



Марчукова О.В. – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и геоэкологии Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень



Воскресенская Е.Н. – доктор географических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь

ISBN 978-5-6048608-6-1

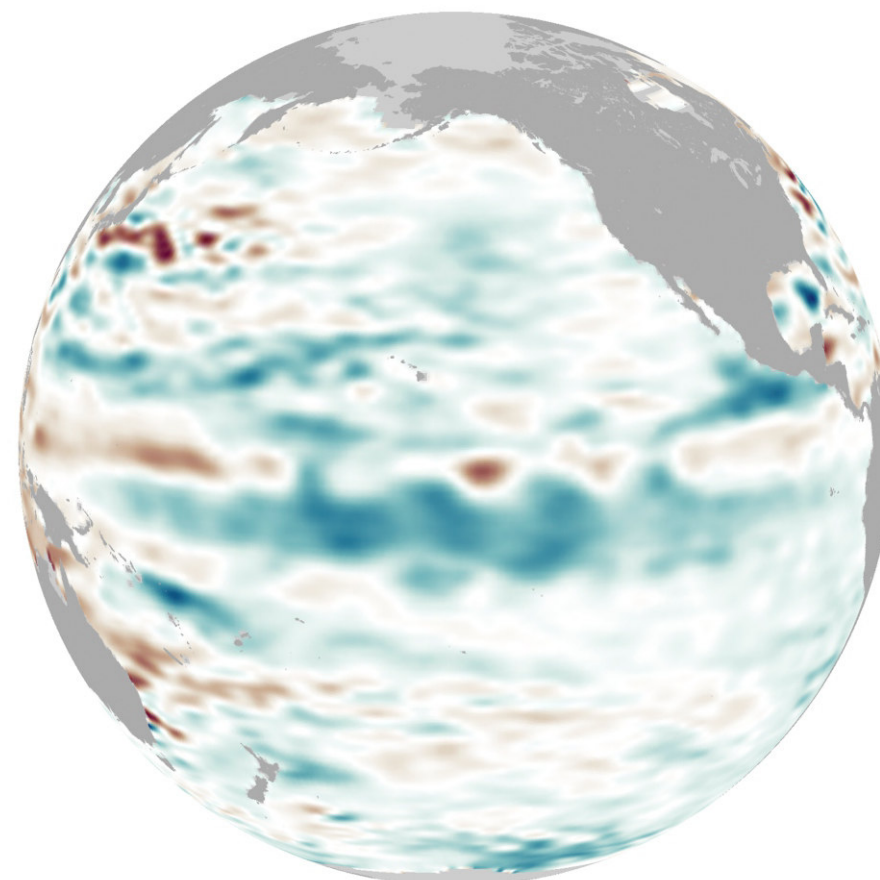


9 785604 860861

**О.В. МАРЧУКОВА, Е.Н. ВОСКРЕСЕНСКАЯ**  
**КЛАССИФИКАЦИЯ ЯВЛЕНИЙ ЛА-НИНЬЯ**

**О.В. МАРЧУКОВА, Е.Н. ВОСКРЕСЕНСКАЯ**

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ЯВЛЕНИЙ ЛА-НИНЬЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КЛИМАТ АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА**



Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation  
Federal state budget scientific institution  
«INSTITUTE OF NATURAL AND TECHNICAL SYSTEMS»

LA NIÑA CLASSIFICATION AND THEIR INFLUENCE  
ON THE CLIMATE OF THE ATLANTIC-EUROPEAN  
REGION

Sevastopol  
2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

**КЛАССИФИКАЦИЯ ЯВЛЕНИЙ ЛА-НИНЬЯ  
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КЛИМАТ  
АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА**

Севастополь

2023

УДК 634.8, 551.583

**Классификация явлений Ла-Нинья и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона / О.В. Марчукова, Е.Н. Воскресенская. Севастополь: ИПТС, 2023. 156 с., 34 ил., 8 табл., 185 библ.**

Монография представляет собой обобщенное исследование о событиях Ла-Нинья в Тихом океане, их разновидностей и классификации, особенностях формирования и влияния на климат Атлантико-Европейского региона. В работе объективно доказано существование двух типов Ла-Нинья в зависимости от места возникновения, характера эволюции, продолжительности и интенсивности этих событий. Установлены закономерности возникновения разных видов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». Особое внимание уделено выявлению характерных проявлений пространственных типов Ла-Нинья в межгодовых аномалиях гидрометеорологических полей Атлантико-Европейского региона в холодное полугодие. Монография рассчитана на научных сотрудников, аспирантов, студентов, специализирующихся в области климатологии и океанологии. Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ ГР 121122300072-3).

The monograph is a generalized study of La Niña events in the Pacific Ocean, their classification, features of formation and influence on the Atlantic-European climate. It is objectively proven the existence of two La Niña types based on place of origin, the nature of evolution, the duration and intensity of these events. The patterns of different La Niña type occurrence relative to the canonical El Niño and El Niño “Modoki” have been found. Particular attention is paid to identifying typical manifestations of La Niña spatial types in interannual anomalies of hydrometeorological fields in the Atlantic-European region during cold half of the year. The monograph is intended for researchers, graduate students, and students specializing in climatology and oceanology.

Печатается по рекомендации

Ученого совета ФГБНУ «Институт природно-технических систем»

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор П.Д. Ломакин  
кандидат географических наук В.А. Наумова

**ISBN 978-5-6048608-6-1**

**DOI:10.33075/978-5-6048608-6-1**

© Марчукова О.В., Воскресенская Е.Н. 2023



Марчукова О.В. – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и геоэкологии Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень



Воскресенская Е.Н. – доктор географических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь

## ВВЕДЕНИЕ

**Я**вление Ла-Нинья – отрицательная фаза главного климатического сигнала межгодового масштаба Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК). ЭНЮК представляет собой квазидвух- восьмилетнее колебание климата Земли и является первой модой глобальной ежемесячной аномалии температуры поверхности океана (ТПО), составляющей 18% от общей дисперсии [Philander, 1990; Wallace et al., 1998; Deser et al., 2010; Messie, Chavez, 2011]. В целом события Ла-Нинья характеризуются экстремальным понижением поверхностной температуры воды (ТПО) в экваториальной зоне Тихого океана, ростом индекса южного колебания и усилением пассатных ветров [Philander, 1990]. Этот глобальный климатический сигнал межгодового масштаба обуславливает формирование существенных аномалий климата и окружающей среды в разных регионах Земли [Rasmusson, Carpenter, 1982; Philander, 1990; Webster et al., 1998; Chang et al., 2000; Chen et al., 2013].

Экономические и социальные последствия от отрицательных эпизодов ЭНЮК масштабны и беспрецедентны. К примеру, в США засуха во время событий Ла-Нинья 1988 г. нанесла ущерб в 40 млрд. \$ [Glantz, 2002] и в 500 млн. \$ при Ла-Нинья 2007–2008 гг. [Manuel, 2008]. В Австралии же,

напротив, во время Ла-Нинья 2010–2011 гг. из-за сильных наводнений большая территория страны была объявлена зоной бедствия [Miller, 2019].

Прогнозирование Ла-Нинья до сих пор остается нерешенной научной проблемой: не были предсказаны начало и продолжительность Ла-Нинья 1998–2000 гг. [Picaut et. al., 2002] и 2016–2018 гг. [Feng et. al., 2020]. Одной из причин неудачных прогнозов холодной фазы ЭНЮК является недостаточная изученность особенностей этих явлений и их качественная классификация в отличие от его теплой фазы, Эль-Ниньо. В результате меньшего опыта качественного прогнозирования интенсивности или местоположения аномалий Ла-Нинья затруднено определение масштабов климатических, экологических и социальных последствий по всему миру. При этом социально-экономические последствия событий Ла-Нинья беспрецедентны. Засуха в США привела к ущербу в 40 млрд. \$ (Glantz, 2002) во время событий 1988 г. и 500 млн. \$ при Ла-Нинья 2007-2008 гг. (Manuel, 2008). В Австралии же, напротив, во время Ла-Нинья 2010-2011 гг. из-за сильных наводнений большая территория страны была объявлена зоной бедствия (Miller, 2019).

В последнее десятилетие вырос интерес к классификации Ла-Нинья [Cai, Cowan, 2009; Shinoda, 2013, Yuan, Yan, 2013; Zhang et. al., 2014], однако методы разделения событий являются математически спорными, а механизм формирования полученных типов не описан ни в одной работе. Поэтому вопрос типизации Ла-Нинья остается открытым, а проявления разных

его типов не достаточно описаны, в том числе, для Европейского региона. Таким образом, изучение условий и особенностей формирования Ла-Нинья является актуальной научной темой. Помимо получения новых знаний оно может помочь в развитии методов предсказания этих явлений, а их заблаговременный прогноз позволит свести к минимуму возможные негативные последствия.

Полученные результаты монографии направлены на решение фундаментальной научной проблемы в области взаимодействия океана и атмосферы в тропиках тихоокеанского сектора в холодную фазу ЭНЮК. Комплексное исследование событий Ла-Нинья, их классификация, выявленные закономерности формирования и влияние на Атлантико-Европейский регион дают основу для совершенствования теории климата. Практическая значимость полученных результатов позволяет составить долгосрочный статистический прогноз погодно-климатических условий Европы в холодное полугодие от момента возникновения бассейна отрицательных аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана до их завершения. Кроме этого, результаты работы могут быть использованы для решения многих прикладных задач, в частности, в практической работе структурных подразделений «Гидрометцентра России», при подготовке рекомендаций заинтересованным ведомствам, например, для перспективного планирования в аграрном комплексе европейской части России или для рационального использования рекреационного потенциала Черного и Азовского морей.



Авторы искренне благодарят за помощь и участие в получении некоторых результатов своего коллегу и соавтора ряда публикаций по теме монографии Лубкова А.С.

## ГЛАВА 1

### ХОЛОДНАЯ ФАЗА ПРОЦЕССА ЭЛЬ-НИНЬО – ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ И ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

**В**ажным элементом анализа аномалий климата является выделение глобальных климатических сигналов и их проявлений разных точках земного шара с помощью так называемых, дальних связей. Разложение глобальных гидрометеорологических полей на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) позволило подтвердить существование типичных межгодовых и междесятилетних масштабов глобальной изменчивости в системе океан-атмосфера. При этом, в частности, при разложении на ЭОФ глобального поля температуры поверхности океана (ТПО) выявилось четыре основных климатических моды пространственного распределения с их временной реализацией, соответствующей межгодовым, десятилетним и междесятилетним колебаниям [Enfield, Mestas-Nuñez, 1999], рис. 1.1 и 1.2.

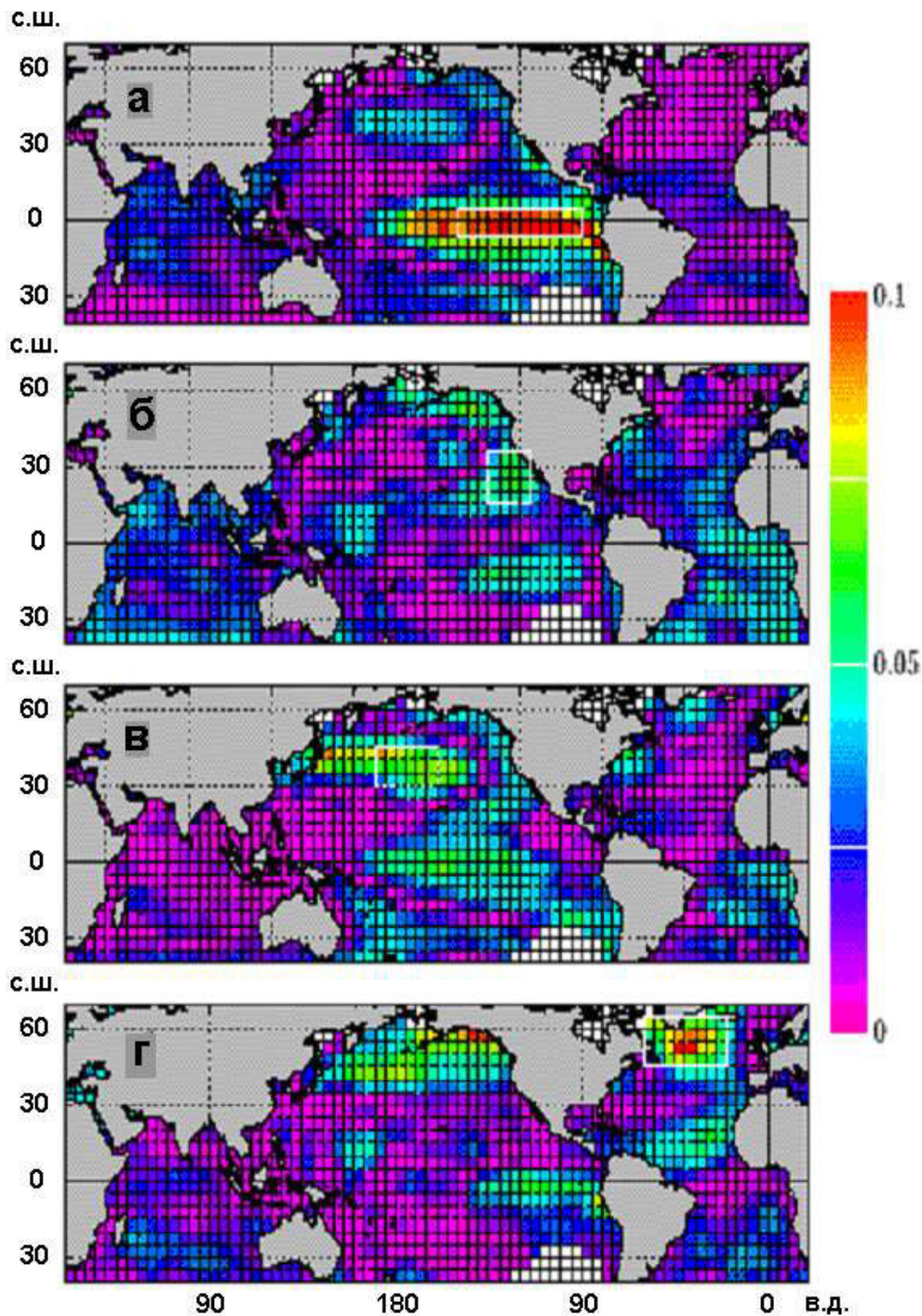


Рисунок 1.1. Распределение основных амплитуд собственных векторов первой ЭОФ, описывающих сигнал ЭНЮК (а) и первых трех ЭОФ описывающих изменчивость не ЭНЮК (б,в,г). Для пространств с высокими амплитудами, оконтуренных белыми прямоугольниками, приведены временные реализации на рис. 1.2 (Заимствовано из [Enfield, Mestas-Nuñez, 1999] ).

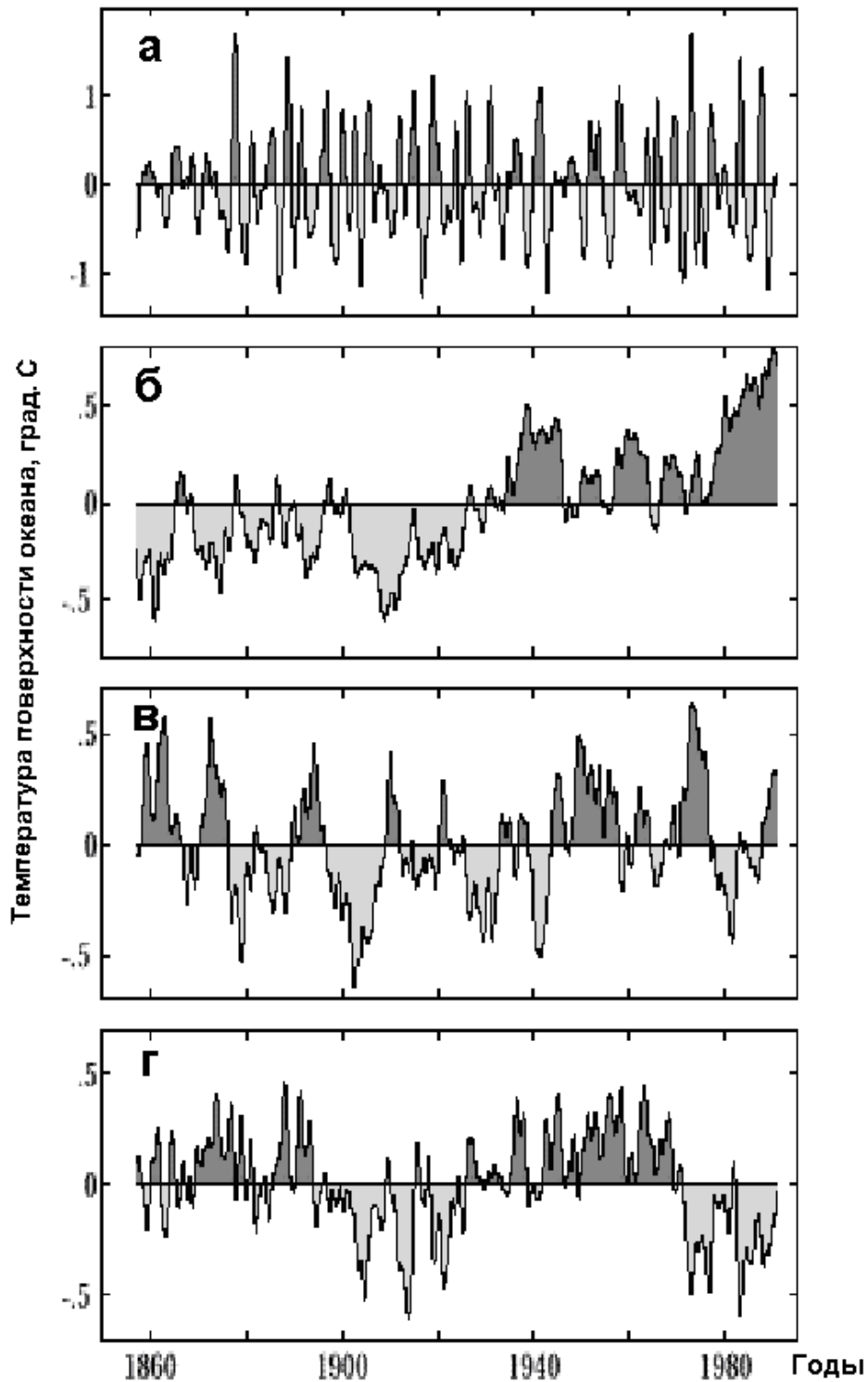
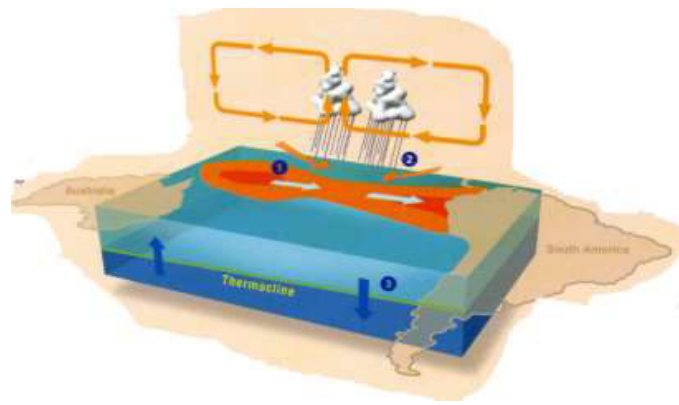


Рисунок 1.2. Временные реализации пространственных эмпирических мод, приведенных на рис.1.1: а – сигнал ЭНЮК, б – наложенные сигналы: глобальное потепление плюс декадная мода, в- ТДО (северо-тихоокеанская осцилляция), г- североатлантическая мультидекадная мода (взято из [Enfield, Mestas-Nuñez, 1999] ).

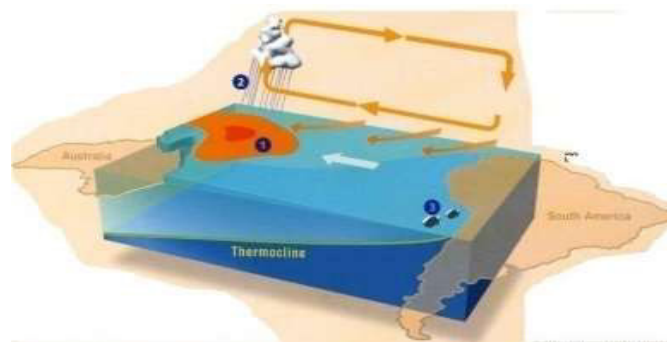
Первая мода представляет собой межгодовые колебания, соответствующие феномену Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК). Вторая – это глобальное повышение температуры с наложенными на нее квазидесятилетними вариациями. Третья, с периодичностью около 20 лет – это мода Тихоокеанской десятилетней осцилляции (ТДО). Четвертая же мода описывает междесятилетние изменения в Северной Атлантике. Величина амплитуды первой моды почти вдвое больше по сравнению с остальными. Это подтверждает важность изучения самого явления ЭНЮК и его проявлений [Goddard, Dille, 2005; Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009; Takahashi et al., 2011; Yuan, Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Capotondi et al. 2015; Zheleznova, Gushchina, 2016; Мохов, Смирнов, 2016; Serykh, Sonechkin, 2021].

Обобщенно, Эль-Ниньо – Южное Колебание представляет собой межгодовые квазипериодические колебания в глобальной системе океан-атмосфера, она является первой модой разложения температуры поверхности Мирового океана (ТПО), составляющей 18% от общей дисперсии [Philander, 1990; Wallace et al., 1998; Deser et al., 2010; Messie, Chavez, 2011]. ЭНЮК имеет две фазы колебания – положительную (Эль-Ниньо) и отрицательную (Ла-Нинья). События Эль-Ниньо соответствуют теплым (положительным) аномалиям ТПО в экваториальной зоне Тихоокеанской акватории, а события Ла-Нинья

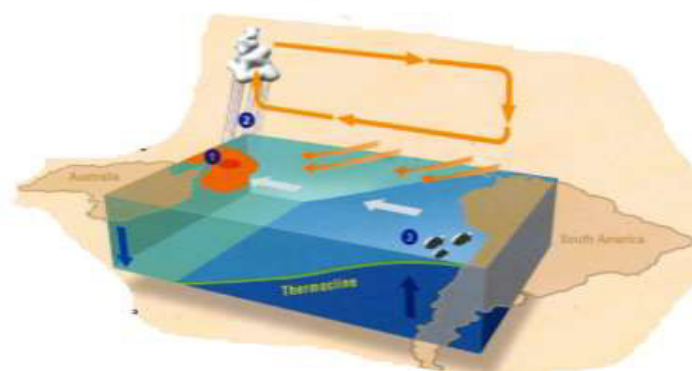
– холодным (отрицательным) аномалиям ТПО. Их схематическое представление приведено на рис.1.3. При этом события Эль-Ниньо достаточно подробно изучены и описаны [Артамонов, Воскресенская и др., 1991; Воскресенская и др., 1992; Воскресенская, Полонский, 1992; Полонский и др., 2003; Воскресенская, Михайлова, 2006; 2010(а; б; в); Лубков и др., 2017; Петросянц, Гущина, 2002; Mokhov et al., 2004; Dommenges et al., 2013], имеются успешные попытки в их моделировании [Duan et al., 2014; Yang, Jiang, 2014; Tao et al., 2020], типизации [Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009, Takahashi et al., 2011, Лубков, 2017; 2019; 2022] и анализе глобальных проявлений [Семенов и др., 2006; Бышев и др., 2012; Железнова, Гущина, 2015]. Что касается Ла-Нинья, то до конца 1990 г. социальные последствия от этих событий были относительно неинтересны всему миру. Явление Ла-Нинья рассматривали как результат развития Эль-Ниньо и ни в коем случае не рассматривали его, как отдельный процесс. Исследователи не видели необходимости проводить различия между нормальными условиями и условиями Ла-Нинья. К нормальным условиям относили просто период отсутствия явления Эль-Ниньо.



а



б



в

Рисунок 1.3. Схематическое представление Эль-Ниньо (а), неаномальных условий в экваториальной зоне Тихого океана (б) и Ла-Нинья (в)

Эта точка зрения невольно подкреплялась средствами массовой информации (СМИ), которые, как правило, теряли интерес к Эль-Ниньо при малейших признаках его ослабления. Только после того, как в СМИ появилась информация о негативных социальных последствиях Ла-Нинья 1998–2000 гг., эти события стали изучать более пристально [Glantz, 2002-a].

Сегодня одно упоминание о возможном начале Ла-Нинья, скорее всего, вызовет бурную реакцию со стороны лиц, ответственных за принятие решений в странах, где Ла-Нинья оказывает существенное воздействие на изменение регионального климата, например, в Филиппинах, Малайзии, Брунее, Соединенных Штатах [Lyon and Camargo, 2009; Vai et al., 2015; Prasanna et al., 2019]. Однако уже стало вполне понятным, что эти события холодной фазы ЭНЮК имеет отклики не только в Тихоокеанском регионе.

Официально принятого определения Ла-Нинья на сегодняшний день не сформулировано [Webb and Magi, 2022]. 28 апреля 2005 года Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA) выступила с пресс-релизом о том, что 26 стран Всемирной метеорологической организации (ВМО) приняли участие в разработке определений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Был опубликован каталог индексов и рабочих определений [Catalogue of Indices ... , 2006]. Самые интересные предложения по определению Ла-Нинья из каталога ВМО перечислены ниже. Итогом работы [Catalogue of Indices ... , 2006] стало то, что каждая страна может самостоятельно



выбирать, какое определение использовать для расчетов и описаний этих явлений. В общем смысле Ла-Нинья обозначает событие, сопровождающееся аномальным понижением температуры поверхностного слоя воды экваториальной зоны Тихого океана, усилением пассатов и ростом индекса Южного Колебания (ЮК). При этом исследователи этого явления обычно подчеркивают, что речь идет об экстремальном охлаждении вод [Glantz, 1998].

В последние три десятилетия 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 уже получены некоторые типы и характеристики этих событий. В качестве примера можно привести работы [Singh et al., 2011; Лубков и др., 2017], в которых сделан обзор выполненных классификаций Эль-Ниньо и показаны их различия в климатических откликах.

В настоящее время большинство авторов отдают предпочтение гипотезе о существовании двух типов событий Эль-Ниньо – Восточно-Тихоокеанского (ВТ) или канонического и Центрально-Тихоокеанского (ЦТ) или «Modoki» [Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009; Takahashi et al., 2011; Zheleznova, Gushchina, 2016]. Для ВТ типа Эль-Ниньо характерно формирование максимально-положительной аномалии ТПО в восточно-экваториальной части Тихого океана в период зрелой фазы, а для ЦТ типа – в центрально-экваториальной. Но существуют и другие точки зрения. К примеру, в работе

[Capotondi 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.

Приведенные в литературе результаты классификаций типов Эль-Ниньо на ВТ и ЦТ, полученные разными авторами, заметно отличаются, иногда даже кардинально. Это связано с используемой методологией, а также с типами данных и их продолжительностью. К примеру, исследователи работы [Ashok et al., 2007] получили второй тип Эль-Ниньо с помощью разложения аномалий ТПО с 1974 по 2004 гг. 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 с 1970 по 2005 гг., 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 ( $10^{\circ}$ с.ш. и  $10^{\circ}$ ю.ш.), с 1870 по 2010 гг. В настоящее время наиболее широко используется метод [Takahashi et al., 2011]. Он позволяет объективно разделить события Эль-Ниньо на два типа и может быть также использован для классификаций Эль-Ниньо по данным климатических моделей.

Описанные выше исследования в основном были сосредоточены на изучении различных типов Эль-Ниньо. Если в настоящее время формируется научный консенсус о существовании двух типов Эль-Ниньо, то вопрос – могут ли Ла-Нинья быть разделены на типы – до сих пор остается открытым. Некоторые исследователи ранее уже отмечали, что Ла-Нинья можно разделить на два типа, как и Эль-Ниньо [Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009]. Классификация Эль-Ниньо в основном базируется на нормированных рядах зимних месяцев (декабрь-январь-февраль, DJF) индексов Nino3 и Nino4 [Kug et al., 2009; Yeh, 2009] или на нормированных рядах индекса DJF Nino3 и индекса Эль-Ниньо Modoki [Ashok et al., 2007]. В работах [Kao, Yu, 2009; Kug, Nam, 2011; Ren, Jin, 2011] было выдвинуто, что трудно выделить два типа Ла-Нинья на основе существующих индексов, ведь события ЦТ можно рассматривать как нелинейное проявление канонических (VT) событий [Dommenges et al., 2013]. Также исследования [Kug et al., 2009; Kug, Nam, 2011; Ren, Jin, 2011] показали, что зональное расположение максимально-холодной аномалии ТПО в центре не отображает очевидного изменения каждого индивидуального явления Ла-Нинья.

Таблица 1.1. Сравнение существующих классификаций Ла-Нинья

Работа	Период исследования Ла-Нинья	Количество типов Ла-Нинья	Метод классификации
Shinoda et al., 2011	1981-2010	2	Визуальный анализ карт поверхностных течений по спутниковым данным
Singh et al., 2011	1978-2009	2	ЭОФ анализ ПСО
Yuan and Yan, 2013	1950-2011	2	$ Nino3  >  Nino4  \rightarrow EP$ $ Nino3  <  Nino4  \rightarrow CP$
Zhang et al., 2014	1950-2009	3	$ Nino3  >  Nino4  \rightarrow EP$ $ Nino3  <  Nino4  \rightarrow CP$ + визуальный анализ $\rightarrow Mix$
Ding et al., 2017	1950-2012	3	$ Nino3  >  Nino4  \rightarrow EP$ $ Nino3  <  Nino4  \rightarrow CP$ + визуальный анализ $\rightarrow Mix$

Напротив, другие исследования утверждают о существовании двух типов Ла-Нинья [Cai, Cowan, 2009; Shinoda, 2013]. Например, события ЦТ Ла-Нинья можно четко отличить от событий ВТ Ла-Нинья в поверхностных океанических течениях путем анализа спутниковых данных [Shinoda, 2013]. Авторы

работы [Singh et al., 2011], изучавшие особенности разных типов событий Ла-Нинья и Эль-Ниньо по данным о ТПО и поверхностной солености океана (ПСО), так же выделили два типа Ла-Нинья, но не подкрепили это статистической достоверностью из-за коротких рядов данных. В самых последних исследованиях [Yuan, Yan, 2013; Zhang, 2014; Ding, 2017] тоже используются ряды не более 60 лет (табл. 1.1).

Существует шесть теорий образования и цикличности ЭНЮК [Neelin et al., 1998; Lin, 2009]: 1) теория постепенно взаимосвязанных мод [Bjerknes, 1969; Gill, 1985] 2) теория стохастического воздействия [McWilliams, Gent, 1978; Lau, 1985], 3) теория осциллятора «загрузки-разгрузки» [Jin, 1997], 4) теория запаздывающего осциллятора [Suarez, Schopf, 1988; Münnich et al., 1991], 5) теория осциллятора адвективного отражения [Picaut et al., 1997] и 6) теория западно-тихоокеанского осциллятора [Weisberg, Wang, 1997]. Механизмы обратных связей между океаном и атмосферой отражаются в первых трех теориях. Однако современные климатические модели, включающие эти обратные связи, по-прежнему испытывают трудности при моделировании фаз ЭНЮК и весьма чувствительны к различным физическим параметрам [Lin, Qian, 2019]. Свободные океанские волны, включая экваториальные волны Кельвина и Россби, описываются тремя другими теориями и прослеживаются как в реальных наблюдениях [Kessler, McPhaden, 1995; Mosquera et al., 2013; Hu, Fedorov, 2017], так и в модельных данных [Dewitte et al., 1999; Vialard et al., 2001; Puy et al., 2017].

Фазовая скорость свободных волн Кельвина обычно составляет 2-3 м/с, а фазовая скорость свободных волн Россби – 0,5-1 м/с. Эти волны вызваны аномальным усилением западных или восточных ветров [Lengaigne et al., 2004], взаимосвязанных с внутрисезонным колебанием Маддена-Джулиана [Zhang, 2005], и демонстрируют отчетливое горизонтальное и вертикальное распространение, в связи с различными типами Эль-Ниньо [Zhang et al., 2017]. Однако скорости распространения свободных океанских волн слишком велики, чтобы объяснить 3–6-летний цикл образования ЭНЮК.

Основным направлением многочисленных работ по изучению механизма ЭНЮК является исследование амплитуды, структуры, модуляции и асимметрии между Эль-Ниньо и Ла-Нинья [An, Wang, 2000; Timmermann, 2003; Yeh et al., 2004; Choi et al., 2013; Ogata et al., 2013; Wittenberg et al., 2014; Okumura et al., 2017]. Однако, основополагающий механизм среднего климатического состояния, модулирующего частоту ЭНЮК, остается открытым.

Явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья имеют значительные различия, как в их пространственной структуре, так и в продолжительности [Larkin, Harrison, 2002]. Большинство Эль-Ниньо быстро заканчиваются после формирования максимально-положительных аномалий ТПО в конце года, тогда как Ла-Нинья могут сохранить свое существование в следующем году и повторно усилиться в период зимы второго года [Larkin, Harrison, 2002; Okumura et al., 2010].

Нелинейные процессы в атмосфере являются основными в формировании этой асимметрии: большие положительные аномалии ТПО могут вызывать глубокую конвекцию над холодным языком, в то время как отрицательные аномалии не оказывают дальнейшего влияния на нормально сухие условия [Hoerling et al., 1997]. В работе [Okumura, Deser, 2010] была предложена следующая гипотеза: во время Ла-Нинья атмосферная волна Кельвина, вызванная тропосферным охлаждением над Индийским океаном, вызывает аномалию поверхностного ветра направленную на запад в западно-экваториальном секторе Тихого океана. Эти аномалии западного приповерхностного ветра, вызванные аномалиями в Индийском океане и в северо-западной тропической части Тихого океана, не позволяют в течение событий Ла-Нинья сбалансировать восточно-экваториальный ветер, вызванный аномалиями осадков над отдаленной западно-экваториальной частью Тихого океана. Отсутствие баланса аномалий приповерхностного ветра над западно-экваториальной частью Тихого океана во время Ла-Нинья обусловлено сдвигом на запад аномалий осадков из-за нелинейной зависимости глубокой атмосферной конвекции относительно абсолютных значений ТПО [Okumura, Deser, 2010]. Чисто восточная аномалия ветра над западно-экваториальной частью Тихого океана в течение Ла-Нинья является гипотетической причиной двухлетней продолжительности события.

В современных работах [Chen et al., 2016; Okumura et al., 2017; Chen, Li, 2021] показано, что как динамические процессы (связанные с поверхностным напряжением ветра, волнением и изменением глубины залегания термоклина), так и термодинамические процессы (это солнечное излучение и изменения скрытого теплового потока из океана в атмосферу) способствуют быстрому затуханию и, следовательно, фазовому переходу при каноническом (BT типе) Эль-Ниньо. В то время как термодинамические процессы оказывают меньшее влияние на скорость затухания ЦТ Эль-Ниньо и Ла-Нинья из-за западного смещения центров аномалий ТПО. Таким образом, разница в воздействии напряжения приземного ветра имеет решающее значение для вклада в асимметрию эволюции между ЦТ Эль-Ниньо и Ла-Нинья, в то время как разница в ветровом напряжении, так и в аномалиях теплового потока вносит свой вклад в асимметрию эволюции между BT Эль-Ниньо и Ла-Нинья [Chen, Li, 2021]. Причины асимметрии при двух типах Ла-Нинья относительно разных типов Эль-Ниньо еще не рассматривались.

ЭНЮК может влиять на глобальный характер циркуляции атмосферы за тысячи километров от экваториальной части Тихого океана через «атмосферный мост» [Liu, Alexander, 2007]. Во время событий Эль-Ниньо глубокая конвекция и теплопередача в тропосфере усиливаются над бассейном аномалий ТПО – это тропическое воздействие, связанное с ЭНЮК, создает волны Россби, распространяющиеся к полюсу и на восток, и впоследствии преломляющиеся от полюса к тропикам.



Планетарные волны формируются как в северной, так и в южной частях Тихого океана, а схема дальнего действия устанавливается в течение 2-6 недель [Liu, Alexander, 2007]. Процессы, которые приводят в действие ЭНЮК, изменяют температуру поверхности, влажность, направление ветра и распределение облачности над северной частью Тихого океана. Как следствие, меняются процессы взаимодействия океана и атмосферы, включая потоки тепла, влаги и импульса на поверхность, таким образом, что возникают аномалии не только в атмосфере, но и в океане. Атмосферный мост более эффективен во время бореальной зимы, когда углубленный Алеутский минимум приводит к более сильным и холодным северо-западным ветрам над центральной частью Тихого океана и более теплым и влажным южным ветрам вдоль североамериканского западного побережья [Liu, Alexander, 2007].

Исследователей процесса Эль-Ниньо – Южное колебание можно условно разделить на две группы. Первая группа занимается исследованием природы явления, его прогнозом возникновения и моделированием. Вторую группу интересует изучение глобальных откликов на разные фазы ЭНЮК. Исследование глобального отклика на ЭНЮК в гидрометеорологических аномалиях по всему Земному шару – является одной из самых актуальных тем изучения взаимодействия океана и атмосферы. Изучение данной темы позволило определить вызванные ЭНЮК аномалии температуры воздуха и количества осадков [Ropelewski, Halpert, 1989; Kiladis, Diaz, 1989; Livezey et al., 1997; Бышев, 2003], изменение движения траектории

циклонов на севере Тихого океана [Fraedrich et al., 1992; Chen, Dool, 1997] и формирование аномалий ТПО в тропической зоне [Воскресенская и др., 1992; Enfield, Mayer, 1997]. Ярче всего отклик ЭНЮК прослеживается в тропиках, в то время как нахождение его в средних и высоких широтах вызывает трудности. Однако в исследованиях [Гущина, Петросянц, 1998; Петросянц, Гущина, 1998] утверждается, что воздействие ЭНЮК на атмосферную циркуляцию продолжается в течение более десяти месяцев до  $60^{\circ}$ с.ш. Это подтверждается в работах [Shabbar, Khandekar, 1996; Livezey et al., 1997], где описано влияние ЭНЮК на изменение количества осадков и температуры воздуха в США и Канаде.

Возникновение аномалий гидрометеорологических характеристик в годы Эль-Ниньо не являются зеркальным отражением аномалий в годы Ла-Нинья [Hoerling et al., 1997; Нестеров, 2013]. Различная продолжительность Эль-Ниньо и Ла-Нинья, показанная в работах [Okumura et al., 2010], может влиять на глобальный атмосферный отклик, что, в свою очередь, вызывает климатические аномалии не только в Индо-Тихоокеанском регионе, но и в средних и высоких широтах. Например, длительное событие Ла-Нинья 1998–2001 гг. вызвало обширную засуху в Соединенных Штатах, в южной части Европы и в юго-западной Азии [Hoerling, Kumar, 2003].

Самые первые карты о воздействии Ла-Нинья на окружающую среду были приведены в работе [Ropelewski, Halpert, 1987]. В этом исследовании были продемонстрированы условия распределения аномального выпадения осадков и засух

(рис. 1.1, а) и температуры воздуха (рис. 1.1, б) во время проявления Ла-Нинья и после. На этих картах видно, что изменение аномалий осадков и температуры воздуха над Атлантико-Европейским регионом отсутствует, что подтверждается в ряде работ [Ropelewski, Halpert, 1987; Halpert, Ropelewski, 1992; Bronnimann et al., 2007], где авторы говорят о затруднении нахождения сигнала в этом регионе из-за большой изменчивости между событиями. Однако авторы других работ утверждали, что значимый сигнал на ЭНЮК находится над Европой [Ineson, Scaife, 2009; Li, Lau, 2012].

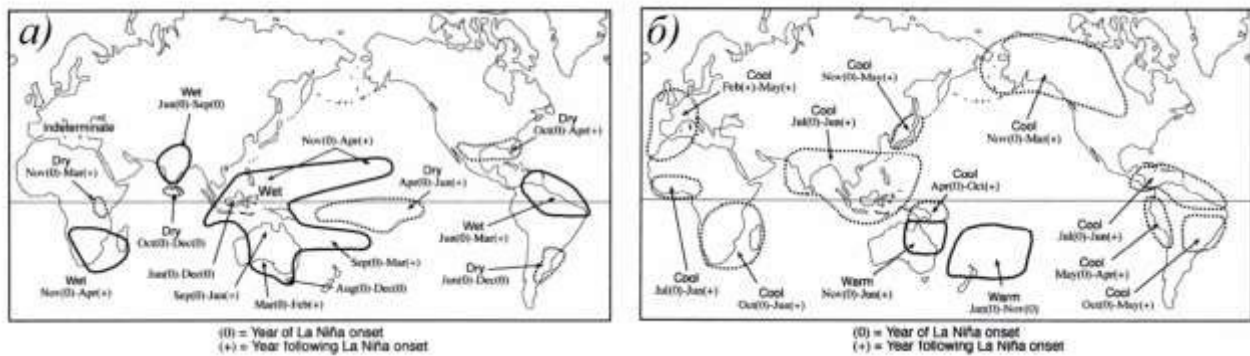


Рисунок 1.4 – Композитные карты потенциальных проявлений осадков и засух (а) и изменения температурных условий во время событий Ла-Нинья по расчетам работы [Ropelewski, Halpert, 1987]

В исследованиях многочисленных работ, в частности, таких статей как [Нестеров, 2000; Мохов, Смирнов, 2006; Zhang et al., 2014] авторами был сделан акцент на то, что в годы Ла-

Нинья происходит большая изменчивость циркуляции атмосферы в Атлантико-Европейском регионе, чем в годы Эль-Ниньо.

Одно из самых известных последствий события Ла-Нинья отмечалось летом 1988 в виде засухи в центрально-западной части США и стало одним из наиболее дорогостоящих для этой страны. Оно составило 40 млрд. \$ США по оценочной версии [Glantz, 2002]. В работе [Trenberth, 1988] это бедствие автор связал с холодной аномалией, возникшей в центрально-экваториальной части Тихого океана. Подобная ситуация повторилась также и летом 1998 г. Однако в этом случае катастрофическая засуха сместилась на северо-восток центральной части США. Один из американских авторов [Changnon, 1999] высказал мнение о том, что последствия Ла-Нинья являются более дорогостоящими для экономики США по сравнению с событиями Эль-Ниньо. В качестве обоснования этой точки зрения он приводит оценку разрушительных последствий катастрофически интенсивного процесса ЭНЮК 1997-1999 гг.

Эль-Ниньо – Южное Колебание влияет не только на изменение климата, но и оказывает огромное воздействие на сельское хозяйство, экономику, экологию, биологическую продуктивность и здоровье людей в разных регионах мира. Воздействие ЭНЮК на растениеводство изучалось во многих странах [Handler, 1990; Cane et al., 1994; Carlson et al., 1996; Meinke et al., 1998]. В целом, исследования показывают, что урожайность в годы Ла-Нинья выше в странах западных и юго-восточных районов Тихого океана. Исследования влияния фаз

ЭНЮК на урожайность арахиса проводились в Австралии [Meinke, Hammer, 1995], на кукурузу – в Зимбабве [Phillips et al., 1998] и на другие культуры – в других странах [Hansen et al., 1998; Messina et al., 1999]. В работе [Liu et al., 2014] показано, что на Северокитайской равнине в годы Ла-Нинья наблюдалось самое высокое сокращение урожайности кукурузы.

В различной степени Ла-Нинья оказывает отрицательное или положительное влияние на морские ресурсы в зависимости от интенсивности события, начала и адаптационной способности вида [Arntz et al., 2006]. В исследовании [Kumar et al., 2014] авторы сделали выводы, что в годы сильных Ла-Нинья улов тунца в Индийском океане снижается. Например, в 1988 г. улов тунца составил 766546 т (рекордно низкий показатель), в то время как в 2006 г. улов был 1456054 т (рекордно высокий показатель). Работа [Riascos et al., 2008] показала снижение общей биомассы двустворчатого моллюска в заливах Колумбии в годы явлений Ла-Нинья, и ее резкое увеличение сразу в последующий год, после окончания этих событий.

Таким образом, выявленные проблемы в изучении событий Ла-Нинья указывают на необходимость тщательного анализа их возникновения, типизации и определения закономерностей формирования глобальных климатических аномалий и последующих региональных откликов по территории нашей планеты Земля под влиянием холодного эпизода ЭНЮК. Изучению отмеченных особенностей и закономерностей Ла-Нинья

посвящена настоящая работа с привлечением наиболее качественных массивов данных реанализов, с максимально-временной продолжительностью.

## ГЛАВА 2

### ТИПИЗАЦИЯ ЛА-НИНЬЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Для изучения закономерностей межгодовых колебаний Дв системе взаимодействия атмосферы и океана, соответствующих Ла-Нинья, в настоящей работе используются среднемесячные ряды разных метео-параметров. При этом важно, чтобы длительность выборок была не менее тридцати лет (стандартный период описания климата). Основной период исследования этой работы – 1900–2019 гг. Однако некоторые данные расширили период исследования с 1870 по 2019 гг., а другие – наоборот, в отдельных случаях сузили возможность анализа до 20 лет.

Основной характеристикой для выделения событий Ла-Нинья является ТПО. Среднемесячные данные о ТПО привлекаются из различных столетних, реконструированных наборов данных ведущих научных центров США, Великобритании и Японии, буев Тихого океана проекта TOGA-TAO и некоторых спутниковых массивов. В то же время, чтобы более детально проанализировать этапы возникновения и развития Ла-Нинья, в работу включены расширенные параметры гидрометеорологических характеристик таких, как приземное давление, скорость/направление ветра и поверхностных течений, изменение

температуры воды по глубине и т.д., которые берутся из современных океанических реанализов. Для изучения климатических откликов на холодные эпизоды ЭНЮК уже привлекаются атмосферные реанализы, включающие в себя пространственно-временные изменения температуры воздуха, приземного давления, геопотенциальных высот на разных изобарических уровнях, количество осадков и других характеристик. Общую картину исследования событий Ла-Нинья дополняет анализ разных индексов взаимодействия атмосферы и океана.

Завершающей целью настоящей работы является определение влияния событий Ла-Нинья на Атлантико-Европейский регион. При этом важнейшим аспектом является типизация этих явлений с учетом всех особенностей идентификации начала, продолжительности и конца событий. Этот вопрос особо актуален в исследованиях, основанных на композитном методе сопоставления характеристик типовых выборок отрицательных аномалий ТПО, соответствующих годам Ла-Нинья, к периодам безаномальных условий в экваториальной зоне Тихого океана. До сих пор для определения хронологии событий ЭНЮК разными авторами используются разные данные, методы и критерии. В данной главе основной фокус направлен на корректное выделение годов Ла-Нинья и их классификацию с учетом особенностей локализации аномалий ТПО и изменения гидрометеорологических характеристик в системе океан-атмосфера по всему экваториально-тихоокеанскому району.



## 2.1 Реконструированные данные температуры поверхности океана и их верификация

С начала 2000-ых годов ведется активная разработка по продлению исторических рядов данных наблюдений за ТПО с помощью, так называемых, «методов реконструкции». В этих методах в качестве базовых математических функций для проектирования значений данных в более ранние периоды, когда измерений было крайне мало, используют пространственные закономерности в полях ТПО для более обеспеченного наблюдениями периода с 1970-х гг. [Hirahara et al., 2014]. Поскольку данные реконструкции в Тихоокеанском регионе включают пространственные структуры событий ЭНЮК, зафиксированные в последние 30 лет, события Ла-Нинья в них могут быть смещены в сторону тенденций последних зафиксированных явлений [Giese et al., 2010]. Это может привести к неправильному подсчету истинного количества этих событий. Отсюда вытекает вопрос: какой из массивов лучше выбрать для изучения Ла-Нинья, их классификации, а также для последующего исследования климатических откликов в отдаленных регионах Земли на эти явления?

В настоящей монографии исследование Ла-Нинья проводилось на основе использования трех основных массивов о среднемесячной ТПО: HadISST (Великобритания), COBE SST2 (Япония) и ERSSTv5 (США). Отметим, что выбор именно этих данных был обусловлен наличием достаточно длинных исторических рядов, более ста лет, что позволяет на

значимом уровне проводить статистический анализ, в особенности для событий ЭНЮК [Марчукова и др., 2020]. Период исследования данных ТПО – с 1870 по 2019 гг. Охарактеризуем каждый выбранный массив, уделив внимание методам их реконструкции.

Данные ТПО в массиве HadISST охватывают период с 1870 по 2019 гг. Они состоят из Морского банка данных Метеорологической службы Великобритании (MDB – Marine Data Bank) в узлах пространственной сетки  $1^\circ \times 1^\circ$ , которые, начиная с 1982 г., включают данные Глобальной системы телекоммуникаций (GTS – Global Telecommunications System). Для расширения объема информации MDB привлекались среднемесячные данные о ТПО, за период с 1871 по 1995 гг., из Комплексного массива данных об океане и атмосфере (COADS – Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Кроме этого, в массиве были использованы спутниковые данные NOAA (сенсор – AVHRR), наблюдаемые только в ночное время суток, и разработан свой алгоритм ассимиляции данных [Rayner et al., 2003]. Этот алгоритм имеет значительные отличия от тех, что применяются в массиве NOAA IO SST v2 [Reynolds et al., 2002; Reynolds et al., 2007], который в свою очередь будет использован в текущей работе для оценки реконструкционных массивов. Значения ТПО в HadISST восстанавливаются с использованием интерполяционной процедуры, с оптимальным уменьшением по пространству в два этапа, и 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 использовано разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) данных ТПО «in situ» и данных, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли [Rayner et al., 2003]. Массив HadISST нередко используют при анализе [например, Yuan, 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  $1^\circ \times 1^\circ$  за период с 1850 по 2019 гг. [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]. Так же в массиве использовались 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, Parker, 1995]. Этот эмпирический метод основан на сравнении результатов специально проведенных измерений ТПО, выполненных на торговых судах ручным термометром при измерении температуры заборной воды в выставленных на палубе ведрах с учетом тепло- и влагообмена. В результате в данные внесены географические и сезонные поправки для периода с 1856 по 1941 гг. 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 последнюю пятую версию реконструированного массива среднемесячных ТПО ERSSTv5 [Huang et al., 2017]. Регулярная сетка этого массива имеет пространственное разрешение  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ . Для восстановления ежемесячных данных ТПО в ERSSTv5 использовались измерения ТПО «in situ» по данным наблюдений на буях и судах с 1875 г. по настоящее время. Данные о ТПО «in situ» с 1875 по 2007 гг. взяты из ICOADS R3.0 [Woodruff et al., 2011], а с 2007 взяты 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, методология реконструкции

ТПО основана на работах [Smith et al., 1996; Smith, 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 гг.:

$$R(x) = \sum_i f_i \psi_i(x), \quad (2.1)$$

где  $R(x)$  - восстановленная АТПО,  $\psi_i(x)$  -  $i$ -ый ЭОТ, а  $f_i$  - подобранный коэффициент восстановления путем минимизации ошибки [Huang et al., 2017]. Для получения пространственных 140 ЭОД и процедуры контроля качества использовался еженедельный интерполяционный массив NOAA IO 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 2019 гг. 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  $95^\circ$ ,  $125^\circ$  и  $140^\circ$  западных долготах.

Дополнительно были использованы 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  $1^\circ \times 1^\circ$  за период 1982-2019 гг., который 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; Reynolds et al., 2007]. Массив данных со спутника Terra представляет собой среднемесячные данные с пространственным разрешением  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$  за период 2001–2019 гг.

С помощью корреляционного анализа было проведено сравнение массивов HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2. Коэффициенты корреляции между массивами рассчитывались по формуле (2.2), а соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО или RMSE – Root Mean Square Error) по формуле (2.3).

$$r = \frac{\text{cov}(x_i y_i)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – среднеквадратические отклонения массивов,  $\text{cov}(x,y)$  – их ковариация.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (2.3)$$

где  $x_i$  – значение одного массива, а  $y_i$  – значение другого.

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, обеспечив пространственную сопоставимость массивов [Марчукова и др., 2020].

Результаты рассчитанных полей корреляции и RMSE между сравниваемыми в работе массивами приведены на рис. 2.1. Можно отметить, что корреляция между COBESST2 и HadISST (рис. 2.1, в) в экваториальной зоне несколько выше, чем в случае корреляций между HadISST–ERSSTv5 (рис. 2.1, а) и COBESST2–ERSSTv5 (рис. 2.1, д). Этот же вывод подтверждается при оценке корреляционной связи в районе Niño3.4: за весь период сравнений коэффициент корреляции для COBESST2–HadISST равен 0,93, в то время как для HadISST–ERSSTv5 и COBESST2–ERSSTv5 – 0,90 и 0,89 соответственно. 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, ERSSTv5 отличается от них больше и RMSE в среднем равняется  $0,3-0,5^{\circ}\text{C}$ , при этом RMSE в районах Nino3 и Nino4 достигают  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

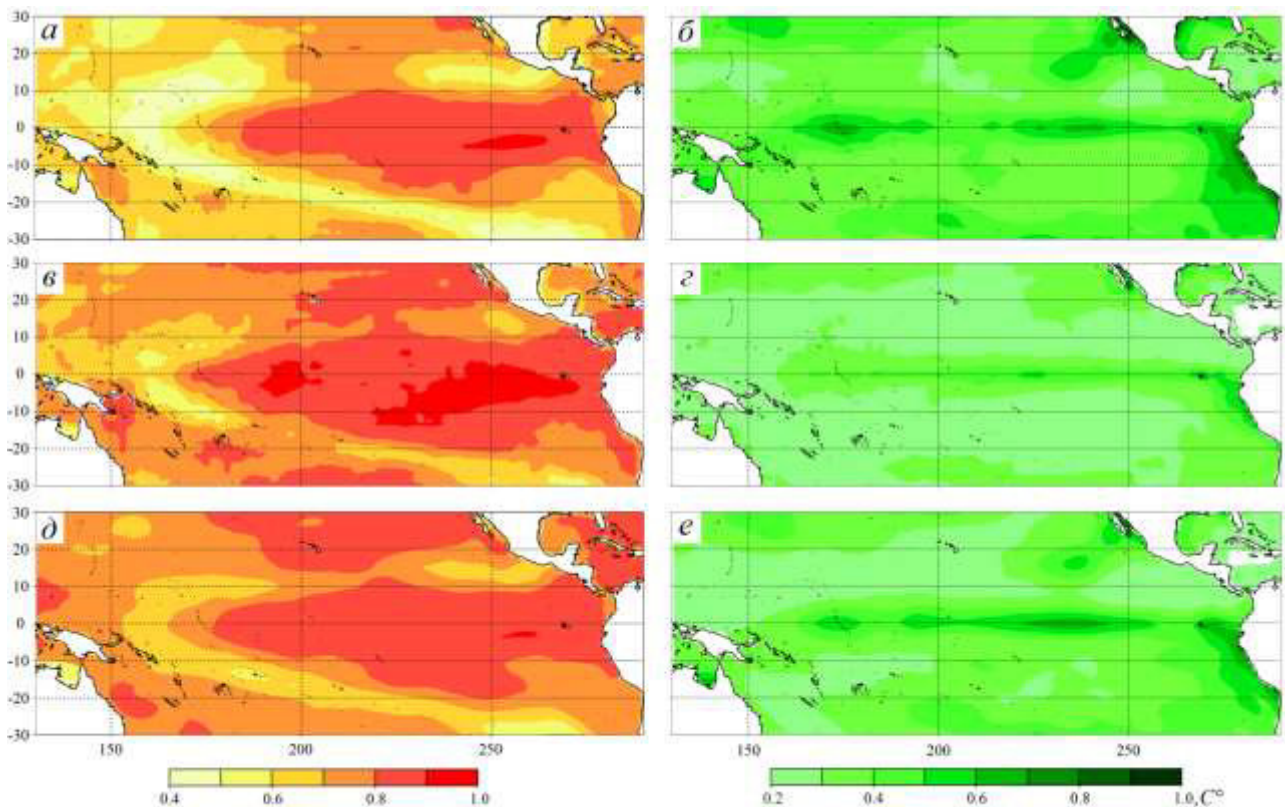


Рисунок 2.1 – Коэффициенты корреляции между массивами ERSSTv5 и HadISST (а), COBE SST2 и HadISST (б), ERSSTv5 и COBE SST2 (д), и RMSE массивов ERSSTv5 и HadISST (б), COBE SST2 и HadISST (г), ERSSTv5 и COBE SST2 (е)



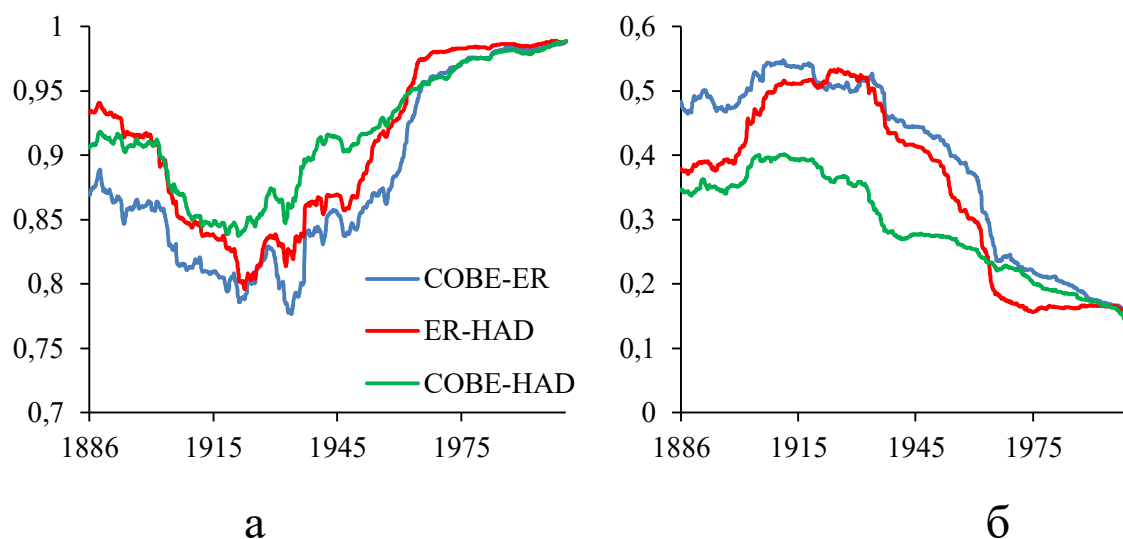


Рисунок 2.2 – Коэффициенты корреляции (а) и RMSE (б), рассчитанные для скользящего 30-летнего периода в районе Niño 3.4 между массивами данных ERSSTv5 и HadISST (красная линия), COBE SST2 и HadISST (зеленая), ERSSTv5 и COBE SST2 (синяя)

Далее рассмотрим изменение корреляции и RMSE между тремя массивами во времени. Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляции и RMSE для скользящего 30-летнего периода с 1870 по 2019 гг. в районе Niño3.4, с координатами  $5^{\circ}$  с. ш. –  $5^{\circ}$  ю. ш. и  $170^{\circ}$  з. д. и  $120^{\circ}$  з. д. (рис. 2.2). Получено, что пара COBE SST2–HadISST с 1885 по 1960 гг. имеет коэффициенты корреляции 30-летнего скользящего периода выше, чем остальные корреляционные пары (рис. 2.2, а), а RMSE – ниже (рис. 2.2, б). При этом с 1905 г. коэффициенты корреляции для всех 3 пар уменьшаются синхронно, а RMSE повышаются. Для всех трех пар в период с 1900 по 1970 гг. данные менее согласованы (значения корреляции уменьшаются, а RMSE – растут), чем в период с 1886 по 1900 гг. Это можно объяснить тем, что

до 1900 г. в Тихом океане были выполнены единичные измерения ТПО, в основном британскими военными кораблями. Температуру измеряли 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 гг. 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, Parker, 1995].

На следующем этапе было проведено сопоставление реконструированных массивов со спутниковыми данными и натурными наблюдениями. В таблице 2.1 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 ТАО, расположенных на экваторе. Стоит отметить, что периоды сравнений несколько отличаются. Для NOAA OI SSTv2 период равен 1982–2019, для спутника Terra – 2001–2019 и буев ТАО – 1981–2019, при этом данные буев имеют 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 ТАО 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 (табл. 2.1) 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 так же учитывались и 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.

Таблица 2.1. Сравнение массивов реконструкций COBESST2, HadISST и ERSSTv5 с данными спутника Terra (сенсор MODIS) за период 2001–2019, спутников NOAA (сенсор AVHRR) за период 1982–2019 и буев проекта ТАО за период 1981–2019 на основе корреляции и RMSE

мас-сив	рай-он	r			RMSE, °C		
		HadISST	COBESST2	ERSS Tv5	HadISST	COBESST2	ERSS Tv5
Сен-сор AVHRR	Nin о 3	0,99	0,99	0,99	0,24	0,34	0,41
	Nin о 3.4	0,99	0,99	0,99	0,18	0,27	0,34
	Nin о 4	0,98	0,99	0,98	0,19	0,31	0,39
Сен-сор MODIS	Nin о 3	0.94	0.94	0.94	0.32	0.45	0.46
	Nin о 3.4	0.91	0.98	0.89	0.47	0.34	0.65
	Nin о 4	0.92	0.98	0.98	0.44	0.59	0.68
Буи ТАО *	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 ТАО, привязанные к определенной локации, в связи с чем в координаты буев выполнялась сплайн-интерполяция массивов реконструкционных данных.

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 буями ТАО, самое меньшее отклонение наблюдается у массива COBE SST2. В сравнении с данными 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 [Марчукова и др., 2020].

Таким образом, можно сделать вывод, что реконструкция COBE SST2 лучше остальных массивов усваивает данные буев проекта ТАО, при этом имеет высокую корреляционную связь со спутниковыми данными MODIS-Terra, которые не усваивались в данной реконструкции. В тоже 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 [Huang et al., 2017], хуже остальных массивов описывает температурные изменения в выбранных регионах, имея сравнительно низкие корреляции и высокие RMSE. Полученные результаты опубликованы в работе [Марчукова и др., 2020].

## 2.2 Выделение событий Ла-Нинья и их статистические характеристики

Анализ качества глобальных массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5, проведенный в предыдущем разделе, показал возможность использования их для исследования событий Ла-Нинья. На их основе были рассчитаны температурные индексы в районах Nino3, Nino4, Nino3.4 и Nino1+2 с 1870 по 2019 гг. для описания первичных статистик без исключения линейного тренда и сезонной изменчивости (табл. 2.2). Если выполнить все эти процедуры фильтрации, среднее значение ( $\bar{x}$ ) будет равно нулю, поэтому ряды индексов ТПО были проанализированы в исходном виде. Длина каждого полученного ряда составила 1800 значений, дискретность – 1 месяц, единица измерения – градусы Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

На основании данных в таблице 2.2 можно сказать, что все выборки однородны, так как коэффициент вариации (С) во всех шести случаях меньше 33%, то есть изменчивость ТПО в экваториальных районах невелика. Однако изменчивость среднемесячных значений ТПО в районе Nino1+2 примерно на 6,7% выше во всех трех реконструированных массивах данных, чем в районах Nino4, Nino3 и Nino3.4. Различия по первичным статистикам между собой не превышают одной десятой значений каждого показателя.

Таблица 2.2 – Показатели первичной статистики для индексов Nino3, Nino4, Nino3.4 и Nino1+2 (без исключения линейного

тренда и сезонной изменчивости) массивов HadISST , COBE SST2 и ERSSTv5 с 1870 по 2019 гг.

Стат хар.	HadISST				COBE SST2				ERSTTv5			
	Nino3	Nino4	Nino3.4	Nino1+2	Nino3	Nino4	Nino3.4	Nino1+2	Nino3	Nino4	Nino3.4	Nino1+2
$\bar{x}$ , °C	25,8	28,4	27,0	22,9	25,8	28,3	26,9	22,4	25,9	28,3	26,9	22,9
D, °C <sup>2</sup>	1,4	0,3	0,7	5,3	1,4	0,4	0,8	4,9	1,4	0,4	0,9	4,6
$\sigma$ , °C	1,2	0,6	0,9	2,3	1,2	0,6	0,9	2,2	1,2	0,7	0,9	2,1
C, %	4,5	2,1	3,2	10,0	4,5	2,2	3,3	9,8	4,6	2,3	3,4	9,3
Min, °C	23,1	26,4	24,2	18,3	22,8	26,4	23,9	17,7	23,1	25,3	24,3	18,6
Max, °C	29,2	30,2	29,2	29,4	29,1	30,3	29,5	28,5	29,2	30,1	29,4	29,1
R, °C	6,1	3,8	5,0	11,1	6,3	3,9	5,6	10,7	6,1	4,7	5,1	10,6

Массив ERSSTv5 имеет несколько большую дисперсию индекса Nino4 ( $D=0,89^{\circ}\text{C}^2$ ) по сравнению с массивами HadISST ( $D=0,74^{\circ}\text{C}^2$ ) и COBE SST2 ( $D=0,79^{\circ}\text{C}^2$ ), а массив HadISST отличается большей дисперсией ( $D=5,30^{\circ}\text{C}^2$ ) и большим значением СКО ( $\sigma=2,30^{\circ}\text{C}$ ) в районе Nino1+2, чем по массивам ERSSTv5 ( $D=4,55^{\circ}\text{C}^2$ ,  $\sigma=2,13^{\circ}\text{C}$ ) и COBE SST2 ( $D=4,86^{\circ}\text{C}^2$ ,  $\sigma=2,20^{\circ}\text{C}$ ). Максимальные температуры характерны для района Nino4 ( $\sim 30,2^{\circ}\text{C}$ ), где проходит  $180^{\circ}$  меридиан (линия смены дат), а минимальные – для района Nino1+2 ( $\sim 18,2^{\circ}\text{C}$ ) – это район образования северной части Перуанского апвеллинга [Kämpf, Charman, 2016].

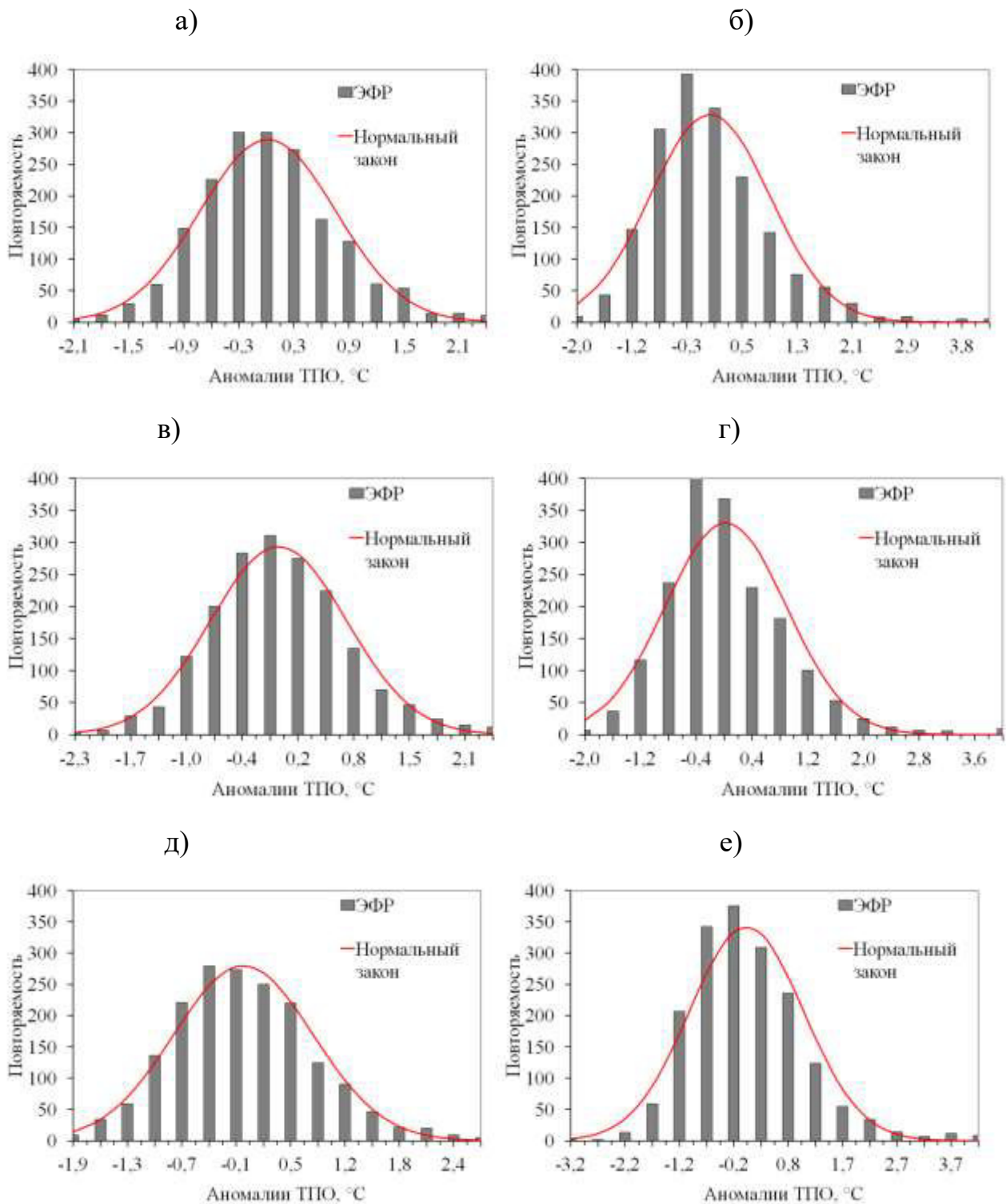


Рисунок 2.3 – Эмпирическая функция и соответствующий ей нормальный закон распределения аномалий ТПО с 1870 по 2019 гг. (с исключенными эффектом глобального потепления и сезонной изменчивости) в районе Niño3.4 по массивам HadISST (а), COBE SST2 (в) и ERSSTv5 (д) и в районе Niño1+2 по массивам HadISST (б), COBE SST2 (г) и ERSSTv5 (е)



По первичным статистикам экваториальных тихоокеанских индексов ТПО массивы HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 явно не отличаются, поэтому полученные ряды данных индексов Nino3, Nino4, Nino3.4 и Nino1+2 для каждого массива, уже с исключенными значениями линейного тренда и сезонной изменчивости, были проверены на соответствие эмпирической функции распределения (ЭФР) нормальному закону. Сначала сравним Nino3.4 – индекс, по которому будут выделяться события Ла-Нинья, – и Nino1+2 – индекс с наибольшей изменчивостью ТПО (рис. 2.3). Далее уже проанализируем ЭФР Nino3 и Nino4 (рис. 2.4) – это индексы, необходимые для первичной классификации Ла-Нинья по методу [Yeh et al., 2009].

Приведенные на рисунке 2.3 кривые подтверждают, что распределения ЭФР соответствуют нормальному закону распределения только в районе Nino3.4 массивов HadISST и COBE SST2, так как статистический критерий  $\chi^2$  меньше, чем критический  $\chi_{кр}^2$  [ $20,2 < 22,4$  (рис. 2.3, а) и  $18,6 < 22,4$  (рис. 2.3, в)]. Этот статистический вывод дает основание считать, что выбранные ряды данных подходят для дальнейшего выделения событий Ла-Нинья по индексу Nino3.4, так как именно в этом экваториальном районе на ТПО влияет большое число малых равнозначных факторов. Тип гистограмм имеет двустороннюю симметрию (рис. 2.3 (а), 2.3 (в)), что указывает на стабильность процесса в обоих случаях. ЭФР среднемесячных значений ТПО в районе Nino3.4 по данным ERSSTv5 уже не соответствует закону нормального распределения, так как статистический критерий  $\chi^2$  больше, чем критический  $\chi_{кр}^2$  [ $31,6 >$

22,4 (рис. 2.3, д)]. Гистограмма этой выборки имеет два пика (рис. 2.3, д), что может указывать на некорректность реконструированных данных или на неисправность измерительных приборов, то есть изначально неправильно выбранные измерительные данные для реконструкции. Гистограммы распределений среднемесячных значений ТПО в районе Nino1+2 массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 имеют разное количество пиков (многомодальные) и не соответствуют закону нормального распределения (рис. 2.3, б, г, е).

Это свидетельствует о присутствии определенных факторов, влияющих на исследуемый регион Nino1+2. Предполагается, что такими факторами могут служить два известных процесса в этом регионе, обуславливающих резкое изменение ТПО, – это интенсификация и ослабление перуанского апвеллинга [Kämpf, Charman, 2016; Марчукова и др., 2020].

Приведенные на рисунке 2.4 ЭФР индексов Nino3 и Nino4 показывают, что распределения не соответствуют нормальному закону во всех трех массивах. Только изменчивость в районе Nino4 массивов HadISST и COBE SST2 почти близки к соответствию, так как статистический критерий  $\chi^2$  немного больше, чем критический  $\chi_{кр}^2$  [ $25,1 > 22,4$  (рис. 2.4, а) и  $35,8 > 22,4$  (рис. 2.4, в)]. В случае с ERSSTv5 статистический критерий  $\chi^2$  индекса Nino4 намного больше критического  $\chi_{кр}^2$  [ $299,5 > 22,4$  (рис. 2.4, д)]. В случае с ERSSTv5 статистический критерий  $\chi^2$  индекса Nino4 намного больше критического

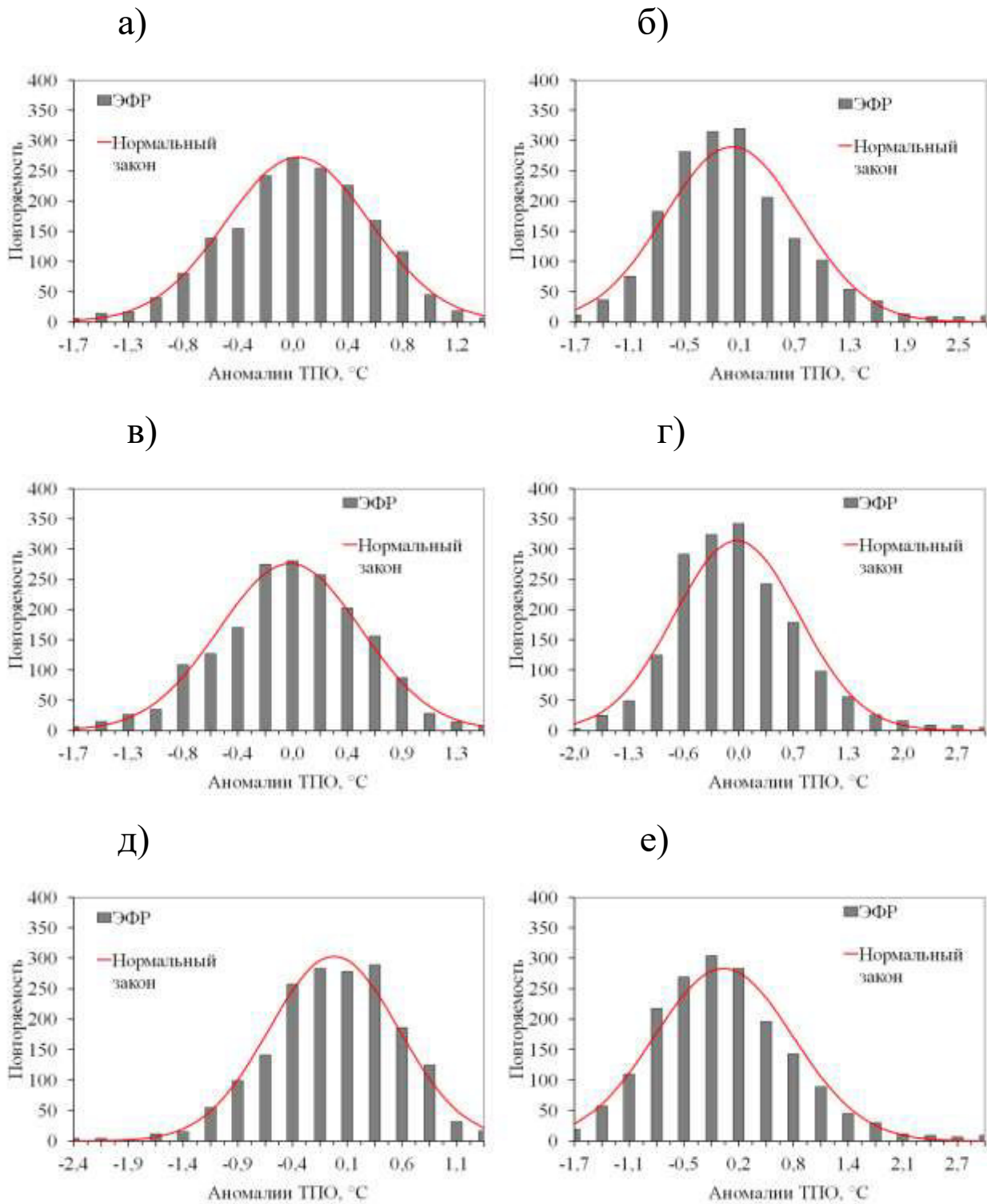


Рисунок 2.4 – Эмпирическая функция и соответствующий ей нормальный закон распределения аномалий ТПО с 1870 по 2019 гг. (с исключенными эффектом глобального потепления и сезонной изменчивости) в районе Nino4 по массивам HadISST (а), COBE SST2 (в) и ERSSTv5 (д) и в районе Nino3 по массивам HadISST (б), COBE SST2 (г) и ERSSTv5 (е)

$\chi_{кр}^2$  [299,5 > 22,4 (рис. 2.4, д)], а гистограмма повторяемости аномалий ТПО смещена в сторону положительных значений. Из этого можно предположить, что по массиву ERSSTv5 и методу [Yeh et al., 2009] 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  $\chi^2$  (474,5) по сравнению с COBE SST2 (320,5) и ERSSTv5 (410,9), а повторяемость аномалий ТПО смещена в сторону положительных значений (рис. 2.4, б). Отсюда можно предположить, что по данным HadISST и методу [Yeh et al., 2009] будет выделено больше Эль-Ниньо BT типа.

Перейдем к выделению событий Ла-Нинья по индексу Nino3.4. Напомним, что индекс Nino3.4 для выделения холодных эпизодов ЭНЮК представляет собой осредненную среднемесячную ТПО в районе, с координатами  $5^\circ$  с. ш. –  $5^\circ$  ю. ш. и  $170^\circ$  з. д. и  $120^\circ$  з. д., с исключением сезонной изменчивости и линейного тренда. Тренд исключается, чтобы убрать эффект влияния глобального потепления из-за которого может быть снижена оценка интенсивности событий Ла-Нинья, особенно последних двух десятилетий. Самый большой вклад линейного тренда в общую дисперсионную изменчивость аномалий ТПО в районе Nino3.4 – у массива ERSSTv5, который составил 5,9%, а величина тренда (Tr) равна  $0,05^\circ\text{C}/10$  лет. Наименьший вклад – у массива HadISST (1,8%, Tr= $0,02^\circ\text{C}/10$  лет). В массиве COBE SST2 вклад линейного тренда составил 4,9% (Tr= $0,04^\circ\text{C}/10$  лет). Все это особенности реконструкций данных каждого массива в отдельности, подробно описанные в

подглаве 2.1 и которые необходимо учитывать при дальнейшем анализе.

Для выделения событий Ла-Нинья был выбран оптимальный критерий, примененный ранее в работе [Voskresenskaya, Marchukova, 2017], при котором пороговое значение составило  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , соответственно, а минимальное время существования аномалии ( $\Pi$ ) – 5 месяцев:

$$\text{АТПО Nino3.4} \geq +0,5^{\circ}\text{C}; \Pi \geq 5 \text{ мес.} \quad (2.4)$$

Таким образом, с использованием оптимального критерия формулы (2.4) и учетом всех фильтраций с 1870 по 2019 гг. по данным массива HadISST было выделено 33 события Ла-Нинья (ЛН), по COBE SST2 – 32 ЛН, по ERSSTv5 – 35 ЛН (рис. 2.5). Вклад ЛН по данным HadISST в общую дисперсионную изменчивость аномалий ТПО в районе Nino3.4 составил 20,3% (рис. 2.5, а), по COBE SST2 – 24,1% (рис. 2.5, б), по ERSSTv5 – 18,5% (рис. 2.5, в) [Voskresenskaya, Marchukova 2015, Voskresenskaya, Marchukova, 2017, Марчукова и др. [2020].

Для каждого выделенного события были рассчитаны продолжительность ( $\Pi$ , в месяцах), интенсивность ( $I$ , в  $^{\circ}\text{C}$ ) и зрелая фаза. За зрелую фазу Ла-Нинья обычно принимают три месяца, при которых наблюдаются максимальные по модулю отрицательные значения аномалий ТПО [Yuan, Yan, 2013]. То есть, одно подмножество данных – это осредненные аномалии ТПО за три месяца, попадающие под понятие зрелой фазы. По данным массива HadISST максимальная фаза развития Ла-Нинья чаще всего выпадает на октябрь-декабрь (34% от общего количества), на втором месте – ноябрь-январь (27%), на тре-

тьем – декабрь-февраль (21%). Стоит отметить, что 97% случаев фаза максимального развития Ла-Нинья чаще приходится на конец осени – начало зимы, со сдвигом 1-2 месяца в обе стороны. По данным массива COBE SST2 пик развития событий Ла-Нинья приходится на ноябрь-январь (35%), на втором месте – октябрь-декабрь (28%), на третьем – декабрь-февраль (22%). Важно уточнить, что именно по данным COBE SST2 Ла-Нинья никогда не достигают своего пика в летний период, и также как по HadISST, чаще всего максимальная фаза развития отрицательных аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана приходится на конец осени – начало зимы.

По данным массива ERSSTv5 холодные эпизоды ЭНЮК чаще всего достигают своего пика в ноябре-январе (31%), как и по COBE SST2, однако на втором месте – декабрь-февраль (23%), на третьем – октябрь-декабрь (11%). Максимальная фаза развития Ла-Нинья по ERSSTv5 в отдельных случаях может выпадать, как на середину лета, так и на середину осени, но подавляющее большинство холодных явлений достигает своего пика в конце осени и в середине зимы.

Средняя интенсивность всех событий Ла-Нинья по HadISST составила  $-1,27^{\circ}\text{C}$ , а средняя продолжительность – 12 месяцев. Самые долгоживущие событие фиксируется с 1954 по 1957 гг. ( $\Pi=32$  мес.) и с 1998 по 2001 гг. ( $\Pi=30$  мес.). Самые интенсивные события приходятся на 1889-1990 гг. ( $I= -2,24^{\circ}\text{C}$ ), 1973-1974 гг. ( $I= -2,08^{\circ}\text{C}$ ), 1988-1989 ( $I= -2,03^{\circ}\text{C}$ ). По данным COBE SST2 средняя интенсивность всех событий Ла-Нинья равна  $-1,37^{\circ}\text{C}$ , а средняя продолжительность

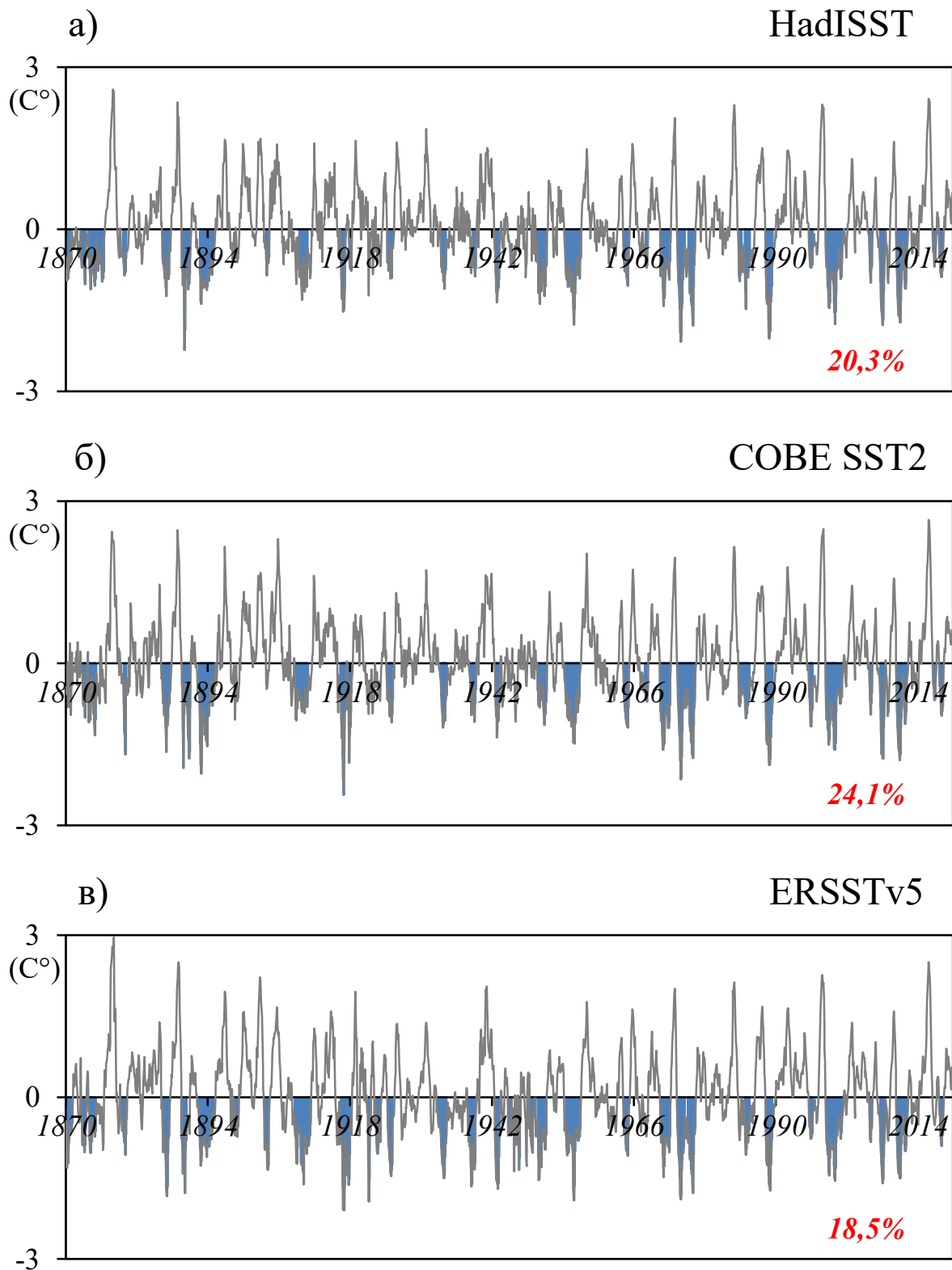


Рисунок 2.5 – Изменчивость индекса Niño3.4 с 1870 по 2019 гг. (серая линия) по трем массивам реконструированных данных ТПО и выделенные события Ла-Нинья (голубая гистограмма). Красными цифрами отмечен дисперсионный вклад событий Ла-Нинья

составляет 12 месяцев. Максимально-продолжительные события приходятся с 1973 по 1976 гг. ( $P=35$  мес.) и с 1998 по 2001 гг. ( $P=30$  мес.). Самые интенсивные события, порог отрицательных аномалий которых превышает минус два градуса, фиксируются в 1892-1894 гг. ( $I=-2,05^{\circ}\text{C}$ ), в 1916-1917 гг. ( $I=-2,44^{\circ}\text{C}$ ) и в 1973-1976 гг. ( $I=-2,15^{\circ}\text{C}$ ), где одно из самых продолжительных событий совпадает с максимально-интенсивным.

Средняя интенсивность всех событий Ла-Нинья по ERSSTv5 составила  $-1,38^{\circ}\text{C}$ , а средняя продолжительность – 12 месяцев, как и по двум предыдущим массивам. Самые долгоживущие событие фиксируется с 1908 по 1911 гг. ( $P=32$  мес.) и с 1954 по 1956 гг. ( $P=30$  мес.). Самое интенсивные событие, порог которого по модулю превышает два градуса, по ERSSTv5 всего одно – это 1916-1918 гг. ( $I=-2,10^{\circ}\text{C}$ ).

Рассмотрим повторяемость событий Ла-Нинья (ЛН) для каждого массива данных последовательно по десятилетним промежуткам времени, чтобы увидеть в какие периоды есть расхождения и понять почему. С 1870 по 1880 выделяется на одно событие ЛН больше по HadISST, в отличие от двух других массивов данных, и в целом продолжительность ЛН больше в среднем на 40%, чем по COBE SST2 и ERSSTv5 (рис. 2.6) [Voskresenskaya, Marchukova 2017], Марчукова и др. [2018], Марчукова и др. [2019]. В период с 1880 по 1890 гг. количество Ла-Нинья по всем трем массивам совпадает. С 1890 по 1900 гг. по массиву ERSSTv5 выделяется на одно событие ЛН больше, по сравнению с событиями других массивов.



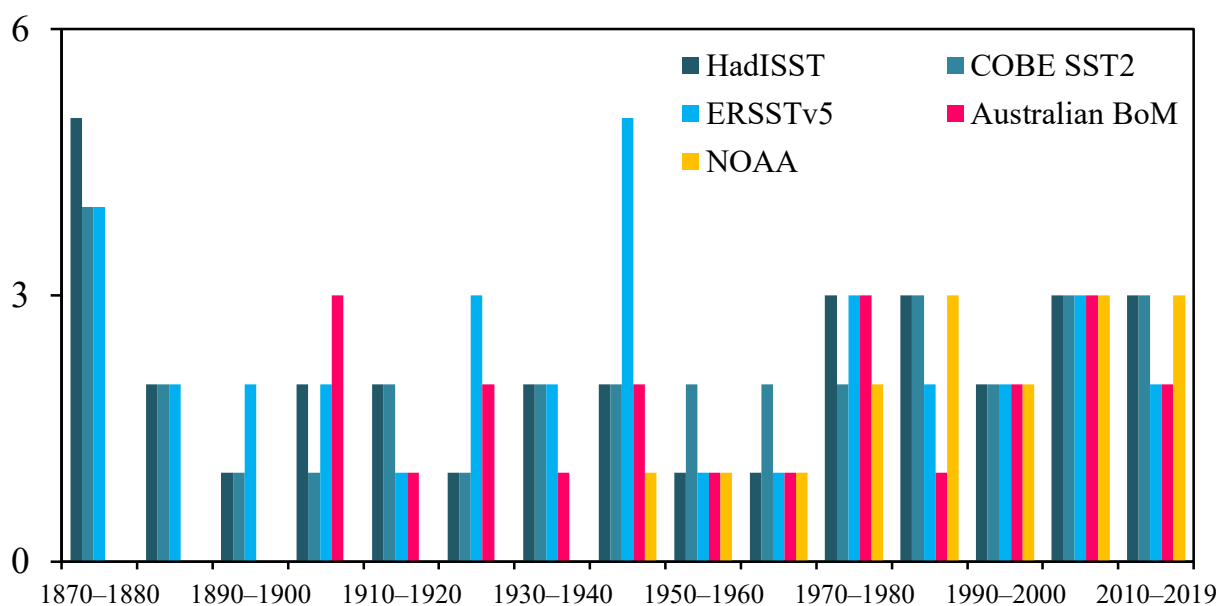


Рисунок 2.6 – Гистограмма сравнения количества выделенных событий Ла-Нинья с 1870 по 2019 гг. по трём реконструированным данным ТПО (HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5) с данными Австралийского метеобюро (BoM) и Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA)

Начиная с 1900 г. верификацию воспроизводимости событий ЛН можно проводить с данными Австралийского метеобюро [<http://www.bom.gov.au/climate/history/enso/>]. Такой выбор связан с наличием исторических данных о давлении в архивах метеобюро на метеостанциях «delaide 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 не редко используют для идентификации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья [Trenberth, Shea, 1987; Trenberth, Caron, 2000]. Австралийское

метеобюро при определении экстремальной фазы ЭНЮК помимо ТПО, так же учитывает и индекс ЮК [Chowdhury, Veecham, 2013].

С 1900 по 1910 гг. на сайте Австралийского метеобюро представлено три события Ла-Нинья (1903-1904, 1906-1907, 1909-1911). По всем трем массивам не выделяется одно событие ЛН 1906-1907 гг. (рис. 2.6). Однако по COBE SST2 так же не выделяется ЛН 1903-1904 гг. Стоит отметить, что на самом сайте [<http://www.bom.gov.au/climate/history/enso/>] пишут, что данные по ТПО для 1906-1907 гг. отсутствуют, а изменение SOI были от слабого до умеренного. В период с 1910 по 1920 гг. событие ЛН 1916-1918 гг. по ERSSTv5 определяется как одно продолжительное событие, что согласуется с данными Австралийского метеобюро. По массивам COBE SST2 и HadISST – это два отдельных события (1916-1917 и 1917-1918 гг.). С 1920 по 1930 гг. по всем трем массивам фиксируется событие ЛН 1924-1925 гг., как и в Австралийском метеобюро. Но по ERSSTv5 еще выделяются события ЛН 1921 г. и 1922-1923 гг., которые не определяются по данным массивов HadISST и COBE SST2. Интересно отметить, что для этого периода в Австралийском метеобюро тоже нет описания ЛН 1921 г. и 1922-1923 гг., но есть описание ЛН 1928–1930 гг., хотя по всем трем массивам такое событие не идентифицируется. В период с 1930 по 1940 гг. количество событий Ла-Нинья по всем трем массивам совпадает (ЛН 1933-1934, 1938-1939 гг), однако явление 1933-1934 гг. в списке Австралийского метеобюро не приведено. С 1940 по 1950 гг. по массиву ERSSTv5 выделяется

на три события ЛН больше, чем по другим массивам, которые не отмечены в Австралийском метеобюро (рис. 2.6).

Начиная с 1950 г., появляется дополнительная возможность сверять количество выделенных событий Ла-Нинья по данным официального сайта NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США). NOAA используют индекс ONI, что является по сути индексом Nino3.4, но с применением трехмесячного фильтра и расчета аномалий ТПО относительно 30 летнего периода [[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/enstostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enstostuff/ONI_v5.php)] а не всего, как делается в настоящей работе. С 1950 по 1960 гг. по COBE SST2 выделяется на одно событие ЛН больше (рис. 2.6). Стоит отметить, что это скорее особенность самого массива, потому что по HadISST и ERSSTv5 событие ЛН 1949-1951 гг. – это одно продолжительное событие, а по COBE SST2 – два отдельных (1949-1950 и 1950-1951 гг.). Австралийское метеобюро также определяет это ЛН как одно долгоживущее явление. С 1960 по 1970 гг. по COBE SST2 выделяется на одно событие ЛН (1967 г) больше, которого нет в списках на сайтах Австралийского метеобюро и NOAA. В период с 1970 по 1980 гг. по массиву COBE SST2 события ЛН 1973-1974 и 1974-1976 выделяются как одно продолжительное событие. На сайте NOAA эти события зафиксированы, как два отдельных, что совпадает с HadISST и ERSSTv5, а на сайте Австралийского метеобюро – как одно долгоживущее явление. По ERSSTv5 не выделяется событие ЛН 1983-1984 гг., а на австралийском сайте и вовсе отсут-

ствуют события ЛН 1983-1984 и 1984-1985 гг., хотя есть множество работ, где эти события учитываются и описываются [Hu et al., 2014; Pan et al., 2020; Song, Wu, 2022]. В период с 1900 по 2010 гг. между тремя массивами нет разногласий в количестве событий Ла-Нинья (рис. 2.6). В последнее десятилетие по массиву ERSSTv5 не выделяется слабое событие ЛН 2016 г., но зато оно фиксируется по данным HadISST и COBE SST2 и есть на официальном сайте NOAA.

Отсюда можно сделать вывод, что в случае анализа Ла-Нинья имеются расхождения в количестве этих явлений по всем трем массивам, как в сравнении между собой, так и в сравнении с данными Австралийского метеобюро и NOAA. Не рекомендуется использовать массив ERSSTv5 для исследований Ла-Нинья, так как по нему в 1940-ые вдвое завышено количество этих событий, которые не были зафиксированы ни в одном источнике информации [Марчукова и др., 2020]. Плохая воспроизводимость событий Ла-Нинья по HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 до 90-ых годов, как раз может быть связана с плохим представлением о физическом механизме чередования фаз ЭНЮК, которые до сих пор плохо прогнозируются [Glantz, 2015].

### 2.3 Первичная классификация Ла-Нинья

Как уже было сказано в главе 2, в современном понимании изучения Ла-Нинья важно проводить классификацию этих явлений. Поэтому в настоящей работе сначала проводилась первичная классификация каждого из этих событий на Восточно-Тихоокеанский (ВТ) и Центрально-Тихоокеанский (ЦТ) типы по методологии [Yeh et al., 2009], с целью дополнительного выявления особенностей массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5. В рамках этой методологии сравниваются индексы аномалий ТПО в районах Nino3 ( $5^{\circ}$ с.ш. –  $5^{\circ}$ ю.ш.,  $150^{\circ}$ з.д. –  $90^{\circ}$ з.д.) и Nino4 ( $5^{\circ}$ с.ш. –  $5^{\circ}$ ю.ш.,  $160^{\circ}$ в.д. –  $150^{\circ}$ з.д.). Это самый простой и популярный метод классификации событий Ла-Нинья, который использовался во многих работах [Yuan, Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Diamond, Bennartz, 2015; Yu, Kim, 2013], в том числе и в наших [Марчукова и др., 2020]. Суть метода [Yeh et al., 2009] заключается в том, что если в зимний период значение индекса в районе Nino3 больше по модулю, чем в районе Nino4, то тип Ла-Нинья определяется как ВТ, а если наоборот, – как ЦТ. Поскольку чаще всего максимальная фаза приходится с ноября «0» года по январь «+1» для Ла-Нинья (31% от всех массивов), в настоящей работе именно в этот период производилось сравнение индексов Nino3 и Nino4, то есть из зимних месяцев учитывались только декабрь и январь.

В результате было получено: 12 ЛН ЦТ, 21 ЛН ВТ по массиву HadISST; 9 ЛН ЦТ, 23 ЛН ВТ по массиву COBE SST2; 15 ЛН ЦТ, 20 ЛН ВТ по массиву ERSSTv5 (см. приложение «А», табл. А4–А6). Далее рассмотрим повторяемость событий ЛН

ЦТ и ВТ типов по каждому массиву данных последовательно по десятилетиям (рис. 2.7), чтобы увидеть в какие периоды есть расхождения, а в какие – есть сходства, чтобы понять, с чем это связано.

1870–1880 гг. В этот период по COBE SST2 не выделяется ни одно событие ЛН ЦТ типа (рис. 2.7, б), а по ERSSTv5 – на одно событий ЛН ВТ меньше, чем по двум другим (рис. 2.7, а).

1880–1890 гг. Расхождений между массивами не наблюдается, как по типам, так и по количеству ЛН.

1890–1900 гг. По ERSSTv5 выделяется на одно событие ЛН ВТ типа больше (рис. 2.7, а). Это явление 1898 г., которое является слабым ( $I=-0,73^{\circ}\text{C}$ ) и не продолжительным ( $P=6$  мес.).

1900–1910 гг. В этот период расхождения присутствуют по всем трем массивам. По HadISST события ЛН 1903-1904 гг. и ЛН 1909-1910 гг., по методологии [Yeh et al., 2009] относятся к ВТ типу, а по ERSSTv5 – к ЦТ типу. По COBE SST2 явление 1903-1904 гг. не идентифицируется по критерию Nino3.4.

1910–1920 гг. По ERSSTv5 выделяется на два события ЛН больше, чем по двум другим массивам (это 1921 г. и 1922-1923 гг.), относящиеся к ВТ типу. Стоит так же отметить, что событие ЛН 1924-1925 гг. классифицируется к ВТ типу, в то время как по HadISST и COBE SST2 относится ЦТ типу (рис. 2.7).

1920–1930 гг. Между HadISST и COBE SST2 разногласий нет, однако по ERSSTv5 ЛН 1938-1939 гг. относится к ЦТ типу.

1930–1940 гг. По массиву ERSSTv5 выделяется на три события ЛН больше, чем по другим массивам, которых нет в списке Австралийского метеобюро, как отмечалось выше.

Одно из этих событий (1944-1945 гг.) относится к ЦТ типу, остальные – к ВТ.

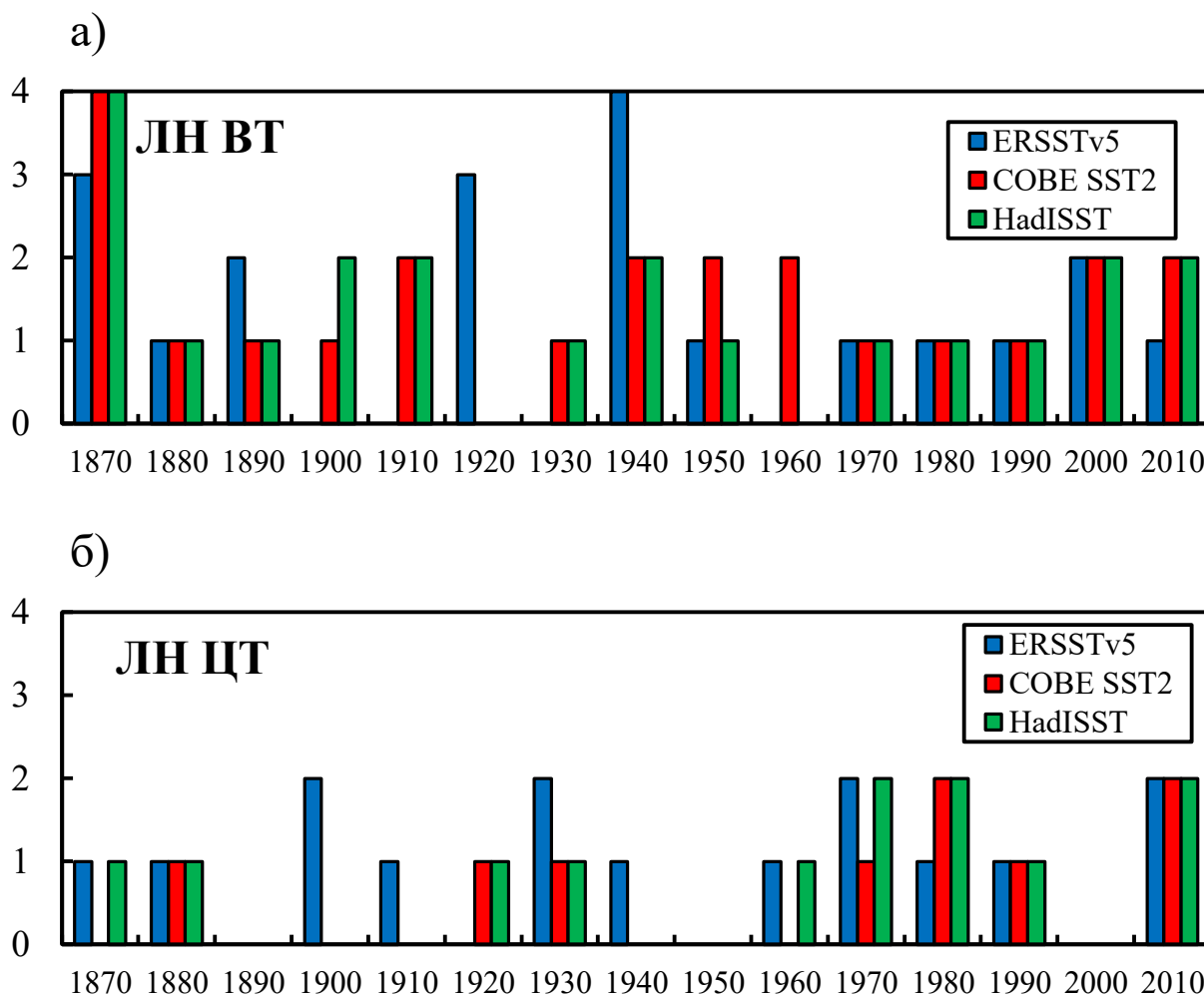


Рисунок 2.7 – Гистограмма количества повторений событий Ла-Нинья ВТ (в) и ЦТ (б) типов по десятилетиям с 1870 по 2019 гг.

1940–1950 гг. По COBE SST2 выделяется на одно событие ЛН ВТ больше (рис. 2.7, а), чем по другим массивам. Выше, уже было отмечено, что это скорее особенность самого массива, потому что по HadISST и ERSSTv5 событие ЛН 1949-1951 гг. – это одно продолжительное событие, а по COBE SST2 – два отдельных (1949-1950 и 1950-1951 гг.).

1950–1960 гг. По COBE SST2 выделяется на одно событие ЛН ВТ типа больше (1967 г), которое не выделяется по двум другим массивам и отсутствует в списках на сайтах Австралийского метеобюро и NOAA. Также примечательно, что событие ЛН 1964-1965 гг. по COBE SST2 относится к ВТ типу (рис. 2.7, а), а по HadISST и ERSSTv5 – к ЦТ типу (рис. 2.7, б).

1970–1980 гг. По массиву COBE SST2 события ЛН 1973-1974 и 1974-1976 гг. определяются как одно продолжительное событие, которое относится к ЦТ типу (рис. 2.7, б).

1980–1990 гг. По HadISST и COBE SST2 разногласий нет, как в количестве, так и по типам, однако по ERSSTv5 ЦТ ЛН 1983-1984 гг. не выделяется (рис. 2.7, б).

1990–2000 гг. Расхождений между тремя массивами не наблюдается, как по типам, так и по количеству ЛН (рис. 2.7).

2000–2010 гг. Разногласия отсутствуют (рис. 2.7).

2010–2019 гг. В это последнее десятилетие по массиву ERSSTv5 не выделяется слабое событие ЛН 2016 г., которое фиксируется по данным HadISST и COBE SST2 и определяется как ВТ тип по методу [Yeh et al., 2009].

Важно отметить, что различия в количестве ЦТ и ВТ типов Ла-Нинья между разными массивами данных восстановленных значений ТПО не просто приходятся на ранний период наблюдений (до 1930 г.), где данные менее надежны, а наоборот разбросаны по всему периоду, в том числе включая последнее десятилетие. До 1990 г. практически нет совпадений в повторяемости двух типов Ла-Нинья всех трех массивов реконструированных данных ТПО (рис. 2.7). Улучшение воспроизводимости Ла-Нинья с 1990-ых 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.

Дополнительно был проведен композитный анализ воспроизводимости зрелой фазы развития двух типов Ла-Нинья по массивам HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 (рис. 2.7). Как уже было описано выше, за зрелую фазу Ла-Нинья обычно принимают три месяца, при которых наблюдаются максимальные отрицательные значения аномалий ТПО [Laken, Calogovic, 2013]. При выделении событий Ла-Нинья зрелая фаза по всем трем массивам определялась по индексу Nino3.4, как три месяца с максимально-отрицательными аномалиями ТПО в периоды Ла-Нинья. В данном случае композиты аномалий ТПО рассчитывались для периодов Ла-Нинья с ноября «0» года по январь «+1», потому что именно в эти месяцы сравнивались индексы Nino3 и Nino4 и чаще всего выпадал максимум интенсивности по трем массивам (напомним, что это 31% от всех случаев).

В целом, зрелая фаза для Ла-Нинья по всем трем массивам воспроизводится хорошо (рис. 2.8). Обнаруженные отличия состоят лишь в том, что интенсивность событий, выделенных по массиву COBE SST2, при ЛН ЦТ выше. По ERSSTv5 максимальная аномалия ЛН ЦТ типа пространственно смещена немного дальше от меридиана 160°з.д. к востоку Тихого океана, по сравнению с массивами HadISST и COBE SST2.

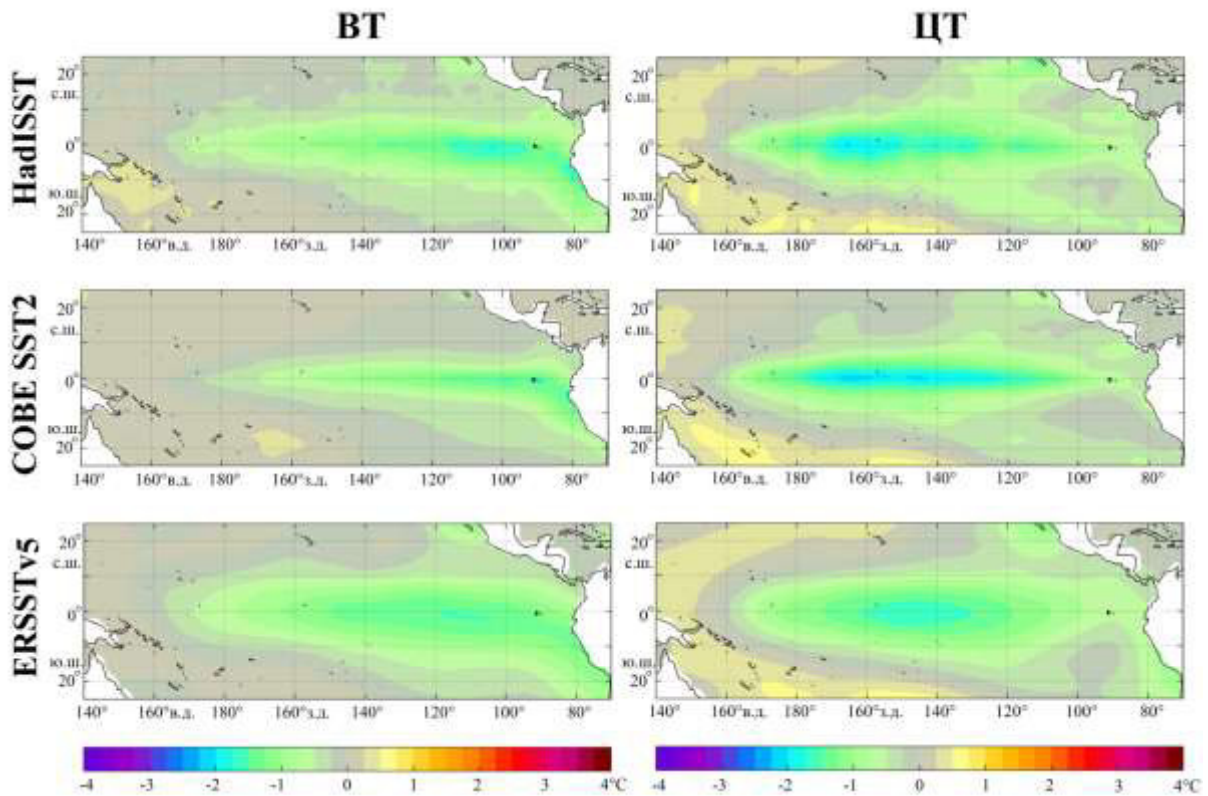


Рисунок 2.8 – Воспроизведение фазы максимального развития (нояб.-янв.) двух типов Ла-Нинья по разным реконструированным данным ТПО

Последним этапом первичной классификации стал визуальный анализ каждого события Ла-Нинья в отдельности. Для визуального анализа было построено 5400 ежемесячных карт аномалий ТПО по массивам HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 в районе с координатами площадки:  $30^{\circ}$ с.ш. и  $30^{\circ}$ ю.ш.,  $100^{\circ}$ в.д. и  $60^{\circ}$ з.д. Визуальный анализ необходим был для того, чтобы сравнить соответствие метода [Yeh et al., 2009] разделения на BT и CT типы с тем, что мы видим на самом деле. В реальности, возникло много спорных моментов. К примеру, событие 1988-1989 гг. по массивам HadISST (рис. 2.9, а) и COBE SST2 (рис. 2.9, б) при сравнении индексов Nino3 и Nino4 относится к BT типу. Но если взглянуть на карты этого события в

ноябре «0» года, когда наблюдаются максимально-отрицательные АТПО, то возникает убеждение, что это явление необходимо отнести к ЦТ типу, так как максимальная аномалия формируется в центре Тихого океана (рис. 2.9). Подобные разногласия возникли во всех трех массивах: 5 случаев по HadISST, 7 случаев по COBE SST2 и 7 случаев по ERSSTv5. Такая неоднозначность в результатах классификации методом [Yeh et al., 2009] затрудняет решение прикладных задач регионального характера. Поэтому необходим другой метод классификации и более правильный подход к типизации событий Ла-Нинья, чтобы в дальнейшем корректно выделить сигналы в атмосфере и океане на холодные эпизоды ЭНЮК.

Таким образом, полученные в работе результаты демонстрируют различия в количестве Центрально-Тихоокеанского и Восточно-Тихоокеанского типов Ла-Нинья, как для раннего периода, с 1870 по 1900 гг., когда данные были менее надежны, так и для всего временного ряда, включая два последних десятилетия. До 1990 г. практически нет совпадений в повторяемости двух типов Ла-Нинья для всех трех массивов. С 1990-ых наблюдаются улучшения воспроизводимости событий Ла-Нинья 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 90-ых гг, может быть связана с плохим

представлением о физическом механизме образования этих явлений, который до сих пор плохо изучен [Марчукова и др., 2020].

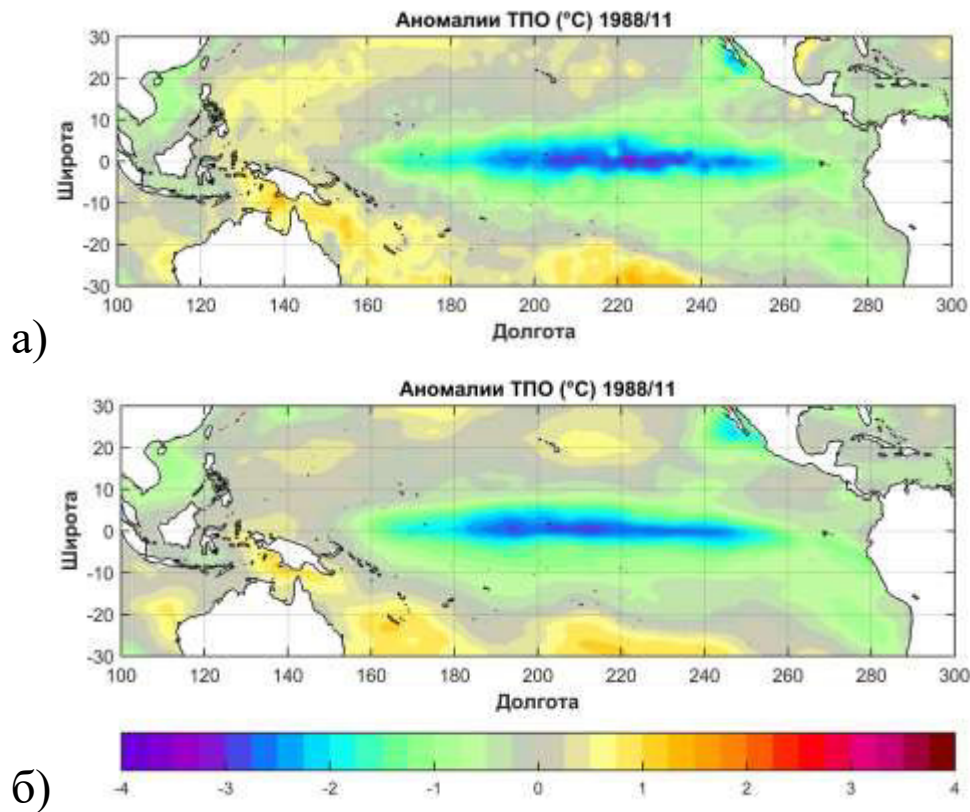


Рисунок 2.9 – Аномалии ТПО в экваториальной зоне Тихого океана в ноябре 1988 г. по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

Подводя итоги в подглаве 2.3, важно отметить, что ERSSTv5 в 1940-ые вдвое завышает количество ВТ типов Ланья и на 45% ЛН ЦТ типа в 20-ые и 30-ые гг. прошлого столетия. 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 гг. [Diamond, Bennartz, 2015, Huang et. al, 2017]. Именно в этот период вошло

много событий Ла-Нинья, что возможно повлияло на воспроизведение этих явлений с 1900 по 1950 гг. Так же такое завышение может быть связано с меньшим пространственным разрешением реконструкции, что повлияло на выделение двух типов Ла-Нинья. В связи с этим, в дальнейшей классификации и исследований механизмов образования Ла-Нинья массив ERSSTv5 не будет использоваться. Дальнейшая работа будет производиться по массивам HadISST и COBE SST2, так как между ними меньше разногласий.

## 2.4 Типизация методом кластерного анализа

В ходе визуального анализа среднемесячных карт аномалий ТПО было отмечено, что при развитии одних событий Ла-Нинья, области максимальной концентрации отрицательных АТПО приурочены к центральной части экваториальной зоны Тихого океана, а для других – к восточной части, вблизи побережья Перу и Эквадора, что подтверждается в работах [Singh et al., 2011; Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014]. В подглаве 3.3 метод [Yeh et al., 2009] разделения Ла-Нинья на два типа, путем сравнения индексов Nino3 и Nino4, продемонстрировал 15% расхождений с визуальным анализом по данным HadISST и 22% – по данным COBE SST2. Чтобы классификация приобрела объективное обоснование существования двух разновидностей Ла-Нинья, в настоящем исследовании было решено применить один из методов математической классификации – кластерный анализ (иерархический подход). Мерой близости

объектов было выбрано Евклидово расстояние. Оно является самой популярной метрикой в кластерном анализе, представляющей геометрическое расстояние в многомерном пространстве [Буреева, 2007]. Кластеризация событий Ла-Нинья проводилась с учетом двух основных характеристик: географических координат площадки и значений АТПО в период зрелой фазы. Район площадки для кластеризации был выбран вдоль всей экваториальной зоны Тихого океана (от  $150^\circ$  в.д. до  $80^\circ$ з.д.) и имел ограничения от  $15^\circ$ с.ш. до  $15^\circ$ ю.ш.

Таким образом, иерархический кластерный анализ по двум массивам данных, HadISST и COBE SST2, показал наличие двух кластеров, результат которого представлен в виде дендограммы рисунка 2.10. Действительно, годы Ла-Нинья, с максимальными значениями АТПО на востоке, были выделены в первый кластер, с максимальными значениями АТПО в центре экваториальной зоны Тихого океана – во второй (рис. 2.10).

В первый кластер по массиву HadISST вошло 19 холодных эпизодов ЭНЮК (рис. 2.10, а), а по COBE SST2 – 18 (рис. 2.10, б), которые получили общее название Восточно-Тихоокеанский (ВТ) тип Ла-Нинья. Во второй кластер вошло 14 событий Ла-Нинья, как по HadISST так и по COBE SST2, которые были названы Центрально-Тихоокеанским (ЦТ) типом. Два кластера по HadISST можно четко разъединить на 290 шаге объединения (рис. 2.10, а), а по COBE SST2 еще раньше – на 250 (рис. 2.10, б).

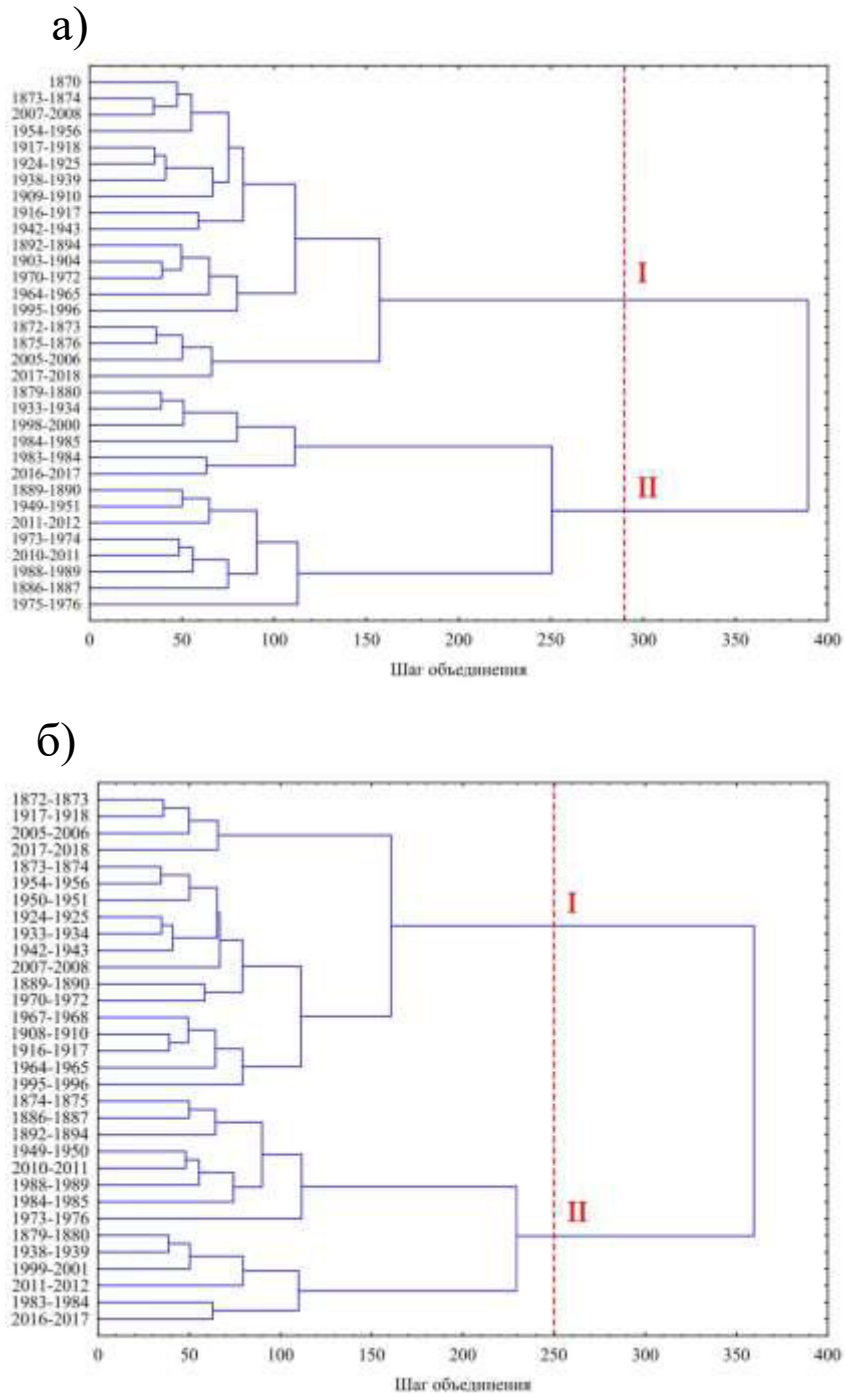


Рисунок 2.10 – Классификация событий Ла-Нинья в период с 1870 по 2019 гг. кластерным анализом по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

Таким образом, иерархический кластерный анализ по двум массивам данных, HadISST и COBE SST2, показал наличие двух кластеров, результат которого представлен в виде дендограммы рисунка 2.10. Действительно, годы Ла-Нинья, с максимальными значениями АТПО на востоке, были выделены в первый кластер, с максимальными значениями АТПО в центре экваториальной зоны Тихого океана – во второй (рис. 2.10).

В первый кластер по массиву HadISST вошло 19 холодных эпизодов ЭНЮК (рис. 2.10, а), а по COBE SST2 – 18 (рис. 2.10, б), которые получили общее название Восточно-Тихоокеанский (ВТ) тип Ла-Нинья. Во второй кластер вошло 14 событий Ла-Нинья, как по HadISST так и по COBE SST2, которые были названы Центрально-Тихоокеанским (ЦТ) типом. Два кластера по HadISST можно четко разъединить на 290 шаге объединения (рис. 2.10, а), а по COBE SST2 еще раньше – на 250 (рис. 2.10, б).

Явное отличие двух типов Ла-Нинья в пространственном распределении максимальных отрицательных аномалий ТПО в период зрелой фазы по двум массивам данным HadISST и COBE SST2 продемонстрировано на рисунке 2.11 с помощью метода композитного анализа.

Композиты демонстрируют области формирования аномалий для ЦТ (рис. 2.11, б и г) и ВТ (рис. 2.11, а и в) типов, но следует отметить, что это совсем не означает, что холодные аномалии возникают там же. Суть полученной классификации



заключается в том, чтобы показать в какой области фокусируются сформированные максимально-отрицательные аномалии ТПО. Ведь именно от этого будет зависеть формирование атмосферных и океанических откликов, влияющих в большей степени на изменение климата. И как мы видим, что главной особенностью ЦТ типа Ла-Нинья является формирование максимальных аномалий в период зрелой фазы в экваториальной части Тихого океана, а для ВТ типа – на востоке вблизи западного побережья Южной Америки. Доказательством справедливости такого вывода послужил расчет статистической значимости о равенстве средних значений ( $\bar{x}$ ) по критерию Стьюдента ( $t$ ) для каждого композита. Для решения этой задачи формировались 2 гипотезы:  $H_0: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  и  $H_1: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ . Далее рассчитывался эмпирический критерий Стьюдента ( $t$ ) и критический ( $t_{кр}$ ). Если  $t > t_{кр}$ , то  $H_0$  принимается, следовательно различия между средними значениями элементов, составляющих композит, являются статистически значимыми. Если  $t < t_{кр}$ , то гипотеза  $H_0$  отклоняется, и, следовательно различия между средними значениями элементов, составляющих композит, являются статистически не значимыми. Статистически значимые 95% области композитов обозначены мелкими точками на рисунке 2.11.

Обобщенные характеристики всех событий Ла-Нинья первого и второго типов приведены в таблицах 2.3 и 3.4 по данным HadISST и COBE SST2 соответственно. Для каждого события были рассчитаны продолжительность ( $\Pi$ , в месяцах), интенсивность ( $I$ , в  $^{\circ}\text{C}$ ), зрелая фаза и максимальное значение ЮК в

период развития самого явления Ла-Нинья. Уровень интенсивности Ла-Нинья характеризуется величиной минимального значения аномалии ТПО в течение существования события. Дополнительно для этой характеристики были рассчитаны поправки. Годы двух типов Ла-Нинья по данным COBE SST2 практически идентичны данным HadISST. Лишь небольшие отличия в событиях 1973-1974 и 1975-1976 гг., которые по COBE SST2 выделяются в одно событие, и в событиях 1949-1950 и 1950-1951 гг., которые по HadISST объединены, а по COBE SST2 – разделены. Остановимся на подробном описании двух полученных типов Ла-Нинья по каждому массиву в отдельности.

Средняя продолжительность Ла-Нинья ЦТ типа по HadISST (табл. 2.3) составила 12 месяцев; средняя интенсивность – примерно  $-1,46^{\circ}\text{C}$ , а максимальная –  $-2,24^{\circ}\text{C}$  (1889-1890 гг.). Начало этих событий чаще приходится на лето, а основной период зрелой фазы – на ноябрь-январь. Общее значение максимального индекса SOI для 12 событий ЦТ типа Ла-Нинья составляет примерно 2,05. Средняя продолжительность Ла-Нинья ЦТ типа по COBE SST2 (табл. 2.4) составила 14 месяцев; средняя интенсивность –  $-1,41^{\circ}\text{C}$ , а максимальная –  $-2,15^{\circ}\text{C}$  (1973-1976 гг.). Как и по HadISST, начало этих событий по COBE SST2 чаще приходится на лето, а основной период зрелой фазы – на ноябрь-январь, а среднее значение SOI равно 2,01 (табл. 2.4).

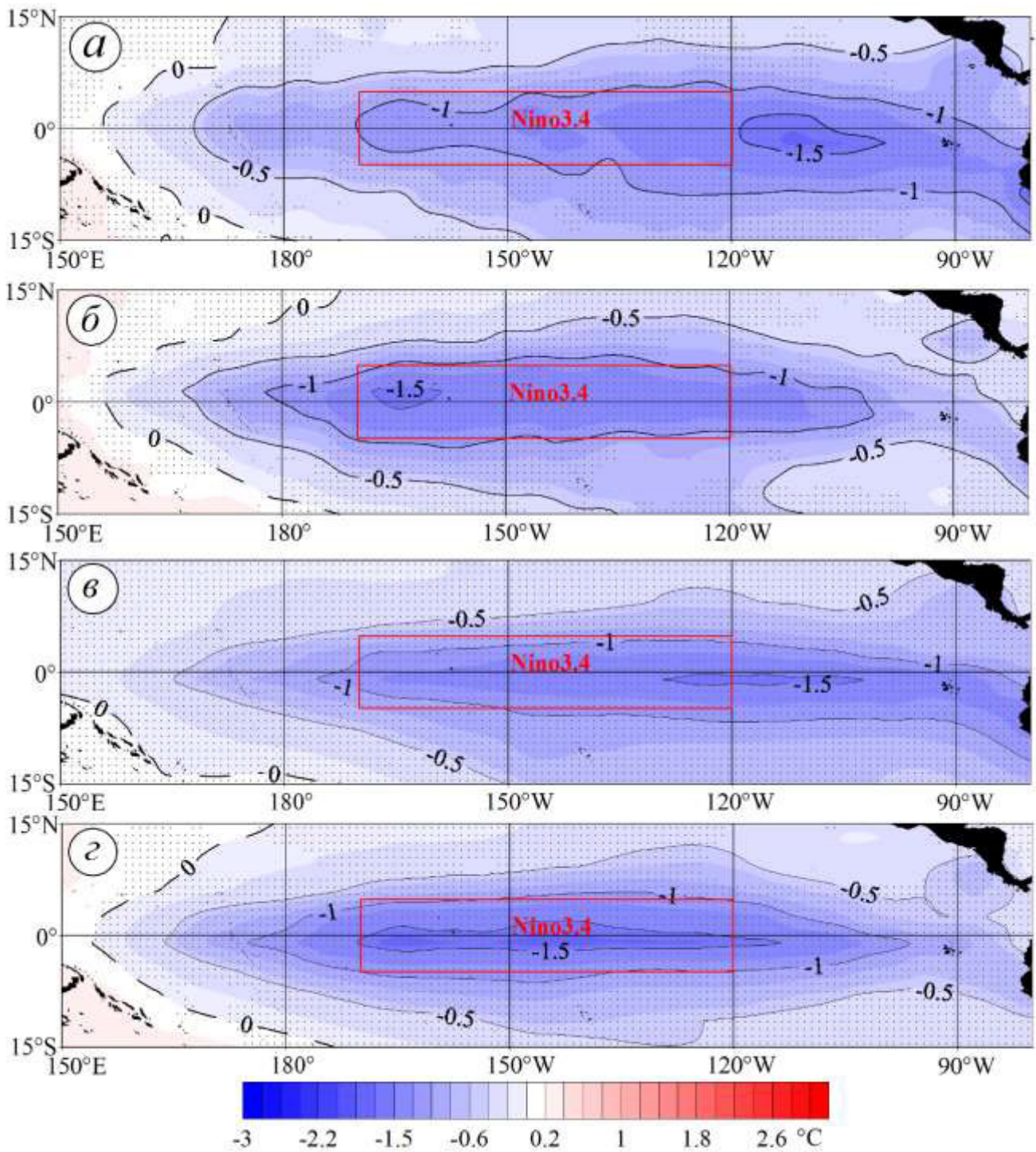


Рисунок 2.11 – композиты пространственного распределения аномалий ТПО по данным HadISST (а, б) и COBE SST2 (в, г) во время зрелой фазы, относительно периода 1870-2019 гг., для Центрально-Тихоокеанского типа (б, г) и Восточно-Тихоокеанского (а, в) типов Ла-Нинья. Мелкими точками обозначена 95% статистическая значимость

Таблица 2.3 – События Ла–Нинья с 1870 по 2019 гг. по данным NadISST

Тип	События Ла–Нинья (годы)	Продолжительность (количество месяцев)	Интенсивность* (°C)	Зрелая фаза* (месяцы)	Максимальное значение индекса ЮК
Центрально–Тихоокеанский тип	1879–1880	6	$-0,85 \pm 0,08$	нояб–январь	1,16
	1886–1887	13	$-1,23 \pm 0,08$	окт–дек	1,8
	1889–1890	17	$-2,24 \pm 0,08$	дек–фев	1,51
	1933–1934	10	$-1,11 \pm 0,06$	окт–дек	0,81
	1949–1951	19	$-1,38 \pm 0,07$	дек–фев	3,06
	1973–1974	14	$-2,08 \pm 0,08$	нояб–январь	2,85
	1975–1976	13	$-1,78 \pm 0,08$	нояб–январь	2,15
	1983–1984	5	$-0,96 \pm 0,08$	окт–дек	0,91
	1984–1985	10	$-1,47 \pm 0,07$	нояб–январь	1,42
	1988–1989	14	$-2,03 \pm 0,07$	окт–дек	2,18
	1998–2001	30	$-1,76 \pm 0,08$	дек–фев	2,1
	2010–2011	12	$-1,73 \pm 0,08$	дек–фев	2,44
	2011–2012	7	$-1,10 \pm 0,08$	нояб–январь	2,45
2016–2017	4	$-0,69 \pm 0,07$	нояб–январь	1,28	
Восточно–Тихоокеанский тип	1870	8	$-0,95 \pm 0,06$	май–июль	1,06
	1872–1873	8	$-1,02 \pm 0,07$	январь–март	1,14
	1873–1875	16	$-1,11 \pm 0,08$	окт–дек	2,19
	1875–1876	14	$-0,97 \pm 0,06$	фев–апр	2,57
	1892–1894	27	$-1,38 \pm 0,07$	окт–дек	2,35
	1903–1904	6	$-0,85 \pm 0,07$	дек–фев	2,15
	1909–1910	17	$-1,30 \pm 0,08$	окт–дек	1,66

	1916–1917	9	$-1,53 \pm 0,08$	нояб– январь	2,49
	1917–1918	5	$-0,77 \pm 0,08$	январь–март	1,57
	1924–1925	9	$-0,91 \pm 0,08$	нояб– январь	1,19
	1938–1939	6	$-0,88 \pm 0,08$	январь–март	2,01
	1942–1943	8	$-1,35 \pm 0,08$	октябрь–декабрь	1,42
	1954–1957	32	$-1,77 \pm 0,08$	октябрь–декабрь	1,92
	1964–1965	9	$-1,05 \pm 0,08$	октябрь–декабрь	1,78
	1970–1972	19	$-1,42 \pm 0,08$	январь–март	2,58
	1995–1996	5	$-0,71 \pm 0,07$	октябрь–декабрь	0,82
	2005–2006	5	$-0,99 \pm 0,08$	декабрь–февраль	1,32
	2007–2008	10	$-1,77 \pm 0,08$	декабрь–февраль	2,05
	2017–2018	7	$-0,89 \pm 0,07$	нояб– январь	1,03

Таблица 2.4 – События Ла–Нинья с 1870 по 2019 гг. по данным COBE SST2

Тип	События Ла–Нинья (годы)	Продолжительность (количество месяцев)	Интенсивность* (°C)	Зрелая фаза* (месяцы)	Максимальное значение индекса ЮК
Центрально–Тихоокеанский тип	1874–1875	7	– $1,34 \pm 0,08$	октябрь–декабрь	2,19
	1879–1880	5	– $1,69 \pm 0,06$	ноябрь–январь	1,8
	1886–1887	16	– $1,64 \pm 0,06$	октябрь–декабрь	1,51
	1892–1894	29	– $2,05 \pm 0,07$	октябрь–декабрь	2,15

	1933–1934	12	– 1,19±0,08	сен–нояб	0,81
	1949–1950	7	– 0,82±0,08	дек–фев	1,58
	1973–1976	35	– 2,15±0,07	нояб–янв	2,85
	1983–1984	5	– 0,80±0,08	окт–дек	0,91
	1984–1985	14	– 1,02±0,08	дек–фев	1,42
	1988–1989	14	– 1,89±0,07	нояб–янв	2,18
	1998–2001	30	– 1,61±0,07	нояб–янв	2,1
	2010–2011	12	– 1,80±0,06	нояб–янв	2,44
	2011–2012	7	– 1,12±0,07	нояб–янв	2,45
	2016–2017	5	– 0,68±0,08	окт–дек	1,28
Восточно–Тихоокеанский тип	1872–1873	6	– 1,01±0,06	фев–апр	1,09
	1873–1874	6	– 1,10±0,08	янв–мар	1,33
	1889–1890	15	– 1,94±0,08	сен–нояб	2,35
	1908–1910	25	– 1,05±0,06	нояб–янв	2,49
	1916–1917	13	– 2,44±0,06	окт–дек	2,57
	1917–1918	6	– 1,85±0,07	нояб–янв	1,4
	1924–1925	11	– 1,09±0,07	дек–фев	1,19

1938–1939	10	– 1,08±0,08	нояб–янв	2,01
1942–1943	9	– 1,37±0,08	окт–дек	1,42
1950–1951	7	– 1,14±0,08	нояб–янв	2,46
1954–1956	29	– 1,49±0,08	окт–дек	1,92
1964–1965	9	– 1,19±0,07	окт–дек	1,78
1967–1968	6	– 0,72±0,06	янв–мар	1,21
1970–1972	20	– 1,61±0,07	дек–фев	2,58
1995–1996	7	– 1,17±0,07	нояб–янв	0,82
2005–2006	5	– 0,95±0,06	дек–фев	1,32
2007–2008	9	– 1,77±0,08	дек–фев	2,05
2017–2018	5	– 0,97±0,08	дек–фев	1,03

Для Ла-Нинья ВТ типа по HadISST средняя продолжительность составила 11 месяцев, однако среди них есть максимально продолжительные события с  $P=32$  мес. (1954-1956 гг.) и 27 мес. (1892-1894 гг.), а так же короткие, со значением  $P=5$  мес. (1995-1996, 2005-2006 гг.), т.е., порогом критерия выделения данных событий (табл. 2.3). Аналогично по данным COBE SST2 (табл. 2.4). Однако совсем не означает, что данные холодные эпизоды цикла ЭНЮК длились недолго. Как отмечалось выше, Ла-Нинья в данной работе определялись по критериям центрального района  $Nino3.4$ , а события ВТ типа зачастую возникают и развиваются в восточно-экваториальных районах Тихого океана. Не всегда холодный язык, в большей степени, может достичь центральной части. Поэтому характер Ла-Нинья ВТ типа с небольшой продолжительностью будет свидетельствовать о том, что по масштабам аномалии данное явление не обширное и является малозначимым по влиянию в сравнении с другими Ла-Нинья данного типа. Средняя интенсивность составила  $-1,13^{\circ}\text{C}$  по HadISST и  $-1,33$  – по COBE SST2, что меньше средней интенсивности Ла-Нинья ЦТ типа в среднем на 15% по двум массивам. Эти значения тоже не отражают реального характера интенсивности событий Ла-Нинья ВТ типа. На рисунке 2.11 заметно, что по значениям аномалий ТПО в период зрелой фазы Ла-Нинья ВТ типа уступают порядка градуса, однако по масштабам распространения холодного языка они немного больше. Трудно оценить общий характер возникновения событий Ла-Нинья ВТ типа: некоторые возникают как летом, так и осенью, но развиваются они все одинаково – в



осенне-зимний период. С вероятностью 0,6 зрелая фаза выпадает на период октябрь-декабрь. Общий показатель максимального значения индекса SOI в период протекания Ла-Нинья составляет около 1,51, что меньше на 0,5 общего показателя у холодных событий ЦТ типа. Это серьезное отличие в показателях индекса атмосферного давления, дает основание задуматься о том, что важную роль в возникновении и характере развития событий Ла-Нинья ЦТ типа являются атмосферные процессы [Воскресенская, Марчукова, 2017].

Как отмечалось в работе [Yuan, Yan, 2013] с 1970 года наблюдается тенденция к учащению возникновения событий Ла-Нинья ЦТ типа, но искать причину этого в глобальном потеплении не беремся. В настоящей работе этот вывод был получен на статистически значимом уровне на основе анализа 150-летних массивов данных. Поэтому автором данной диссертационной работы не разделяется мнение в работе [Yuan and Yan, 2013], где используют сравнительно короткие климатические ряды (с 1950 по 2011 гг.) и объясняют причину отмеченной тенденции глобальным потеплением. Искать объяснение этой особенности необходимо путем последующего анализа природных низкочастотных колебаний. Более того, несмотря на большое количество современных исследований ЭНЮК [Miller, 2019; Wang et al., 2019; Wu et al., 2020; Li et al., 2021 и др.], в настоящее время совершенно не закрыт вопрос о закономерностях формирования и эволюции его теплых и холодных эпизодов под влиянием естественных природных явлений, связанных с низкочастотными колебаниями в системе атмо-

сфера-океан. Дело в том, что до сих пор не выявлена первопричина, приводящая к экстремальному изменению обычных климатических и океанических условий в экваториальной части Тихого океана.

Таким образом, иерархическим методом кластерного анализа с учетом интенсивности отрицательных аномалий ТПО и их пространственного расположения в зрелую фазу Ла-Нинья по двум массивам данным HadISST и COBE SST2 доказано наличие двух типов событий: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского.

Обнаружено, что Ла-Нинья первого типа интенсивнее по величине, но меньше по масштабу распространения языка холодных вод относительно второго типа. При этом значения индекса ЮК в событиях Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа на порядок выше, чем в событиях второго типа. Этот результат подтверждает важную роль атмосферных изменений в формировании Ла-Нинья второго типа.

Отмечено, что фаза максимального развития Ла-Нинья чаще приходится на конец осени – начало зимы, со сдвигом 1-2 месяца в обе стороны. При этом Ла-Нинья никогда не достигают своего пика в летний период – с середины весны до середины осени.

Полученные результаты дают предпосылки для официальной классификации событий Ла-Нинья по принципу особенностей пространственного формирования аномалий ТПО и аномалий приземного давления в экваториальной зоне Тихого океана.

## 2.5 Физические особенности формирования двух пространственных типов Ла-Нинья

Общеизвестно, что резкие изменения характеристик пассатных ветров являются одной из причин формирования межгодовых аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана [Philander, 1990]. Однако причины этих изменений до сих пор остаются дискуссионными. Расчеты в данной работе показали, что отрицательная корреляционная связь увеличивается при сдвиге на 3 месяца, если анализировать ряды индекса Nino3.4 с индексами пассатных ветров (табл. 2.5). Исключение составляет лишь западный пассатный район. Это подтверждает роль пассатов в формировании холодных аномалий в экваториальной зоне Тихого океана в годы Ла-Нинья. При этом, если рассматривать особенности изменения пассатных индексов, соответствующих разным типам Ла-Нинья, то получается, что Восточный тип характеризуется усилением Восточного экваториального пассата, в то время как Центральный тип - Центрально-Тихоокеанских ветров (рис. 2.12). Однако это до конца не объясняет физические особенности образования двух типов Ла-Нинья.

Таблица 2.5 – Корреляция между индексами TW и Nino3.4

Индекс	без сдвига	сдвиг на 3 мес.
Западный Пассат	-0,67	-0,59
Центральный Пассат	-0,67	-0,80
Восточный Пассат	-0,37	-0,51

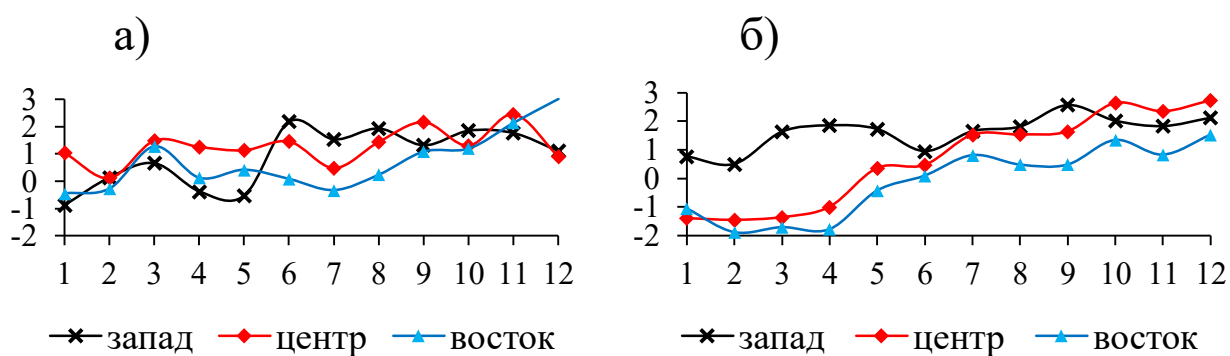


Рисунок 2.12 – Композиты изменения индексов Пассатных ветров в «0 год» для трех событий Ла-Нинья ВТ типа (а) и для восьми событий Ла-Нинья ЦТ (б).

На рисунке 2.13 продемонстрированы композитные карты аномалий ТПО и поверхностных течений по данным океанического реанализа NCEP GODAS с июня по октябрь «0» года для двух типов Ла-Нинья с 1981 по 2019 гг. Видно, что при ЦТ типе Ла-Нинья отрицательная аномалия ТПО начинает формироваться уже в июне в центрально-экваториальной зоне Тихого океана. Течения в летний период возле этих аномалий расходятся. При ВТ типе Ла-Нинья отрицательные аномалии ТПО начинают зарождаться в конце августа «0» года в восточно-экваториальной зоне Тихого океана, при этом расхождения течений в экваториально-центральной части не наблюдается. Анализ композитных карт аномалий ТПО и поверхностных течений за 39 лет дал основание предположить, что при ЦТ типе Ла-Нинья холодная аномалия ТПО возможно образуется за счет формирования центрально-экваториального апвеллинга, поднимающего из глубин океана к поверхности более холодные и богатые биогенами воды. Чтобы доказать данное предположение, были проанализированы среднемесячные данные

о концентрации хлорофилла «А» с 1998 по 2019 гг. и значения температуры воды по глубине от 5 м до 4000 м с 1981 по 2019 гг.

Сначала были проанализированы карты изменений среднемесячных значений концентрации хлорофилла «А» по спутниковым данным SeaWiFS с 1998 по 2010 гг. В этот период попало всего одно событие Ла-Нинья Восточного типа (2007 г) и два события Центрального типа (1998–99, 2010 гг.). По единичным примерам было обнаружено, что летом, в начальной стадии зарождения отрицательной аномалии ТПО, при ЦТ типе Ла-Нинья среднемесячная концентрация хлорофилла в районе центрально-экваториальной части Тихого океана увеличивается почти в шесть раз – с 0,1 мг/м<sup>3</sup> до 0,6 мг/м<sup>3</sup> (карты не представлены). Это свидетельствует о поднятии глубинных холодных вод, обогащенных биогенами, на поверхность, то есть об образовании центрально-экваториального апвеллинга. При Восточном типе такого увеличения концентрации хлорофилла в 2007 г не наблюдалось в центре Тихого океана, но было зафиксировано в районе Перуанского апвеллинга. Это также хорошо прослеживается на глубинных картах изменения среднемесячных значений температуры воды для этих же единичных примеров Ла-Нинья (карты не представлены). Летом 2007 г. (ВТ тип Ла-Нинья) термоклин был приподнят к поверхности у берегов Южной Америки от 120° до 90° з.д., а летом 1998 г. (ЦТ тип Ла-Нинья) термоклин был поднят к поверхности в районе 150°–120° з.д.



Если рассматривать ежемесячные композиты температуры воды в вертикальном разрезе по глубине экваториальной полосы Тихого океана (рис. 3.4.3) с 1981 по 2019 гг. для 4 событий ВТ и 8 событий ЦТ типов Ла-Нинья, то значимые изменения на 95% уровне характерны только для Центрального типа Ла-Нинья в летний период в толще воды до 250 метров. Из рисунков 2.14 (а, в, д) хорошо видно, что термоклин в центрально-экваториальной зоне Тихого океана более приподнят вверх (50-75 м), нежели при Восточном типе (100-150 м). В годы ВТ типа Ла-Нинья значимых подъемов глубинных вод в центрально-экваториальной части не обнаружено. Однако получены значимые изменения температуры воды в толще до 50 м в районе восточно-экваториальной части Тихого океана в октябре месяце (рис. 2.14, е).

Данные GLOB COLOR позволили получить композиты среднемесячных изменений концентрации хлорофилла «А» для двух типов Ла-Нинья с учетом их статистической значимости на 95% уровне. Как и предполагалось, в годы ЦТ типа Ла-Нинья наблюдается значимое увеличение концентрации хлорофилла до 0,8 мг/м<sup>3</sup> в центрально-экваториальной части Тихого океана в летний период (рис. 2.15). Это еще раз доказывает, что физическим объяснением образования Центрально-Тихоокеанского типа Ла-Нинья является заблаговременное формирование центрально-экваториального апвеллинга.

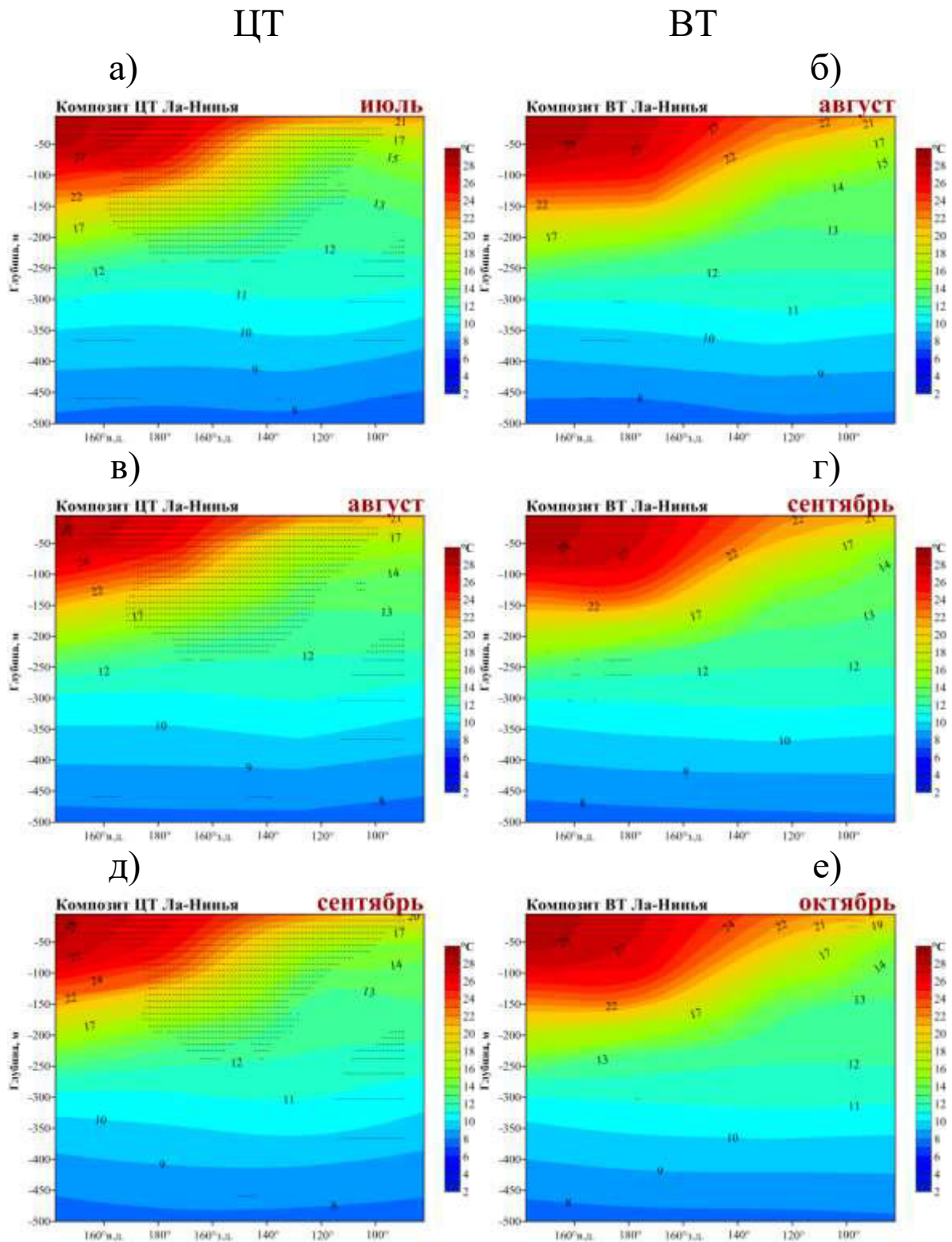


Рисунок 3.4.3 – Композиты изменения среднемесячной температуры по глубине на разрезе на экваторе ( $0^\circ$ ) от  $150^\circ$ в.д. до  $90^\circ$ з.д. по данным океанического реанализа NCEP/GODAS для BT (4 события) и ЦТ (8 событий) типов Ла-Нинья. Точками обозначена статистическая значимость на 95% уровне



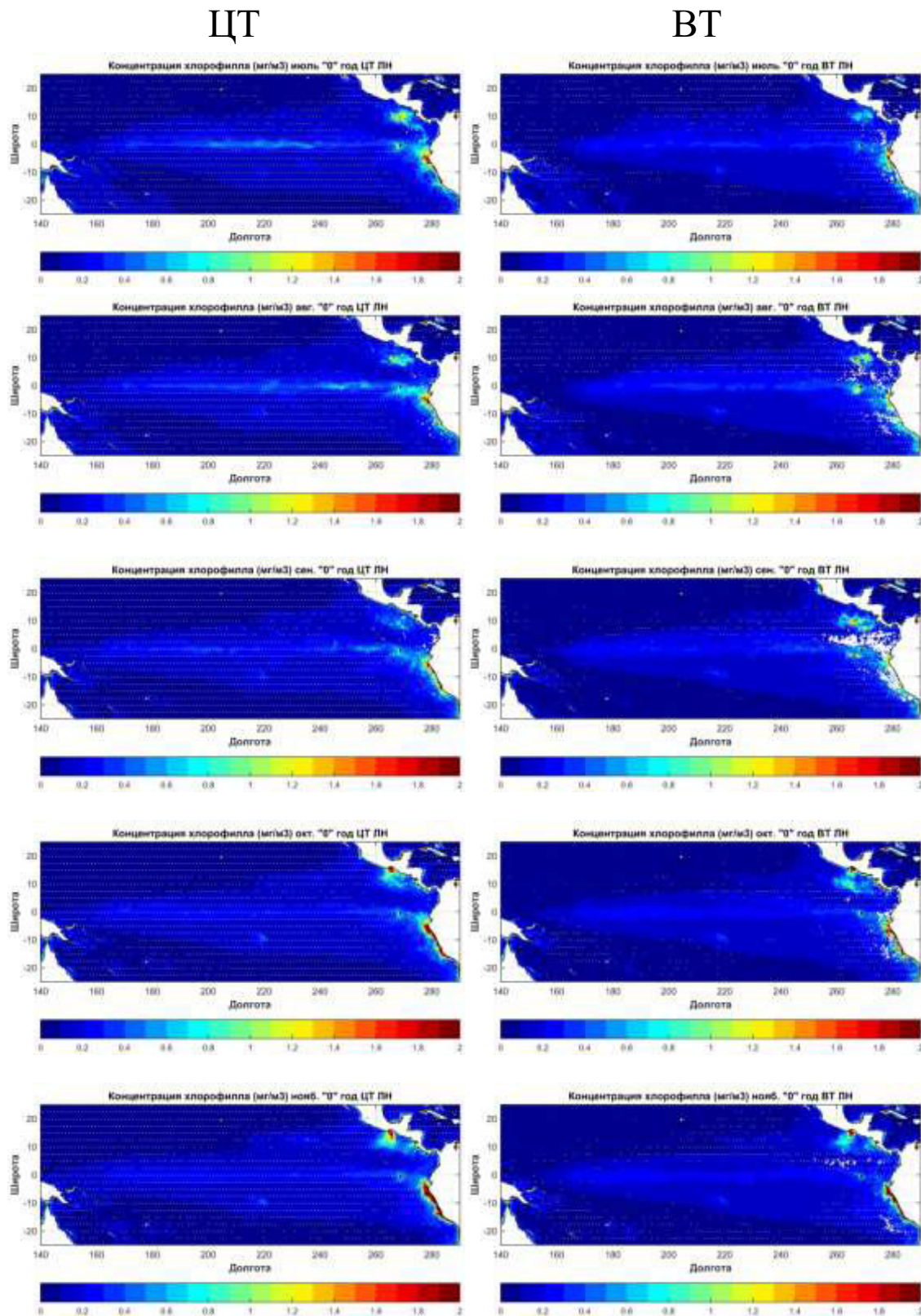


Рисунок 2.15 – Композиты изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла по спутниковым данным проекта GLOB COLOR для ВТ (3 события) и ЦТ (5 событий) типов Ла-Нинья. Белыми точками обозначена статистическая значимость на 95% уровне

В настоящей работе были описаны особенности образования двух типов Ла-Нинья, Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, на основе композитного анализа среднемесячных полей концентрации хлорофилла «А» с 1998 по 2019 гг. по спутниковым данным проекта GlobColour, поверхностных течений, температуры воды на поверхности и на глубине до 500 м из океанического реанализа NCEP GODAS с 1981 по 2019 гг. На основе этого анализа были сделаны следующие выводы:

1) События Ла-Нинья ЦТ типа возникают обычно в мае или апреле в центре экваториальной зоны Тихого океана. Их максимальная фаза развития приходится на ноябрь-декабрь. Важную роль при этом играет интенсификация Центрально-экваториальных пассатных ветров. Летом, в начальной стадии развития явления в центрально-экваториальной зоне формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в шесть-восемь раз (с 0,1 мг/м<sup>3</sup> до 0,8 мг/м<sup>3</sup>), а термоклин в экваториальной зоне между 170°–100° з.д. поднимается до глубины 50 м. Этот центрально-экваториальный апвеллинг обуславливает образование отрицательной аномалии ТПО и способствует образованию ЦТ типа Ла-Нинья.

2) Ла-Нинья ВТ типа возникают в апреле и всегда на востоке. Максимальная фаза таких событий обычно приходится на октябрь-декабрь. При ВТ типе Ла-Нинья центрально-экваториальный апвеллинг не образуется. Отрицательная анома-

лия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией Пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана.

## 2.6 Закономерность повторяемости полученных типов Ла–Нинья относительно событий Эль–Ниньо

Изучение закономерностей формирования событий Ла–Нинья относительно Эль–Ниньо осуществлялась с помощью разложения пространственно-временных полей аномалий ТПО в экваториальной части Тихого океана на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Подробнее об этом методе изложено в главе 2. Напомним лишь, что для ЭОФ анализа в настоящей работе была сформирована матрица объект-признак  $\{x_j^i\}$ , где  $i=1, \dots, N$  – количество объектов,  $j=1, \dots, M$  – количество признаков, характеризующих данный объект. В нашем случае  $N$  – количество временных промежутков, при которых наблюдались события Ла–Нинья с 1900 по 2019 гг. Это 21 временной промежуток, включающие 2,5-летние периоды от января «0» года, т.е. начала возникновения явления Ла–Нинья, до июня «+2» года.  $M$  – осредненные значения аномалий ТПО по широте от  $0,5^\circ$ с.ш. до  $0,5^\circ$ ю.ш. для экваториальной зоны Тихого океана в пределах  $150^\circ$ в.д.– $80^\circ$ з.д. (рис. 3.5.1). В одном временном промежутке 3990 значений АТПО. Получается матрица  $x_{3990}^{21}$ , что, по сути, означает пространственно-временные диаграммы, или диаграммы Хомволлера [Hovmöller, 1949], разложенные в ряды, для формирования этой самой матрицы,

по которой и были в дальнейшем рассчитаны ЭОФ (см. схему рис. 2.16).

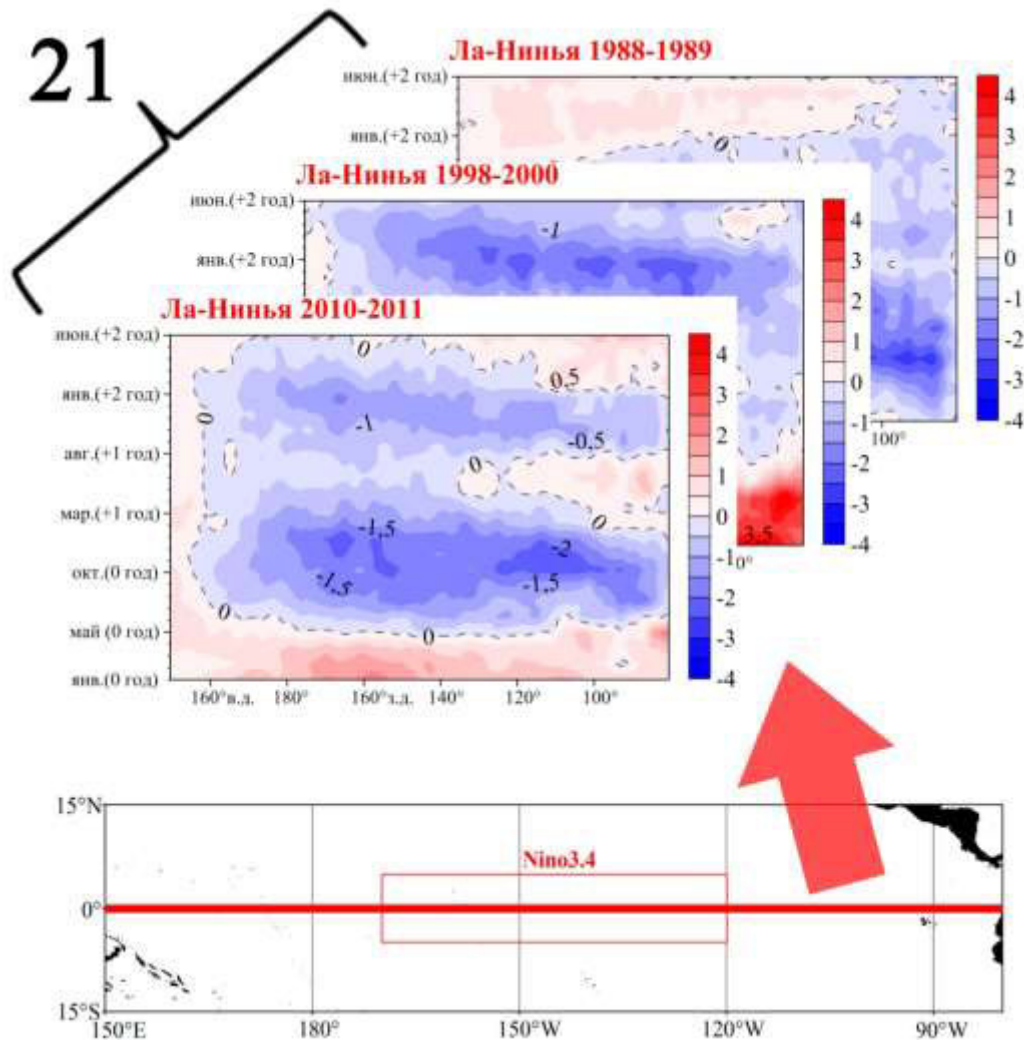


Рисунок 2.16 – Схема получения 2,5-летних долготно-временных диаграмм аномалий ТПО для ЭОФ анализа закономерностей формирования Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана. Красной жирной линией отмечен район осреднения аномалий ТПО по долготе

Из современной литературы известно, что природа формирования событий Ла-Нинья несимметрична событиям Эль-Ниньо [Larkin, Harrison, 2002; Okumura et al., 2010; Hu et al., 2017]. Если события Эль-Ниньо, как правило, существуют не больше года, то события Ла-Нинья могут длиться до двух лет,

а иногда возникает одно событие, а следом за ним другое. Поэтому, чтобы учесть продолжительные и последовательные эпизоды холодной фазы ЭНЮК, выделенные явления Ла-Нинья по данным HadISST и COBE SST2 были определены в 2,5 летние временные отрезки от января «0» года до июня «+2» года, включающие в себя одно или два события Ла-Нинья. Таким образом, с 1900 по 2019 гг. получились 21 временных периодов: 1/1903-6/1905, 1/1909-6/1911, 1/1916-6/1918, 1/1924-6/1926, 1/1933-6/1935, 1/1938-6/1940, 1/1942-6/1944, 1/1949-6/1951, 1/1954-6/1956, 1/1964-6/1966, 1/1970-6/1972, 1/1973-6/1975, 1/1975-6/1975, 1/1983-6/1985, 1/1988-6/1990, 1/1995-6/1997, 1/1998-6/2000, 1/2005-6/2007, 1/2007-6/2009, 1/2010-6/2012, 1/2016-6/2018. Изменения аномалий ТПО в эти 2,5-летние временные периоды в экваториальной полосе Тихого океана (рис. 2.16) были разложены на ЭОФ.

В результате было получено три основных ЭОФ, как по HadISST, так и по COBE SST2, суммарный вклад которых в общую дисперсионную изменчивость аномалий ТПО в экваториальной полосе Тихого океана составил почти 80% (табл. 2.6). Рассмотрим суммарную амплитуду каждой из трех полученных мод в 21 временной промежутки по 2,5 года, когда наблюдались события Ла-Нинья. На рисунке 2.17 видно, что суммарные амплитуды первой и второй мод идут в противофазе, а третья – практически модулирует первый ЭОФ. Это указывает на то, что возможно существование совершенно двух разных пространственно-временных особенностей образования явлений Ла-Нинья. Теперь рассмотрим более подробно, что эти две

первые полученные моды демонстрируют в физическом смысле.

Таблица 2.6 – Дисперсионный вклад (%) полученных ЭОФ разложения пространственно-временных АТПО в экваториальной полосе Тихого океана

	Вклад (%)	
	HadISST	COBE SST2
ЭОФ 1	43,57	45,57
ЭОФ 2	22,58	21,18
ЭОФ 3	10,00	12,82
ЭОФ 4	5,94	5,35
ЭОФ 5	3,00	2,92
ЭОФ 6	2,78	2,35

Первая ЭОФ составила 43,6% по HadISST и 45,6% по COBE SST2. Из рисунка 2.18 (а, в) видно, что события Ла-Нинья с большим вкладом первой моды возникают в конце весны и в начале лета. Зрелая фаза такого явления, приходится на ноябрь-январь, а максимально-отрицательная аномалия ТПО расположена в центрально-экваториальной части. В то же время, рисунок 2.18 (а, в) показывает, что ровно через год возникает второе Ла-Нинья с максимально-отрицательной аномалией ТПО в декабре-феврале в центрально-экваториальной части Тихого океана, но более слабой, по сравнению с первым годом Ла-Нинья. В физическом смысле первая ЭОФ демонстрирует два последовательных Ла-Нинья, которые возникают после

сильного канонического Эль-Ниньо. То есть, после интенсивного Эль-Ниньо обычно происходит Ла-Нинья с формированием максимально отрицательных аномалий в центрально-экваториальной зоне Тихого океана в конце осени и начале зимы, потом утихает и ровно через год усиливается снова. Это доказывает концепцию двухлетнего Ла-Нинья, и еще раз подтверждает, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья асимметричны друг к другу, подтверждая работы [Larkin, Harrison, 2002; Okumura et al., 2010; Hu et al., 2017].

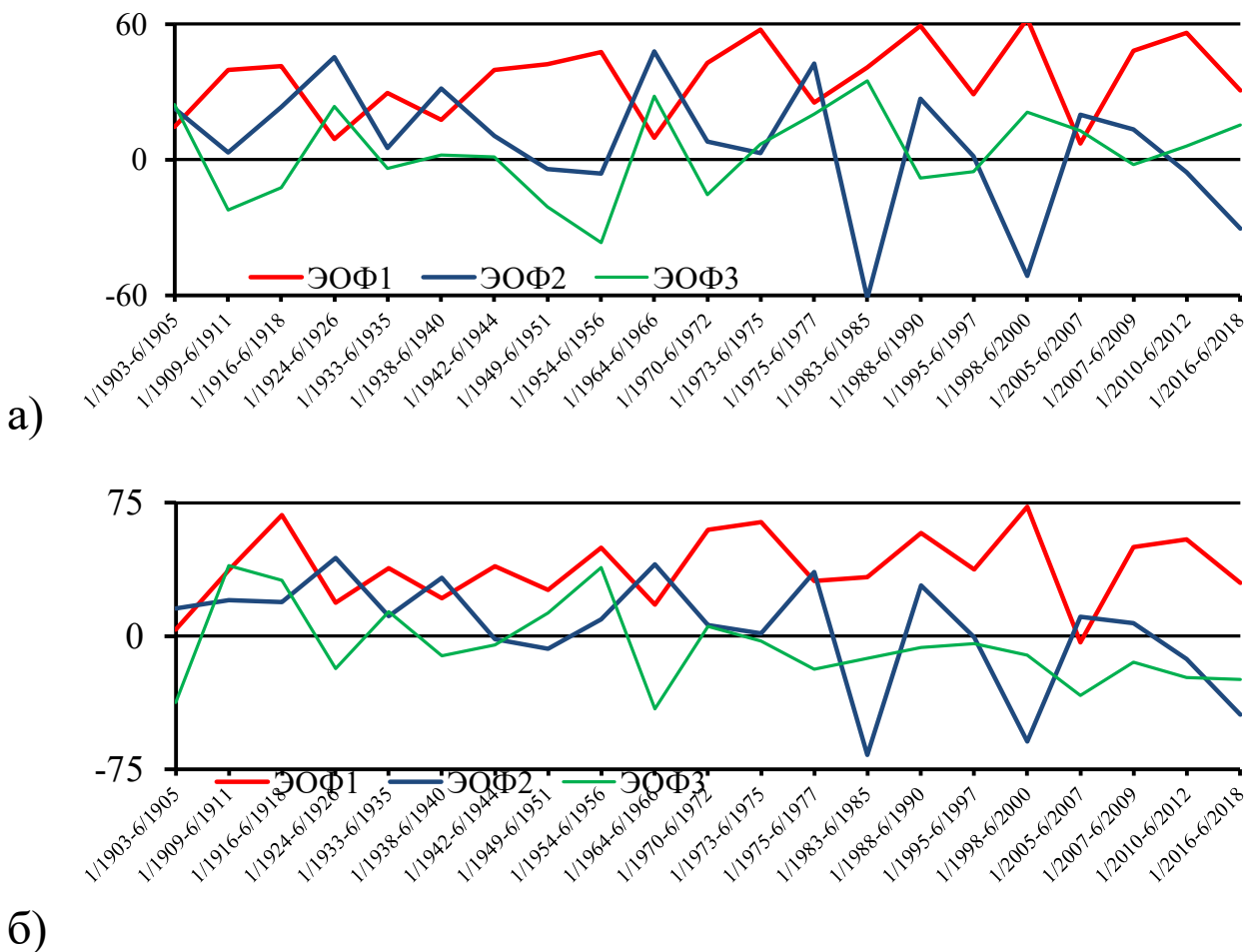


Рисунок 2.17 – Суммарные амплитуды трех полученных мод в 2,5-летние периоды, когда наблюдались одно или два события Ла-Нинья, по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

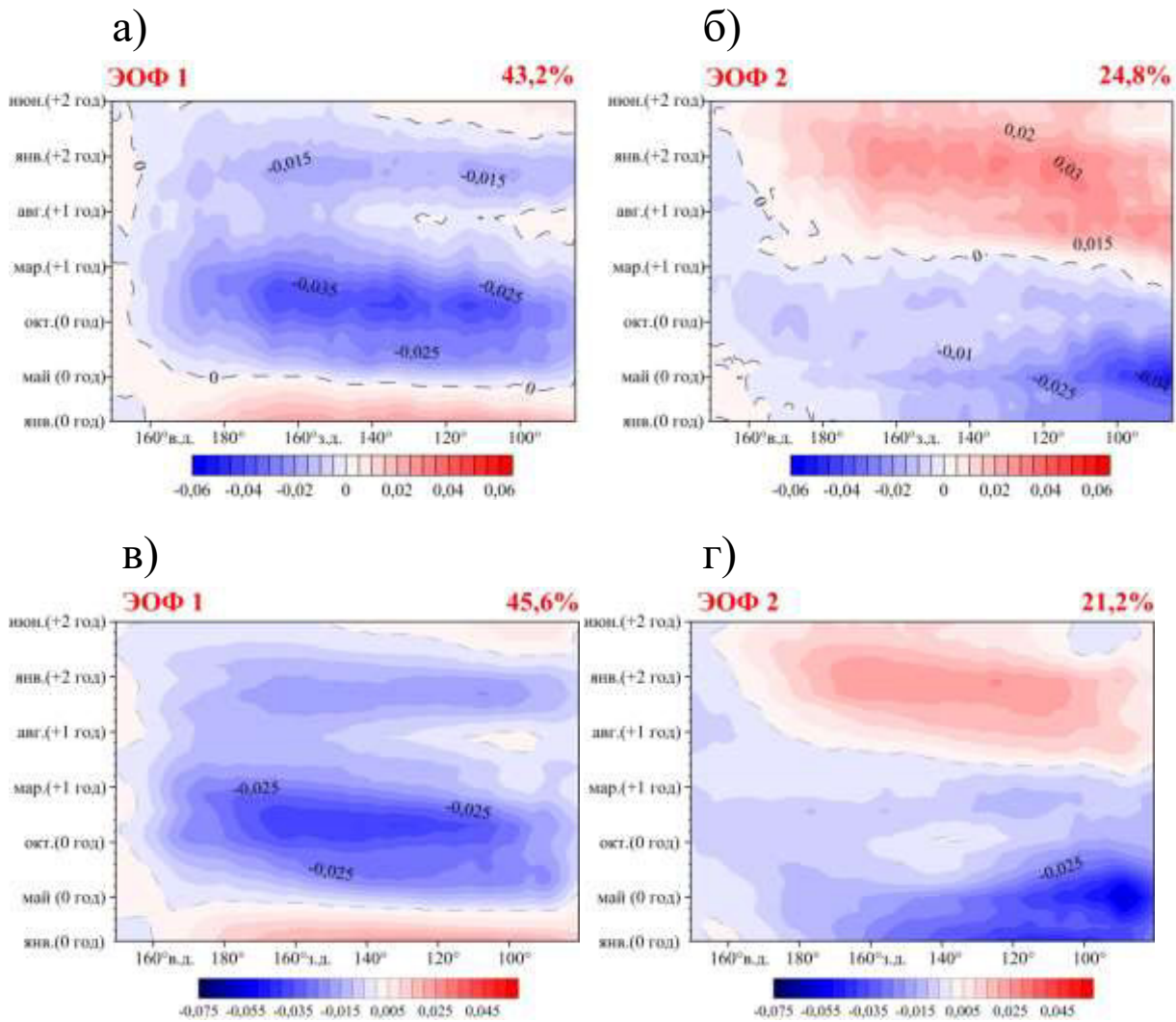


Рисунок 2.18 – Пространственно-временные диаграммы первых двух мод, полученных по данным HadISST (а, б) и COBE SST2 (в, г)

Вторая ЭОФ составила 26,6% (рис. 3.5.3 б, г) по данным HadISST, и 21,2% – по COBE SST2. События Ла-Нинья с большим вкладом в суммарную амплитуду второй моды возникают в начале весны в восточно-экваториальной части Тихого океана. Максимально-отрицательная аномалия приходится на июнь-август. Заканчиваются такие события зимой +1 года в центре Тихого океана. Ла-Нинья с пространственно временной структурой второй ЭОФ носят чисто Восточно-Тихоокеанский



характер, как было описано ранее в подглавах 3.3 и 3.4, а также в наших опубликованных работах [Voskresenskaya, Marchukova, 2017; Voskresenskaya et. al., 2018], возникают в восточно-экваториальной части Тихого океана, там же развиваются и существуют не больше года. После таких Ла-Нинья возможно образование Эль-Ниньо Modoki.

2,5-летние периоды изменений аномалий ТПО в экваториальной полосе Тихого океана в тоже время были проклассифицированы с помощью иерархического кластерного анализа (рис. 2.19). В результате получилось, что периоды Ла-Нинья, где больший вклад вносила вторая мода, отошли в первый кластер, а периоды, где больший вклад вносила первая мода, отошли ко второму кластеру.

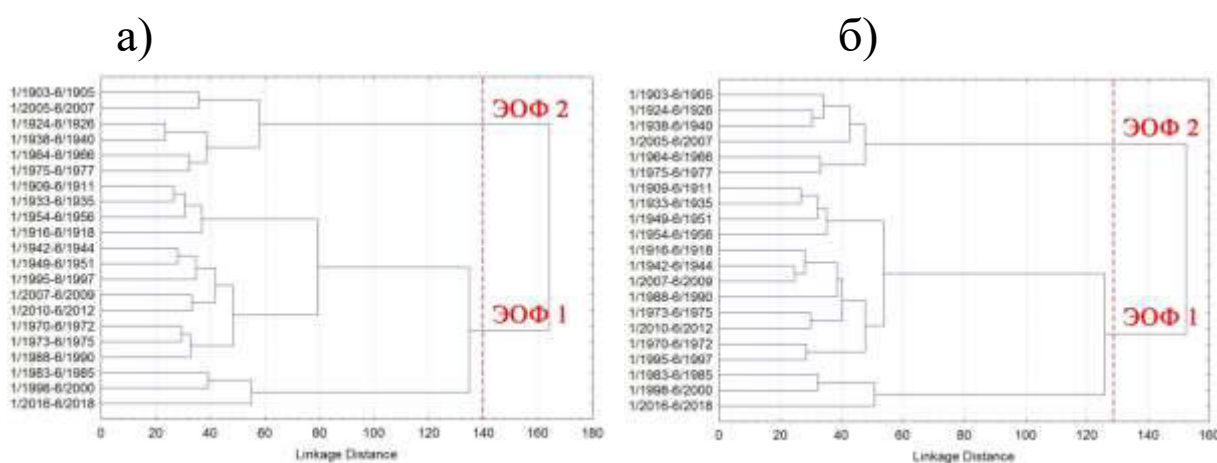


Рисунок 2.19 – Дендограммы иерархического кластерного анализа 2,5-летних периодов аномалий ТПО (годы Ла-Нинья) по массивам COBE SST2 (а) и HadISST (б) с 1900 по 2019 гг. в экваториальной зоне Тихого океана. Мера тесноты связи – Эвклидово расстояние

Таким образом, с помощью разложения на ЭОФ 2,5-летних отрезков изменений аномалий ТПО в экваториальной зоне

Тихого океана по данным массивов HadISST и COBE SST2 с 1900 по 2019 гг. и их дальнейшей кластеризации были получены пространственно временные закономерности формирования явлений Ла-Нинья относительно разных типов Эль-Ниньо.

Подводя итоги по Главе 2 можно заключить, что с использованием оптимального критерия интенсивности ( $-0,5^{\circ}\text{C}$ ), минимальной продолжительности существования аномалии ТПО в районе Nino3.4 в течение пяти последовательных месяцев по трем массивам данных HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 в период с 1870 по 2019 гг. выделено 33, 32 и 35 событий Ла-Нинья. Их вклад в общую дисперсионную изменчивость аномалий ТПО в районе Nino3.4 составил 20,3%, 24,1% и 18,5%, соответственно.

Иерархическим методом кластерного анализа с учетом интенсивности отрицательных аномалий ТПО и их пространственной локализации в зрелую фазу доказано наличие двух пространственных типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского. В результате анализа эволюции каждого из типов описаны их особенности.

События Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа обычно возникают в мае или июне в центре экваториальной зоны Тихого океана. Важную роль при этом играет интенсификация пассатных ветров в этом регионе. Летом, в начальной стадии развития явления там же формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в 6-8 раз (с  $0,1 \text{ мг/м}^3$  до  $0,8 \text{ мг/м}^3$ ), а термоклин в экваториальной зоне между  $170^{\circ}$ – $100^{\circ}$  з.д. поднимается до глубины

50 м. Максимальная фаза развития таких событий приходится на ноябрь-январь.

Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа возникают в апреле и всегда на востоке. При этом центрально-экваториальный апвеллинг не образуется. Отрицательная аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией Пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана. Максимальная фаза таких событий обычно приходится на октябрь-декабрь.

ЭОФ анализ пространственно-временных полей ТПО по массивам HadISST и COBE SST2 выявил наличие двух основных мод. Первая мода ЭОФ (43,6% по HadISST и 45,6% по COBE SST2) в физическом смысле эта мода демонстрирует два последовательных Ла-Нинья, которые возникают после интенсивного канонического Эль-Ниньо. При этом максимально отрицательная аномалия ТПО формируется в центрально-экваториальной зоне Тихого океана в конце осени - начале зимы, затем угасает и ровно через год усиливается снова. Это доказывает концепцию двухлетнего Ла-Нинья и подтверждает, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья асимметричны друг к другу.

Вторая мода ЭОФ (22,6% по HadISST и 21,2% по COBE SST2) соответствует Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа, которые возникают в восточно-экваториальной части Тихого океана, там же развиваются и существуют не больше года. После таких событий Ла-Нинья возможно образование Эль-Ниньо «Modoki».

## ГЛАВА 3

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛА-НИНЬЯ В КЛИМАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЯХ АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА

Ла-Нинья, как отрицательная фаза ЭНЮК, вызывает огромный интерес ученых и специалистов разных областей из-за своего глобального климатического воздействия на окружающую среду, сопровождающегося негативными последствиями [Rasmusson, Wallace, 1983; Fu et al., 1986]. Исследование глобального отклика на Ла-Нинья – одна из актуальных тем изучения взаимодействия океана и атмосферы. Этот вопрос также волнует и охватывает важные сферы деятельности человечества, такие как экономика, здравоохранение, экология, сельское хозяйство и другие. К примеру, когда в 2007–2008 гг. фиксировалось Ла-Нинья в Тихом океане, на юго-востоке северной Америки наблюдалась сильная засуха [Manuel, 2008]. В результате, из-за неурожая основных сельскохозяйственных

культур фермеры Северной Каролины (США) потеряли около 500 миллионов долларов. Если при Ла-Нинья на юго-западе северной Америке возникает засуха, то в Австралии, напротив, наблюдаются обильные дожди и наводнения. В 2010–2011 гг. были зафиксированы два последовательных Ла-Нинья. При этом 78% территории Квинсленда (Австралия), площадь которой равна площади Германии и Франции вместе взятых, из-за сильных предшествующих наводнений было объявлено зоной бедствия [Miller, 2019]. Изучение условий формирования Ла-Нинья может помочь в развитии методов прогнозирования этих событий, а их заблаговременный прогноз позволит свести к минимуму негативные последствия.

В настоящей монографии фокус внимания направлен на изучение проявлений двух типов Ла-Нинья в формированиях аномалий гидрометеорологических характеристик над Атлантико-Европейским регионом. В ранних работах [Ropelewski, Halpert, 1987; Halpert, Ropelewski, 1992; Bronnimann et al., 2007] утверждалось, что отклик этого сигнала в аномалиях осадков и температуры воздуха в Атлантико-Европейском районе отсутствует, обосновывая это затруднением его выделения в данном регионе вследствие большой изменчивости между событиями. Позднее авторы других работ все-таки получили значимый сигнал на холодные эпизоды ЭНЮК над Европой [Ineson, Scaife, 2009; Li, Lau, 2012]. В исследованиях [Нестеров, 2000; Мохов, Смирнов, 2006; Zhang et al., 2014] был сделан

акцент на то, что в годы Ла-Нинья происходит большая изменчивость циркуляции атмосферы над северной Атлантикой, чем в годы Эль-Ниньо. Поэтому, основная цель данного раздела состоит в том, чтобы на основе проведенной пространственной классификации Ла-Нинья определить закономерности влияния событий ВТ и ЦТ типов на формирование погодно-климатических аномалий в Атлантико-Европейском регионе в течение двух основных периодов: с 1900 по 2016 гг. и с 1950 по 2019 гг. (в зависимости от используемого набора данных).

### **3.1 Пространственные аномалии приземного давления и осадков**

Отклики на события Ла-Нинья в Атлантико-Европейском регионе в настоящей работе исследуются в полях приземного давления и атмосферных осадков с помощью метода анализа композитов с учетом статистической значимости по критерию Стьюдента на 95% уровне значимости. Полученные осредненные карты по годам анализируются помесячно, начиная с сентября «0» года (от стадии развития самого явления) по ноябрь «+1» года. Каждый композит включает в себя 14 событий Ла-Нинья ВТ типа и 12 событий Ла-Нинья ЦТ типа с 1900 по 2016 гг. Стоит отметить, что продолжительные Ла-Нинья, для которых было характерно два пика развития максимально-отрицательной аномалии ТПО, длительность которых около двух лет, разбивались на два события по отдельности для каждого года.

Согласно результатам Главы 2 для композитных карт ВТ типа Ла-Нинья были отобраны следующие годы: 1903–1904, 1909–1910, 1916–1917, 1917–1918, 1924–1925, 1938–1939, 1942–1943, 1954–1955, 1955–1956, 1964–1965, 1970–1971, 1995–1996, 2005–2006, 2007–2008 (12 событий). Аналогично выбраны годы ЦТ типа Ла-Нинья: 1910–1911, 1933–1934, 1949–1951, 1973–1974, 1975–1976, 1983–1984, 1984–1985, 1988–1989, 1998–1999, 1999–2000, 2010–2011, 2011–2012 (12 событий). Перейдем к описанию полученных результатов.

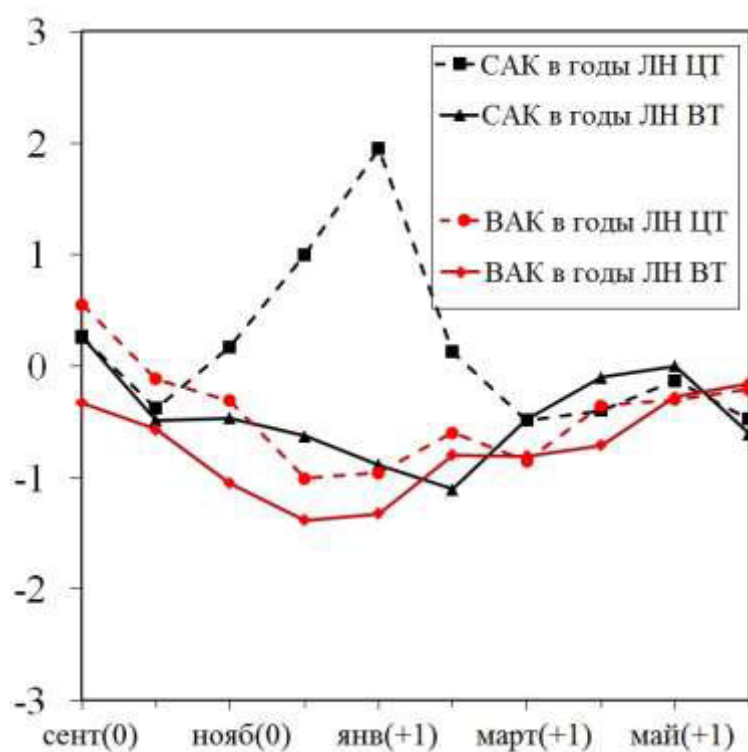


Рисунок 3.1 – Композиты индексов САК И ВАК для ЦТ и ВТ типов Ла-Нинья с 1950 по 2019 гг.

Как было отмечено ранее, максимальная фаза развития для ВТ типа Ла-Нинья выпадает на октябрь-декабрь, а для ЦТ типа – на ноябрь-январь (см. главу 2). Выраженный значимый

отклик в Атлантико-Европейском регионе в периоды Ла-Нинья фиксируется в зимний период – с декабря по март. То есть, через дальнедействующие связи (или «атмосферный мост») [Liu, Alexander, 2007] сигнал на холодную фазу ЭНЮК в исследуемом регионе распространяется с момента начала развития максимально-отрицательных аномалий ТПО в экваториальном секторе Тихого океана со сдвигом в 1-2 месяца. Это хорошо прослеживается в изменениях индексов Североатлантического (САК) и Восточно-Атлантического колебаний (ВАК). Как видно из рисунка 3.1 максимальное проявление ЦТ Ла-Нинья в изменениях индекса САК отмечается в январе, при этом фаза САК – положительная. В то время как в годы ВТ типа Ла-Нинья значения индекса САК в зимние месяцы – отрицательные (рис. 3.1). Комозит индекса ВАК, как при ВТ типе, так и ЦТ, показывает значения ниже нуля (то есть преобладает отрицательная фаза колебания). Однако в годы ВТ Ла-Нинья значения индекса ВАК ниже  $-1$  в зимний период. Перейдем к рассмотрению композитных полей приземного давления и осадков в годы разных типов Ла-Нинья.

При этом напомним ставшую уже классической схему формирования европейских климатических аномалий, которая в работах [Hurrell, 1995; Voskresenskaya, Polonsky, 1995] была опубликована практически одновременно. В положительную фазу САК центры действия атмосферы Северной Атлантики – Азорский максимум и Исландский минимум – смещаются к северу–северо-востоку и траектории североатлантических циклонов проходят по северу Европы. А в это время на юге Ев-



ропы господствуют антициклонические условия. В отрицательную фазу САК картина меняется на противоположную: Азорский максимум и Исландский минимум смещаются к югу–юго-западу. Тогда траектории циклонов проходят по югу Европы и Средиземному морю, а антициклонические условия в это время характерны для северной Европы.

В годы Восточно-Тихоокеанского типа Ла-Нинья, как показал рис. 3.1, индекс САК имеет отрицательные значения с максимумом в феврале. В соответствии с теорией [Hurrell, 1995; Voskresenskiya, Polonsky, 1995] во время отрицательной фазы САК основная часть циклонов в Европейский регион действительно, проходит через Пиренейский полуостров и Средиземноморский район, что хорошо видно из рис. 3.2 на композитных картах аномалий давления по данным реанализа 20CR и осадков по данным GPCC в феврале «+1» года Ла-Нинья ВТ типа. В то же время, в зоне умеренных широт Северной Атлантики образуется статистически значимая отрицательная аномалия приземного давления, до  $-5$  мб в центре действия в зимний период, с выраженным максимумом в феврале «+1» года (рис. 3.2, а). На севере исследуемого региона формируется положительная аномалия приземного давления, в среднем равная 3-4 мб (рис. 3.2, а). Образованная структура в поле приземного давления соответствует отрицательной фазе ВАК, описание которого представлено в работах [Нестеров, 2013; Polonskii, Kibal'chich, 2015]. Следовательно, можно сделать один из выводов, что при ВТ типе Ла-Нинья в зимний период происходит усиление негативной фазы ВАК. Это приводит к устойчивому,

аномальному похолоданию в феврале и начале марта во всей северной части Европы. К этому вернемся чуть позже.

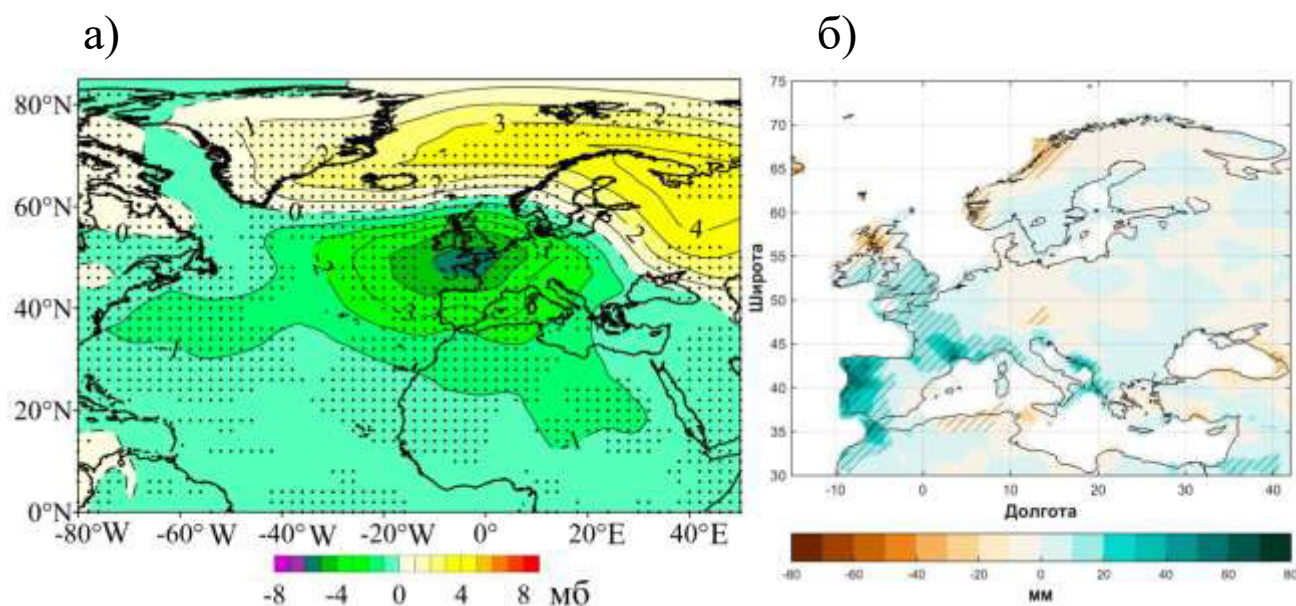


Рисунок 3.2 – Композиты в феврале «+1» года аномалий приземного давления по данным реанализа 20CR (а) и аномалий количества выпавших осадков по данным GPCC (б) в годы событий Ла-Нинья ВТ типа (14 событий). Точками отмечена статистическая 95% значимость для давления, линиями – для осадков

При Центрально-Тихоокеанском типе Ла-Нинья выявлена противоположная структура в поле приземного давления. Зимой над Атлантикой в умеренном поясе между  $40^\circ$  и  $60^\circ$  с.ш. образуется положительная аномалия приземного давления. А в высоких широтах этого региона формируется отрицательная аномалия давления, с минимальными значениями до -6 мб в январе (рис. 3.3, а). Подобная структура в поле давления соответствует положительной фазе САК. Согласно классической теории [Hurrell, 1995; Voskresenskaya, Polonsky, 1995], траекто-

рия движения циклонов с Атлантики в Европу в положительную фазу САК смещается на 200–400 км севернее [Бардин, Полонский, 2005; Нестеров, 2013], а в западной и северной Европе наблюдается положительная аномалия температуры воздуха. В то же время, интересно заметить, что при ЦТ типа Ла-Нинья на юге и западе Скандинавии и Великобритании в период с конца декабря «0» года по начало марта «+1» года наблюдается значимая положительная аномалия в температуре воздуха в связи с активной циклонической деятельностью над этим регионом (рис. 3.3, б).

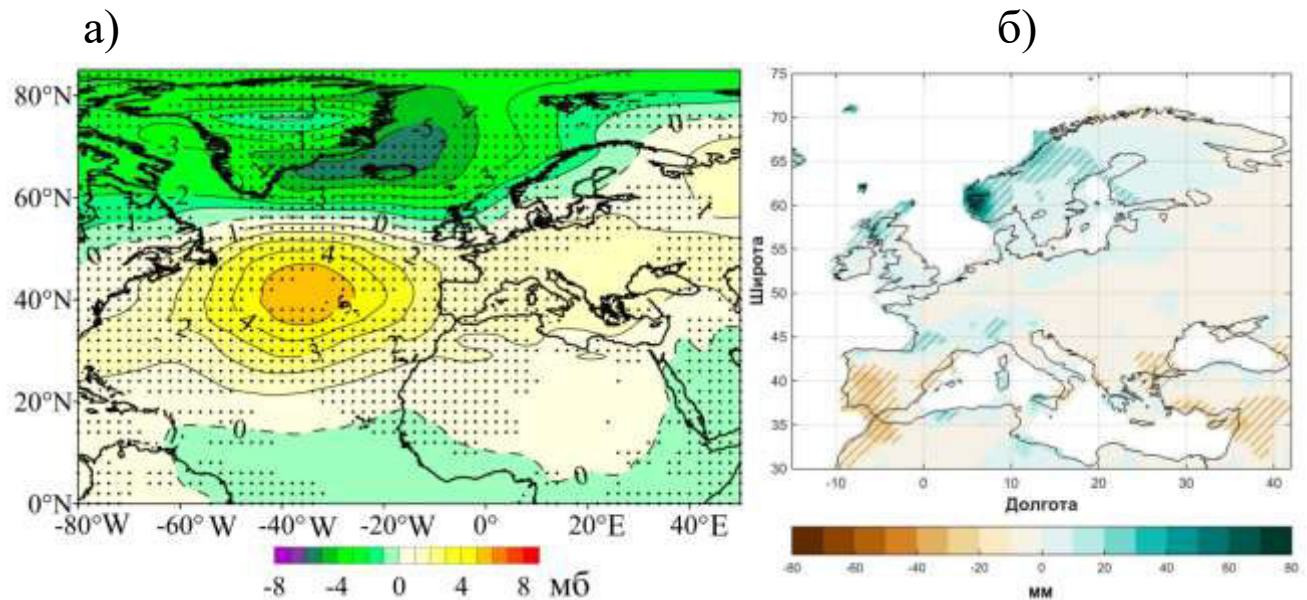


Рисунок 3.3 – Композиты в январе «+1» года аномалий приземного давления по данным реанализа 20CR (а) и аномалий количества выпавших осадков по данным GPCC (б) в годы событий Ла-Нинья ВТ типа (12 событий). Точками отмечена статистическая 95% значимость для давления, линиями – для осадков

Положительные аномалии осадков в годы Ла-Нинья ЦТ типа достигают 100–150 мм/мес в январе «+1» года над Скандинавией, особенно в ее юго-западной части, в то время как для южной и юго-западной части Европы характерны значимые отрицательные аномалии осадков (рис. 3.3, б).

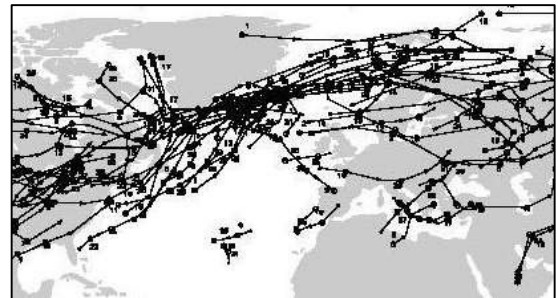
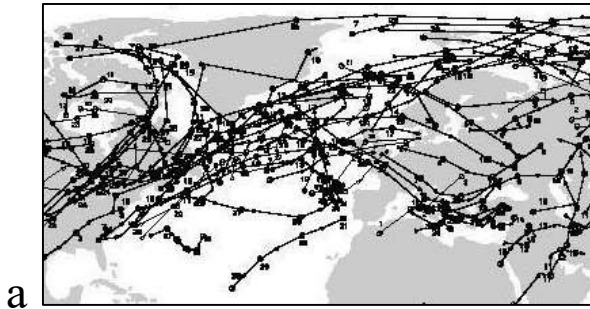
С помощью данных Атласа траекторий движений внетропических циклонов (*Atlas of Extratropical Storm Tracks*) за период с 1961 по 2010 гг., взятых с сайта NASA GISS (<http://data.giss.nasa.gov/stormtracks/>), были получены композиты траекторий зимних циклонов (рис. 3.4) для 5 событий ВТ (1964–1965, 1970–1972, 1995–1996, 2005–2006, 2007–2008) и 7 событий ЦТ (1973–1974, 1975–1976, 1983–1984, 1984–1985, 1988–1989, 1998–1999, 1999–2000) типов Ла-Нинья в зимний период.

Композиты траекторий движения циклонов в январе и феврале «+1» года, построенные для 5 событий ВТ и 7 событий ЦТ типов Ла-Нинья (рис. 3.4), хорошо согласуются с композитами аномалий приземного давления и количества выпавших осадков, полученными для 14 ВТ ЛН и 12 ЦТ ЛН (рис. 3.2 и рис. 3.3). Траектории перемещения североатлантических циклонов более растянуты к югу Европы для ВТ типа Ла-Нинья (рис. 3.4, а, в), как для отрицательной фазы колебаний САК, и более сконцентрированы к северу для ЦТ типа Ла-Нинья (рис. 3.4, б, г), как в случае положительной фазы САК [Бардин, Полонский, 2005].

BT тип Ла-Нинья

ЦТ тип Ла-Нинья

ЯНВАРЬ



ФЕВРАЛЬ

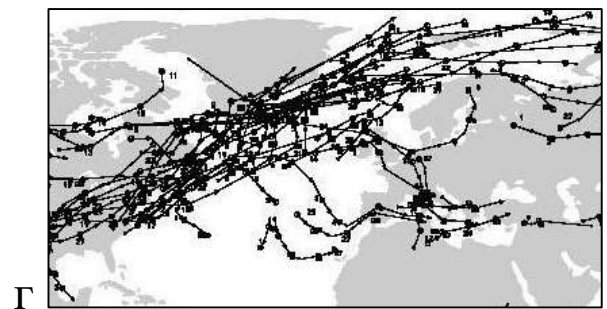
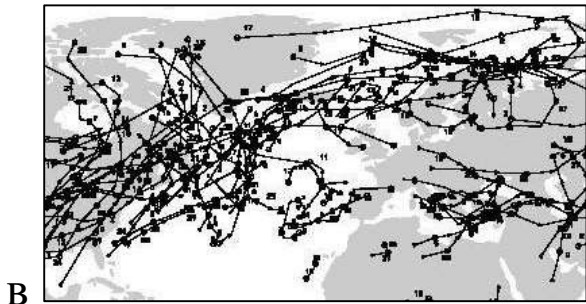


Рисунок 3.4 – Композиты траекторий циклонов в январе и феврале «+1» года для BT типа Ла-Нинья (а , в) ЦТ типа Ла-Нинья (б, г)

В результате, при ВТ типе Ла-Нинья циклоническая деятельность усиливается над Центральной Европой и Средиземноморским бассейном, а при ЦТ типе – над Великобританией и северо-западной частью Европы.

## 3.2 Аномалии в поле температуры

Для продолжения анализа климатических аномалий в годы разных Ла-Нинья использовались массивы ежедневных данных о средней температуре воздуха из базы E-OBS 19.0e на пространственной сетке  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  за период с 1950 по 2019 гг. Кроме того, использовались более длинные ряды данных из реанализа 20 Century Reanalysis v2c (20CRv2c или 20CR) с пространственной сеткой  $2^\circ \times 2^\circ$  за период с 1900 по 2014 гг.

Стоит отметить, что для получения композитов температуры воздуха продолжительные события Ла-Нинья, длительностью около двух лет, как и в случае с давлением и осадками, разбивались на два события отдельно для каждого года. Для ВТ типа Ла-Нинья в период 1950–2019 были отобраны годы: 1954–1955, 1955–1956, 1964–1965, 1970–1971, 1995–1996, 2005–2006, 2007–2008, 2017–2018 (8 событий). Годы ЦТ типа Ла-Нинья 1950–1951, 1973–1974, 1975–1976, 1983–1984, 1984–1985, 1988–1989, 1998–1999, 1999–2000, 2010–2011, 2011–2012, 2016–2017 (11 событий).

В исследовании откликов на события Ла-Нинья в Атлантико-Европейском регионе по данным E-OBS анализируются подекадные композитные карты среднесуточных температур воздуха отдельно для каждого типа с сентября «0» года по август «+1» года. Под декадами подразумеваются десятидневные периоды, при этом последняя декада месяца считается как количество дней в месяце минус 20 [Лубков и др., 2019]. В каждой декаде исключен многолетний тренд и сезонная изменчивость.

Оценка статистической значимости температурных откликов Ла-Нинья для каждого типа проводилась независимо друг от друга. Для этого были составлены отдельные выборки значений в каждой узловой точке. Далее для каждой из этих выборок выполнялась проверка статистической гипотезы о значимости отличий выборочного среднего от среднемноголетнего значения (с учетом исключенной выборки) на основе стандартного t-критерия в предположении, что сравниваемые выборки извлечены из одной и той же генеральной совокупности с неизвестной дисперсией. t-критерий Стьюдента рассчитывался по следующей формуле:

$$t_{\text{эмп}} = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{n_x D_x + n_y D_y}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}} \quad (3.1)$$

где  $D_x$  и  $D_y$  – дисперсии двух выборок;  $n_x$  и  $n_y$  – длины соответствующих выборок [Гордеева, 2010]. Для удобства в работе все незначимые отличия при  $\alpha = 0,05$  приравнивались к отсутствию значения.

Дополнительно, в каждой узловой точке оценивалась повторяемость знака аномалии композитной карты следующим образом.



Таблица 3.1 – Вероятность, в процентах, заключения неверного вывода о достоверности композитной карты температурных декадных откликов на ВТ и ЦТ типы Ла-Нинья по данным E-OBS. В скобках указано количество входящих в искусственно-созданный композит случайных лет. S – площадь области однородной аномалии.

Ла-Нинья тип	Среднедекадные суточные температуры, %	
	S < 500 000 км <sup>2</sup>	S > 500 000 км <sup>2</sup>
ВТ (8)	37 %	13 %
ЦТ (11)	12 %	1 %

В случае, если знак аномалии совпадал с композитным знаком и по модулю превышал  $0,5^{\circ}\text{C}$ , количество совпадений подсчитывалось и делилось на количество событий анализируемого типа. На композитных картах черными точками отмечалась повторяемость более 80% и серыми точками, если она превышала 66%. В работе проверялась вероятность получения неверного вывода о достоверности композитной карты. Для этого случайным образом были созданы по 100 искусственных полей при количестве входящих карт, равном 8 и 11 (количество карт соответствует количеству событий Ла-Нинья разных типов, наблюдаемых за период 1950–2019 гг.). Далее в этих композитах оценивалось наличие или отсутствие областей со значимыми точками, в которых повторяемость была более

66%. Для анализа была условно принята градация на малые области, размер которых не превышал 500 000 км<sup>2</sup>, и большие – более 500 000 км<sup>2</sup>. Оценка вероятности получения неверного вывода для среднедекадной температуры воздуха проводилась на примере январей. Результаты такой оценки для разных типов Ла-Нинья указаны в таблице 3.1. Далее охарактеризуем наиболее выраженные и значимые аномалий температуры воздуха, совпадающие по знаку и расположению в полях, полученных по обоим массивам данных (E-OBS и 20CR).

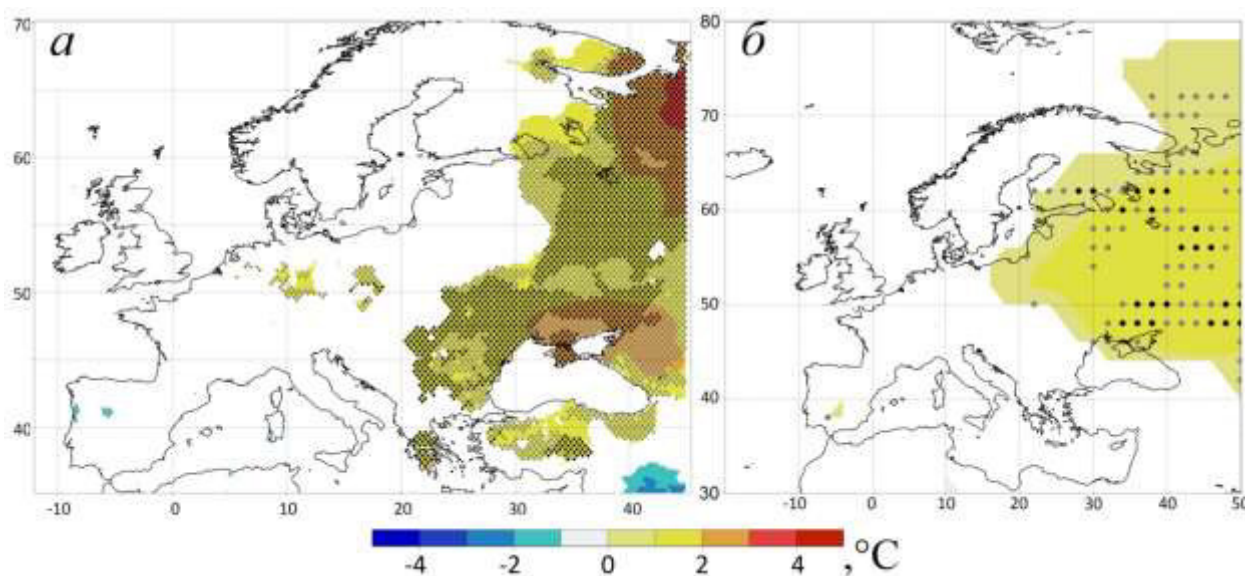


Рисунок 3.5 – Композиты аномалий температуры воздуха (°C) в третью декаду октября по данным E-OBS (а) и для октября в целом по данным 20CR (б) «0» года ВТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%

Значимая аномалия температуры воздуха Восточно-Тихоокеанского Ла-Нинья по данным E-OBS (8 событий) наблюдается

на севере Европы в первой декаде октября и имеет положительный знак. Во второй декаде октября эта положительная аномалия распространяется и на восточную часть Европы. Максимальная аномалия температуры воздуха достигает  $+2...+3^{\circ}\text{C}$  в третьей декаде октября на востоке Европы и в Причерноморье (рис. 3.5, а). Положительная октябрьская аномалия подтверждается на более расширенных композитах (15 событий ВТ ЛН) по данным реанализа 20CR (рис. 3.5, б). Аналогичная картина положительных аномалий температуры воздуха наблюдается и во второй декаде ноября. Отсюда можно сделать вывод, что в год начала Восточно-Тихоокеанского типа Ла-Нинья теплая погода в середине осени характерна для всей восточной Европы.

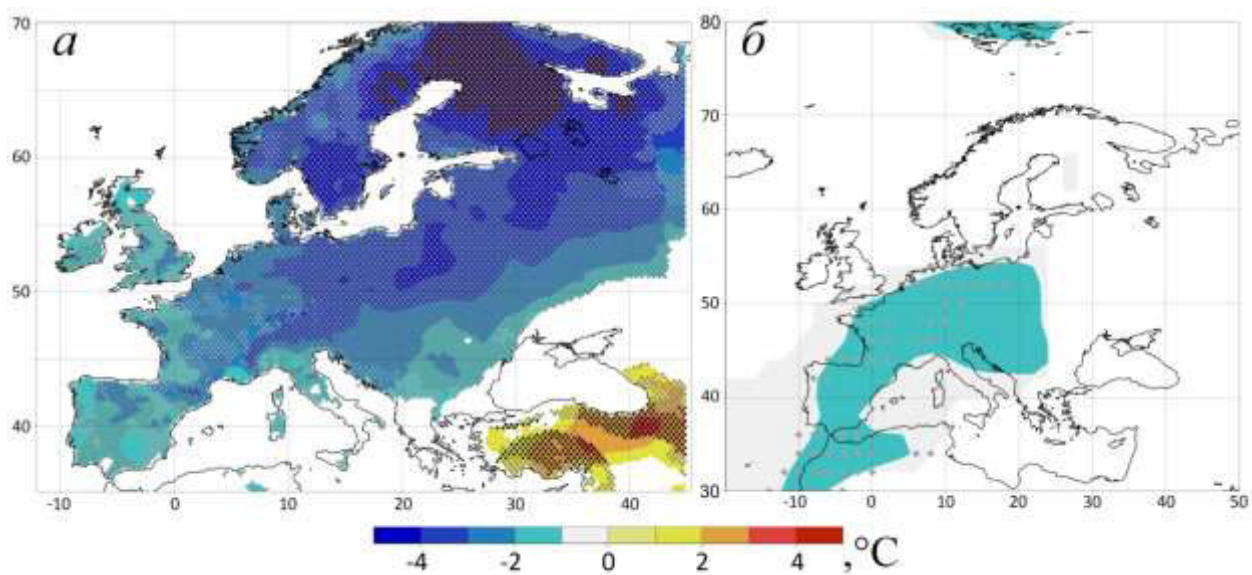


Рисунок 3.6 – Композиты аномалий температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) в первую декаду марта по данным E-OBS (а) и для марта в целом по данным 20CR (б) «+1» года ВТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%

Следующие значимые климатические отклики на ВТ ЛН наблюдаются в феврале месяце «+1» года. В третьей декаде февраля и первой декаде марта интенсивные отрицательные аномалии температуры воздуха отмечаются практически по всей Европе (кроме Турции и Грузии). Минимумы температурных аномалий, со значениями менее  $-6^{\circ}\text{C}$ , приходятся на территорию Финляндии (рис. 3.6, а). В Скандинавском регионе формируются устойчивые холода с аномалией около  $-4\dots-5^{\circ}\text{C}$  во второй и третьей декадах марта вплоть до первой декады апреля, что согласуется с уже полученными результатами по данным приземного давления и осадков, когда выражены негативные фазы ВАК и САК. По данным реанализа 20CR в марте «+1» года ВТ типа Ла-Нинья поле этих отрицательных аномалий температуры воздуха подтверждается только над Западной Европой (рис. 3.6, б). Вероятность ошибки, рассчитанной на основе набора данных реконструкции E-OBS, составляет 13%. Таким образом, можно сделать вывод, что для большей материковой части Европы в годы ВТ типа Ла-Нинья будет характерна поздняя прохладная весна.

Центрально-Тихоокеанский тип Ла-Нинья. Поле отрицательных аномалий температуры воздуха (до  $-3^{\circ}\text{C}$ ), расположенное над центральной и восточной Европой, характерно для второй и третьей декад ноября «0» года ЦТ ЛН. Повторяемость возникновения этой аномалии составляет 66% (3.7, а). Похолодание в ноябре месяце во время ЦТ типа статистически подтверждается на среднемесячных композитных картах по данным реанализа 20CR (3.7, б). На этом сходства композитов по

данным E-OBS и 20CR в годы ЛН ЦТ типа заканчиваются. Далее описание формирования температурных аномалий продолжится лишь на основании данных E-OBS.

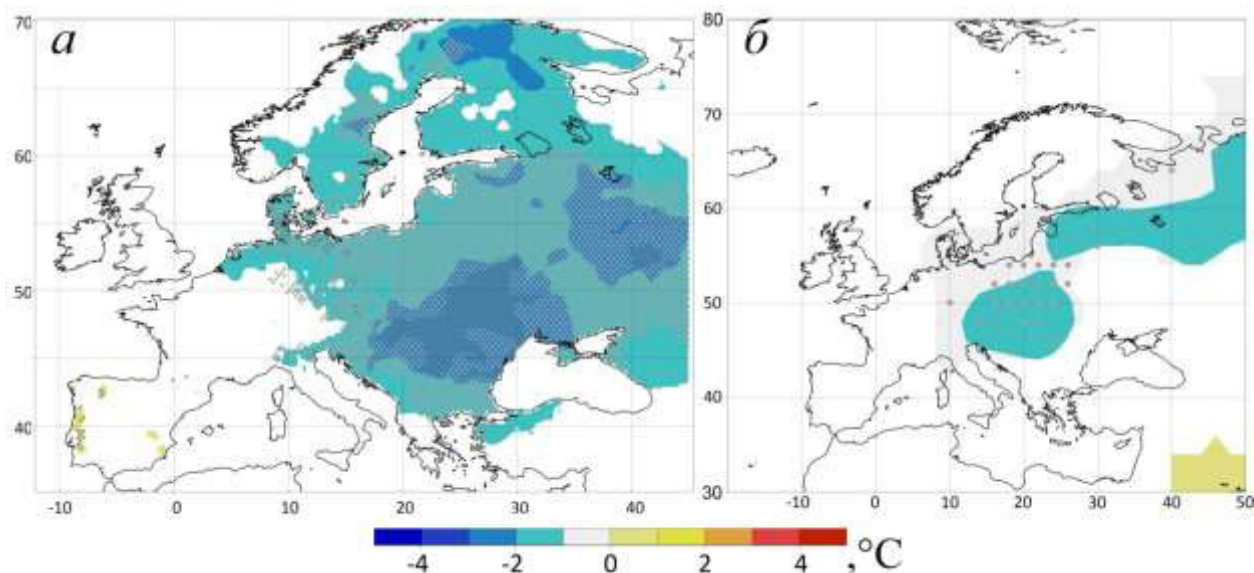


Рисунок 3.7 – Композиты аномалий температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) в третью декаду ноября по данным E-OBS (а) и для ноября в целом по данным 20CR (б) «0» года ЦТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

В третьей декаде декабря «0» года, первой и второй декаде января «+1» года устойчиво теплая погода устанавливается в Прибалтике, на юге Скандинавского полуострова и в Великобритании. Их максимальные значения составляют  $+2..+3^{\circ}\text{C}$ . Аналогичная картина соответствует и декадным аномалиям в третьей декаде февраля. Третья декада марта и первая декада апреля «+ 1 года» ЦТ типа ЛН также характеризуются положительными аномалиями температуры воздуха (равных в среднем  $+2^{\circ}\text{C}$ ) в Восточной Европе, охватывающей Украину, Польшу, Белоруссию и страны Балтии. В целом зима и весна в

большой части Европы «+1» года ЛН ЦТ умеренно теплая, что связано с усилением положительной фазы САК и активной циклонической деятельностью. Вероятность ошибки о полученных аномалиях не превышает 1%.

Таким образом, в результате полученной пространственной классификации Ла-Нинья показаны особенности двух типов этих событий, обусловленные глобальными процессами в системе океан-атмосфера, которые проявляются в аномалиях гидрометеополей через усиление или ослабление Восточно-Атлантического или Североатлантического колебаний.

### **3.3 Явление Ла-Нинья в 2020-2021 гг и его проявления**

В октябре 2020 г. ВМО объявила о развитии явления Ла-Нинья, которое, как ожидалось, должно было продлиться до следующего года и повлиять на температуру воздуха, количество осадков и характер траектории движения циклонов [<https://www.fao.org/3/cb2954en/cb2954en.pdf>].

По индексу Nino3.4 холодное событие началось в сентябре 2020 г. (аномалия ТПО=-0,59°C), а закончилась спустя восемь месяцев в апреле 2021 г. (рис. 3.8). Максимальная фаза развития Ла-Нинья 2020–2021 пришлась на октябрь-декабрь, а интенсивность события составила -1,12°C.

Анализ пространственного распределения аномалий температуры воды и поверхностных течений по данным реанализа NCEP/GODAS на глубине 5 м в экваториальном секторе Тихого океана позволил проследить за изменениями в системе океан-атмосфера с начала 2020 по сентябрь 2021 гг., которые

предшествовали началу рассматриваемого события Ла-Нинья до его полного угасания. С января по апрель 2021 вдоль всей экваториальной зоны тихоокеанского региона наблюдались обычные условия. Однако уже в мае-июне в зоне Перуанского апвеллинга интенсифицировались течения, и образовалась отрицательная аномалия ТПО в районе Nino1+2. В августе 2020 г. аномалия ТПО со значениями меньше  $-0,6^{\circ}\text{C}$  достигла района Nino3.4, но максимум аномалии пониженной температуры воды находился в восточном секторе Тихого океана.

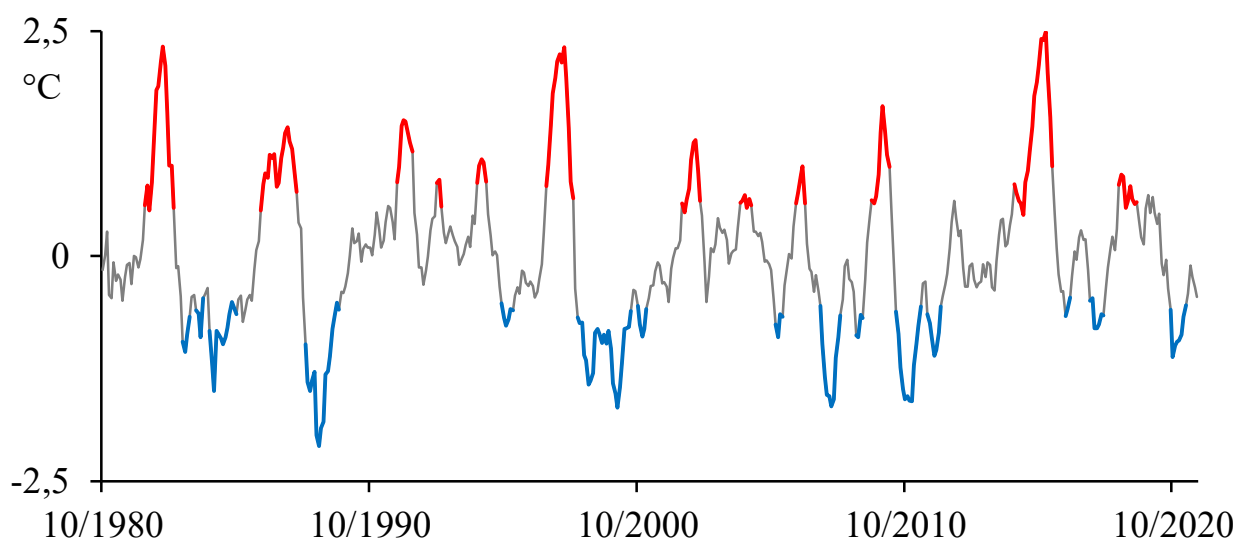


Рисунок 3.8 – Изменение индекса Nino3.4 с октября 1980 по сентябрь 2021 гг. по данным HadISST

Из рисунка 3.9 видно одно из типичных пространственных расположений аномалии ТПО в период максимального развития Ла-Нинья. Как раз из представленного на рисунке признака локализации аномалии ТПО в период зрелой фазы событие можно отнести к ВТ типу. Это также подтверждается по методу [Yeh et al., 2009], поскольку осредненная аномалия ТПО за октябрь-декабрь в районе Nino3 достигла  $-0,9^{\circ}\text{C}$ , что

больше по модулю аномалии в районе Niño4, составившей - 0,7°C (рис. 3.10).

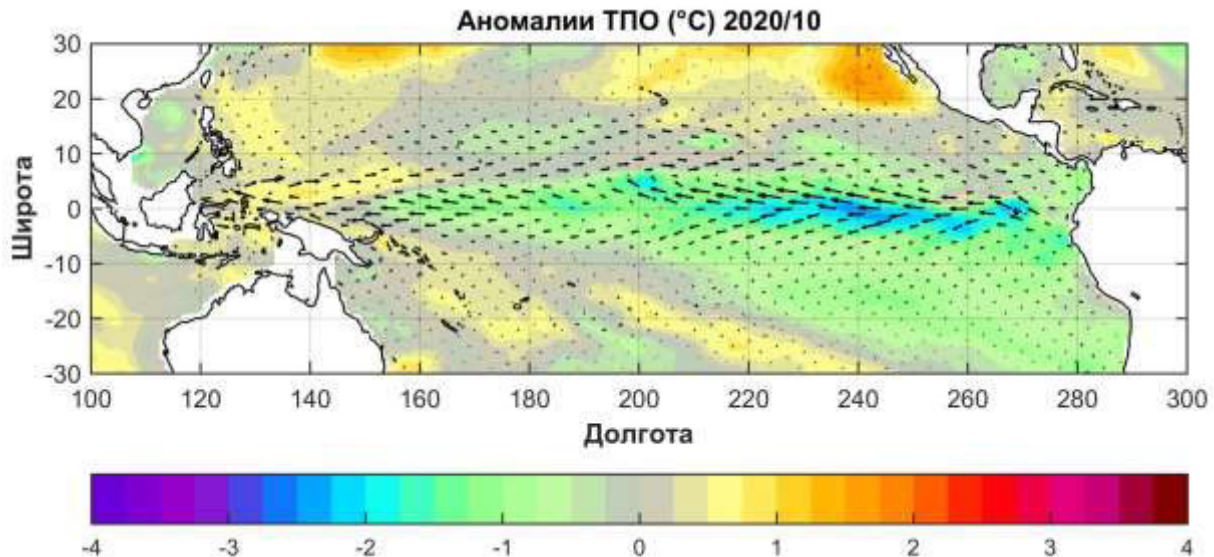


Рисунок 3.9 – Распределение аномалий температуры воды, направлений и скоростей течений на глубине 5 м для октября 2020 г. по данным реанализа NCEP/GODAS

Значимого усиления центрально-экваториального пассата не наблюдалось, как и формирования экваториального апвеллинга. Вместо этого были образованы условия для развития Перуанского апвеллинга на востоке акватории Тихого океана. Аномальное усиление пассатов в восточно-экваториальной зоне Тихого океана за счёт экмановского транспортного переноса привело к перемещению поверхностных водных масс к северу от побережья Перу,



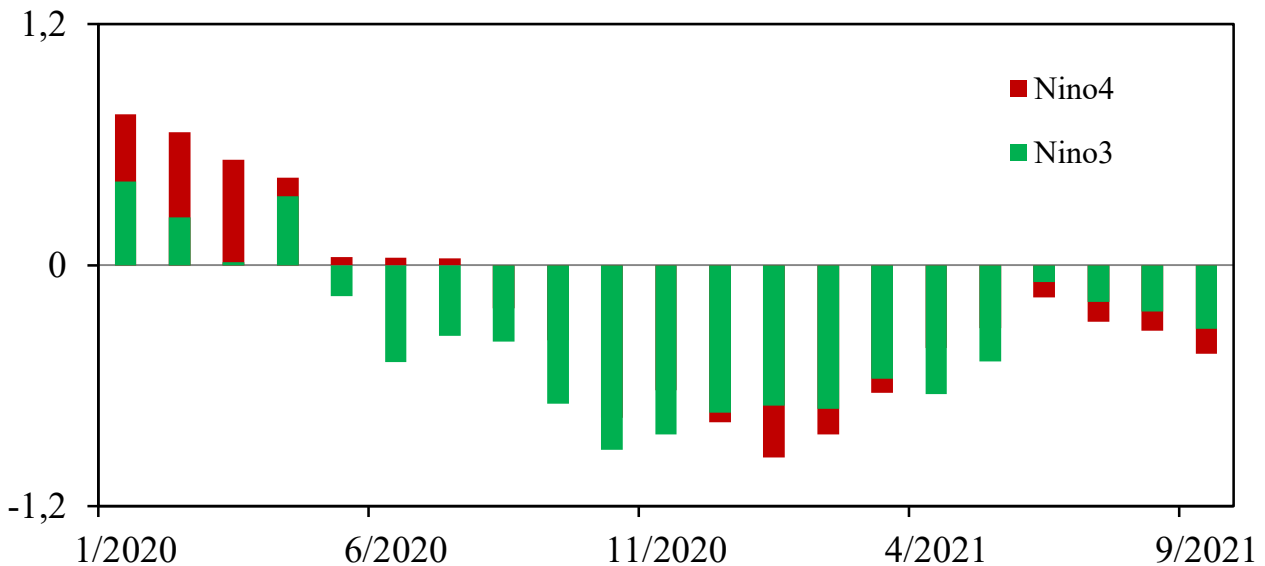


Рисунок 3.10 – Гистограммы индексов Nino3 и Nino4 данных массива HadISST с января 2020 по сентябрь 2021 гг.

тем самым интенсифицируя прибрежный апвеллинг. Таким образом, в области дивергенции более холодные глубинные воды поднялись к поверхности и начали распространяться в западном направлении вдоль экватора. Эти условия, по-видимому, и привели к развитию Восточно-Тихоокеанского типа Ла-Нинья.

Сформировавшаяся тихоокеанская аномалия в системе океан-атмосфера, как было показано выше, находит свой региональный отклик. Рассмотрим проявления события Ла-Нинья 2020–2021 в аномалиях температуры воздуха в Европе по данным реанализа NCEP/NCAR и сравним с композитами данных E-OBS, полученными для периода 1950–2019 гг. В подглаве 3.1 был сделан вывод, что наиболее значимые отклики в аномалиях температуры воздуха в годы ВТ типа Ла-Нинья характерны для сентября, октября, февраля и марта в Атлантико-Европейском регионе.

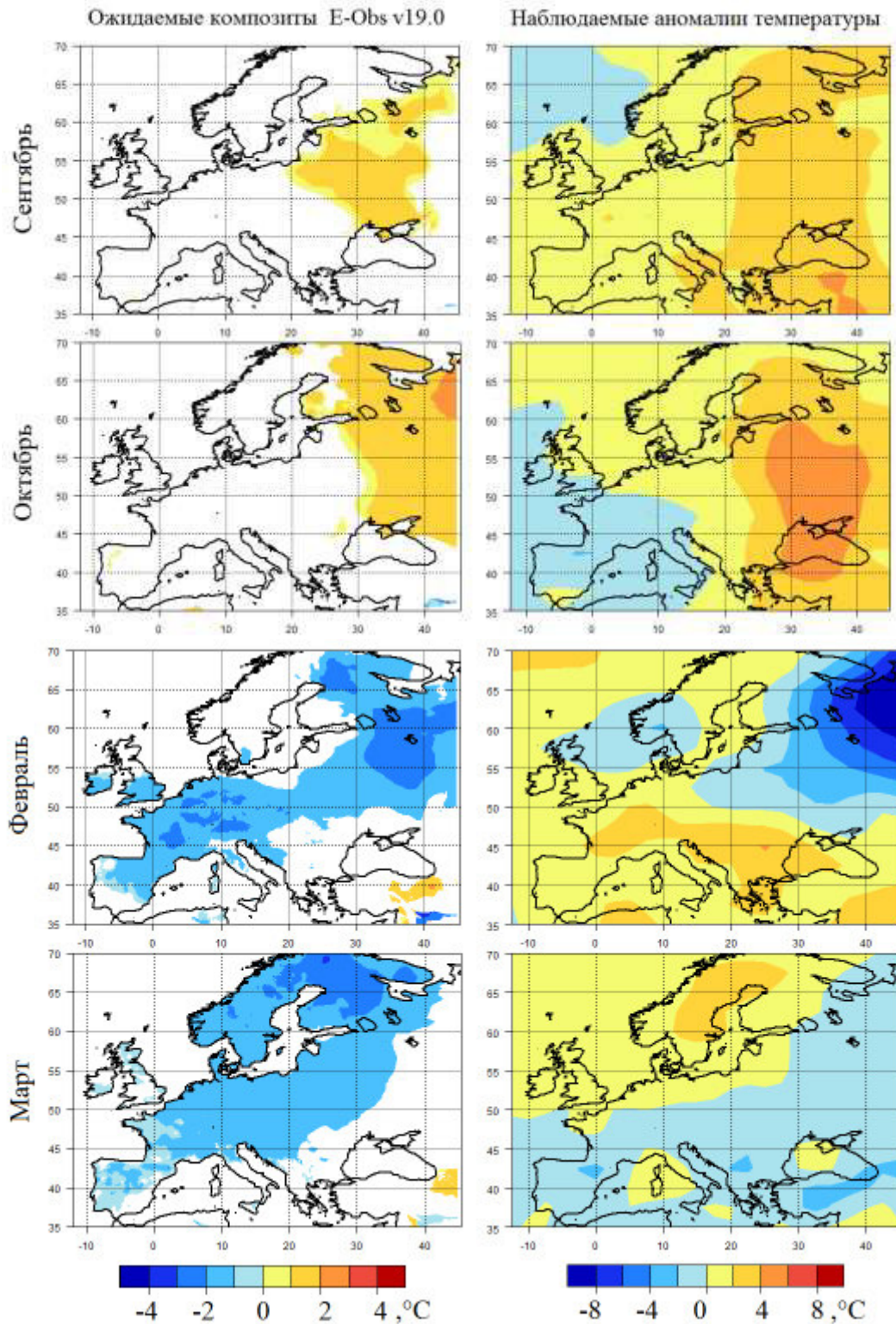


Рисунок 3.11 – Композиты значимых аномалий температуры воздуха для 8 событий Ла-Нинья ВТ типа в период 1950–2019 гг. в сентябре, октябре, феврале и марте по данным E-OBS (слева) и среднемесячные аномалии температуры воздуха в сентябре, октябре 2020 г. и феврале, марте 2021 г. по данным NCAP/NCAR (справа)

Примечательно, что если осенние отклонения температуры от средней нормы были положительными, то зимние и весенние — отрицательные (рис. 3.11).

Почти все статистически-значимые аномалии температуры воздуха, приведенные на композитных картах слева на рисунке 3.11, оправдались. Исключением стал только март. В первой половине марта 2021 г. во многих регионах обновились исторические минимумы температуры. Так 9.03.2021 г. новый температурный рекорд был зафиксирован в Петрозаводске, Россия [<https://kareliameteo.ru/>], 10.03.2021 – в Ювяскюля, Финляндия [<http://climexp.knmi.nl/>]. Однако на Севере Европы во второй половине марта метеоусловия резко изменились – на смену арктической холодной воздушной массе пришла теплая атлантическая.

Таким образом, становится понятным, что погодные условия в северной и восточной Европе, наблюдаемые с 2020 по 2021 гг., соответствуют установленным закономерностям проявлений Ла-Нинья ВТ типа и подтверждают полученный в работе результат.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование закономерностей формирования особенностей межгодовых аномалий в системе океан-атмосфера тропической зоны Тихого океана, соответствующие событиям Ла-Нинья и их проявлений в межгодовой изменчивости гидрометеорологических характеристик Атлантико-Европейского региона, выполненное в настоящей работе на основе анализа долговременных современных массивов данных, позволило сформулировать следующие выводы.

1. С использованием современных методов анализа по данным ТПО нескольких международных массивов продолжительностью более 100 лет на статистически значимом уровне впервые доказано существование двух типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, различающихся по месту возникновения, характеру эволюции, продолжительности и интенсивности событий.

2. Выявлены физические различия и особенности формирования Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья.

- События Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа обычно возникают в мае или июне в центре экваториальной

---

зоны Тихого океана. Важную роль при этом играет интенсификация пассатных ветров в этом регионе. Летом, в начальной стадии развития явления там же формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в 6-8 раз (с 0,1 мг/м<sup>3</sup> до 0,8 мг/м<sup>3</sup>), а термоклин в экваториальной зоне между 170°–100° з.д. поднимается до глубины 50 м. Максимальная фаза развития таких событий приходится на ноябрь-январь.

- Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа возникают в апреле и всегда на востоке. При этом центрально-экваториальный апвеллинг не образуется. Отрицательная аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией Пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана. Максимальная фаза таких событий обычно приходится на октябрь-декабрь.

- Впервые установлены закономерности последовательности возникновения выделенных Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». Показана асимметрия в продолжительности существования Эль-Ниньо и Ла-Нинья разных типов.

3. Изучены проявления разных типов Ла-Нинья в Атлантико-Европейском регионе:

- В годы Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа структура поля приземного давления в зимний период соответствует отрицательной фазе Североатлантического колеба-

---

ния (САК). При этом основное количество циклонов из Атлантики проходит по югу Европы, Средиземноморский и Черноморский регионы, что проявляется в существенных положительных аномалиях осадков в зимний период, достигающие 80 мм/мес. над Пиренейским и Апеннинским полуостровами. В то же время, отмечается усиление отрицательной фазы Восточно-Атлантического колебания (ВАК), что вызывает холодные зимы и позднюю весну в западной, северной и центральной частях Европы, со значениями аномалий до  $-4^{\circ}\text{C}$  в феврале и первой декаде марта.

- В годы Ла-Нинья Центрально-Тихоокеанского типа структура приземного давления над северной Атлантикой в зимний период соответствует положительной фазе САК, при которой траектории атлантических циклонов проходят по северу-западу Европы. Это проявляется в поле аномалий среднемесячных осадков в виде положительных аномалий  $\sim 100\dots 150$  мм/мес. над Скандинавией, особенно в ее юго-западной части. При этом в западной и северной Европе наблюдается теплая и мягкая погода. Для южной и юго-западной частей Европы характерны значимые отрицательные аномалии осадков.

Независимый анализ эволюции Ла-Нинья 2020–2021 гг., основанный на данных мониторинга этого события, показал, что оно относится к Восточно-Тихоокеанскому типу, а его европейские проявления полностью укладываются в схему характерных аномалий, соответствующих событиям данного типа, что подтверждает выявленную в настоящей работе закономерность.

---

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. An S.-I., Wang B. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency // *J. Climate*. 2000. V. 13. P. 2044–2055. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<2044:ICOTSO>2.0.CO;2
2. Arntz W.E., Gallardo V.W., Gutiérrez D., Isla E., Levin L.A., Mendo J., Neira C., Rowe G.T., Tarazona J., Wolff M. El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California, and Benguela Current upwelling ecosystems // *Adv. Geosci.* 2006. V. 6. P. 243–265. DOI: 10.5194/adgeo-6-243-2006
3. Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Niño Modoki and its possible teleconnection // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. C11007. DOI: 10.1029/2006JC003798
4. Australian rainfall during El Niño and La Niña events [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bom.gov.au/climate/history/enso/> – Дата обращения: 20.12.2022
5. Bai X., Wang J., Austin J., Schwab D.J., Assel R., Clites A., Bratton J.F., Colton M., Lenters J., Lofgren B., Wohlleben T., Helfrich S., Vanderploeg H., Luo L., Leshkevich G. A record-breaking low ice cover over the Great Lakes during winter 2011/2012: combined effects of a strong positive NAO and La Niña // *Clim. Dyn.* 2015. V. 44. P. 1187–1213. DOI: 10.1007/s00382-014-2225-2

- 
6. Bjerknes, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.* 97, 163172 (1969).
  7. Bronnimann S., Xoplaki E., Casty C., Pauling A., Luterbacher J. ENSO influence on Europe during the last centuries // *Clim. Dyn.* 2007. V. 28. P. 181–197. DOI: 10.1007/s00382-006-0175-z
  8. Cai W., Cowan T. La Nina Modoki impacts Australia autumn rainfall variability // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L12805. DOI: 10.1029/2009GL037885
  9. Cane M.A., Eshel G., Buckland R.W. Forecasting Zimbabwean maize yield using eastern equatorial Pacific sea surface temperature // *Nature.* 1994. V. 370. P. 204–205.
  10. Capotondi A., Wittenberg A.T., Newman M., Lorenzo E.D., 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. Understanding ENSO diversity // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 921–938. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00117.1
  11. Carlson R.E., Todey D.P., Taylor S.E. Midwestern corn yield and weather in relation to extremes of the southern oscillation // *J. Prod. Agric.* 1996. V. 9. P. 347–352. DOI: 10.2134/jpa1996.0347
  12. Catalogue of Indices and Definitions of El Niño and La Niña in Operational Use by WMO Members / WMO Commission for Climatology; CCI-XIII (2005) Expert Team on El Niño and La Niña Definitions // World Meteorological Organization. Geneva. 2006. 71 p.
  13. Chang C.P., Zhang Y.S., Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pa-



---

cific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon // *J. Climate*. 2000. V. 13. P. 4326–4340. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013%3C4326:IAIVOT%3E2.0.CO;2

14. Changnon S.A. Impacts of 1997–98 El Niño-generated weather in the United States // *Bulletin of the American Meteorology Society*. 1999. V. 80. № 9. P. 1819–1828. DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<1819:IOENOG>2.0.CO;2

15. Chen M, Li T, Shen X, Wu B (2016) Relative roles of dynamic and thermodynamic processes in causing evolution asymmetry between El Niño and La Niña. *J Clim* 29:2201–2220

16. Chen S.F., Chen W., Wei K. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO // *Adv. Atmos. Sci.* 2013. V. 30. P. 1712–1724. DOI: 10.1007/s00376-013-2296-8

17. Chen W.Y., van den Dool H.M. Asymmetric impact of tropical SST anomalies on atmospheric internal variability over the North Pacific // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 6. P. 725–740. DOI: 10.1175/1520-0469(1997)054<0725:AIOTSA>2.0.CO;2

18. Chen, M., Li, T. ENSO evolution asymmetry: EP versus CP El Niño. *Clim Dyn* 56, 3569–3579 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05654-7>

19. Choi J., An S.-I., Yeh S.-W., Yu J.-Y. ENSO-like and ENSO-induced tropical Pacific decadal variability in CGCMs // *J. Climate*. 2013. V. 26. P. 1485–1501. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00118.1

20. Chowdhury R.K., Beecham S. Influence of SOI, DMI and Niño3.4 on South Australian rainfall // *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2013. V. 27. P. 1909–1920. DOI: 10.1007/s00477-013-0726-

x

- 
21. Deser, C., Alexander, M. A., Xie, S. P. & Phillips, A. S. Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2, 115–143 (2010)
  22. Dewitte, B., Reverdin, G. & Maes, C. Vertical structure of an OGCM simulation of the equatorial Pacific Ocean in 1985–94. *J. Phys. Oceanogr.* 29, 1542–1570 (1999)
  23. Diamond M.S., Bennartz R. Occurrence and trends of eastern and central Pacific El Niño in different reconstructed SST data sets // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 375–381. DOI: 10.1002/2015GL066469
  24. Ding S., Chen W., Feng J., Graf H-F. Combined Impacts of PDO and Two Types of La Niña on Climate Anomalies in Europe // *Journal of Climate*. 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0376.1
  25. Dommenges D., Frauen C., Bayr T. Analysis of the non-linearity in the pattern and time evolution of El Niño Southern Oscillation // *Climate Dynamics*. 2013. V. 40. № 11-12. P. 2825–2847. DOI: 10.1007/s00382-012-1475-0
  26. Duan W., Tian B., Xu H. Simulations of two types of El Niño events by an optimal forcing vector approach // *Clim. Dyn.* 2014. V. 43. P. 1677–1692. DOI: 10.1007/s00382-013-1993-4
  27. Enfield D.B., Mayer D.A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 929–946
  28. Feng L.C., Zhang R.-H., Yu B., Han X. Roles of wind stress and subsurface cold water in the second-year cooling of the 2017/18 La Niña event // *Adv. Atmos. Sci.* 2020. V. 37. P. 847–860. DOI: 10.1007/s00376-020-0028-4
  29. Folland C.K., Parker E. Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data // *Quarterly Journal of the*

---

Royal Meteorological Society. 1995. V. 121. P. 319–367. DOI: 10.1002/qj.49712152206

30. Fraedrich K., Muller K., Kuglin R. Northern Hemisphere circulation regimes during the extremes of the El Nino/ Southern Oscillation // *Tellus*. 1992. V. 44a. № 1. P. 33–40.

31. Fu C.B., Diaz H., Fletcher J. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation // *Mon. Weather Rev.* 1986. №114. P. 1716–1738.

32. Giese B.S., Slowey N.C., Ray S., Compo G.P., Sardeshmukh P.D., Carton J.A., Whitaker J.S. The 1918/19 El Niño // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2010. V. 91. P. 177–183. DOI: 10.1175/2009BAMS2903.1

33. Gill, A. E. Elements of coupled ocean-atmosphere models for the tropics, in *Coupled Ocean-Atmosphere Models*, Elsevier Oceanogr. Ser., vol. 40, pp. 303–328, Elsevier, New York (1985).

34. Glantz M.H. A La Nina Summit: A Review of the Causes and Consequences of Cold Events // *Environmental and Societal Impacts Group, NCAR. Boulder.* 1998. 43 p.

35. Glantz M.H. La Nina and its impacts: facts and speculations. New York: The United Nations University. 2002-a. 313 p.

36. Glantz M.H. La Nina: An overview of the process // *La Nina and its impacts: facts and speculation / edited by Michael H. Glantz.* New York: The United Nations University. 2002. P. 3–24.

37. Glantz M.H. Shades of Chaos: Lessons Learned About Lessons Learned About Forecasting El Nino and Its Impacts // *Int. J. Disaster Risk Sci.* 2015. V. 6. P. 94–103. DOI: 10.1007/s13753–015–0045–6

- 
38. Goddard L., Dilley M. El Niño: Catastrophe or opportunity // *Journal of Climate*. 2005. V. 18. P. 651–665. DOI: 10.1175/JCLI-3277.1
39. Halpert M.S., Ropelewski C.F. Surface temperature patterns associated with the Southern oscillation // *J. Clim.* 1992. V. 5. P. 577–593. DOI: 10.1175/1520-0442(1992)005<0577:STPAWT>2.0.CO;2
40. Handler P. USA corn yields, the El Niño and agricultural drought: 1867–1988 // *Int. J. Climatol.* 1990. V. 10. P. 819–828. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<0404:EIOAIT>2.0.CO;2
41. Hansen J.W., Hodges A.W., Jones J.W. ENSO influences on agriculture in the Southeastern United States // *J Climate*. 1998 V. 11. P. 404–411
42. Hirahara S., Ishii M., Fukuda Y. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty // *Journal of Climate*. 2014. V. 27. P. 57–75. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00837.1
43. Hoerling M., Kumar A. The perfect ocean for drought // *Science*. 2003. V. 299. P. 691–694. DOI: 10.1126/science.1079053
44. Hoerling M.P., Kumar A., Zhong M. El Niño, La Niña, and nonlinearity of their teleconnections // *J. Climate*. 1997. V. 10. № 8. P. 1769–1786. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2
45. Hovmöller E. The Trough-andRidge Diagram // *Tellus*. 1949. V. 1. № 2. P. 62–66
46. Hu Z.Z., Kumar A., Xue Y., Jha B. Why were some La Niñas followed by another La Niña? // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 1029–1042. DOI: 10.1007/s00382-013-1917-3

- 
47. Hu, S. & Fedorov, A. V. The extreme El Niño of 2015–2016: The role of westerly and easterly wind bursts, and preconditioning by the failed 2014 event. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3531-2> (2017)
48. 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. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons // *Journal of Climate*. 2017. V. 30. P. 8179–8205. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
49. Ineson S., Scaife A.A. The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño // *Nat. Geosci.* 2009. V. 2. P. 32–36. DOI: 10.1038/ngeo381
50. Ishii M., Shouji A., Sugimoto S., Matsumoto T. Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection // *Int. J. Climatol.* 2005. V. 25. P. 865–879. DOI: 10.1002/joc.1169
51. Jin, F.-F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J. Atmos. Sci.* 54, 811829 (1997)
52. Kämpf J., Chapman P. The Peruvian–Chilean Coastal Upwelling System. In: *Upwelling Systems of the World*. Springer, Cham. 2016. 433 p. DOI: 10.1007/978-3-319-42524-5\_5
53. Kao H.Y., Yu J.Y. Contrasting eastern Pacific and central Pacific types of ENSO // *Journal of Climate*. 2009. V. 22. P. 615–632. DOI: 10.1175/2008JCLI2309.1
54. Kessler, W. S. & McPhaden, M. J. Oceanic Equatorial Waves and the 1991–93 El Niño. *J. Clim.* 8, 1757–1776 (1995)

- 
55. Kiladis G.N., Diaz H.Z. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation // *J. Climate*. 1989. V. 2. № 9. P. 1069–1090
56. Kug J.S., Ham Y.G. Are there two types of La Niña? // *Geophys. Res. Lett.* 2011 V. 38. L16704. DOI: 10.1029/2011GL048237
57. Kug J.S., Jin F.F., An S.I. Two types of El Nino events: Cold tongue El Nino and warm pool El Nino // *Journal of Climate*. 2009. V. 22. P. 1499–1515. DOI: 10.1175/2008JCLI2624.1
58. Kumar P.S., Pillai G.N. Manjusha U. El Nino Southern Oscillation (ENSO) impact on tuna fisheries in Indian Ocean // *SpringerPlus*. 2014. V. 3. DOI: 10.1186/2193-1801-3-591
59. Laken B., Calogovic J. Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2013. V. 3. A29. DOI: 10.1051/swsc/2013051
60. Larkin N.K., Harrison D.E. ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 1118–1140. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1118:EWENOA>2.0.CO;2
61. Lau, K. M. Elements of a stochastic-dynamical theory of long-term variability of the El Niño-Southern Oscillation. *J. Atmos. Sci.* 42, 1552–1558 (1985)
62. Lengaigne, M., J.-P. Boulanger, C. Menkes, P. Delecluse, and J. Slingo: Westerly wind events in the tropical Pacific and their influence on the coupled ocean-atmosphere system. *Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, *Geophys. Monogr.*, Vol. 147, Amer. Geophys. Union, 49–69 (2004)

- 
63. Li J., Mu L., Zhong L. Frequent central Pacific La Niña events may accelerate Arctic warming since the 1980s // *Acta Oceanol. Sin.* 2021. V. 40. P. 62–69. DOI: 10.1007/s13131-021-1843-x
64. Li Y., Lau N.C. Impact of ENSO in the atmospheric variability over the North Atlantic in late winter—role of transient eddies // *J. Clim.* 2012 V. 25. P. 320–342. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00037.1
65. Lin, J. L. Ocean-atmosphere interaction in the lifecycle of ENSO: the coupled wave oscillator. *Chin Ann Math Ser B* 2009 30(6), 715–28 (2009).
66. Lin, J., Qian, T. Switch Between El Nino and La Nina is Caused by Subsurface Ocean Waves Likely Driven by Lunar Tidal Forcing. *Sci Rep* 9, 13106 (2019)
67. Liu Y., Yang X., Wang E., Xue C. Climate and crop yields impacted by ENSO episodes on the North China Plain: 1956–2006 // *Regional Environmental Change*. 2014. V. 14. Issue 1. P. 49–59. DOI: 10.1007/s10113-013-0455-1
68. Liu Z., Alexander M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections // *Rev. Geophys.* 2007 V. 45. RG2005. DOI: 10.1029/2005RG000172
69. Livezey R.E., Masutani M., Leetmaa A., Rui H., Ji M., Kumar A. Teleconnective response of the Pacific-North American region atmosphere to large central equatorial Pacific SST anomalies // *J. Climate*. 1997. V. 10. № 2. P. 1787–1820. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010<1787:TROTPN>2.0.CO;2v
70. Lyon B., Camargo S.J. The seasonally-varying influence of ENSO on rainfall and tropical cyclone activity in the Philippines // *Clim. Dyn.* 2009. V. 32. P. 125–141 (2009). DOI: 10.1007/s00382-008-0380-z

- 
71. Manuel J. Drought in the Southeast: Lessons for water management // *Environ Health Perspect.* 2008. V. 116. A168-A171. DOI: 10.1289/ehp.116-a168
72. Marchukova O.V., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. Diagnostics of the La Niña events in 1900–2018 // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606 P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012036
73. McPhaden M.J. The Tropical Atmosphere Ocean (TAO) Array is Completed // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1995. V. 76(5). P. 739–741. DOI: 10.1175/1520-0477-76.5.739
74. 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. The Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA) observing system: A decade of progress // *Journal of Geophysical Research.* 1998. V. 103. P. 169–240. DOI: 10.1029/97jc02906
75. McWilliams, J. & Gent, P. A coupled air-sea model for the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* 35, 962–989 (1978)
76. Meinke H., Hammer G.L. Climatic risk to peanut production: a simulation study for northern Australia // *Aust. J. Exp. Agric.* 1995. V. 35. P. 777–780. DOI: 10.1071/EA9950777
77. Meinke H., Stoner C., Hammer G.L. SOI phases and climatic risk to peanut production: a case study for northern Australia // *Int. J. Climatol.* 1998. V. 16. P. 783–789 DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199607)16:7<783::AID-JOC58>3.0.CO;2-D
78. Messie, M. & Chavez, F. Global modes of sea surface temperature variability in relation to regional climate indices. *J Climate* 24, 4314–4331 (2011).



- 
79. Messina C.D., Hansen J.W., Halla A.J. Land allocation conditioned on El Niño-Southern Oscillation phases in the Pampas of Argentina // *Agricultural Systems*. 1999. V. 60. P. 197–212. DOI: 10.1016/S0308-521X(99)00032-3
80. Miller J. *La Niña and the Making of Climate Optimism*. Palgrave Macmillan, Cham. 2019. 288 p. DOI: 10.1007/978-3-319-76141-1\_9
81. Mokhov I.I., Khvorostyanov D.V., Eliseev A.V. Decadal and longer term changes in El Niño-Southern Oscillation characteristics // *International Journal of Climatology*. 2004. V. 24. № 4. P. 401–414. DOI: 10.1002/joc.1013
82. Mosquera, K., Dewitte, B., Illig, S., Takahashi, K. & Garrić, G. The 2002/03 El Niño: equatorial wave sequence and their impact on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 1–12 (2013).
83. Münnich, Matthias; Cane, Mark A.; Zebiak, Stephen E. (1991). "A Study of Self-excited Oscillations of the Tropical Ocean–Atmosphere System. Part II: Nonlinear Cases". *Journal of the Atmospheric Sciences*. 48 (10): 1238–1248. doi:10.1175/1520-0469(1991)048<1238:ASOSEO>2.0.CO;2
84. National weather service – Monthly atmospheric and SST Indices. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> – Дата обращения: 21.06.2023
85. Neelin J.D., Battisti D.S., Hirst A.C., Fei-Fei J., Wakata Y., Yamagata T., Zebiak S.E. ENSO theory. *J. Geophys. Res.* 103(14), 26214,290 (1998)
86. Ogata T., Xie S.-P., Wittenberg A., Sun D.-Z. Interdecadal amplitude modulation of El Niño–Southern Oscillation and its

---

impact on tropical Pacific decadal variability // *J.Climate*. 2013. V. 26. P. 7280–7297. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00415.1

87. Okumura Y.M., Deser C. Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 5826–5843. DOI: 10.1175/2010JCLI3592.1

88. Okumura Y.M., Ohba M., Deser C., Ueda H. A Proposed Mechanism for the Asymmetric Duration of El Nino and La Nina // *J. Climate*. 2010. V. 24. P. 3822–3829. DOI: 10.1175/2011JCLI3999.1

89. Okumura Y.M., Sun T.Y., Wu X. Asymmetric modulation of El Nino and La Nina and the linkage to tropical Pacific decadal variability // *J. Climate*. 2017. V. 30. P. 4705–4733. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0680.1

90. Pan X., Li T., Chen M. Change of El Niño and La Niña amplitude asymmetry around 1980 // *Clim. Dyn*. 2020. V. 54. P. 1351–1366. DOI: 10.1007/s00382–019–05062–y

91. Pascolini-Campbell M., Zanchettin D., Bothe O., Timmreck C., Matei D., Jungclaus J.H., Graf H.-E. Toward a record of central Pacific El Niño events since 1880 // *Theoretical and Applied Climatology*. 2015. V. 119. P. 379–389. DOI: 10.1007/s00704-014-1114-2

92. Philander, S. G., 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA.

93. Phillips J.G., Cane M.A., Rosenzweig C. ENSO, seasonal rainfall patterns and simulated maize yield variability in Zimbabwe // *Agr. Forest Meteorol*. 1998. V. 90. P. 39–50. DOI: 10.1016/S0168-1923(97)00095-6

94. Picaut J., Hackert E., Busalacchi A.J., Murtugudde R., Lagerloef G. Mechanisms of the 1997-1998 El Niño–La Niña, as

---

inferred from space-based observations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. 3037. DOI: 10.1029/2001JC000850

95. Picaut, J., Masia, F. & du Penhoat, Y. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO. *Science* 277, 663–666 (1997).

96. Polonskii A.B., Kibal'chich I.A. Circulation indices and thermal regime of Eastern Europe in winter // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. V. 40. № 1. P. 1–9. DOI: 10.3103/S106837391501001X

97. Prasanna K., Singh P., Chowdary J.S., Naidu C.V., Parekh A., Gnanaseelan C., Dandi R. Northeast monsoon rainfall variability over the southern Peninsular India associated with multiyear La Niña events // *Clim. Dyn.* 2019. V. 53. P. 6265–6291. DOI: 10.1007/s00382-019-04927-6

98. Puy, M. & Coauthors, 2017: Influence of westerly wind events stochasticity on El Niño amplitude: The case of 2014 vs. 2015. *Climate Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3938-9> (2017).

99. Rasmusson E.M., Carpenter T.H. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño // *Mon. Wea. Rev.* 1982. V. 110. P. 354–384. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2

100. Rasmusson E.M., Wallace J.M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation // *Science*. 1983. № 222. P. 1195–1202

101. Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature

---

since the late nineteenth century // *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108(D14). 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670

102. Ren H.L., Jin F.F. Niño indices for two types of ENSO // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L04704. DOI: 10.1029/2010GL046031

103. Ren R.C., Rao J., Wu G.X., Cai M. Tracking the delayed response of the northern winter stratosphere to ENSO using multi reanalyses and model simulations // *Climate Dynamics*. 2017. V. 48. P. 2859–2879. DOI: 10.1007/s00382-016-3238-9

104. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. P. 1609–1625. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015,1609:AIISAS.2.0.CO;2

105. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlat M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*. 2007. V. 20. P. 5473–5496. DOI: 10.1175/2007JCLI1824.1

106. Riascos J.M., Heilmayer O., Laudien J. Population dynamics of the tropical bivalve *Cardita affinis* from Malaga Bay, Colombian Pacific related to La Nina 1999–2000 // *Helgoland Marine Research*. 2008. V. 62. P. 63–71. DOI: 10.1007/s10152-007-0083-6

107. Ropelewski C.F., Halpert M.S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation // *J. Climate*. 1989. V. 2. № 3. P. 268–284. DOI: 10.1175/1520-0442(1989)002<0268:PPAWTH>2.0.CO;2

108. Ropelewski. C.F., Halpert M.S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern Oscillation // *Monthly Weather Review*. 1987. V. 115. P. 1606–1626. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2

- 
109. Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the Main Mode of Interannual Climate Variability // *Atmosphere*. 2021. V. 12. 1443. DOI: 10.3390/atmos12111443
110. Shabbar A., Khandekar M. The impact of El Niño–Southern Oscillation on the temperature field over Canada // *Atmosphere–Ocean*. 1996. V. 34. № 2. P. 401–416. DOI: 10.1080/07055900.1996.9649570
111. Shinoda T., Hurlburt H.E., Metzger E.J. Anomalous tropical ocean circulation associated with La Niña Modoki // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 116. C12001. DOI: 10.1029/2011JC007304
112. Singh A., Delcroix T., Cravatte S. Contrasting the flavors of El–Niño–Southern Oscillation using sea surface salinity observations // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C06016. DOI: 10.1029/2010JC006862
113. Singh A., Delcroix T., Cravatte S. Contrasting the flavors of El–Niño–Southern Oscillation using sea surface salinity observations // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C06016. DOI: 10.1029/2010JC006862
114. Smith T.M., Reynolds R.W. Extended reconstruction of global sea surface temperature based on COADS data (1854–1997) // *Journal of Climate*. 2003. V. 16. P. 1495–1510 DOI:10.1175/1520-0442-16.10.1495
115. Smith T.M., Reynolds R.W., Livezey R.E., Stokes D.C. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions // *Journal of Climate*. 1996. V. 9. P. 1403–1420. DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<1403:ROHSST>2.0.CO;2
116. Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J. Improvements to NOAA’s historical merged land–ocean surface

---

temperature analysis (1880–2006) // *Journal of Climate*. 2008. V. 21. P. 2283–2296. DOI: 10.1175/2007jcli2100.1

117. Song L., Wu R. Different processes of occurrence of cold events over East Asia in El Niño and La Niña winters // *Clim. Dyn.* 2022 V. 30(22). DOI: 10.1007/s00382–021–06082–3

118. Suarez, M. J. & Schopf, P. S. A delayed action oscillator for ENSO. *J. Atmos. Sci.* 45, 32833287 (1988)

119. Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki El Niño // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L10704. DOI: 10.1029/2011GL047364

120. Tao L., Duan W., Vannitsem S. Improving forecasts of El Niño diversity: a nonlinear forcing singular vector approach // *Clim. Dyn.* 2020. V. 55. P. 739–754. DOI: 10.1007/s00382-020-05292-5

121. The KNMI Climate Explorer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://climeхр.knmi.nl/>. – Дата обращения: 1.06.2021

122. Timmermann A. Decadal ENSO amplitude modulations: A nonlinear paradigm // *Global and Planetary Change*. 2003. V. 37. P. 135–156

123. Trenberth K. Quoted in article written by Eugene Linden. Big chill for the greenhouse: Remember El Nino? Now comes its cool sibling. *La Nina* // *Time Magazine*. 1988. 90 p.

124. Trenberth K., Caron J.M. The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. P. 4358–4365.

125. Trenberth K., Shea D.J. On the evolution of the Southern Oscillation // *Monthly Weather Review*. 1987. V. 115. P. 3078–3096.

- 
126. van den Dool H.M., Saha S., Johansson A. Empirical orthogonal teleconnections // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. P. 1421–1435. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1421:EOT>2.0.CO;2
127. Vialard, J. et al. Oceanic mechanisms driving the SST during the 1997–1998 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.* 31, 1649–1675 (2001)
128. Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Spatial classification of La Nina events // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017. V. 53. Issue 1. P. 111–119 DOI: 10.1134/S0001433817010133
129. Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V., Maslova V.N., Lubkov A.S. Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 107. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012043
130. Voskresenskaya E.N., Polonsky A.B. Trends and interannual variability of parameters of large-scale air-sea interaction in the North Atlantic // *Oceanographic Literature Review*. 1995. V.12 (42). P. 1057.
131. Wallace, J. M. et al. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J. Geophys. Res.* 103, 14241–14259 (1998)
132. Wang X., Li T., Chen M. Mechanism for asymmetric atmospheric responses in the western North Pacific to El Niño and La Niña // *Clim. Dyn.* 2019. V. 53. P. 3957–3969 DOI: 10.1007/s00382-019-04767-4
133. Webb E.J., Magi B.I. The Ensemble Oceanic Niño Index // *International Journal of Climatology*. 2022. P. 1–21 DOI: 10.1002/joc.7535

- 
134. Webster P.J., Magaña V.O., Palmer T.N., Shukla J., Tomas R.A., Yanai M., Yasunari T. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1998. V. 103. P. 14451–14510. DOI: 10.1029/97JC02719
135. Weisberg, R. H. & Wang, C. A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 24, 779782 (1997)
136. Wittenberg A.T., Rosati A., Delworth T.L., Vecchi G.A., Zeng F.R. ENSO modulation: Is it decadal predictability? // *J. Climate*. 2014. V. 27. P. 2667–2681. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00577.1
137. 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. ICOADS release 2.5: Extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive // *The International Journal of Climatology*. 2011. V. 31. P. 951–967. DOI: 10.1002/joc.2103
138. Wu R., Lin M., Sun H. Impacts of different types of El Niño and La Niña on northern tropical Atlantic sea surface temperature // *Clim. Dyn.* 2020. V. 54. P. 4147–4167 DOI: 10.1007/s00382-020-05220-7
139. Yang S., Jiang X.W. Prediction of Eastern and Central Pacific ENSO events and their impacts on East Asian climate by the NCEP climate forecast system // *J. Clim.* 2014. V. 27. P. 4451–4472. DOI: 10.1175/Jcli-D-13-00471.1
140. Yeh S.-W., Jhun J.-G., Kang I.-S., Kirtman B.P. The decadal ENSO variability in a hybrid coupled model // *J. Climate*. 2004. V. 17. P. 1225–1238. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017(1225:TDEVIA)2.0.CO;2



- 
141. 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*. V. 461. P. 511–514. DOI: 10.1038/nature08316
142. Yu J.-Y., Kim S.T. Identifying the Types of Major El Niño Events since 1870 // *International Journal of Climatology*. 2013. V. 33. P. 2105–2112. DOI: 10.1002/joc.3575
143. Yuan, Y., Yan, H. M. (2013). Different types of La Nina events and different responses of the tropical atmosphere. *Chinese Science Bulletin* 58, 406–415. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>
144. Zhang W., Wang L., Xiang B., Qi L., He J. Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter // *Climate Dynamics*. 2014. V. 44. P. 1351–1366. DOI: 10.1007/s00382-014-2155-z
145. Zhang, C. Madden-Julian oscillation. *Rev. Geophys.* 43, 2003RG, <https://doi.org/10.1029/2004RG000158> (2005)
146. Zhang, Z., Ren, B. & Zheng, J. Leading modes of tropical Pacific subsurface ocean temperature and associations with two types of El Niño. *Sci Rep* 7, 42371, <https://doi.org/10.1038/srep42371> (2017)
147. Zheleznova I.V., Gushchina D.Yu. Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. V. 41. P. 760–769. DOI: 10.3103/S1068373916110030
148. Артамонов Ю.В., Воскресенская Е.Н., Джиганшин Г.Ф. и др. Низкочастотная изменчивость гидрометеорологических и гидрофизических характеристик Тропической и Субтропической Атлантики в связи с глобальными вариациями типа Эль-Ниньо-Южные Осцилляции. / Под ред. Полонского

---

А.Б. Сизова // Деп. рук. № 4560 В-91.– М: ВИНТИ, 1991.– 247 с.

149. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 2. С. 3–13.

150. Бурева Н. Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП “STATISTICA”. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики». Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т. 2007. 112 с.

151. Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. М.: Наука. 2003. 343 с.

152. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О влиянии событий Эль-Ниньо на климатические характеристики Индоокеанского региона // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 165–175

153. Воскресенская Е.Н., Зеленко А.А., Полонский А.Б. Эль-Ниньо 1991–1992 годов и его проявление в Тропической Атлантике // Морской гидрофизический журнал. 1992. № 6. С. 62–70

154. Воскресенская Е.Н., Полонский А.Б. Североатлантические колебания и их связь с Эль-Ниньо - южными осцилляциями // Морской гидрофизический журнал.– 1992.– №4.– С. 23– 30.

155. Воскресенская Е.Н. Разные типы Эль-Ниньо и их проявления в изменчивости гидрометеорологических условий

---

Черноморского региона // Системы контроля окружающей среды. – 2008. – С. 325 – 328.

156. Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В. Классификация событий Эль-Ниньо и погодно-климатические аномалии в Черноморском регионе // Доповіді НАН України. – 2010. – №3. – С. 120 – 124.

157. Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В., Маслова В.Н. Особенности гидрометеорологических полей Тихоокеанского региона в связи с событиями Эль-Ниньо // Український гідрометеорологічний журнал. – 2010. – №6. – С. 234 – 241.

158. Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В. Особенности изменчивости гидрометеохарактеристик Черноморского региона под влиянием разных типов Эль-Ниньо // Системы контроля окружающей среды. – 2005. – С. 262 – 267.

159. Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В. Эль-Ниньо разных типов и особенности их проявления в Атлантико-Европейском регионе // Системы контроля окружающей среды.–2006.– С.307–310.

160. Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Пространственная классификация Ла-Нинья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. №1. С. 125–134. DOI: 10.7868/S0002351517010138

- 
161. Гордеева С.М. Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. Практикум по дисциплине // СПб.: РГГМУ. 2010. 74 с.
162. Гущина Д.Ю., Петросянц М.А. О связи температуры поверхности экваториальной части Тихого океана с циркуляцией скорости ветра в центрах действия атмосферы // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 5–22.
163. Доклад по феномену Ла-Нинья 2021 Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fao.org/3/cb2954en/cb2954en.pdf>. – Дата обращения: 20.03.2022.
164. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 36–50.
165. Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kareliameteo.ru/>. – Дата обращения: 1.06.2021
166. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Температурные аномалии в Европе в холодный период года в связи с ЭНЮК // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 2 (36). С. 73–80 DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-73-80

---

167. Лубков, А.С., Воскресенская, Е. Н., Марчукова, О. В., 2017. Современная классификация Эль-Ниньо и сопоставление соответствующих климатических откликов. Системы контроля окружающей среды, 7(27), 94–100.

168. Лубков А.С. Воскресенская Е.Н. Марчукова О.В. Прогнозирование индекса южного колебания // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2017. – №4(62). – С. 370–388.

169. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Прогнозирование наступления событий Эль-Ниньо // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018. – С. 265– 267.

170. Марчукова О.В. Воскресенская Е.Н. Гидрометеорологические аномалии в Азово-Черноморском регионе в годы явления Ла-Нинья // Труды Государственного океанографического института. 2017. №218. С. 255–264.

171. Марчукова О.В. Воскресенская Е.Н. События Ла-Нинья 2016 и 2017 годов и их дальноедействие в Атлантико-Европейском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 12(32). С. 80– 85.

172. Марчукова О.В., Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 97–120. DOI: 10.21638/spbu07.2020.106

- 
173. Марчукова О.В., Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 97–120. DOI: 10.21638/spbu07.2020.106
174. Марчукова О.В., Воскресенская Е.Н., Лубков А.С. К вопросу о физическом механизме формирования двух типов Ла-Нинья // Процессы в геосредах. 2018. № 3(17). С. 267–268.
175. Михайлова Н.В., Е.Н. Воскресенская Эволюция событий Эль-Ниньо разных типов в тропической зоне Тихого океана / Системы контроля окружающей среды. – 2010. – Вып. 14. – С. 158 – 163.
176. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Взаимосвязь вариаций глобальной приповерхностной температуры с процессами Эль-Ниньо/Ла-Нинья и Атлантическим долгопериодным колебанием // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 5. С. 580–584. DOI: 10.7868/S0869565216110190
177. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.
178. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-

---

Атлантического и Арктического колебаний // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667

179. Нестеров Е.С. Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 74–83.

180. Нестеров Е.С. Изменчивость характеристик атмосферы и океана в атлантико-европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 74–83

181. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.:Триада, лтд. 2013. 144 с.

182. Петросянц М.А., Гущина Д.Ю. Крупномасштабное взаимодействие глобальной циркуляции атмосферы с температурой поверхности экваториальной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 5–24

183. Петросянц М.А., Гущина Д.Ю. Об определении явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 24–35.

184. А.Б. Полонский, Е.Н. Воскресенская, Д.В. Башарин, Н.В. Влияние Южного колебания на изменчивость приземной температуры и давления в Атлантико-Европейском регионе в

---

весенний период // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – №3. – С. 50 – 62.

185. Семенов Е.К., Соколихина Е.В., Соколихина Н.Н. Атмосферная циркуляция в низких широтах в периоды теплых и холодных фаз явления Эль-Ниньо – Южное Колебание // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 5–18.



---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. Холодная фаза процесса Эль-Ниньо – Южное Колебание и ее атмосферные отклики.....	11
ГЛАВА 2. Типизация Ла-Нинья и особенности их формирования .....	32
2.1. Реконструированные данные температуры поверхности океана и их верификация .....	34
2.2. Выделение событий Ла-Нинья и их статистические характеристики .....	47
2.3. Первичная классификация Ла-Нинья.....	62
2.4. Типизация методом кластерного анализа.....	70
2.5. Физические особенности формирования двух пространственных типов Ла-Нинья .....	84
2.6. Закономерность повторяемости полученных типов Ла–Нинья относительно событий Эль-Ниньо .....	92
ГЛАВА 3. Проявления Ла-Нинья в климатических аномалиях Атлантико-Европейского региона .....	101
3.1.    Пространственные аномалии приземного давления	

---

и осадков.....	103
3.2. Аномалии в поле температуры .....	112
3.3. Явление Ла-Нинья 2020-2021 гг. и его проявления.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	128

Подписано в печать 21.12.2023

Заказ № 077. Тираж 500 экз.

---

Редакционно-издательский отдел ИПТС  
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28  
Тел.: +7 (8692) 54-44-10  
e-mail: [ph@instpts.ru](mailto:ph@instpts.ru)