ

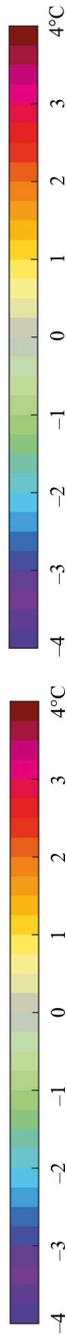
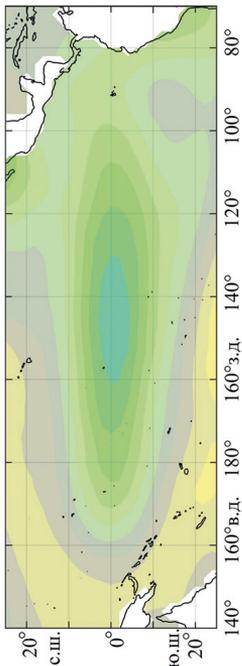
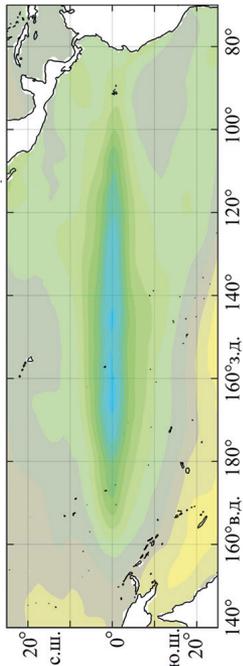
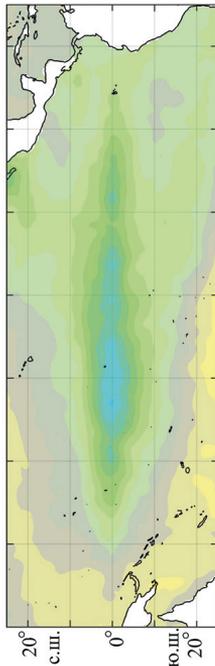


Рис. 7. Воспроизведение фазы максимального развития (октябрь — декабрь) двух типов Ла-Нинья по разным реконструированным данным ГПО

принимают три месяца, при которых наблюдаются максимальные положительные/отрицательные значения аномалий ТПО (Laken and Calogovic, 2013), т. е. одно подмножество данных — это осредненные аномалии ТПО за три месяца, попадающие под понятие зрелой фазы. Зрелая фаза по всем трем массивам определялась по индексу Nino3.4 как три месяца с максимально-отрицательными/максимально-положительными аномалиями ТПО в периоды Ла-Нинья/Эль-Ниньо. В нашем случае зрелая фаза для Ла-Нинья в среднем приходится на октябрь — декабрь, для Эль-Ниньо — на ноябрь — январь.

В целом зрелая фаза, как для Эль-Ниньо, так и для Ла-Нинья по всем трем массивам воспроизводится хорошо (рис. 6, 7). Обнаруженные отличия состоят лишь в том, что интенсивность событий, выделенных по массиву COBE SST2, при Ла-Нинья ЦТ-типа выше, а по ERSSTv5 максимальная аномалия Эль-Ниньо ВТ-типа в период зрелой фазы пространственно более смещена к центру Тихого океана по сравнению с массивами HadISST и COBE SST2.

Таким образом, продемонстрированы различия и подобия в повторяемости и воспроизводимости максимальной фазы развития двух типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья для трех реконструированных массивов данных ТПО HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5.

4. Выводы

В результате проведенного исследования показана высокая линейная связь между массивами ERSSTv5, HadISST и COBE SST2 среднемесячных значений ТПО с 1870 по 2018 г. для районов экваториальной зоны Тихого океана (коэффициенты корреляции изменяются от 0,7 до 0,95). Среднеквадратические отклонения массивов HadISST и COBE SST2 относительно друг друга не превышают 0,4°C: это частично объясняется использованием при реконструкции данных некоторых аналогичных методов (Hirahara et al., 2014). В отличие от тесной связи между HadISST и COBE SST2 массив ERSSTv5 отличается от них, так как среднеквадратические отклонения этого массива в районах Nino3 и Nino4 в среднем равны 0,7°C.

По результатам верификации массивов показано, что в COBE SST2 были значительно лучше усвоены данные с буев проекта TOGA-TAO. Сравнивая анализируемые массивы со спутниковыми данными Terra (MODIS), которые не усваивались ни в одной из реконструкций, COBE SST2 показал несколько лучшую воспроизводимость изменчивости аномалий ТПО за период 2001–2018 гг. в сравнении с другими массивами. Однако массив HadISST имеет наименьшие среднеквадратические отклонения от спутниковых данных Terra (MODIS) и данных проекта NOAA IO SST v2.

В массиве ERSSTv5 завышено количество событий Эль-Ниньо Центрально-Тихоокеанского типа на 42,8 % по сравнению с HadISST и на 28,6 % — по сравнению с COBE SST2 и занижено количество Эль-Ниньо Восточно-Тихоокеанского типа на 23,8 % по сравнению с HadISST и на 20 % — по сравнению с COBE SST2. Это можно частично объяснить тем, что в последних версиях ERSST (v4 и v5) период обучающей выборки был увеличен и равнялся 30 годам с 1982 по 2011 г. (Diamond and Bennartz, 2015; Huang et al., 2017). В этот период вошло событие Эль-Ниньо 2009–2010 гг. Центрально-Тихоокеанского типа, что, возможно, повлияло на воспроизведение этих событий с 1870 по 1950 г. Также такое завышение может быть

связано с меньшим пространственным разрешением реконструкции, что повлияло на выделение типов Эль-Ниньо.

Полученные в работе результаты демонстрируют различия в количестве Центрально-Тихоокеанского и Восточно-Тихоокеанского типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья как для раннего периода с 1870 по 1900 г., когда данные были менее надежны, так и для всего временного ряда, включая два последних десятилетия. До 1950 г. практически нет совпадений в повторяемости двух типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья для всех трех массивов. С 1970-х гг. наблюдаются улучшения воспроизводимости событий Эль-Ниньо по всем трем массивам, что напрямую связано с пополнением банков данных более частыми судовыми измерениями, увеличением количества буев и с появлением спутниковой информации, частичное усвоение которой заложено в каждый из трех массивов. Плохая воспроизводимость событий Ла-Нинья и несогласованность в их типах по HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 вплоть до 1990-х гг. может быть связана с неверным представлением о физическом механизме образования этих явлений, который до сих пор недостаточно изучен.

При изучении событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья не рекомендуется использовать массив ERSSTv5. При этом сравнение массивов COBE SST2 и HadISST для выделения разных типов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья показало возможность практически равноценного использования обоих массивов.

Литература/References

- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata T. (2007). El Nino Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J.-Y., Braconnot, P., Cole, J., Dewitte, B., Giese, B., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Karnauskas, K., Kirtman, B., Lee, T., Schneider, N., Xue, Y., Yeh, S.-W. (2015). Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 921–938. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00117.1>
- Diamond, M.S., Bennartz, R. (2015). Occurrence and trends of eastern and central Pacific El Niño in different reconstructed SST data sets. *Geophysical Research Letters*, 42, 375–381. <https://doi.org/10.1002/2015GL066469>
- Enfield, D. B., Mestas-Nunez, A. M. (1999). Multiscale Variabilities in Global Sea Surface Temperatures and Their Relationships with Tropospheric Climate Patterns. *Journal of Climate*, 12, 2719–2733. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2719:MVIGSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719:MVIGSS>2.0.CO;2)
- Folland, C. K., Parker, E. (1995). Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 319–367. <https://doi.org/10.1002/qj.49712152206>
- Giese, B. S., Slowey, N. C., Ray, S., Compo, G. P., Sardeshmukh, P. D., Carton, J. A., Whitaker, J. S. (2010). The 1918/19 El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 177–183. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2903.1>
- Glantz, M. H. (2015). Shades of Chaos: Lessons Learned About Forecasting El Nino and Its Impacts. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6, 94–103. <https://doi.org/10.1007/s13753-015-0045-6>
- Goddard, L., Dilley, M. (2005). El Niño: Catastrophe or opportunity. *Journal of Climate*, 18, 651–665. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3277.1>
- Hirahara, S., Ishii, M., Fukuda, Y. (2014). Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *Journal of Climate*, 27, 57–75. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00837.1>
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Smith, T. M., Vose, R. S., Zhang, H.-M. (2017). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30, 8179–8205. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0836.1>
- Ishii, M., Shouji, A., Sugimoto, S., Matsumoto, T. (2005). Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865–879. <https://doi.org/10.1002/joc.1169>

- Kao, H. Y., Yu, J. Y. (2009). Contrasting eastern Pacific and central Pacific types of ENSO, *Journal of Climate*, 22, 615–632. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2309.1>
- Kug, J. S., Jin, F. F., An, S. I. (2009). Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 22, 1499–1515. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2624.1>
- Laken, B., Calogovic, J. (2013). Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A29. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013051>
- Lee, T., McPhaden, M. J. (2010). Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 37, L14603. <https://doi.org/10.1029/2010GL044007>
- Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N., Marchukova, O. V. (2017). Modern classification of El Niño and comparison of the corresponding climate responses. *Sistemy kontrolya okruzhaiushchei sredy*, 7(27), 94–100. (In Russian)
- McPhaden, M. J., Busalacchi, A. J., Cheney, R., Donguy, J. R., Gage, K. S., Halpern, D., Ji, M., Julian, P., Meyers, G., Mitchum, G. T. (1998). The Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA) observing system: A decade of progress. *Journal of Geophysical Research*, 103, 169–240. <https://doi.org/10.1029/97jc02906>
- McPhaden, M. J. (1995). The Tropical Atmosphere Ocean (TAO) Array is Completed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 739–741. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-76.5.739>
- Pascolini-Campbell, M., Zanchettin, D., Bothe, O., Timmreck, C., Matei, D., Jungclaus, J. H., Graf, H.-E. (2015). Toward a record of central Pacific El Niño events since 1880. *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 379–389. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1114-2>
- Philander, S. G. (1990). *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. CA, San Diego: Academic Press.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C., Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Ren, R. C., Rao, J., Wu, G. X., Cai, M. (2017). Tracking the delayed response of the northern winter stratosphere to ENSO using multi reanalyses and model simulations. *Climate Dynamics*, 48, 2859–2879. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3238-9>
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15, 1609–1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIIASAS.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIIASAS.2.0.CO;2)
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., Schlax, M. G. (2007). Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- Singh, A., Delcroix, T., Cravatte, S. (2011). Contrasting the flavors of El Niño — Southern Oscillation using sea surface salinity observations. *Journal of Geophysical Research*, 116, 148–227. <https://doi.org/10.1029/2010JC006862>
- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Peterson, T. C., Lawrimore, J. (2008). Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006). *Journal of Climate*, 21, 2283–2296. <https://doi.org/10.1175/2007jcli2100.1>
- Smith, T. M., Reynolds, R. W. (2003). Extended reconstruction of global sea surface temperature based on COADS data (1854–1997). *Journal of Climate*, 16, 1495–1510. <https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.10.1495>
- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Livezey, R. E., Stokes, D. C. (1996). Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. *Journal of Climate*, 9, 1403–1420. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1403:ROHSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1403:ROHSST>2.0.CO;2)
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10704. <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>
- van den Dool, H. M., Saha, S., Johansson, A. (2000). Empirical orthogonal teleconnections. *Journal of Climate*, 13, 1421–1435. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1421:EOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1421:EOT>2.0.CO;2)
- Voskresenskaya, E. N., Marchukova, O. V. (2017). Spatial classification of La Niña events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, 111–119. <https://doi.org/10.1134/S0001433817010133>
- Woodruff, S. D., Worley, S. J., Lubker, S. J., Ji, Z., Freeman, J. E., Berry, D. I., Brohan, P., Kent, E. C., Reynolds, R. W., Smith, S. R., Wilkinson, C. (2011). ICOADS release 2.5: Extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *The International Journal of Climatology*, 31, 951–967. <https://doi.org/10.1002/joc.2103>

- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P., Jin F.-F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*, 461, 511–514. <https://doi.org/10.1038/nature08316>
- Yu, J.-Y., Kim, S. T. (2013). Identifying the Types of Major El Niño Events since 1870. *International Journal of Climatology*, 33, 2105–2112. <https://doi.org/10.1002/joc.3575>
- Yuan, Y., Yan, H. M. (2013). Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 58, 406–415. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>
- Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L., He, J. (2014). Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. *Climate Dynamics*, 44, 1351–1366. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z>
- Zheleznova, I. V., Gushchina, D. Yu. (2016). Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño. *Russian Meteorology and Hydrology*, 41, 760–769. <https://doi.org/10.3103/S1068373916110030>

Статья поступила в редакцию 13 мая 2019 г.

Статья рекомендована в печать 27 ноября 2019 г.

Контактная информация:

Марчукова Олеся Владимировна — olesjath@mail.ru

Лубков Андрей Сергеевич — andrey-ls2015@yandex.ru

Воскресенская Елена Николаевна — elena_voskr@mail.ru

The quality of the reproduction of El Niño and La Niña events using different reconstructed sea surface temperature data sets

O. V. Marchukova, A. S. Lubkov, E. N. Voskresenskaya

Institute of natural and technical systems,
28, ul. Lenina, Sevastopol, 299011, Russian Federation

For citation: Marchukova, O. V., Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N. (2020). The quality of the reproduction of El Niño and La Niña events using different reconstructed sea surface temperature data sets. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (1), 96–120. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.106> (In Russian)

In this paper, using various data sets of the reconstructed ocean surface temperature — HadISST, COBE SST2 and ERSSTv5 — the differences are showed in the identification of El Niño and La Niña events with their subsequent separation on the East Pacific (EP) and Central Pacific (CP) types from 1870 to 2018. The SST data of the TOGA-TAO buoys from 1981 to 2018, the Terra satellite (MODIS) from 2001 to 2018 and the NOAA IO SSTv2 from 1982 to 2018 were used for a verification of the quality of SST reconstructions in the equatorial Pacific. The obtained results in this work demonstrate differences in the number of EP and CP types of El Niño and La Niña for the early period from 1870 to 1900, when the data were less reliable, and for the entire time series, including the last two decades. According to the study results, it was shown that ERSSTv5 overestimates the number of CP El Niño by 42,8% relative to HadISST and by 28,6% relative to COBE SST2 and underestimates the number of EP El Niño by 23,8% relative to HadISST and by 20% relative to COBE SST2. The choice between the COBE SST2 and HadISST data sets as a result of comparing of the selected El Niño and La Niña events showed the possibility to use of both arrays is almost equivalent.

Keywords: La Niña, El Niño, sea surface temperature, Pacific Ocean, El Niño — Southern Oscillation.

Received: May 13, 2019

Accepted: November 27, 2019

Contact information:

Olesia V. Marchukova — olesjath@mail.ru

Andrey S. Lubkov — andrey-ls2015@yandex.ru

Elena N. Voskresenskaya — elena_voskr@mail.ru