ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

На правах рукописи

МАРЧУКОВА ОЛЕСЯ ВЛАДИМИРОВНА

СОБЫТИЯ ЛА-НИНЬЯ: ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
Воскресенская Елена Николаевна
доктор географических наук, профессор

Севастополь – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. СОБЫТИЯ ЛА-НИНЬЯ И ИХ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ 16

1.1. Эль-Ниньо – Южное Колебание 18

1.2. Определение события Ла-Нинья 20

1.3. Особенности формирования Ла-Нинья в атмосфере и океане 22

1.4. Вопрос о необходимости классификации Ла-Нинья 26

1.5. Воздействие событий Ла-Нинья на окружающую среду и климат 33

Выводы к Главе 1 37

ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 39

2.1. Используемы данные и их верификация 39

2.1.1. Реконструированные данные температуры поверхности океана и их верификация для Тихоокеанского региона 40

2.1.2. Данные разных типов реанализа и спутниковых наблюдений 49

2.1.3. Индексы взаимодействия атмосферы и океана 53

2.2. Методы исследования событий Ла-Нинья 57

2.2.1. Статистическая обработка данных 57

2.2.2. Метод выделения событий Ла-Нинья и их первичная классификация 63

2.2.3. Иерархический кластерный анализ 65

2.2.4. Разложение на эмпирические ортогональные функции 66

Выводы к Главе 2 68

ГЛАВА 3. КЛАССИФИКАЦИЯ СОБЫТИЙ ЛА-НИНЬЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ 70

3.1. Выделение событий Ла-Нинья и их статистические характеристики 70

3.2. Первичная классификация Ла-Нинья 81

3.3. Типизация методом кластерного анализа 88

3.4. Физические особенности формирования двух пространственных типов Ла-Нинья 97

3.5. Закономерность повторяемости полученных типов Ла–Нинья относительно событий Эль–Ниньо 103

Выводы к Главе 3 109

ГЛАВА 4. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ В ГОДЫ ЛА-НИНЬЯ 112

4.1. Аномалии в полях приземного давления и осадков 113

4.2. Температурные аномалии 119

4.3. Ла-Нинья 2020–2021 и его проявления 124

Выводы к Главе 4 129

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 130

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 133

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 136

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Основные характеристики событий Ла-Нинья по трём реконструированным массивам данных ТПО: HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 159

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Композитные поля аномалий температуры воздуха в Европе по данным E-OBS в годы разных типов Ла-Нинья 166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Явление Ла-Нинья – холодный эпизод феномена Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК). 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].

Социально-экономические последствия событий Ла-Нинья беспрецедентны. Засуха в США привела к ущербу в 40 млрд. $ [Glantz, 2002] во время событий 1988 г. 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 событий в отличие от его теплой фазы, Эль-Ниньо. В результате меньшего навыка прогнозирования местоположения и интенсивности аномалий Ла-Нинья затруднено определение масштабов социально-экологических последствий во всём мире.

В последнее десятилетие вырос интерес к классификации Ла-Нинья [Cai, Cowan, 2009; Shinoda et. al., 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 описаны, в том числе, для Европейского региона. Таким образом, изучение условий и особенностей формирования Ла-Нинья до сих пор 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.

Объект исследования – события Ла-Нинья.

Предмет исследования – крупномасштабные межгодовые аномалии в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана и соответствующие им климатические аномалии в Атлантико-Европейском регионе в годы разных типов Ла-Нинья.

Цель и задачи исследования

Основная цель работы – комплексное исследование событий Ла-Нинья разных типов и их проявлений в Атлантико-Европейском регионе.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие научные задачи:

1. Провести типизацию событий Ла-Нинья на основе метода математической классификации с учетом их пространственно-временной изменчивости.

2. Изучить особенности формирования и эволюции полученных типов Ла-Нинья.

3. Исследовать климатические аномалии в Атлантико-Европейском регионе, соответствующие полученным типам Ла-Нинья.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология» согласно пункту 2 «Взаимодействие между атмосферными процессами в полярных и умеренных широтах и между процессами в умеренных широтах и тропиках».

Научная новизна

По данным продолжительностью более 100 лет из нескольких реконструированных массивов о температуре поверхности океана (ТПО), с использованием современных методов анализа, впервые на статистически значимом уровне доказано существование двух типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, различающихся по месту возникновения, характеру эволюции, продолжительности и интенсивности событий.

Впервые выявлены физические различия и особенности формирования полученных двух типов Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана на основе расчета и анализа композитных полей ТПО, приземного давления и ветра, изменения вертикального профиля температуры воды, концентрации хлорофилла, поверхностных течений и других гидрометеорологических характеристик.

Впервые установлены закономерности последовательности возникновения выделенных Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». На основе разложения пространственно-временных полей аномалий ТПО на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) в экваториальной полосе Тихого океана показана асимметрия в продолжительности существования Эль-Ниньо и Ла-Нинья разных типов.

Выявлены характерные особенности проявлений выделенных типов Ла-Нинья в межгодовых аномалиях гидрометеополей Атлантико-Европейского региона в холодное полугодие. Статистически доказано, что аномалии в гидрометеополях Европы в годы разных типов Ла-Нинья сопровождаются усилением или ослаблением Восточно-Атлантического или Североатлантического колебаний.

Данные и методы исследования

В работе привлекалось многочисленное количество разных видов данных. Из них можно выделить следующие группы.

Реконструированные массивы среднемесячных данных температуры поверхности океана (ТПО):

– HadISST Метеорологического офиса Гадлея (Великобритания), с разрешением сетки 1°×1° с 1870 по 2019 гг.;

– COBE SST2 Японского метеорологического агентства в узлах пространственной сетки 1°×1° с 1850 по 2019 гг.;

– ERSSTv5 Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) с разрешением 2°×2° с 1854 по 2019 гг.

Данные разных типов реанализа:

– среднемесячные поля скорости, направления течений и температуры воды по глубине от 5 м до 4000 м из реанализа NCEP GODAS с 1981 по 2019 гг (40 слоев по глубине, шаг по пространству – 1°);

– среднемесячные поля температуры воздуха и приземного давления из реанализа 20 столетия (20th Century Reanalysis V2c) с шагом сетки в 2° с 1900 по 2014 гг.;

– среднемесячные поля атмосферных осадков из массива GPCC для периода 1901–2013 гг.

Данные наблюдений:

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

– ежедневные данные приземных наблюдений за температурой воздуха, привязанные к сетке с разрешением 0,1°×0,1°, из базы E-OBS 19.0e с 1950 по 2019 гг.

Спутниковые данные:

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

– спутниковые данные о хлорофилле с 2001 по 2019 гг. проекта GlobColour (обедненые данные с датчиков SeaWiFS (NASA), MODIS (NASA), MERIS (ESA), OLCI-A (ESA), VIIRS (NOAA/NASA);

Дополнительно в работе привлекались индексы взаимодействия атмосферы и океана: Nino1+2, Nino3, Nino4, Nino3.4, SOI, NAO, EA, EP TWI, CP TWI, WP TWI.

Научная и практическая значимость результатов

Полученные в работе результаты 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 бассейна отрицательных аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана до их завершения. полученных результатов позволяет составить долгосрочный

статистический прогноз погодно-климатических условий Европы в холодное полугодие от момента возникновения. 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. В будущем результаты можно применить для усовершенствования образовательных курсов географического и климатического профилей ВУЗов Российской Федерации. Полученные результаты включены в отчеты по государственным научным темам, а также грантов РФФИ, что подтверждает их практическую значимость.

Теоретическая и практическая значимость работы подтверждается и тем, что диссертационные результаты были получены в рамках выполнения государственных научных программ и тем НАН Украины, РАН, в частности, темы госзадания Института природно-технических систем № 0012-2021-0007 (121122300072-3) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия». Частично полученные результаты были представлены в ряде грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 16-05-00231 "События Эль-Ниньо и Ла-Нинья: классификация, особенности и проявления в погодно-климатических аномалиях в Черноморском регионе"; № 16-35-00186 "Исследование климатических условий Черноморского побережья России в связи с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья"; № 18-45-920063 "Медико-климатическая характеристика туристско-рекреационного региона Севастополя в условиях наблюдаемых изменений климата"; № 20-45-920008 "Воздействие изменения климата на виноградарство в Севастопольском регионе".

Положения, выносимые на защиту:

1. Иерархическим методом кластерного анализа с учетом интенсивности отрицательных аномалий ТПО и их пространственного расположения в зрелую фазу с 1870 по 2019 гг. доказано наличие двух пространственных типов Ла-Нинья: Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского. Получены количественные и качественные оценки физических различий формирования выделенных типов Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана на основе анализа полей приземного ветра, изменения температуры воды по глубине, концентрации хлорофилла, поверхностных течений и других гидрометеорологических характеристик.

2. Установлены закономерности формирования Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского типов Ла-Нинья относительно канонического Эль-Ниньо и Эль-Ниньо «Modoki». На основе разложения пространственно-временных полей аномалий ТПО в экваториальной полосе Тихого океана на эмпирические ортогональные функции получено две основных моды. Первая ЭОФ (~44,5%) в физическом смысле демонстрирует концепцию двухлетнего Ла-Нинья и подтверждает, что события Эль-Ниньо и Ла-Нинья ассиметричны друг к другу. Вторая ЭОФ (~22 %) описывает однолетний Восточно-Тихоокеанский тип Ла-Нинья, после которого возможно образование Эль-Ниньо «Modoki».

3. Выявлены характерные особенности в межгодовых аномалиях гидрометеополей Атлантико-Европейского региона при разных типах Ла-Нинья. Статистически доказано, что климатические аномалии в Европе в годы разных типов Ла-Нинья возникают через усиление или ослабление Восточно-Атлантического или Североатлантического колебаний.

Личный вклад автора

В ходе выполнения диссертационной работы автором самостоятельно были проведены обработка, анализ и верификация всех массивов данных, написаны программные коды для решения поставленных задач. Соискатель активно участвовал в интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Автором лично были подготовлены материалы к научным публикациям в

рецензируемых изданиях, представлены результаты на многочисленных всероссийских и международных конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечена проведенным комплексным статистическим анализом большого объема данных за длительный период, из разных источников (реанализы, спутниковая информация, буи TOGA-TAO и т.д. с учетом значимости и стандартных ошибок). Новизна научных результатов подтверждена публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах, размещенных в наукометрических базах РИНЦ, ВАК, SCOPUS и Web of Science.

Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах Лаборатории крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата Института природно-технических систем в период 2015 по 2022 гг. Кроме этого, полученные результаты были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях: Международная научная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Севастополь, 2014–2017); Международная научная конференция студентов и молодых ученых "Современная гидрометеорология: актуальные проблемы и пути их решения" (Одесса, 2014); Научно-практическая молодежная конференция «Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами» (Севастополь, Ялта, 2014–2018); 19-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Туапсе, 2015); Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2015–2021); International Geographical Union Regional Conference: Geography, Culture and Society for our Future Earth (Moscow, 2015); Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, 2015); Молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (Севастополь, 2016); I Черноморская научно-практическая конференция МГУ «Проблемы безопасности

в современном мире» (Севастополь, 2016); Международная научная конференция памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова «Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии» (Ростов-на-Дону, 2016); V Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование – MARESEDU» (Москва, 2016); XXV международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (Севастополь, 2017); Всероссийская конференция "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития" (Санкт-Петербург, 2017); Всероссийская научная конференция «Моря России» (Севастополь, 2017–2021); International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences (Moscow, 2019); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, Севастополь, Санкт-Петербург, 2018–2020); Молодежная научная конференция «Морские исследования и рациональное природопользование» (Севастопль, 2018); V Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 2019); Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы» (Воронеж, 2019); International Conference «Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Problems of Adaptation and Management» (Moscow, 2019); Международная конференция и Школа молодых ученых, посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой (Иркутск, 2021); XII международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (с. Паратунка, Камчатский край, 2021).

Публикации по теме диссертации

Результаты настоящей диссертационной работы опубликованы в 23 научных статьях. Требованию ВАК при Минобрнауки Российской Федерации соответствуют 22 работы в рецензируемых российских научных изданиях. Из них 10 научных статей входят в наукометрические базы SCOPUS и Web of Science.

Кроме этого, опубликовано 42 тезиса докладов, размещенных в системе РИНЦ, а результаты работы апробированы на 35 всероссийских и международных научных конференциях. Требования к публикациям основных научных результатов диссертации, предусмотренных в п. 11 и 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, соблюдены.

Статьи, входящие в наукометрическую базу **Scopus** и **Web of Science:**

1. Voskresenskaya E. N., **Marchukova O.V.** Qualitative classification of the La Nina events // Physical Oceanography. 2015. Vol. 3. P. 14-24. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-14-24

2. Voskresenskaya, E.N., **Marchukova O.V.** Spatial classification of La Nina events // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. Vol. 53. Issue 1. P.: 111–119 DOI:10.1134/S0001433817010133

3. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.** Прогнозирование индекса Южного Колебания // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. №4. С.:370–388 DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.404

4. 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. Vol. 107. DOI:10.1088/1755-1315/107/1/012043

5. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.** Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2019, V.386, 012040. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012040

6. **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

7. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.** Forecasting El Niño/La Niña and Their Types Using Neural Networks // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Т. 45. № 11. С. 806–813. DOI: 10.3103/S1068373920110084

8. **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

9. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., **Marchukova O.V.**, Evstigneev V.P. European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020. V. 606 P. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012031

10. Vyshkvarkova E., Rybalko E., **Marchukova O.**, Baranova, N. Assessment of the Current and Projected Conditions of Water Availability in the Sevastopol Region for Grape Growing // Agronomy. 2021. 11. 1665. DOI: 10.3390/agronomy11081665

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня **ВАК** и **РИНЦ:**

1. Воскресенская Е.Н., Лубков А. С., **Марчукова О.В.** Пространственная классификация Эль-Ниньо и условия формирования события 2015 года // Системы контроля окружающей среды. 2015. Вып. 2 (22). С.: 80 – 90.

2. **Марчукова О. В.**, Воскресенская Е. Н., Лубков А. С. Статистический прогноз Эль-ниньо 2015-2016 годов и его верификация // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 4(24). С.: 80 – 90.

3. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н., Лубков А.С. Ла-Нинья 2016 года в рамках пространственной классификации событий // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 6(26). С.: 84 – 92.

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

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

6. **Марчукова О.В.** Воскресенская Е. Н., Лубков А. С. Проявление разных типов Ла-Нинья в Черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2017. Выпуск 8(28). С.: 79– 85.

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

8. **Марчукова О.В.** Воскресенская Е. Н. События Ла-Нинья 2016 и 2017 годов и их дальнодействие в Атлантико-Европейском регионе // Системы контроля окружающей. 2018. Выпуск 12(32). С.: 80–85.

9. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.**, Журавский В.Ю. Проявление событий Эль-Ниньо в Черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2018. Выпуск 4 (34). С.: 94–101. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-94-101

10. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н. Сочетание разных типов Ла-Нинья с Тихоокеанской декадной осциляцией // Системы контроля окружающей среды. 2019. Выпуск 1 (35). С.: 72–78 DOI: 10.33075/2220-5861-2019-1-72-78

11. 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. Выпуск 2 (36). С.: 73–80 DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-73-80

12. **Марчукова О.В.**, Воскресенская Е.Н. Тенденции изменения концентрации льда и температуры воздуха в Арктике // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1(43). С. 25–34. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-25-34

13. Воскресенская Е.Н., **Марчукова О.В.**, Афанасьева В.В. Оценка возможных изменений повторяемости событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья к концу XXI века по моделям проекта CMIP6 // Системы контроля окружающей среды. 2021. Выпуск 4(46). С. 14–21. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-14-21

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, приложения и списка использованных источников.

Во введении обосновывается актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования; перечислены основные этапы исследования и

результаты; приведены основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость, личный вклад автора и апробация результатов исследования. В Главе 1, на основе анализа литературных источников, представлено описание современного состояния достаточно ограниченной изученности событий Ла-Нинья по сравнению с изученностью Эль-Ниньо, включая его классификацию и моделирование. Обобщены представления об особенностях формирования Ла-Нинья по изменениям в атмосфере и океане. Обозначен вопрос о необходимости классификации Ла-Нинья и понимания механизма, объясняющего влияние событий Ла-Нинья на отдаленные регионы земных полушарий. В Главе 2 описываются используемые массивы реконструированных данных и реанализов, приведена оценка их качества. Рассматриваются методы выделения событий Ла-Нинья, их классификации, анализа выделенных типов и их региональных откликов. В Главе 3, по данным за последние ~150 лет, выделены события Ла-Нинья, получены их статистические характеристики и проведена сама классификация. Проведен анализ возникновения и эволюции каждого из двух выявленных типов по набору параметров системы океан-атмосфера. Глава 4 посвящена результатам исследования проявления Ла-Нинья в межгодовой изменчивости температуры воздуха, приземного давления и осадков в Атлантико-Европейском регионе.

Объем работы составляет 169 страниц. Текст исследования иллюстрирован 50 рисунками. Библиографический список включает в себя 216 наименований, в том числе 182 на английском языке.

Благодарности

Автор искренне благодарит своего научного руководителя, доктора географических наук, профессора Е.Н. Воскресенскую за предоставленную тему и идею диссертации, грамотное руководство и ценные рекомендации. Автор признателен за помощь своему коллеге и соавтору многих публикаций Лубкову А.С.

ГЛАВА 1. СОБЫТИЯ ЛА-НИНЬЯ И ИХ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

На протяжении тысячелетий люди стремятся понять и предсказать естественные изменения климата, которые проявляются на разных пространственных и временных масштабах. Самым ранним трактатом о погоде и климате является работа «Метеорологика» Аристотеля [Аристотель. Метеорологика, 1981], написанная в V веке до нашей эры. С тех пор изучение сезонных, межгодовых и междесятилетних колебаний климата и источников их формирования – одна из основных проблем международных научных кругов. Интерес к ее решению поддерживается правящими кругами всех стран, поскольку климатические аномалии разных масштабов затрагивают устойчивость развития всех отраслей экономики и общественной безопасности [IPCC, 2007; IPCC, 2014; IPCC, 2021].

Существенным элементом анализа аномалий климата является выделение климатических сигналов и откликов на них в разных точках земного шара, называемых дальними связями. Разложение глобальных данных гидрометеополей на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) позволило подтвердить существование типичных межгодовых и междесятилетних масштабов глобальной изменчивости в системе океан-атмосфера. Так, периоды межгодового, десятилетнего и междесятилетнего масштабов выделяются при разложении на ЭОФ глобального поля температуры поверхности океана (ТПО), что видно из (рис.1.1), на котором представлены четыре моды пространственного распределения с их временной реализацией [Enfield, Mestas-Nuñez, 1999]. Первая мода представляет собой межгодовые колебания, соответствующие феномену Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК). Вторая – это глобальное повышение температуры совместно с проявлением квазипериодических вариаций. Третья, с периодичностью около 20 лет – это мода Тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО). И четвертая – описывает междесятилетние изменения в Северной Атлантике. Если обратить внимание на амплитуду первой моды, то видно, что ее величина почти вдвое больше по сравнению с остальными. Это подтверждает

важность изучения самого явления ЭНЮК и его проявлений [Goddard, Dilley, 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].

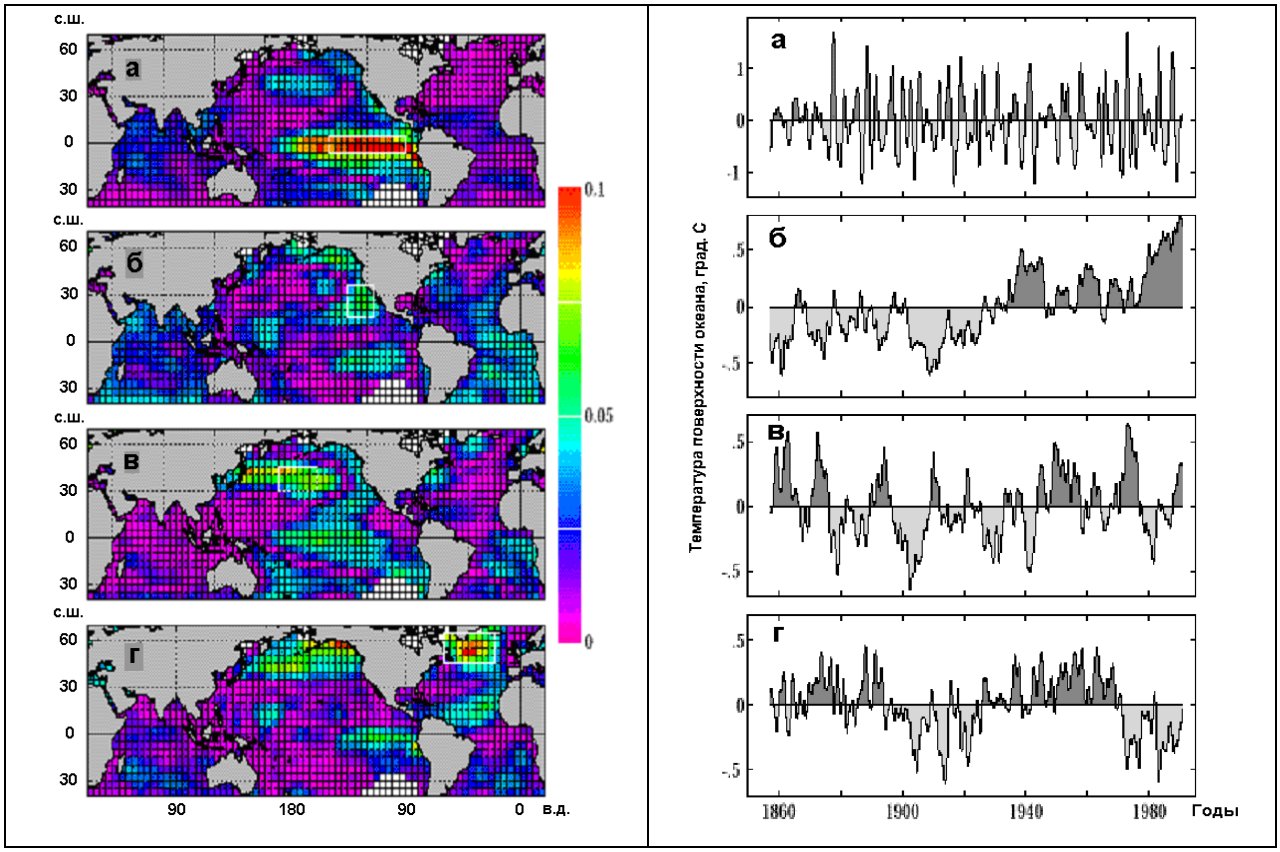


Рисунок 1.1 – Распределение основных амплитуд собственных векторов первой ЭОФ, описывающих сигнал ЭНЮК (а) и последующих трех ЭОФ описывающих изменчивость не ЭНЮК (б, в, г) (слева). Для пространств с высокими амплитудами, оконтуренных белыми прямоугольниками, приведены временные реализации эмпирических мод (справа): (а) – сигнал ЭНЮК, (б) – глобальное потепление плюс декадная мода, (в) – сигнал ТДО, (г) – Атлантическая мультидекадная осцилляция (заимствовано из [Enfield, Mestas-Nuñez, 1999])

Направлению исследований ЭНЮК, как главного климатического сигнала на межгодовом масштабе, уделялось и продолжает уделяться много внимания в рамках международных и национальных программ по изучению природной среды с использованием различных подходов. Настоящая глава посвящена изучению

данного феномена по литературным источникам, с более детальным рассмотрением его отрицательной фазы – событий Ла-Нинья.

1.1. Эль-Ниньо – Южное Колебание

В начале 1890 г. в восточной части Тихого океана перуанские географы начали писать о смене прибрежного течения раз в несколько лет, которое приносило обильные осадки в районы пустынь на севере Перу и характеризовалось обилием рыб, которых не было в тех краях, а вылавливаемая рыба исчезала. На конференции в Лиме (Перу) в 1892 г. перуанские географы впервые дали название этому явлению – Эль-Ниньо.

После разрушительного голода в Индии в конце 1870 г. [Всемирная история …, Т. 14, 1999], англичане стали уделять значительный интерес к прогнозированию поведения азиатских муссонов. Попытка предсказать поведение индийского муссона подвигла ученых к многочисленным исследованиям, с целью спрогнозировать выпадение дождей, приносимых южно-азиатским муссоном. Такой прогноз мог бы предотвратить нехватку продовольствия и голод на индийском субконтиненте, являвшимся на тот момент британской колонией. Некоторые исследователи стремились понять причины возникновения аномалий температуры в тропической части Индийского и Тихого океанов, что возможно и стало бы ключом для улучшения прогнозирования в Индии. В течение следующих нескольких десятилетий исследователи, такие как Чарльз Тодд, Генри Блэнфорд, Хьюго Хилденбренсон и другие, искали причину муссонной недостаточности в Индии [Glantz, 2002]. В начале XX века Гилберт Уолкер изучал изменения атмосферного давления на уровне моря в западной и центральной частях Тихого и Индийского океанов [Walker, 1924]. Он заметил: когда атмосферное давление в пункте порт Дарвин в Австралии повышается, то в пункте о. Таити в Тихом океане оно падает, и наоборот. Этот процесс изменения в приземном давлении, подобный «качелям», Уолкер назвал Южным Колебанием (ЮК).

В конце 1960-х, профессор Якоб Бьеркнес, используя данные, собранные за 1957-58 гг (Международный геофизический год), и существующие исследования по Перуанскому прибрежному течению, проведенными другими исследователями, определил физические механизмы, связывающие изменения поверхностной температуры океана (ТПО) в восточно-экваториальной части Тихого океана вблизи побережья Перу и Эквадора с изменениями давления над уровнем моря западной части Тихого океана [Bjerknes, 1966]. Вначале 1980 г. было определено, что Эль-Ниньо и Южное Колебание являются двумя характеристиками одного большого процесса в системе океан-атмосфера, которое получило название Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) [Rasmusson, Carpenter, 1982]. Сейчас уже известно, что ЭНЮК – это главная климатическая мода на межгодовом масштабе, которая оказывает сильное влияние на состояние климата и окружающей среды [Philander, 1990; McPhaden et al., 2006]. Эль-Ниньо – Южное Колебание включает в себя два эпизода: теплый (события Эль-Ниньо) и холодный (события Ла-Нинья). При этом события Эль-Ниньо достаточно подробно изучены и описаны [Петросянц, Гущина, 2002; Mokhov et al., 2004; Dommenget 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] 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. 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 важных решений в странах, где Ла-Нинья оказывает существенное воздействие на изменение регионального климата, например, в Филиппинах, Малайзии, Брунее, Соединенных Штатах [Lyon and Camargo, 2009; Bai 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.

1.2. Определение события Ла-Нинья

Прежде, чем прижилось слово «Ла-Нинья», холодные события в экваториальной части Тихого океана имели много названий: «холодный эпизод», «Эль-Вьехо», «холодная фаза ЭНЮК», «аналог Эль-Ниньо», «холодный аналог Эль-Ниньо», «противоположность Эль-Ниньо», «холодная погодная интерпретация Эль-Ниньо», «холодная фаза», «сестра Эль-Ниньо», «анти-Эль-Ниньо», «время года с холодной ТПО», «аномальное событие», «холодная погодная противоположность Эль-Ниньо», «обратная сторона Эль-Ниньо», «периодическое аномальное холодное течение на поверхности океана», «младенец девочка», «другая фаза ЭНЮК», «зрелый холодный эпизод» и так далее [O'Brien, 2002]. Каждое из этих названий уже использовалось разными учеными и в СМИ, а некоторые употребляются до сих пор.

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.

Россия: Ла-Нинья – явление в экваториальной части Тихого океана, характеризующееся отрицательной аномалией поверхностной температуры океана (для базового периода 1971–2000) в районе Nino3, меньшей или равной -0,5°C, происходящее в течение трех или более месяцев.

США: Ла-Нинья – явление в экваториальной части Тихого океана, характеризующееся отрицательным значениями поверхностной температуры океана, отклоняющихся от нормальных значений (базовый период – 1971–2000 гг.), в районе Nino3.4, меньше или равном -0,5°C, в течении трех месяцев подряд.

Австралия: в настоящее время Австралийское бюро метеорологии не использует формальные определения для описания Ла-Нинья/Эль-Ниньо цикла, а скорее использует различные показатели, как инструменты оценки. Оценка Ла-Нинья/Эль-Ниньо состояния проводится в рамках научной, еще во многом субъективной, работы и охватывает, по крайней мере, одно официальное совещание в месяц всего научного персонала, чтобы обсудить полный спектр анализа состояния атмосферы и океана. Это включает в себя исследование индексов (ЮК, Nino 1+2, 3, 4, 3.4, MEI), а также косвенных показателей таких, как пассаты, количество высоких облаков/исходящее длинноволновое излучение, подповерхностную температуру океана, пространственное распределение поверхностной температуры океана и результаты моделирования. Эта оценка используется с целью разработки текста работы «Итоги ЭНЮК» для обсуждения в Австралийском метеобюро, обновляемой еженедельно в интернете [http://www.bom.gov.au/climate/enso/] в период развития Ла-Нинья/Эль-Ниньо.

Великобритания: Метеорологическое бюро Великобритании в настоящее время не использует объективное определение Эль-Ниньо и Ла-Нинья, поскольку связь между Эль-Ниньо / Ла-Нинья и европейским климатом слаба. Очень трудно определить индексный порог, который был бы пригоден или значим для региона Великобритании. На данный момент Метеобюро Великобритании предпочитает предоставлять информацию в виде индексов, которые можно интерпретировать для местного применения пользователями прогнозов.

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].

1.3. Особенности формирования Ла-Нинья в атмосфере и океане

Опишем типичный сценарий развития события Ла-Нинья и механизм его формирования в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана. В качестве иллюстрации будем использовать его обобщенное схематическое представление (рис.1.3.1) из [Glantz, 2002-a]. Эта схема позволяет сравнить нормальные условия состояния океана и атмосферы в экваториальной зоне Тихого океана с условиями существования явления Ла-Нинья.

При нормальных условиях теплые воды, с температурой равной примерно 28-29°C, расположены в западно-экваториальной части Тихого океана, а более холодные, с температурой около 22-23 °C, – на востоке [duPenhoat, Eldin, 2000]. Глубина залегания термоклина на востоке – около 50 м, а на западе – 200 м (рис.1.3.1). О развитии Ла-Нинья свидетельствуют следующие признаки [из Glantz M.H., 2002-a]:

- аномально холодная ТПО центрально- и восточно-экваториальной части Тихого океана;
- аномально низкое давление на западе и аномально высокое давления на востоке от линии перемены дат (180° меридиан) в экваториальной зоне Тихого океана;
- положительные значения индекса ЮК;
- пассаты дуют сильнее, чем при нормальных условиях;

- повышение уровня термоклина у побережья Перу и заглубление в восточной части Тихого океана (рис. 1.3.1);
- обильное выпадение осадков над теплым бассейном в западной части океана, который еще более аномально смещается на запад, чем при нормальных условиях (рис. 1.3.1);
- повышение уровня моря в западно-экваториальной части Тихого океана и снижение в восточно-экваториальной.

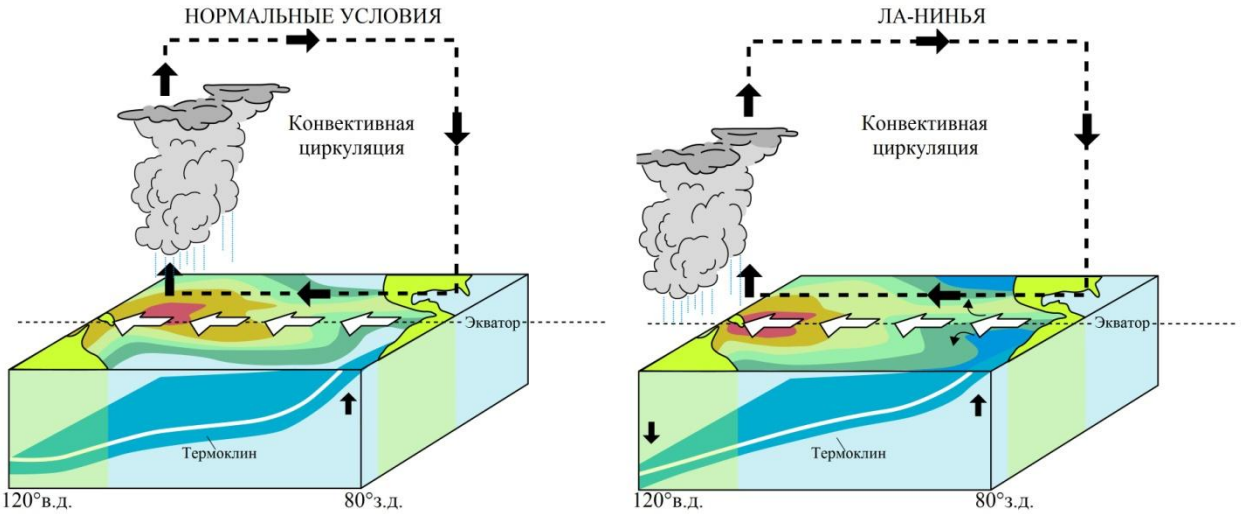


Рисунок 1.3.1 – Схематическое изображение нормальных условий и условий Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана [Glantz, 2002-a]

Явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья имеют значительную разницу, 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].

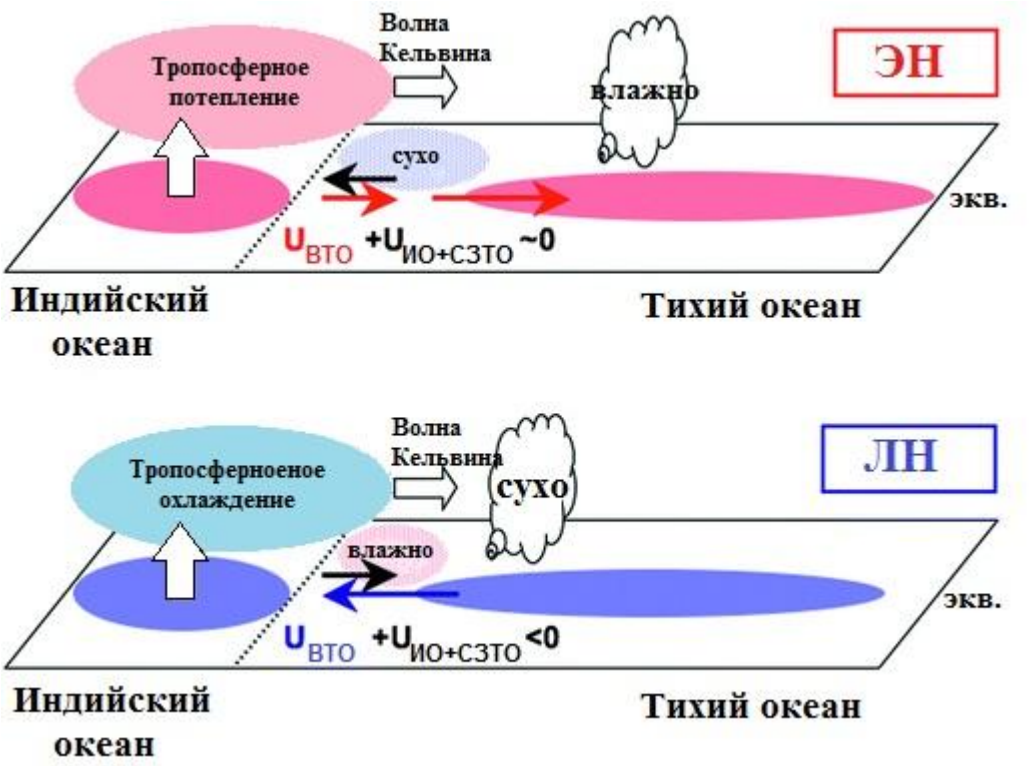


Рисунок 1.3.2 – Схема, демонстрирующая возможную причину асимметрии ветрового отклика в западно-экваториальной части Тихого океана между Эль-Ниньо и Ла-Нинья в период зрелой фазы [Okumura, Deser, 2010]. Розовые (синие) оттенки овалов характеризуют положительные/отрицательные аномалии ТПО над Тихим и Индийским океанами. Красные (синие) стрелки указывают на аномалии поверхностного ветра, вызванные аномалиями ТПО во время событий Эль-Ниньо (Ла-Нинья); черные стрелки указывают на аномалии поверхностного ветра, вызванные Индийский океаном и северо-западными тропическими аномалиями ТПО Тихого океана [Okumura, Deser, 2010]

Нелинейные процессы в атмосфере являются фундаментальными для 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 (рис.

1.3.2). 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 ($U_{ВТО}$), вызванный аномалиями осадков над отдаленной западно-экваториальной частью Тихого океана (рис. 1.3.2). 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.

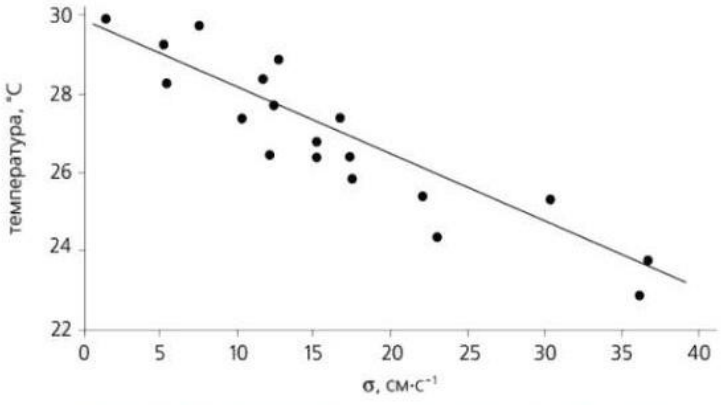


Рисунок 1.3.3 – Связь средней квадратической величины скорости течений экваториальных волн Россби с поверхностной температурой океана для точки I (140°з.д.). Коэффициент корреляции равен 0,88 [Бондаренко, Жмур, 2004]

В развитии Ла-Нинья экваториальные волны Россби принимают активное участие (рис. 1.3.3). Они создают попеременно направленную циркуляцию вод в вертикальной плоскости вдоль экватора, что приводит к перемешиванию холодных глубинных вод с теплыми водами на поверхности [Бондаренко, 2006]. По сути Ла-Нинья развивается тогда, когда модуляционный механизм волн Россби выстраивается в четкие модуляции с большими амплитудами волн (течений) [Бондаренко, Серых, 2011]. Известно, что во время Ла-Нинья

биологическая продуктивность океана увеличивается [Riascos et al., 2008; Feingold, 2011], но не только за счет понижения температуры воды, как это принято считать, но и за счет увеличения вертикальных движений воды [Бондаренко и др., 2012].

1.4. Вопрос о необходимости классификации Ла-Нинья

В 1998 г. на саммите в Боулдере (США, штат Колорадо), посвященном событиям Ла-Нинья, впервые было отмечено, что по интенсивности эти явления могут быть слабыми, умеренными, сильными, очень сильными и даже чрезвычайно сильными [Glantz , 1998]. Внимание на это было обращено в связи с тем, что именно от уровня интенсивности зависят экологические и экономические последствия Ла-Нинья. Однако говоря об умеренных и сильных событиях, обычно не учитывают продолжительность этих явлений. Именно после Ла-Нинья 1998–2000 гг., когда холодная аномалия ТПО продолжалась с июля 1998 по июнь 2000 гг., впервые возникла концепция двухлетнего Ла-Нинья [Glantz, 2002], которую в последующем активно развивали в работах [Okumura, Deser, 2010; Gao, Zhang, 2017] в поисках объяснения возможного механизма образования таких событий.

Далее, поскольку холодная фаза ЭНЮК рассматривается как антипод его положительной фазе, то для лучшего понимания и описания особенности Ла-Нинья вполне разумно рассматривать в сопоставлении с Эль-Ниньо. В последнее десятилетие было обнаружено, что распределение аномалий ТПО (АТПО) во время зрелой фазы[1] событий Эль-Ниньо, после 1990 г больше смещается на запад в центрально-экваториальной части Тихого океана по сравнению с АТПО Эль-Ниньо до этого периода [Ashok et al., 2007; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009]. В работах [Yuan et al., 2012; Yuan, Yang , 2012] показано, что эти различия приводят к значительным изменениям в системе конвекции, вертикального движения

[1] Зрелая фаза Эль-Ниньо/Ла-Нинья – три последовательных месяца с максимально положительными (максимально отрицательными) значениями АТПО

воздуха и в изменениях аномалий осадков в тропической зоне Тихого океана. Одна из первых попыток классифицировать события Эль-Ниньо была в работе [Kane, 1997], где автор выделил два типа Эль-Ниньо, которые он назвал «ambiguous» (неявный) и «unambiguous» (явный). Для первого типа было характерно повышение ТПО у Перуанского побережья в начале года и развитие отрицательной фазы Южного Колебания, потепление в центрально-экваториальной части Тихого океана в начале или в конце года. Второй тип отличается от первого тем, что отрицательная фаза Южного Колебания и потепление в центральной части Тихого океана наблюдались в середине года. Ранее Deser C. и Wallace J.M. [1990], используя данные судовых наблюдений о ТПО, приземном ветре, давлении за период с 1946 по 1985 гг., а также спутниковые данные об уходящей длинноволновой радиации, разделили события Эль-Ниньо по месту географической локализации на две группы. К первой группе они отнесли теплые фазы вдоль побережья Перу (каноническое Эль-Ниньо), ко второй – широкомасштабные потепления в экваториальном регионе Тихого океана, связанные с Южным Колебанием [Deser, Wallace, 1990]. Существование «неканонических» событий Эль-Ниньо наряду с «каноническими» позже было отмечено во многих работах [Trenberth, Stepaniak, 2001; Larkin, Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Ashok, Yamagata, 2009; Kao, Yu, 2009; Kug et al., 2009]. Эти «неканонические» события Эль-Ниньо были названы разными авторами по-разному: «Эль-Ниньо линии перемены даты» [Larkin, Harrison, 2005], Эль-Ниньо «Modoki» [Ashok et al., 2007], «теплый бассейн Эль-Ниньо» [Kug et al., 2009] и Центрально-Тихоокеанский Эль-Ниньо (ЦТ) [Kao, Yu, 2009]. Характерной особенностью «неканонических» событий Эль-Ниньо является формирование области положительных аномалий ТПО в центрально-экваториальной части Тихого океана и области отрицательных аномалий ТПО у Южноамериканского побережья в начальную фазу.

Кроме формирования положительных АТПО в центрально-экваториальной зоне Тихого океана в период зрелой фазы, ЦТ тип Эль-Ниньо также показывает различные особенности в физическом механизме [Kug et al., 2009; Kao, Yu, 2009]

и в атмосферных откликах над тропиками [Ashok et al., 2007; Yuan, Yang, 2012]. Под влиянием глобального потепления, особенно под воздействием десятилетнего потепления в экваториальной части Тихого океана, Эль-Ниньо «Modoki» стал более интенсивным и более чаще проявляться после 1990 г [Ashok et al., 2007; Yeh et al., 2009; Lee, McPhaden, 2010]. Некоторые исследования показали различные воздействия «канонического» Эль-Ниньо (или ВТ) и ЦТ Эль-Ниньо на частоту проявления атлантических ураганов [Kim, 2009], на северо-западные тихоокеанские тропические циклоны [Chen, Tam, 2010], на количество зимних осадков в Северной Америке [Weng, 2009], на количество осадков над Австралией [Wang, Hendon, 2007; Taschetto, England, 2009], а также на количество осадков над Восточной и Юго-Восточной Азией [Yuan, Yang, 2012; Weng et al., 2007; Weng et al., 2011; Feng et al., 2010; Feng et al., 2010-a; Feng and Li, 2011; Yuan et al., 2012; Yuan et al., 2012-a]. В работе [Железнова, Гущина, 2016] показано, что более сильная статистическая связь изменения циркуляции атмосферы отмечается в Северном полушарии при ВТ типе Эль-Ниньо, в то время как в Южном полушарии сильнее отклик на ЦТ тип Эль-Ниньо.

Приведенные 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, Ham, 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 (ВТ) событий [Dommenget et al., 2013]. Также исследования [Kug et al., 2009; Kug, Ham, 2011; Ren, Jin, 2011] показали, что зональное расположение

максимально-холодной аномалии ТПО в центре не отображает очевидного изменения каждого индивидуального явления Ла-Нинья.

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. 1.4.1). Остановимся на этих работах поподробнее.

Таблица 1.4.1. Сравнение существующих классификаций Ла-Нинья

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

В работе [Yuan, Yan, 2013] события Ла-Нинья выделялись с 1950 по 2011 гг. по стандартизированным значениям индексов Nino3 и Nino4, где в качестве критерия принималось значение аномалии ТПО меньше -0,5°С, в течение, как минимум пяти последовательных месяцев. Классификация проводилась путем сравнения значений индексов Nino3 и Nino4 в период зрелой фазы холодного

события. Если стандартизированные значения индекса Nino3 достигали минимальных значений, по сравнению с индексом Nino4, в период зрелой фазы Ла-Нинья, то это явление относили к ВТ типу, а если наоборот – то к ЦТ типу. Таким образом, авторы выделили 8 Ла-Нинья ВТ и 7 ЦТ типов. Кроме формирования максимально-отрицательной аномалии ТПО относительно районов Nino3 и Nino4 Тихого океана, были выявлены пространственно временные особенности распространения отрицательной аномалии (рис. 1.4.1). Для ВТ типа Ла-Нинья характерно развитие отрицательной аномалии ТПО на востоке экваториально-восточной части Тихого океана и дальнейшее распространение на запад к экваториально-центральной части Тихого океана (рис. 1.4.1, в). Для ЦТ типа Ла-Нинья отрицательная аномалия ТПО также сначала возникает в восточно-экваториальной части Тихого океана, но с большей интенсивностью развивается в экваториально-центральной части Тихого океана (рис. 1.4.1, г).

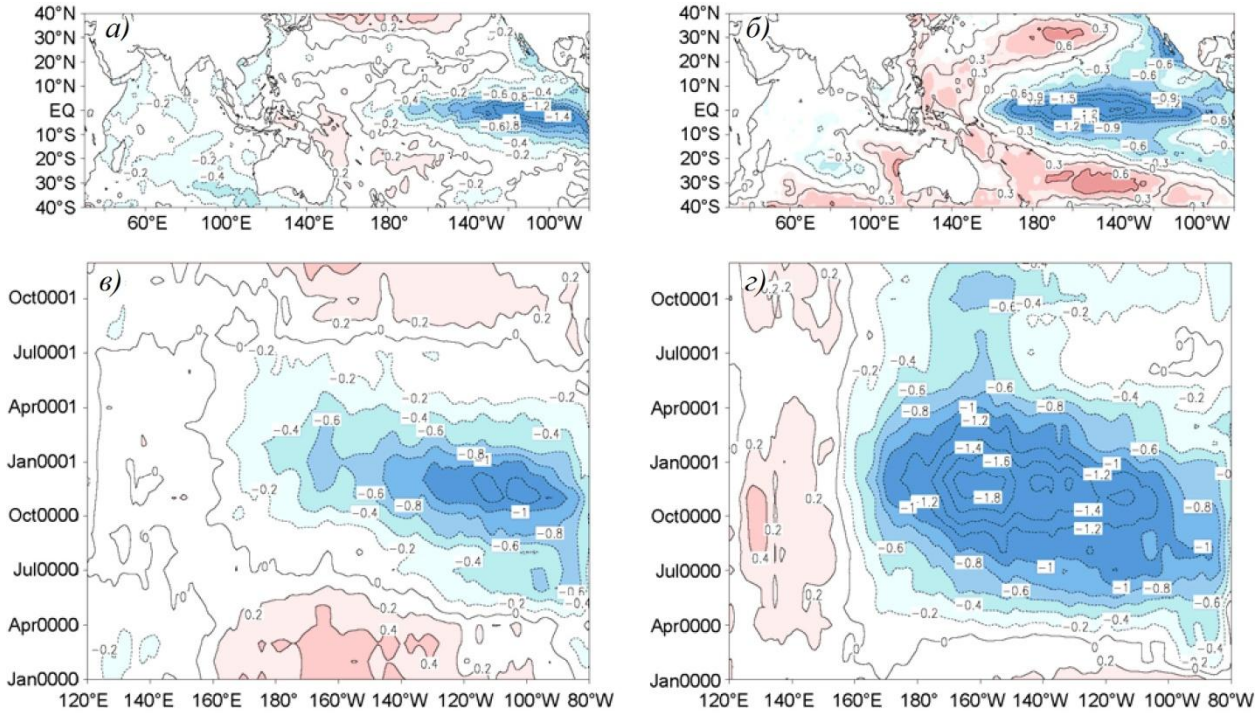


Рисунок. 1.4.1 – Композиты формирования АТПО (°С) в период зрелой фазы ВТ (а) и ЦТ типов (б) Ла-Нинья. Композиты изменения распространения АТПО по времени и долготе для ВТ ЛН (в) и ЦТ ЛН (г) с 0000 по оси у, означающего год наступления Ла-Нинья, 0001 – последующий год [Yuan, Yan, 2013]

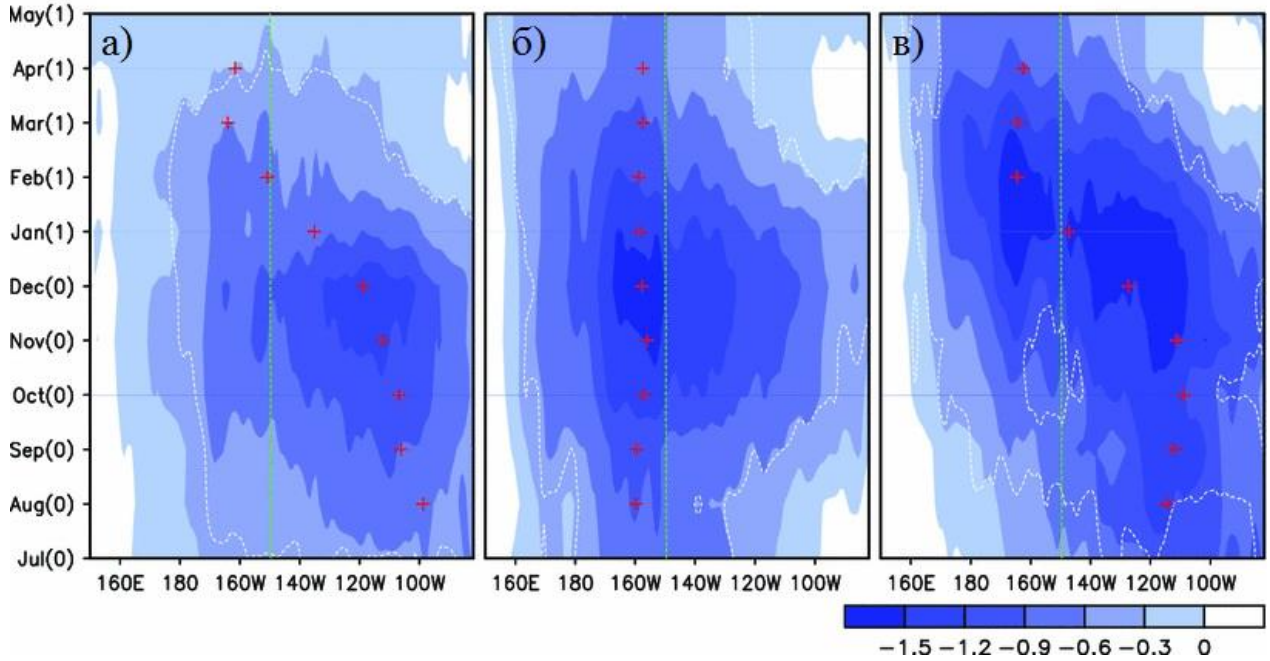


Рисунок. 1.4.2. Долготно-временная диаграмма композитов аномалий ТПО (°С) в экваториальной части Тихого океана для в ВТ (а), ЦТ (б) и смешанного (в) типов Ла-Нинья. Ось ординат – это 11-месячный период с июля «0» по май «+1» гг. Контурные линии – границы 95% статистической значимости. Красные кресты – максимально отрицательные АТПО, которые пространственно сглажены с использованием трехмесячного осреднения [Zhang et. al., 2014]

Исследователи [Zhang et al., 2014] взяли готовые годы Ла-Нинья из базы данных Центра по прогнозированию климата (Climate Prediction Center) с 1951 по 2009 гг. и по такому же методу, как в статье [Yuan, Yan, 2013] выделили 7 событий ВТ типа ЛН (1954/55, 1955/56, 1964/65, 1971/72, 1984/85, 1995/96 и 2005/06), 7 событий ЦТ ЛН (1973/74, 1974 / 75, 1975/76, 1983/84, 1988/89, 1998/99 и 2000/01) и три года событий ЛН они отнесли к смешанному типу (1970/71, 1999/00 и 2007/08), так как в период зрелой фазы отрицательная аномалия ТПО охватывала сразу два района. Рисунок 1.4.2 показывает сезонную эволюцию экваториальной аномалии ТПО для трех типов Ла-Нинья по работе [Zhang et. al., 2014]. Зарождение ВТ Ла-Нинья с его последующим достижением максимально-отрицательных аномалий происходит в восточно-экваториальном секторе Тихого океана, а зрелая фаза приходится на ноябрь-декабрь (рис. 1.4.2, а). Аномалия ТПО

в ходе развития распространяется на запад. В отличие от ВТ ЛН, ЦТ ЛН демонстрирует фундаментальное различие в структуре зарождения и развития аномалий ТПО (рис. 1.4.2, б). Во-вторых, аномалия ТПО почти никуда не распространяется во время ЦТ Ла-Нинья. ЦТ Ла-Нинья, по-видимому, связан с локальным взаимодействием в системе океан-атмосфера, которое развивается и распадается на одном месте. По мере того как ЦТ Ла-Нинья развивается, его аномалия ТПО распространяется одновременно на восток и на запад от центра развития. Контрастные особенности зарождения и эволюции аномалий ТПО, связанные с ВТ и ЦТ Ла-Нинья по мнению авторов предполагают, что лежащие в их основе динамики распространения должны быть разными. Это и обеспечивает возможное доказательство существования различных типов Ла-Нинья. Смешанный тип Ла-Нинья авторы работы [Zhang et. al., 2014] решили не рассматривать, чтобы выделить явные отклики на ЦТ и ВТ Ла-Нинья. Еще одной особенностью данной работы является указание на всех графиках статистической значимости, не смотря на коротки ряды данных.

В работе [Ding et al., 2017] события Ла-Нинья выделялись с 1950 по 2012 гг. по критерию -0,5°C и минимальной продолжительность 4 месяца. Таким образом, авторы выделили 21 зим Ла-Нинья (1950/51, 1954/55, 1955/56, 1964/65, 1970/71, 1971/72, 1973/74, 1974/1975, 1975/76, 1983/84, 1984/85, 1988/89, 1995/96, 1998/99, 1999/00, 2000/01, 2005/06, 2007 / 08, 2008/09, 2009/10, 2010/11) из 18 отдельных событий Ла-Нинья. Особый метод классификации они не использовали, а сослались на методику [Yuan, Yan, 2013; Zhang et al., 2014], поэтому получили тоже самое: 9 ЦТ ЛН (1950/51, 1973/74, 1975/76, 1988/89, 1998/99, 2000/01, 2008/09, 2010/11, 2011/12) и 6 ВТ ЛН (1954/55, 1955/56, 1964/65, 1984/85, 1995/96, 2005/06) и три года смешанного типа Ла-Нинья (1970/71, 1999/00, 2007/08). Но проанализировав ежемесячные карты аномалий ТПО и аномалии разных характеристик в атмосфере, исключили события 1971/72 и 1973/74 гг., сославшись на высокие показатели индекса Тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО) в те года (тогда наблюдалась отрицательная фаза ТДО). С учетом характерных последствий вулканической активности на климат продолжительностью не менее

двух лет, авторы также исключили зиму 1983 г., когда было сильное извержение вулкана Эль-Чичон (1982 г.) [Graf et al., 2014].

Такая неоднозначность информации, как правило, затрудняет ее использование для решения прикладных и управленческих задач регионального развития на фоне меняющегося климата. Поэтому остается необходимость поиска правильного подхода к типизации событий Ла-Нинья, чтобы в дальнейшем корректно выделять сигналы в атмосфере и океане на холодные эпизоды ЭНЮК.

1.5. Воздействие событий Ла-Нинья на окружающую среду и климат

Чтобы обсуждать механизм дальнодействующих воздействий Ла-Нинья, следует коротко охарактеризовать состояние изученности процессов возникновения и эволюции событий. 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.

Интересным является вопрос исследования зависимости возникновения разных фаз ЭНЮК от Тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО). Эта тема также в целом недостаточно изучена. Особой проблемой является то, что ТДО как бы может влиять на количество возникновений событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья [Lin et al., 2018]. Если это так, то возникает аналогичный вопрос – а какой механизм у этого всего? Авторы статьи [Lin et al., 2018] показали на статистически значимом уровне, что события Эль-Ниньо возникают в три раза чаще, чем события Ла-Нинья во время положительной фазы ТДО, тогда как частота проявлений Эль-Ниньо уменьшается примерно на половину от количества Ла-Нинья во время отрицательной фазы ТДО. Аналогичная тенденция

проявляется и в большинстве моделей CMIP5. В этой же работе [Lin et al., 2018] предлагают, что теплый восточный тропический бассейн Тихого океана и его аномалии в западных пассатных ветрах над центральной частью Тихого океана, связанные с положительной фазой ТДО, могут быть более благоприятными для возникновения Эль-Ниньо, чем для Ла-Нинья, однако основной механизм не рассматривается. В исследованиях [Liu, Alexander, 2007; Lee et al., 2012] подчеркивается, что ТДО имеет потенциал модулировать телеконецкию (влияние на характер глобальной циркуляции на тысячи километров от экваториальной части Тихого океана через «атмосферный мост»), связанную с ЭНЮК, в разных частях земного шара. Причем многие ученые подчеркивают большую модулирующую роль ТДО в сочетании с Эль-Ниньо [Goodrich, 2007]. Однако мало изучена комбинация разных фаз ТДО в сочетании с событиями Ла-Нинья.

Известно, что Эль-Ниньо и Ла-Нинья возникают не ассиметрично друг к другу. Возможно, это связано с тем, что ЭНЮК включает в себя нелинейные процессы [An, 2009] или шумы, зависящие от состояния погоды [Jin et al., 2007].

ЭНЮК может влиять на глобальный характер циркуляции атмосферы на 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 дальнодействия устанавливается в течение 2-6 недель [Liu, Alexander, 2007]. То, что приводит в действие ЭНЮК, изменяет температуру поверхности, влажность, направление ветра и распределение облаков над северной частью Тихого океана – это все меняет поверхностные тепловые, импульсные и пресноводные потоки 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°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].

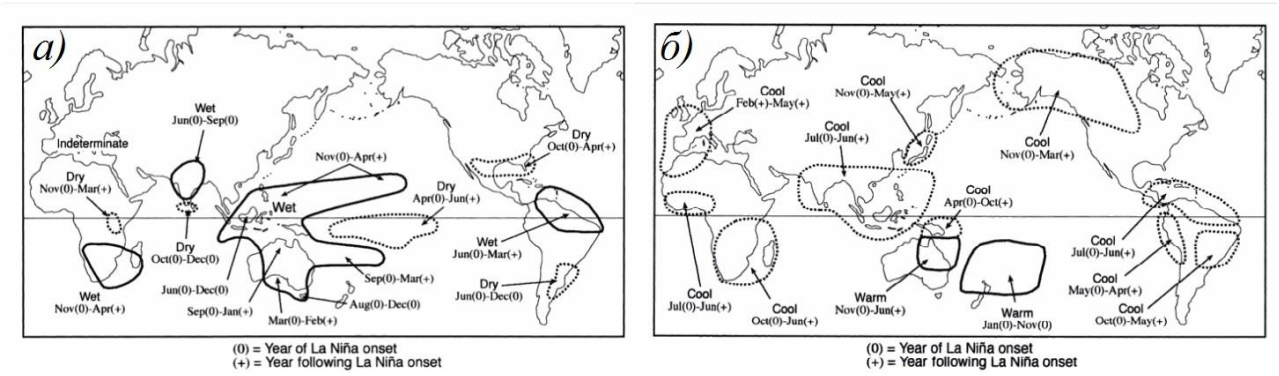


Рисунок 1.5.1 – Композитные карты потенциальных проявлений осадков и засух (а) и изменения температурных условий во время событий Ла-Нинья по расчетам работы [Ropelewski, Halpert, 1987]

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. 1.5.1, а) и температуры воздуха (рис. 1.5.1, 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]. В исследованиях статей [Нестеров, 2000; Мохов, Смирнов, 2006; Zhang et al., 2014] 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 после Ла-Нинья – засуха в центрально-западной части США летом 1988, одна из самых дорогостоящих для этой страны (40 млрд. $ США) по версии [Glantz, 2002]. В работе [Trenberth, 1988] это бедствие автор связал с холодной аномалией, возникшей в центрально-экваториальной части Тихого океана. Тоже самое произошло и летом 1998 г., однако засуха сместилась на северо-восток центральной части США. Один

американский автор [Changnon, 1999] предположил, что Ла-Нинья являются более дорогостоящими для экономики США, чем события Эль-Ниньо, обосновывая эту точку зрения на оценке явления ЭНЮК 1997-99 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.

Выводы к Главе 1

Анализ литературных источников по исследованию событий Ла-Нинья и их региональных проявлений показал следующее.

1. События Ла-Нинья – это недостаточно изученный холодный эпизод глобального процесса ЭНЮК, отклики которого обусловливают специфические межгодовые аномалии климата и окружающей среды в разных регионах Земли.

2. В связи с отсутствием в настоящее время четкого критерия ВМО для выделения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, возможно использовать различные обоснованные подходы и методы.

3. Для более корректного исследования Ла-Нинья и его проявлений чрезвычайно важна классификация этих явлений. Однако из ограниченного объема результатов (не больше десяти опубликованных работ с использованием, порой, коротких рядов данных), видно, что нет четкого консенсуса о типизации событий Ла-Нинья, по сравнению с событиями Эль-Ниньо. Отсюда исходит острая необходимость поиска правильного подхода к типизации событий Ла-Нинья.

4. К настоящему времени не выявлен единый механизм, объясняющий влияние событий Ла-Нинья на аномалии окружающей среды в отдаленных регионах Земли.

Таким образом, выявленные проблемы в изучении событий Ла-Нинья указывают на необходимость тщательного анализа их возникновения, типизации и определения закономерностей формирования глобальных и региональных климатических аномалий нашей планеты Земля под влиянием холодного эпизода ЭНЮК. Этому будет посвящена настоящая работа с использованием наиболее качественных массивов данных реанализов, с максимально-временной продолжительностью.

ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из ключевых требований для корректного изучения причин и механизмов изменений климата является наличие качественных, однородных и длительных массивов данных о глобальных параметрах взаимодействия атмосферы и океана. Указанное требование, в качестве основной задачи, сформулировано в международных, региональных и национальных программах под патронажем ВМО и ЮНЕСКО, а также в научно-исследовательских и прикладных проектах разных уровней. Однако, несмотря на интенсивные усилия, прилагаемые в этом направлении, созданные в настоящее время исторические массивы глобальных данных и разные типы реанализа, в мире отсутствует хотя бы один банк гидрометеорологических и океанологических данных, удовлетворяющий указанному требованию. Имеющиеся данные позволяют на определенном статистически значимом уровне выделять и анализировать лишь отдельные временные масштабы изменчивости глобальной системы океан-атмосфера.

2.1. Используемы данные и их верификация

Для изучения закономерностей межгодовых колебаний в системе взаимодействия атмосферы и океана, соответствующих Ла-Нинья, в настоящей работе используются среднемесячные ряды разных гидрометеорологических параметров. При этом важно, чтобы длительность рядов 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.

2.1.1. Реконструированные данные температуры поверхности океана и их верификация для Тихоокеанского региона

С 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 диссертационной работе 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°×1°, 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°×1° 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 забортной 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°×2°. 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 дальнодействий (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.:

$$R(x) = \sum_i f_i \psi_i(x), \qquad (2.1.1.1)$$

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°, 125° и 140° 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°×1° 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°×0.083° 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 (2.1.1.2), а соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО или RMSE – Root Mean Square Error) по формуле (2.1.1.3).

$$r = \frac{cov(x_i\, y_i)}{\sigma_x \sigma_y}, \qquad (2.1.1.2)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения массивов, cov(x,y) – их ковариация.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}\,, \qquad (2.1.1.3)$$

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. 2.1.1.1. Можно отметить, что корреляция между COBESST2 и HadISST (рис. 2.1.1.1, в) в экваториальной зоне несколько

выше, чем в случае корреляций между HadISST–ERSSTv5 (рис. 2.1.1.1, а) и COBESST2– ERSSTv5 (рис. 2.1.1.1, д). Этот же вывод подтверждается при оценке корреляционной связи в районе Nino3.4: 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°C, при этом RMSE в районах Nino3 и Nino4 достигают 0,7°C.

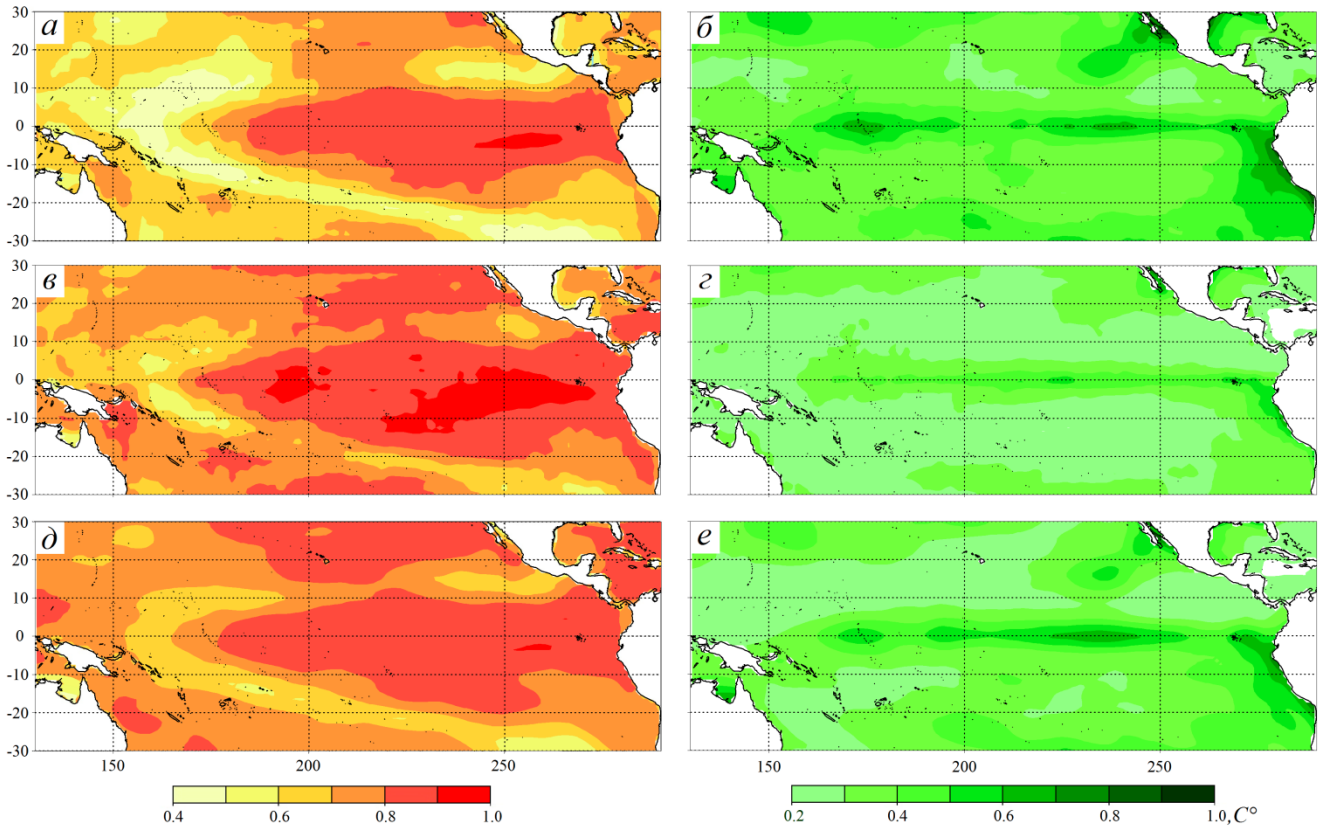
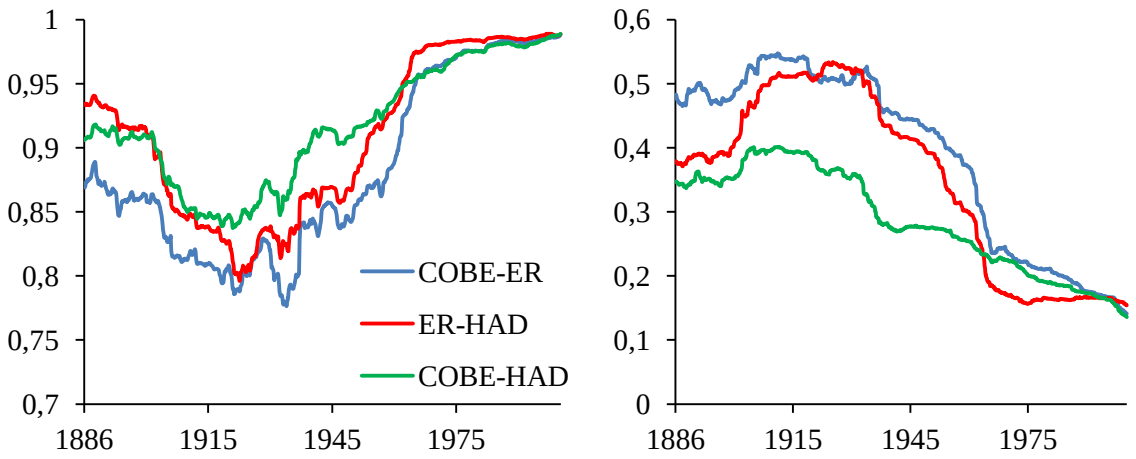


Рисунок 2.1.1.1 – Коэффициенты корреляции между массивами ERSSTv5 и HadISST (а), COBE SST2 и HadISST (в), ERSSTv5 и COBE SST2 (д), и RMSE массивов ERSSTv5 и HadISST (б), COBE SST2 и HadISST (г), ERSSTv5 и COBE SST2 (е)



а *б*

Рисунок 2.1.1.2 –Коэффициенты корреляции (а) и RMSE (б), рассчитанные для скользящего 30-летнего периода в районе Nino 3.4 между массивами данных ERSSTv5 и HadISST (красная линия), COBE SST2 и HadISST (зеленая), ERSSTv5 и COBE SST2 (синяя)

Далее было рассмотрено 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 Nino3.4, с координатами 5° с. ш. – 5° ю. ш. и 170° з. д. и 120° з. д. (рис. 2.1.1.2). Получено, что пара COBE SST2–HadISST с 1885 по 1960 гг. имеет коэффициенты корреляции 30-летнего скользящего периода выше, чем остальные корреляционные пары (рис. 2.1.1.2, а), а RMSE – ниже (рис. 2.1.1.2, 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 1986 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 2.1.1.1 приведены результаты сравнения массивов HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2 с данными датчика AVHRR (спутники NOAA), скорректированными на основе измерений «in situ» в проекте NOAA OI SSTv2, датчика MODIS (спутник Terra) и измерениями «in situ», полученными с буев проекта TAO, расположенных на экваторе. Стоит отметить, что периоды сравнений несколько отличаются. Для NOAA OI SSTv2 период равен 1982–2019, для спутника Terra – 2001–2019 и буев TAO – 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 TAO была выполнена сплайн-интерполяция реконструированных массивов в координаты локализации буев (0°ш, 95°з.д., 125°з.д. и 140°з.д.). Из используемых рядов данных исключен тренд и сезонная изменчивость.

По результатам коррекционной оценки (табл. 2.1.1.1) 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. 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.

Таблица 2.1.1.1. 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 TAO за период 1981–2019 на основе корреляции и RMSE

массив	район	r			RMSE,°C		
		HadISST	COBESST2	ERSSTv5	HadISST	COBESST2	ERSSTv5
Сенсор AVHRR	Nino 3	0,99	0,99	0,99	**0,24**	0,34	0,41
	Nino 3.4	0,99	0,99	0,99	**0,18**	0,27	0,34
	Nino 4	0,98	**0,99**	0,98	**0,19**	0,31	0,39
Сенсор MODIS	Nino 3	0.94	0.94	0.94	**0.32**	0.45	0.46
	Nino 3.4	0.91	**0.98**	0.89	0.47	**0.34**	0.65
	Nino 4	0.92	**0.98**	**0.98**	**0.44**	0.59	0.68
Буи TAO*	95 з.д.	0.88	**0.90**	0.89	0.67	**0.62**	0.66
	125 з.д.	0.94	**0.95**	0.93	0.51	**0.47**	0.53
	140 з.д.	**0.96**	**0.96**	0.94	0.41	**0.37**	0.47

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

По результатам оценки RMSE, в сравнении с буями TAO, 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 TAO, 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].

2.1.2. Данные разных типов реанализа и спутниковых наблюдений

Кроме массивов о среднемесячных значениях ТПО для изучения механизма формирования событий Ла-Нинья и их проявлений в Атлантико-Европейском регионе использовались следующие данные:

– среднемесячные поля скоростей и направлений течений на глубине 5 м из океанического реанализа NCEP GODAS [Saha et al., 2006] с 1981 по 2019 гг. в узлах пространственной сетки 1°×1°;

– среднемесячная температура воды по глубине от 5 м до 4000 м из реанализа NCEP GODAS [Saha et al., 2006] с 1981 по 2019 гг (40 слоев по глубине, с шагом в 1° по пространству);

– среднемесячная концентрация хлорофилла по спутниковым данным *SeaWiFS* [Cracknell et al., 2001] с разрешением 9 км с 1998 по 2010 гг.;

– спутниковые данные о хлорофилле с 2001 по 2019 гг проекта GlobColour (обедненые данные с датчиков SeaWiFS (NASA), MODIS (NASA), MERIS (ESA), OLCI-A (ESA), VIIRS (NOAA/NASA) с разрешением 4 км [Maritorena et al., 2010];

– среднемесячная температура воздуха, приземное давление, высота геопотенциала на изобарической поверхности 500 мб из реанализа XX столетия (20th Century Reanalysis V2c) с шагом сетки 2° с 1850 по 2014 гг [Compo et al., 2006; Giese et al., 2016];

– среднемесячные значения о количестве осадков из массива *GPCC V8* для периода 1901–2016 гг на пространственной сетке 1º×1º [Schneider et al., 2016];
– ежедневные данные приземных наблюдений за температурой воздуха в Европе, привязанных к сетке с разрешением 0,1°×0,1° из базы E-OBS 19.0e с 1950 по 2019 гг. [Cornes et al., 2018].

Опишем вкратце каждый массив из перечисленных выше.

NCEP GODAS – это среднемесячный океанический реанализ в узлах регулярной сетки в 1° по долготе и 0,333° по широте, так же это 40 уровней по глубине (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115, 125, 135, 145, 155, 165, 175, 185, 195, 205, 215, 225, 238, 262, 303, 366, 459, 584, 747, 949, 1193, 1479, 1807, 2174, 2579, 3016, 3483, 3972, 4478 м) за период с 1/1980 г по настоящее время. Как температурные, так и синтетические профили солености усваиваются в данном реанализе по схеме 3DVAR (трехмерное вариационное усвоение данных), разработанной в работе [Derber, Rosati, 1989]. В GODAS усвоены потоки импульсов, тепловые потоки и перенос воды, полученные в атмосферном реанализе NCEP 2. Согласно статьям [Behringer et al., 1998; Saha et al., 2006] этот океанический реанализ хорошо воспроизводит реальные наблюдения.

SeaWIFS – спутниковый датчик с широким обзором океанического поля, предназначенный для сбора глобальной биологической информации Мирового океана. Функционировал с сентября 1997 по декабрь 2010 гг. [Cracknell et al., 2001]. Основная работа этого датчика была направлена на количественное определение хлорофилла, производимого морским фитопланктоном. Данные SeaWiFS находятся в свободном доступе на различных веб-сайтах. В данной диссертационной работе используется уже готовый массив среднемесячных значений концентрации хлорофилла с разрешением 9 км с 1998 по 2010 гг. Для анализа событий Ла-Нинья 12 лет мало, поэтому были привлечены данные по хлорофиллу из проекта GlobColour с 2001 по 2019 гг.

Проект GlobColour начался в 2005 г. как проект Европейского космического агенства (ESA) по использованию данных обычными пользователями (DUE – Data User Element), чтобы обеспечить непрерывное формирование базы данных

объединенных продуктов L3 Ocean Color [Maritorena et al., 2010]. Одной из целей GlobColour является получение длинных непрерывных временных рядов данных о цвете океана, сформированных из разных источников спутниковых наблюдений, к примеру, таких как:

- спектрометрический прибор среднего разрешения (MERIS) на борту ENVISAT;
- спектрометр умеренной визуализации (MODIS) для Системы наблюдений за Землей (EOS);
- датчик с широким обзором океанического поля SeaWiFS на борту OrbView-2.

Данные по хлорофиллу из проекта GlobColour являются оперативным продуктом для работы Морской службы мониторинга окружающей среды им. Коперника (CMEMS). В GlobColour используются современные алгоритмы получения количественных значений концентрации хлорофилла из коэффициентов отражения, которые подробно описанные в работе [Garnesson et al., 2019]. В тоже время в этих массивах применяются «слиятельные подходы» (объединение данных с разных спутниковых датчиков), позволяющие получать более расширенную пространственно-временную картину распределения концентрации хлорофилла на поверхности океана [Garnesson et al., 2019].

Реанализ XX столетия (20th Century Reanalysis) версии V2c представляет глобальный набор данных об атмосферной циркуляции за период 1850–2014 гг. Этот реанализ обеспечивает важную инструментальную связь между историческими реконструкциями палеоклимата и климатическими моделями прогнозирования. Преимущество реанализа XX столетия (20CR) в том, что он охватывает более столетний период наблюдений за погодой, в то время, как другие реанализы ограничиваются началом интерполяции с 1948 г. Проект 20CR – это разработка Физического отдела NOAA и CIRES (Кооперативный институт исследований в области наук об окружающей среде), расположенного в Университете Колорадо, при финансовой поддержке Министерства энергетики США с целью расширения охвата имеющихся реанализов, начиная с XIX и

заканчивая началом XXI веков [Compo et al., 2006]. Данный реанализ усваивает только наблюдения приземного синоптического давления в системе глобального прогнозирования центра NOAA и предписывает значения ТПО и распределения морского льда, чтобы получить оценки, к примеру, температуры, давления, скоростей и направлений ветра, влажности, солнечной радиации и распределения облачности от уровня приземной поверхности до вершины атмосферы в течение заданного периода [Giese et al., 2016]. В версии V2c для ассимиляции данных используется ансамблевый фильтр по алгоритмам работ [Compo et al., 2006; Compo et al., 2011], который непосредственно оценивает наиболее вероятное состояние глобальной атмосферы для каждого трехчасового периода с учетом возможной вероятностной ошибки.

Массивы GPCC являются продуктами Глобального климатического центра по осадкам, находящегося под управленческой эгидой ВМО [Rudolf et al., 2005]. *GPCC V8* представляет сеточные среднемесячные значения количества осадков с пространственным разрешением 1º×1º над континентами и островами за период с 1901 по 2016 гг. Контроль качества этих данных составлялся на базе 67 200 метеорологических станциях, функционирующих с 1986 г. Климатология количества выпавших осадков, интерполированных по сетке, считалась относительно периода 1951–2000 гг. на основе 80 тыс. метеостанций [Schneider et al., 2016].

Выбор массива *GPCC V8*, как и реанализа 20CR V2c для расчета климатических откликов на события Ла-Нинья обусловлен их вековым охватом, что повышает статистическую значимость и достоверность последующих полученных результатов анализа в настоящей диссертационной работе.

Массив E-OBS 19.0e представлен в виде ансамблевого набора суточных данных приземной темпратуры воздуха для материковой части Европы и доступен на регулярной сетке 0,1°. Этот массив также используется в работе для расчета композитов в годы Ла-Нинья, но уже по декадам и для периода с 1950 по 2019 гг. Ансамбль данных E-OBS создан с помощью процедуры условного моделирования, где для каждого из членов ансамбля температуры воздуха

создается пространственно коррелированное случайное поле с использованием предварительно рассчитанной функции пространственной корреляции [Cornes et al., 2018]. Среднее значение вычисляется по элементам, предоставленное в виде полей «наилучшего выбора» [Cornes et al., 2018]. Разброс рассчитывается как разница между 5 и 95 процентилями по ансамблю, чтобы обеспечить достоверность 90% диапазона [Cornes et al., 2018].

2.1.3. Индексы взаимодействия атмосферы и океана

Дополнительно в работе использовались следующие индексы взаимодействия атмосферы и океана, некоторые из которых были рассчитаны самостоятельно, а другие – взяты из доступных источников:

– температурные инндексы: *Nino1+2, Nino3, Nino4, Nino3.4;*

– индексы взаимодействия атмосферы и океана: *ЮК, САК, ВАК*;

– пассатные индексы, рассчитываемые для высоких слоев атмосферы *EP TWI, CP TWI, WP TWI* в трех экваториальных районах Тихого океана – восточном, центральном и западном.

Существует несколько индексов, используемых для мониторинга экваториальной части Тихого океана. Большинство из них основано на расчете аномалий ТПО, осредненных по конкретному региону. Номера регионов имеют названия Nino с нумерацией от 1 до 4 (рис. 2.1.3.1), соответствующих номерам судовых путей, которые пересекали эти регионы. Данные из этих судовых путей позволяют фиксировать исторические события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, возникшие до 1949 г. [Rasmusson, Carpenter, 1982].

Индекс Nino3.4 представляет изначально среднемесячные значения ТПО в районе с координатами 5° с. ш. – 5° ю. ш. и 170° з. д. и 120° з. д. (рис. 2.1.3.1) Далее эти значения ТПО фильтруют (трех-месячное скользящее, исключение сезонной изменчивости и т. д.), а затем переводят в аномалии относительно среднего климатического периода (1981–2010 гг.) или любого другого периода по желанию автора. Значения индекса Nino3.4 можно скачать в открытом доступе

[https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/] или рассчитать самостоятельно. В настоящей диссертационной работе все температурные индексы Nino для экваториальной зоны Тихого океана рассчитаны отдельно для каждого массива – HadISST, ERSSTv5 и COBE SST2 – за период с 1870 по 2019 гг.

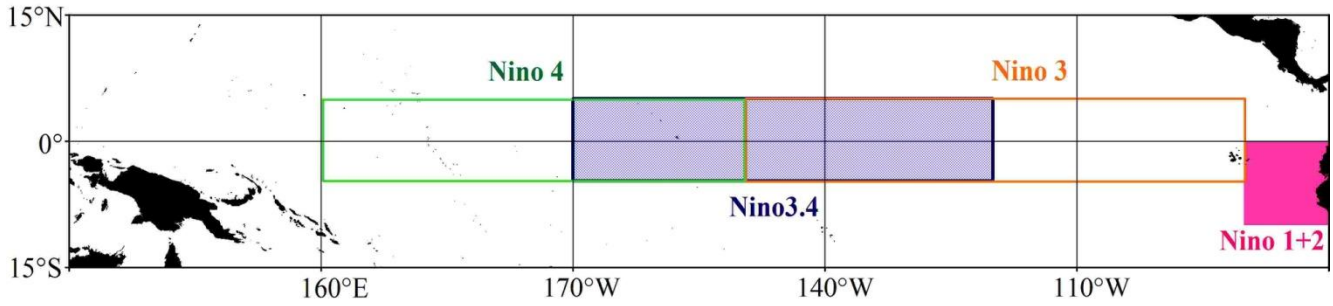


Рисунок 2.1.3.1 – Районы расчетов тихоокеанских температурных индексов Nino

Индекс Nino3 представляет среднемесячные значения ТПО, осредненные по району с координатами 5° с. ш. – 5° ю. ш. и 150° з. д. – 90° з. д. (рис. 2.1.3.1). Когда-то район Nino3 был основным центром мониторинга и определения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, однако позже было выяснено, что ключевым регионом для ЭНЮК и связанными с ним процессами взаимодействия океана и атмосферы, является район Nino3.4 [Trenberth, 1997].

Индекс Nino4 отражает проявления изменений ЭНЮК в экваториально-центральной части Тихого океана и представляет собой среднемесячные значения ТПО в районе с координатами 5° с. ш. – 5° ю. ш. и 160° в. д. – 150° з. д. (рис. 2.1.3.1). Изменчивость ТПО в этом регионе, как правило, имеет наименьшую дисперсию, в сравнении с другими.

Индекс Nino1+2 – это среднемесячные значения ТПО, рассчитываемые для самого восточно-экваториального региона Тихого океана, с координатами 0° – 10° ю. ш. и 90° з. д. – 80° з. д. (рис. 2.1.3.1). Именно в этом районе, вблизи Южной Америки, местное население обратило внимание на проявление Эль-Ниньо.

В то же время, кроме индексов ТПО в данной работе привлекались данные индекса южного колебания (ЮК) за 1866–2019 гг., рассчитанного сотрудниками

Отдела климатических исследований Университета Восточной Англии [Ropelewski, Jones, 1987]. Индекс ЮК представляет собой разность нормированных значений приземного давления между двумя пунктами в Тихом океане: порт Дарвин (Австралия) и о. Таити. Значения этого индекса были взяты из открытого источника [https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/].

Восточно-Атлантическое колебание (ВАК) связывает три центра действия атмосферы, расположенных над районами Великобритании, Черного моря и Канарских островов (рис. 2.1.3.2) [Wallace, Gutzler, 1981]. Центры действия для этого колебания имеют следующие координаты: 25° с.ш., 25° з.д. (E), 55° с.ш., 20° з.д. (F), 50° с.ш., 40° в.д. (G). Формулу расчета индекса ВАК можно записать следующим образом:

$$I_{BAK} = \frac{1}{4}[2z(F) - z(E) - z(G)], \qquad (2.1.3.1)$$

где z – нормализованное значение геопотенциала на изобарической поверхности 500 мб (H_{500}).

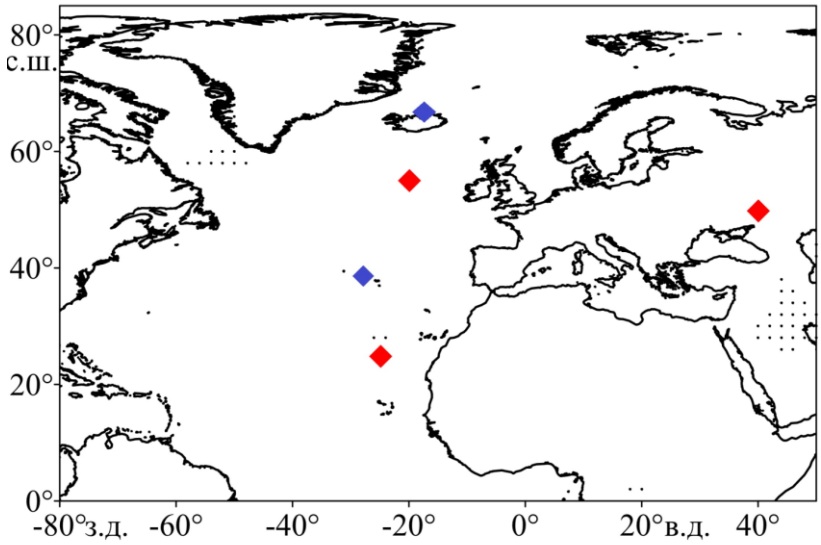


Рисунок 2.1.3.2 – Центры действия Восточно-Атлатического (красные пометки) и Северо-Атлатического (синие пометки) колебаний.

Положительная фаза индекса ВАК характеризуется возрастанием меридионального переноса атмосферной циркуляции, когда в поле изобарической поверхности 500 мб на востоке Северной Атлантики появляется мощный гребень и сопряженная с ним ложбина, протянувшаяся вдоль Баренцева моря к югу, в

направлении западной части Средиземного моря [http://seakc.meteoinfo.ru/training/volatility]. При отрицательной фазе индекса ВАК, наоборот, происходит усиление зонального переноса в восточной части Северной Атлантики и над территорией Западной Европы. Центры действия атмосферы при ВАК формируются в разные сезоны, незначительно изменяя свое географическое расположение.

Значения индекса ВАК для расчетов данной работы были взяты за период с 1950 по 2019 гг. с официального сайта Центра прогнозирования климата NOAA (CPC) [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml].

Североатлантическое колебание (САК) – это атмосферное колебание, связанное с разницей атмосферного давления между Исландским минимумом и Азорским максимумом. От этого колебания зависит скорость и направление западных ветров и траектория движения циклонов из Атлантики в Европу [Нестеров, 2013]. Индекс Североатлантического колебания (САК), как и индекс ВАК, охватывает основные центры действия атмосферы, расположенные в районах Северная Атлантика – Европа (рис. 2.1.3.2). В Центре прогнозирования климата NOAA индекс САК рассчитывают на основе разложения полей аномалий геопотенциала H_{500} на ЭОФ, рассчитанных относительно базового климатического периода 1981–2010 гг., откуда и был взят этот индекс с 1950 по 2018 гг [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml] для дальнейшей работы.

Принципиальные отличия САК и ВАК в том, что ВАК сдвинут к юго-востоку Европы в меридиональном направлении относительно диполя САК. Композитные поля температуры для отрицательной (положительной) фазы САК в общих чертах сходны с аналогичными полями для положительной (отрицательной) фазы ВАК [http://seakc.meteoinfo.ru/training/volatility]. Но стоит отметить, что степень влияния САК на режим температуры в Северной Америке и Гренландии более значительна.

Дополнительно в настоящем исследовании были привлечены среднемесячные значения индексов Пассатных ветров (TWI), рассчитанные на

850 мб изобарической поверхности для трех районов Тихого океана (рис. 2.1.3.3) – восточного (EP), центрального (CP) и западно-экваториального (WP) – из CPC NOAA с 1979 по 2019 гг. [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/].

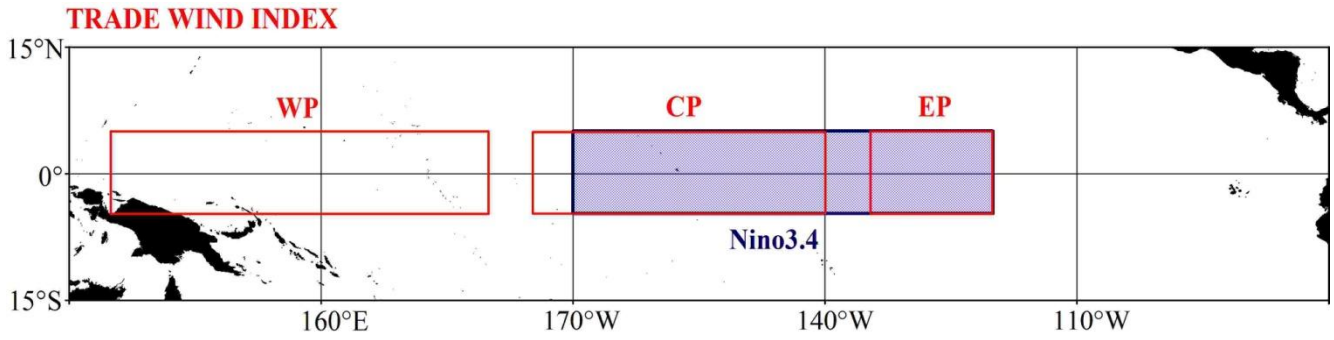


Рисунок 2.1.3.3 – Районы расчета индексов Пассатных ветров в экваториальной части Тихого океана.

2.2. Методы исследования событий Ла-Нинья

Над всеми данными, описанными выше, производилась статистическая обработка и фильтрация с удалением линейного тренда, сезонного хода и прочих периодичных колебаний. Методы статистического анализа поэтапно изложены в данной подглаве. Подробно раскрыта тема применяемых математических методов для классификации событий Ла-Нинья по пространственным и временным признакам.

2.2.1. Статистическая обработка данных

Для характеристики статистических рядов климатических данных и индексов в настоящей работе рассчитывались следующие показатели первичной статистики.

Среднее – это значение анализируемого ряда ($\bar{x}$), которое в статистической гидрометеорологии описывает центр тяжести характеристики при различных

изменениях. Простыми словами – это сумма всех значений выборки, деленная на их количество (N). Рассчитывается по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \quad (2.2.1.1)$$

где N – длина исследуемой выборки.

Мода (Mo) – часто встречающееся значение в исследуемой выборке.

Медиана (Me) – значение характеристики, попадающее на середину исследуемого ряда, если расположить числа в нем от наименьшего к большему. Главная особенность этой характеристики в том, что сумма отклонений значений выборки от медианы по модулю равна минимальному значению самого ряда. В виде формулы это выглядит так:

$$\sum_{i=1}^{N}|x_i - Me| = \min \quad (2.2.1.2)$$

Дисперсия (D) и взаимосвязанное с этим показателем среднее квадратическое отклонение (σ) описывают рассеяние показателей статистической выборки относительно среднего показателя этого ряда. Рассчитываются по следующим формулам:

$$D = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2, \quad (2.2.1.3)$$

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (2.2.1.4)$$

Размах вариации (R) характеризует максимальный разброс значений выборки и рассчитывается, как максимальное значение ряда вычесть минимальное:

$$R = \max - \min \quad (2.2.1.5)$$

Коэффициент вариации (C) – показатель изменчивости исследуемой характеристики ряда. Этот показатель первичной статистики позволяет оценить изменчивость выборки и ответить на вопрос: велика она или нет. Коэффициент вариации не имеет размерности, но его можно перевести в проценты. Если эта характеристика будет больше 33%, то это будет означать, что изменчивость выборки велика, а если меньше 33% – то изменчивость маленькая. Из последнего утверждения будет следовать статистический вывод, что анализируемый ряд однороден.

Важно на первом этапе статистической обработки рассчитывать эмпирическую и интегральную функции распределения гидрометеорологической выборки и основные характеристики форм этих функций.

Эмпирическая функция распределения (ЭФР), в несложном понимании, означает повторяемость в конкретных интервалах значений характеристики ряда. ЭФР обычно рисуют в виде гистограммы: по оси «х» наносятся пределы интервалов, а повторяемость изображается в виде прямоугольников, высота которых откладывается по оси «у».

Путем поэтапного суммирования повторяемости исследуемой характеристики ряда на всех интервалах можно получить интегральную *ЭФР*, которая описывает вероятность выпадения значения, меньше заданного. Интегральную ЭФР обычно рисуют как график, возрастающий от нуля до единицы.

Перечислим характеристики формы ЭФР, которые тоже учитывались в исследовании.

Асимметрия описывает симметричность ЭФР относительно среднего арифметического показателя ряда, которую можно вычислить по формуле:

$$As = \frac{1}{N\sigma^3}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3 \qquad (2.2.1.6)$$

При абсолютной симметричности повторяемости значений выборки по интервалам относительно среднего показателя, асимметрия равна нулю (As = 0).

Когда асимметрия больше нуля (As > 0), формулируется статистический вывод, что ЭФР имеет положительный «хвост», а основное количество значений характеристики выборки – меньше среднего арифметического.

Если показатель асимметрии меньше нуля (As < 0), то ЭФР обладает отрицательным «хвостом»: количество значений характеристики ряда больше среднего арифметического.

Эксцесс – это островершинность распределения исследуемой выборки. Можно рассчитать по формуле:

$$Ex = \left[\frac{1}{N\sigma^4}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4\right] \cdot 3 \qquad (2.2.1.7)$$

Если Ex > 0, то ЭФР является относительно островершинной. Если $Ex < 0$, то ЭФР является относительно плосковершинной и распределение стремится к случайному.

Все полученные ЭФР проверялись на соответствие закону нормального распределения. Нормальный закон имеет особое значение в статистике, так как он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения при часто встречающихся условиях [Гордеева, 2010]. Функция плотности вероятности нормального закона распределения может быть выражена формулой:

$$f(\bar{x}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2.1.8)$$

где x - значение случайной величины; $\bar{x}$ и σ - среднее значение и стандартное отклонение исходного ряда, соответственно. Нормальному закону свойственно равенство среднего значения, моды и медианы, а также симметричность относительно среднего [Гордеева, 2010]. Форма кривой функции нормального закона и ее расположение на горизонтальной оси зависит от стандартного отклонения и среднего значения выборки.

ЭФР, как правило, отличаются от нормального закона в большей или меньшей степени. Однако всегда нужно ответить на вопрос: являются ли эти различия значительными или ими можно пренебречь и считать нашу ЭФР нормальным законом? Для объективного ответа привлекается статистический критерий (хи-квадрат). Он характеризует совокупность относительных различий ЭФР и теоретического распределения (в частности, нормального закона) и может быть рассчитан на основе интервалов ЭФР по формуле [Гордеева, 2010]:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{k_{max}} \frac{(m_k - n_k)^2}{n_k} \quad (2.2.1.9)$$

где $т_к$— частота эмпирической функции распределения в k-том интервале; k_{max} – количество интервалов; $п_к$ - частота нормального закона для k-того интервала [Гордеева, 2010]. Если различий нет, т.е. ЭФР абсолютно совпадает с функцией нормального закона распределения, то $\chi^2 = 0$ [Гордеева, 2010].

В других случаях необходимо задать точность, с которой мы хотим определить соответствие ЭФР нормальному закону. Эта точность определяется доверительной вероятностью и задается исследователем в зависимости от задачи. Для гидрометеорологических рядов, как правило, доверительная вероятность определяется: p = 95%. Тогда соответствующая ошибка при принятии решения составляет 5%. Это уровень значимости α [Гордеева, 2010].

В зависимости от уровня значимости около нуля формируется некоторый интервал значений χ^2, в пределах которого делается вывод о соответствии ЭФР нормальному закону. Граница интервала определяется как $\chi^2_{\text{кр}}$ (хи-квадрат критическое), которое определяется по статистическим таблицам в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы $\nu = k$ - 3 , где k - количество интервалов ЭФР [Гордеева, 2010].

Таким образом, если рассчитанный по формуле χ^2 будет меньше, чем $\chi^2_{\text{кр}}$, то статистически он близок к нулю и ЭФР соответствует нормальному закону. А если χ^2 будет больше, чем $\chi^2_{\text{кр}}$, тогда различия между ЭФР и нормальным законом статистически значимы и ЭФР не соответствует нормальному закону [Гордеева, 2010].

Большинство данных было переведено в аномалии относительно заданного климатического периода с исключением сезонной изменчивости и линейного тренда. Период для расчета аномалий задавался в зависимости от длины ряда. Для того чтобы выделить сезонную изменчивость, нужно рассчитать среднемесячные значения $\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau)$ по всему временному ряду для каждого месяца

$$\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau) = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} F(\varphi, \lambda, z_0, \tau + 12i), \qquad (2.2.1.10)$$

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

$$\delta\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t) = F(\varphi, \lambda, z_0, \tau) - \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau) \qquad (2.2.1.11)$$

Качество метода удаления сезонного хода из рядов данных продемонстрировано на рис. 2.2.1.1. Видно, что после фильтрации исчезает изменчивость с периодами год, полгода и три месяца.

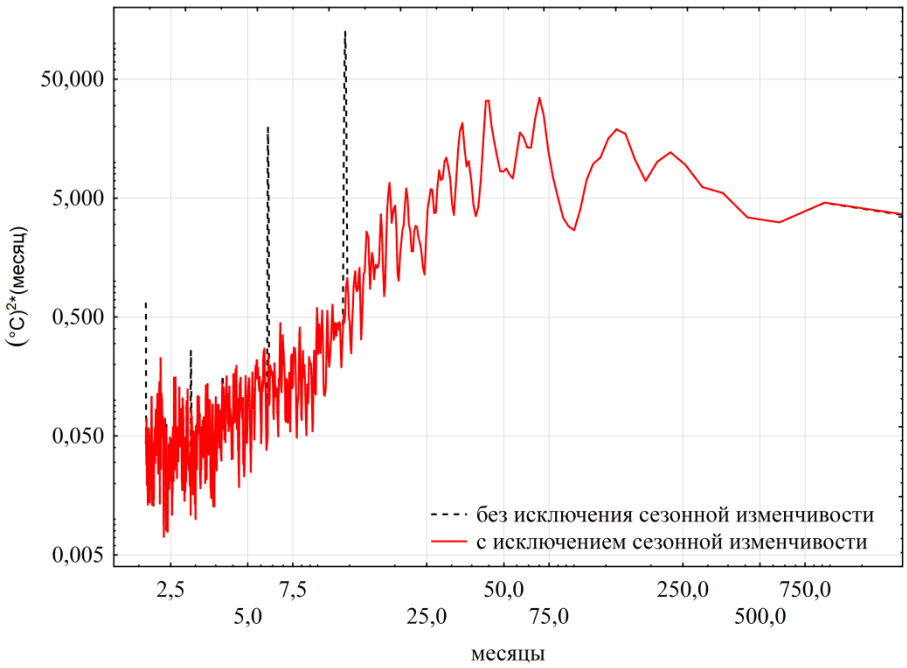


Рисунок 2.2.1.1 – спектры ТПО осредненные в районе Nino3.4 по данным массива HadISST за 1870-2019 гг. Спектр до удаления сезонного хода обозначен пунктирной линией, сплошной красной – после.

а) б)

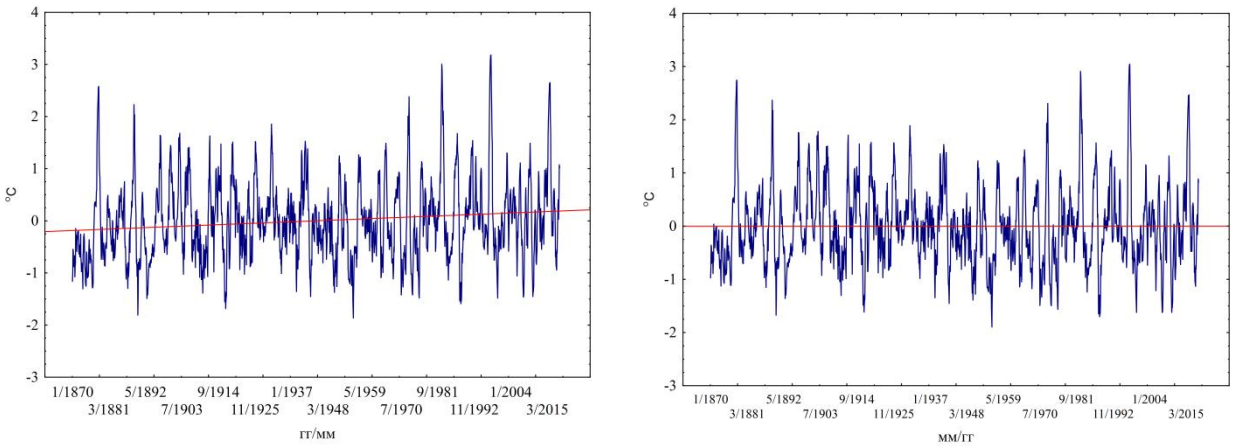


Рисунок 2.2.1.2 – Изменчивость аномалий ТПО (°С) в районе Nino3 по данным HadISST за период 1870-2018 гг. без исключения линейного тренда (а) и с исключением линейного тренда (б). Красной линией обозначен тренд ряда.

Кроме сезонного хода из всех анализируемых данных исключался линейный тренд:

$$dy = y - (ax + b), \qquad (2.2.1.11)$$

где y – последовательность анализируемых значений (например, среднемесячные изменения ТПО в конкретной точке или регионе); x – номер временного периода (месяца, года и т.д.); b – точка пересечения с осью y на графике; a – значение, на которое увеличивается следующее значение временного ряда. На рис. 2.2.1.2 пример исключения линейного тренда из аномалий ТПО в районе Nino3.

2.2.2. Метод выделения событий Ла-Нинья и их первичная классификация

Первоочередной задачей данной диссертационной работы являлось выделение событий Ла-Нинья на основании конкретного определения. Как отмечалось выше в главе 1, в издании [Catalogue of Indices … , 2006] есть перечень рабочих определений и индексов для Ла-Нинья (ЛН) и Эль-Ниньо (ЭН), предложенных 26 странами-членами ВМО. Однако там же отмечено, что право выбора критериев для выделения холодных и теплых эпизодов ЭНЮК остается за исследователем.

Ла-Нинья, по аналогии с Эль-Ниньо, характеризуют соответствующим индексом этих событий. Одним из таких индексов является широко используемый Nino3.4 [Trenberth, 1997; Петросянц, Гущина, 2002] который представляет собой среднемесячную аномалию ТПО в экваториальной зоне Тихого океана, с координатами 5°с.ш. – 5°ю.ш. и 170°з.д. и 120°з.д. По данным массивов HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 были рассчитаны индексы Nino3.4 для периода 1870–2019 гг. Полученные ряды осредненной среднемесячной ТПО по трем массивам были детрендированы и по ним рассчитаны естественные аномалии температуры поверхности океана (АТПО, °С) относительно всего исследуемого периода с исключением сезонной изменчивости.

Для выделения событий Ла-Нинья был выбран оптимальный критерий, примененный ранее в работе [Voskresenskaya, Marchukova, 2017], при котором пороговое значение составило -0,5°С, соответственно, а минимальное время существования аномалии (П) – 5 месяцев. Для событий Ла-Нинья критерий выглядит в виде условия (2.2.2.1):

$$\text{АТПО Nino3.4} \geq +0{,}5°\text{C}$$

$$\text{П} \geq 5 \text{ мес.} \qquad (2.2.2.1)$$

Начиная с 1900 г. выделенные события Эль-Ниньо и Ла-Нинья по массивам HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 сравнивались с данными Австралийскго метеобюро. 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 ЭН и ЛН. Австралийское метеобюро при определении экстремальной фазы ЭНЮК помимо ТПО, так же учитывают и индекс ЮК. Для периода, начиная с 1950 г., появляется дополнительная возможность сверять количество Эль-Ниньо и Ла-Нинья по данным официального сайта NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США).

Принимая во внимание современное понимание о том, что изучение Эль-Ниньо и Ла-Нинья следует проводить с учетом их классификации, в настоящей работе 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°с.ш – 5°ю.ш., 150°з.д. – 90°з.д.) и Nino4 (5°с.ш. – 5°ю.ш., 160°в.д. – 150°з.д.). Это самый простой метод классификации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, который был применен во многих работах [Yuan, Yan, 2013; Zhang et. al., 2014; Diamond, Bennartz, 2015; Yu,

Kim, 2013]. Суть метода [Yeh et al., 2009] заключается в том, что если в зимний период значение индекса в районе Nino3 больше по модулю, чем в районе Nino4, то тип Эль-Ниньо/Ла-Нинья определяется как ВТ, а если наоборот, – как ЦТ. Поскольку чаще всего максимальная фаза приходится с октября «0» года по январь «+1» для Эль-Ниньо и Ла-Нинья, в настоящей работе именно в этот период производилось сравнение индексов Nino3 и Nino4.

Классификация по методу [Yeh et al., 2009] не совершенна, потому что не отражает место возникновения аномалии ТПО и как эта аномалия перемещается относительно пространства. Поэтому для новой, более усовершенствованной классификации Ла-Нинья было выбрано применение математического метода – иерархической кластеризации.

2.2.3. Иерархический кластерный анализ

Для пространственной классификации событий Ла-Нинья был выбран *метод кластерного анализа*. Как правило, в теории математической классификации для этих целей выделяют три подхода: дискриминация (дискриминантный анализ), кластеризация (кластер-анализ), группировка [Орлов, 2004]. Задача кластерного анализа - выявление естественного разбиения на классы, свободного от субъективизма исследователя, а конечная цель – выделение групп однородных объектов, сходных между собой, при резком отличии этих групп друг от друга [Орлов, 2014]. Кластерный анализ позволяет рассматривать достаточно большой объем информации и резко сокращать, сжимать объемы информации, делать их компактными и наглядными [Буреева, 2007]. В настоящей работе используется один из видов кластерного анализа – иерархический, суть которого состоит в последовательном объединении или разделении больших кластеров на малые, мерой связи между которыми было выбрано Эвклидово расстояние [Voskresenskaya, Marchukova, 2017], определяемое по формуле:

$$d_{E_y} = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} \left(x_{ik} - x_{jk}\right)^2}, \qquad (2.2.3.1)$$

где x_{ik} и x_{jk} значения k-й переменной на i-м и j-м расстоянии, m – число характеристик.

Кроме этого, в настоящей работе использовался композитный анализ полученных типов Ла-Нинья. Как известно, *анализ композитов* основывается на выборе подмножеств данных, в которых ключевые моменты времени могут быть определены на основе определенных критериев [Laken, Calogovic, 2013]. В нашем случае выбраны осредненные максимальные по абсолютной величине отрицательные ежемесячные аномалии ТПО за период зрелой фазы (временной критерий композитов) события Ла-Нинья. *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 [Voskresenskaya, Marchukova, 2017].

2.2.4. Разложение на эмпирические ортогональные функции

Изучение закономерностей формирования Ла-Нинья относительно разных типов Эль-Ниньо осуществлялось с помощью разложения пространственно-временных полей аномалий ТПО в экваториальной части Тихого океана на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Метод анализа эмпирических ортогональных функций – разложение сигнала или набора данных с точки зрения ортогональных основных функций, которые определены от данных. Это тоже, что метод главных компонент, только ЭОФ анализ позволяет выявить пространственно-временные закономерности. В анализе ЭОФ проектируются исходные данные, аномалии ТПО, на ортогональной основе. Здесь главное правильно сформировать матрицу (объект-признак), по которой рассчитывается ковариционная матрица собственных векторов центрированных аномалий, что в дальнейшем обеспечивает получение процента дисперсионного вклада каждой моды.

Таким образом, была составлена матрица «объект–признак» $\{x_j^i\}$, где i = 1,…n – количество объектов, j = 1,…m – число признаков, описывающих данный объект.

В данном случае, n – это количество временных промежутков с 1900 по 2019 гг., при которых наблюдались события Ла-Нинья. Это 21 временной промежуток, включающий период в 2,5 года 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°с.ш. до 0,5°ю.ш. для экваториальной зоны Тихого океана в пределах от 150°в.д. до 80°з.д. (рис. 2.2.4.1). В одном временном промежутке 3990 значений ТПО. Получается матрица x_{3990}^{21}.

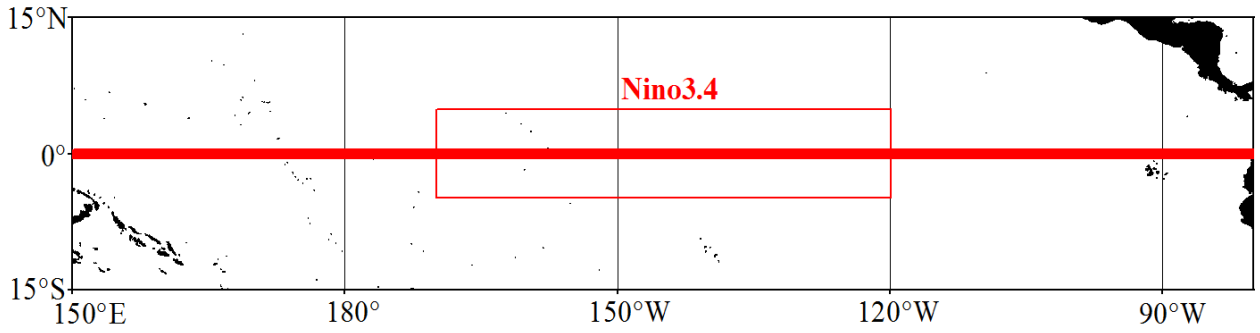


Рисунок 2.2.4.1 – Район осреднения аномалий ТПО для расчета долготно-временных диаграмм (толстая красная линия) и район Nino3.4, по которому выделялись события Ла-Нинья

Для полученной матрицы были рассчитаны три числовые характеристики:

1. $\{\bar{x}_j\}$ – вектор осредненных значений признаков, то есть среднее по выборке аномалий ТПО для определенного временного промежутка Ла-Нинья;
2. $\{D_j\}$ – вектор дисперсии значения признаков;
3. $covj', j''$ – матрица соответствующих ковариаций признаков.

Далее данные центрировались вычитанием среднего каждого столбца и нормировались делением на $\sqrt{D_j}$. Затем были получены безразмерные массивы данных, для которых $\bar{x}_j^*$ = 0 , а D_j^* = 1.

По собственным векторам ψ_j^k и собственным значениям λ_j полученных ковариационных матриц были определены сами эмпирические ортогональные функции и вклад k-ой полученной моды в полную дисперсию по формуле:

$$\left(\lambda_j / \sum_{k=1}^{M} \lambda_k\right) \cdot 100\%. \quad (2.2.4.1)$$

Набор мод представляет полную ортонормированную основу, по которой можно разложить каждый объект:

$$x_j = \sum_{k=1}^{M} a_k \psi_j^k, \quad (2.2.4.2)$$

где a_k – амплитуда k-ой ЭОФ/моды.

По сути, получились пространственно-временные диаграммы, или диаграммы Хомволлера [Hovmöller E., 1949], которые были разложены в ряды, сформирована матрица и рассчитаны ЭОФы.

Выводы к Главе 2

1. Сравнение трех основных глобальных массивов (ERSSTv5, HadISST и COBE SST2) реконструированных среднемесячных значений ТПО с 1870 по 2019 гг. показало тесную линейную связь между данными в районе экваториальной зоны Тихого океана с коэффициентами корреляции от 0,7 до 0,95 [Марчукова и др., 2020]. Среднеквадратические отклонения массивов HadISST и COBE SST2 относительно друг друга не превышают 0,4°C: это частично объясняется использованием при реконструкции данных некоторых аналогичных методов [Hirahara et al., 2014]. В отличие от тесной связи между HadISST и COBE SST2, ERSSTv5 отличается от них, так как среднеквадратические отклонения этого массива в районах Nino3 и Nino4 в среднем равны 0,7°C.

2. По результатам верификации реконструированных массивов ТПО с реальными данными показано, что в COBE SST2 были незначительно лучше усвоены данные буев проекта TOGA-TAO. Сравнивая анализируемые массивы со спутниковыми данными Terra (MODIS), которые не усваивались ни в одной из реконструкций, COBE SST2 показал несколько лучшую воспроизводимость изменчивости аномалий ТПО за период 2001–2019, в сравнении с другими

массивами. Однако массив HadISST имеет наименьшие среднеквадратические отклонения от спутниковых данных Terra (MODIS) и данных проекта NOAA IO SST v2.

3. В качестве основного метода классификации Ла-Нинья обоснованно выбран иерархический кластерный анализ. Для исследования повторяемости и закономерности возникновения событий Ла-Нинья относительно Эль-Ниньо подходит метод разложения на Эмпирические ортогональные функции пространственно-временных полей ТПО в экваториальной зоне Тихого океана.

Таким образом, качество массивов ERSSTv5, HadISST и COBE SST2 указывает на безусловную возможность использования таких данных для вполне достоверных оценок крупномасштабных низкочастотных процессов.

Доступные в настоящее время глобальные и региональные массивы данных, а также предложенные методы позволяют анализировать низкочастотную изменчивость в системе океан-атмосфера, а также ее региональные проявления на межгодовом и десятилетних масштабах.

Результаты настоящей главы опубликованы в работах: Марчукова и Воскресенская [2017], Марчукова и др. [2020], Marchukova et al. [2020].

ГЛАВА 3. КЛАССИФИКАЦИЯ СОБЫТИЙ ЛА-НИНЬЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

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 гидрометео характеристик в системе океан-атмосфера по всему экваториально-тихоокеанскому району.

3.1. 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. 3.1.1). Если выполнить все эти процедуры фильтрации, среднее значение ($\overline{\boldsymbol{x}}$) 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 (°C).

Таблица 3.1.1 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*	*Nino 1+2*	*Nino3*	*Nino4*	*Nino3.4*	*Nino 1+2*	*Nino3*	*Nino4*	*Nino3.4*	*Nino 1+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^2	**1,4**	0,3	0,7	5,3	**1,4**	0,4	0,8	4,9	**1,4**	0,4	0,9	4,6
σ, °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

На основании данных в таблице 3.1.1 можно сказать, что все выборки однородны, так как коэффициент вариации (C) 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. Массив ERSSTv5 имеет несколько большую дисперсию индекса Nino4 (D=0,89°C^2) по сравнению с массивами HadISST (D=0,74°C^2) и COBE SST2 (D=0,79°C^2), а массив HadISST отличается большей дисперсией (D=5,30°C^2) и большим значением СКО (σ=2,30°C) в районе Nino1+2, чем по массивам ERSSTv5 (D=4,55°C^2, σ=2,13°C) и COBE SST2 (D=4,86°C^2, σ=2,20°C). Максимальные температуры характерны для района Nino4 (~30,2°C), где проходит 180° меридиан (линия смены дат), а минимальные – для района Nino1+2 (~18,2°C) – это район образования северной части Перуанского аппвелинга [Kämpf, Chapman, 2016].

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. 3.1.1). Далее уже проанализируем ЭФР Nino3 и Nino4 (рис. 3.1.2) – это индексы, необходимые для первичной классификации Ла-Нинья по методу [Yeh et al., 2009].

Приведенные на рисунке 3.1.1 кривые подтверждают, что распределения ЭФР соответствуют нормальному закону распределения только в районе Nino3.4 массивов HadISST и COBE SST2, так как статистический критерий χ^2 меньше, чем критический $\chi^2_{кр}$ [20,2 < 22,4 (рис. 3.1.1, а) и 18,6 < 22,4 (рис. 3.1.1, 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. 3 (а), 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 χ^2 больше, чем критический $\chi^2_{кр}$ [31,6 > 22,4 (рис. 3.1.1, д)]. Гистограмма этой выборки имеет два пика (рис. 3.1.1, 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. 3.1.1, 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, обусловливающих резкое

изменение ТПО, – это интенсификация и ослабление перуанского апвеллинга [Kämpf, Chapman, 2016; Марчукова и др., 2020].

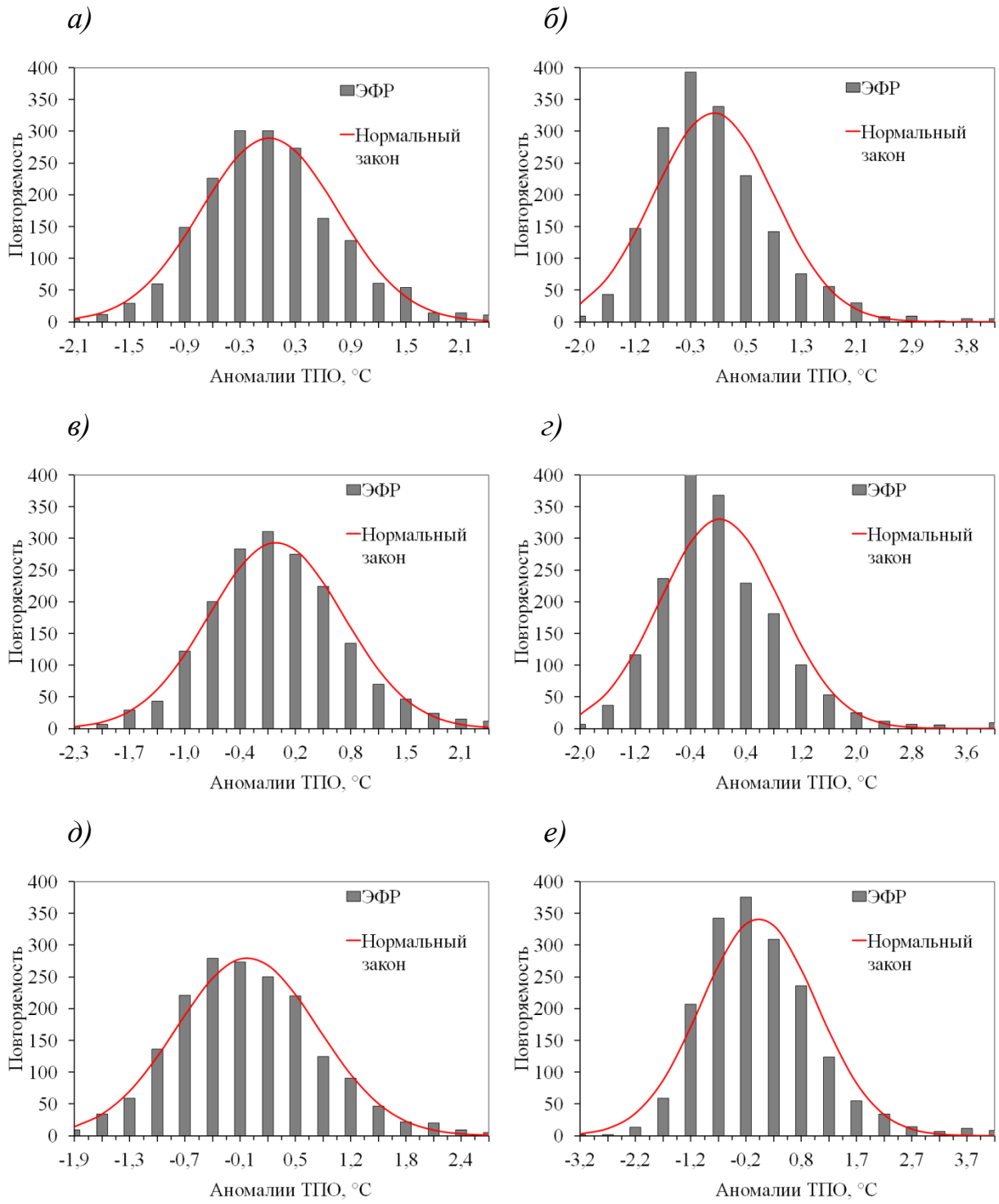


Рисунок 3.1.1 – Эмпирическая функция и соответствующий ей нормальный закон распределения аномалий ТПО с 1870 по 2019 гг. (с исключенными эффектом глобального потепления и сезонной изменчивости) в районе Nino3.4 по массивам HadISST (а), COBE SST2 (в) и ERSSTv5 (д) и в районе Nino1+2 по массивам HadISST (б), COBE SST2 (г) и ERSSTv5 (е)

Приведенные на на рисунке 3.1.2 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 χ^2 немного больше, чем критический $\chi^2_{кр}$ [25,1 > 22,4 (рис. 3.1.2, а) и 35,8 > 22,4 (рис. 3.1.2, в)]. В случае с ERSSTv5 статистический критерий χ^2 индекса Nino4 намного больше критического $\chi^2_{кр}$[299,5 > 22,4 (рис. 3.1.2, 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 χ^2 (474,5) по сравнению с COBE SST2 (320,5) и ERSSTv5 (410,9), а повторяемость аномалий ТПО смещена в сторону положительных значений (рис. 3.1.2, б). Отсюда можно предположить, что по данным HadISST и методу [Yeh et al., 2009] будет выделено больше Эль-Ниньо ВТ 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° с. ш. – 5° ю. ш. и 170° з. д. и 120° 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°C/10 лет. Наименьший вклад – у массива HadISST (1,8%, Tr=0,02°C/10 лет). В массиве COBE SST2 вклад линейного тренда составил 4,9% (Tr=0,04°C/10 лет). Все это особенности реконструкций данных каждого массива в отдельности, подробно описанные в главе 2 и которые необходимо учитывать при дальнейшем анализе.

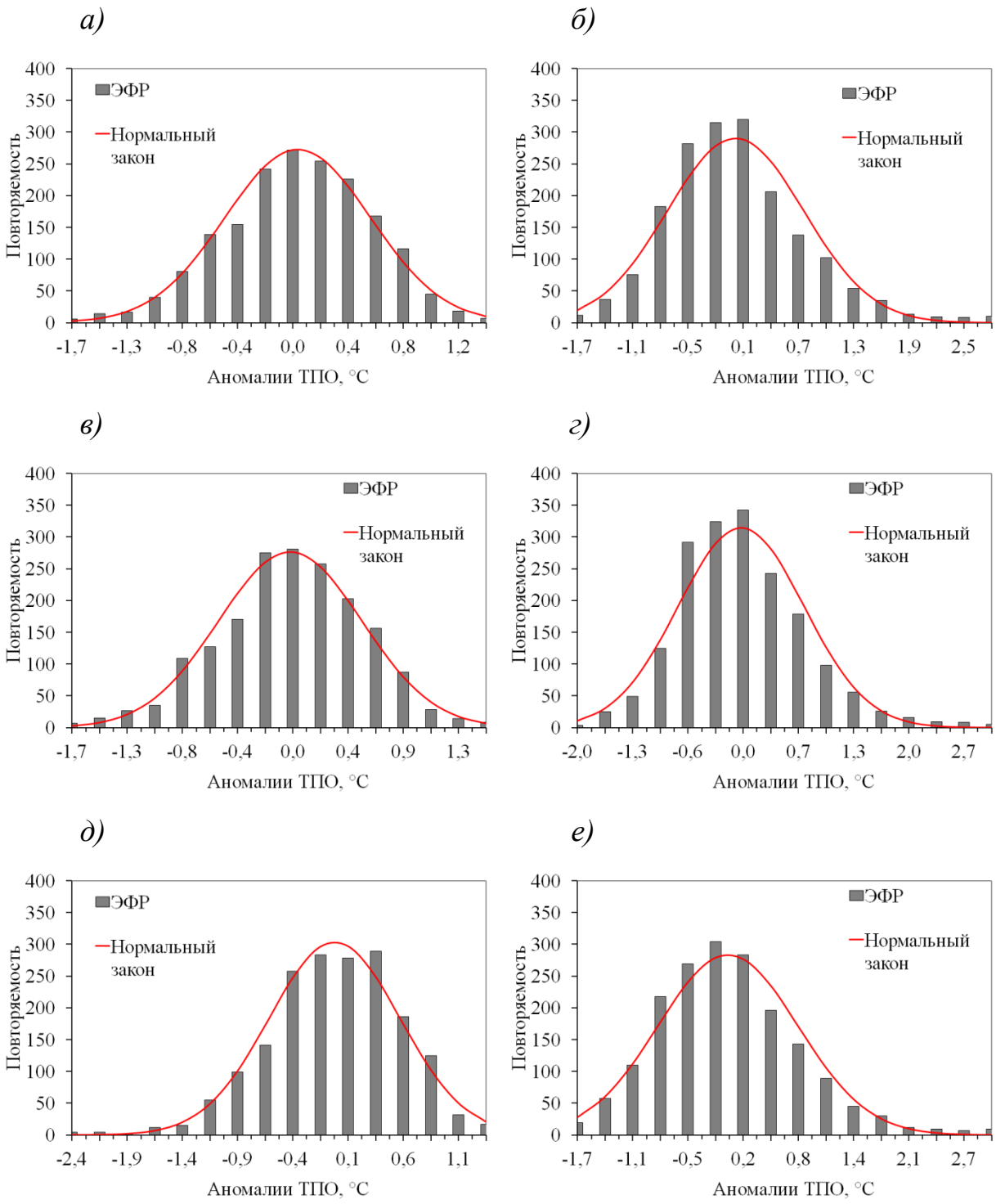


Рисунок 3.1.2 – Эмпирическая функция и соответствующий ей нормальный закон распределения аномалий ТПО с 1870 по 2019 гг. (с исключенными эффектом глобального потепления и сезонной изменчивости) в районе Nino4 по массивам HadISST (а), COBE SST2 (в) и ERSSTv5 (д) и в районе Nino3 по массивам HadISST (б), COBE SST2 (г) и ERSSTv5 (е)

Таким образом, с использованием оптимального критерия формулы (2.2.2.2) 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. 3.1.3). Вклад ЛН по данным HadISST в общую дисперсионную изменчивость аномалий ТПО в районе Nino3.4 составил 20,3% (рис. 3.1.3, а), по COBE SST2 – 24,1% (рис. 3.1.3, б), по ERSSTv5 – 18,5% (рис. 3.1.3, в).

Для каждого выделенного события были рассчитаны продолжительность (П, в месяцах), интенсивность (И, в °С) 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 третьем – 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. Более подробно с каждым выделенным Ла-Нинья по трем реконструированным массивам данных ТПО можно ознакомиться в

приложении А, где также есть круговые диаграммы процентного соотношения периодов максимальных фаз развития.

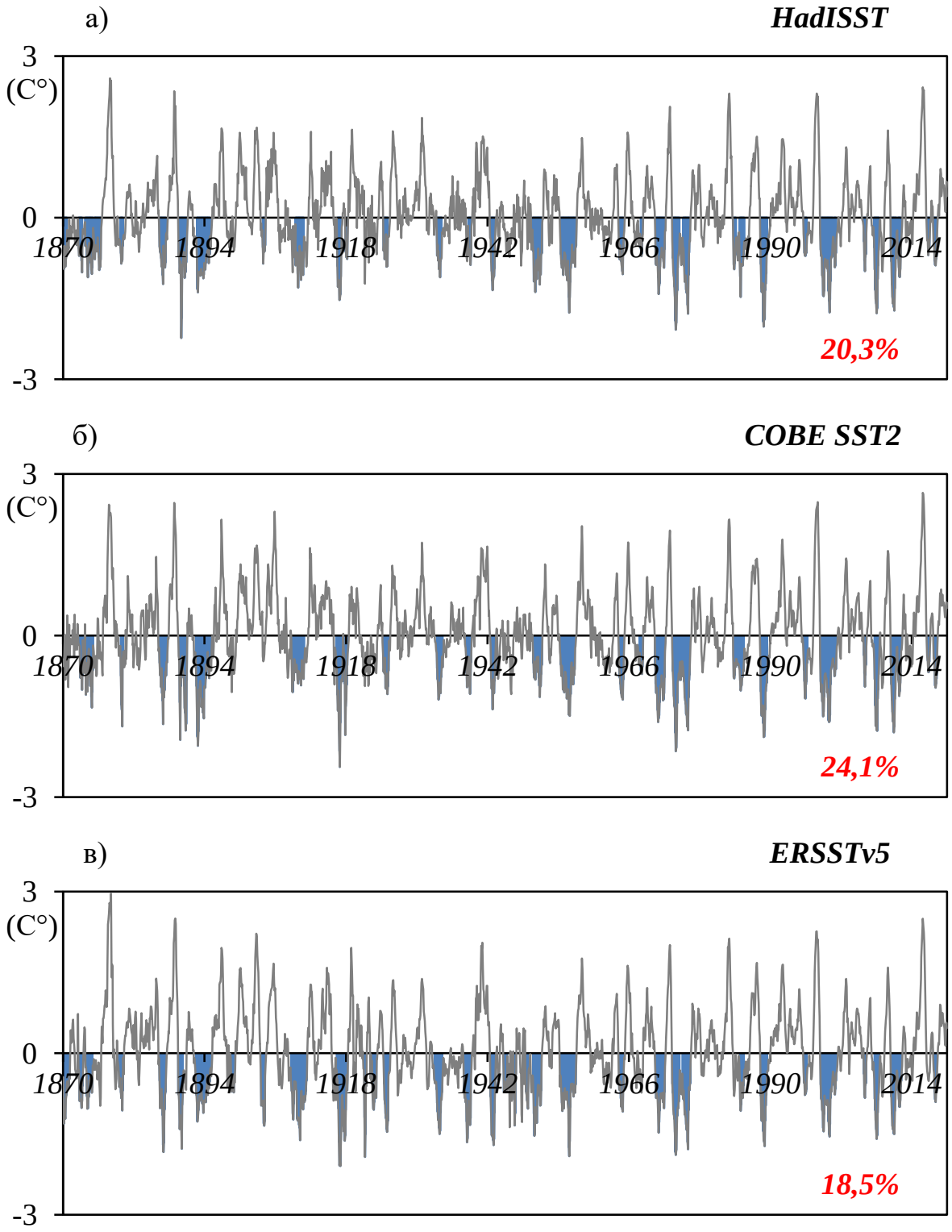


Рисунок 3.1.3 – Изменчивость индекса Nino3.4 с 1870 по 2019 гг. (серая линия) по трем массивам реконструированных данных ТПО и выделенные события Ла-Нинья (голубая гистограмма). Красными цифрами отмечен дисперсионный вклад событий Ла-Нинья

Средняя интенсивность всех событий Ла-Нинья по HadISST составила –1,27°С, а средняя продолжительность – 12 месяцев. Самые долгоживущие событие фиксируется с 1954 по 1957 гг. (П=32 мес.) и с 1998 по 2001 гг. (П=30 мес.). Самые интенсивные события приходятся на 1889-1990 гг. (И= –2,24°С), 1973-1974 гг. (И= –2,08°С), 1988-1989 (И= –2,03°С).

По данным COBE SST2 средняя интенсивность всех событий Ла-Нинья равна –1,37°С, а средняя продолжительность – 12 месяцев. Максимально-продолжительные события приходятся с 1973 по 1976 гг. (П=35 мес.) и с 1998 по 2001 гг. (П=30 мес.). Самые интенсивные события, порог отрицательных аномалий которых превышает минус два градуса, фиксируются в 1892-1894 гг. (И= –2,05°С), в 1916-1917 гг. (И= –2,44°С) и в 1973-1976 гг. (И= –2,15°С), где одно из самых продолжительных событий совпадает с максимально-интенсивным.

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

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. 3.1.3). 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.

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 and Beecham, 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. 3.1.3). 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, 11938-1939 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. 3.1.3).

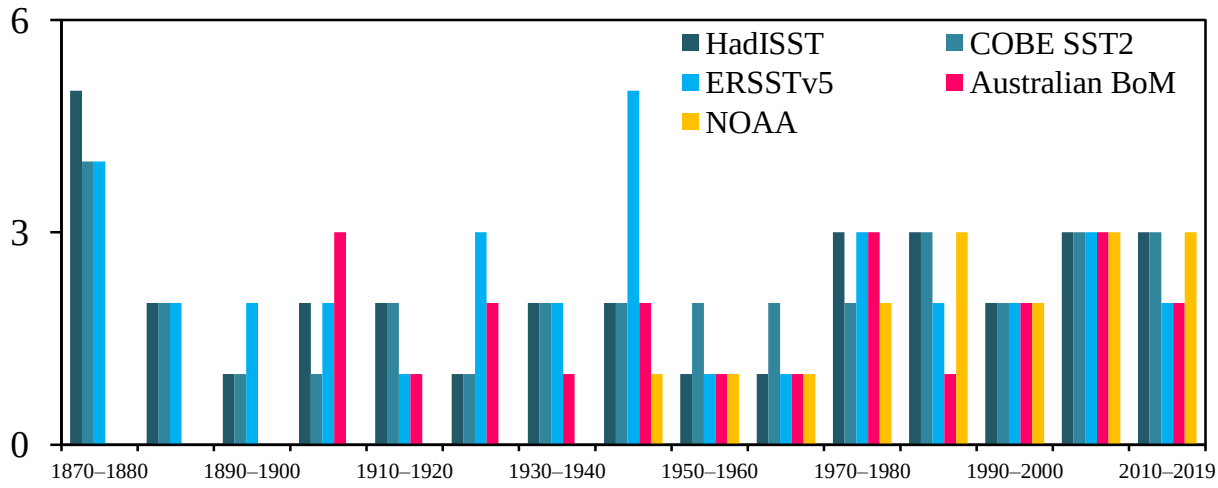


Рисунок 3.1.3 – Гистограмма сравнения количества выделенных событий Ла-Нинья с 1870 по 2019 гг. по трём реконструированным данным ТПО (HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5) с данными Австралийского метеобюро (BoM) и Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA)

Начиная с 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/ensostuff/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. 3.1.3). 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 отсутствуют 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. 3.1.3). 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].

3.2. 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°с.ш – 5°ю.ш., 150°з.д. – 90°з.д.) и Nino4 (5°с.ш. – 5°ю.ш., 160°в.д. – 150°з.д.). Это самый простой 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. 3.2.1), 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. 3.2.1, б), а по ERSSTv5 – на одно событий ЛН ВТ меньше, чем по двум другим (рис. 3.2.1, 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. 3.2.1, а). Это явление 1898 г., которое является слабым (И=-0,73°С) и не продолжительным (П=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. 3.2.1).

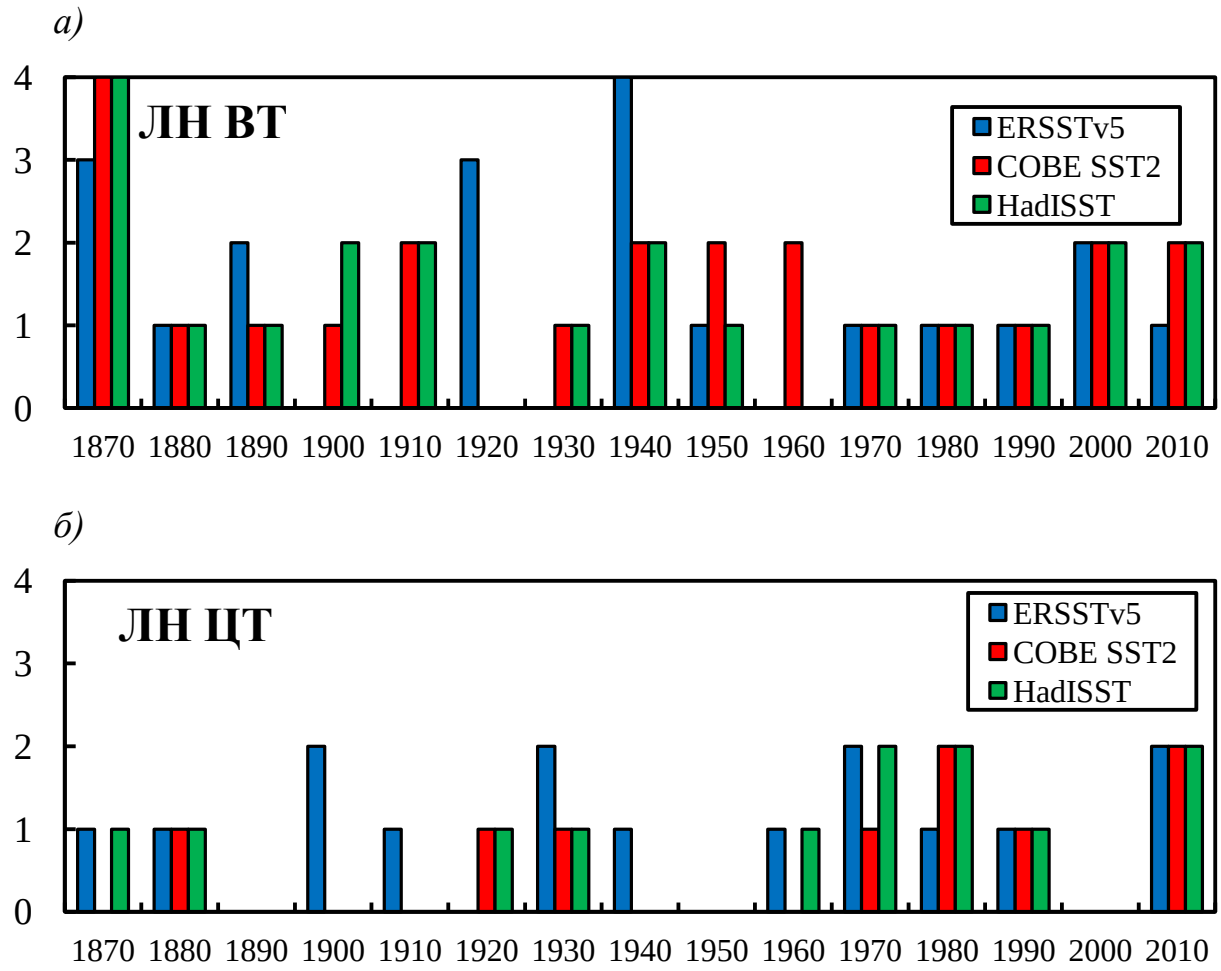


Рисунок 3.2.1 – Гистограмма количества повторений событий Ла-Нинья ВТ (в) и ЦТ (б) типов по десятилетиям с 1870 по 2019 гг.

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.

1940–1950 гг. По COBE SST2 выделяется на одно событие ЛН ВТ больше (рис. 3.2.1, 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. 3.2.1, а), а по HadISST и ERSSTv5 – к ЦТ типу (рис. 3.2.1, 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. 3.2.1, 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. 3.2.1, б).

1990–2000 гг. Расхождений между тремя массивами не наблюдается, как по типам, так и по количеству ЛН (рис. 3.2.1).

2000–2010 гг. Разногласия отсутствуют (рис. 3.2.1,).

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. 3.2.1). 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. 3.2.2). 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).

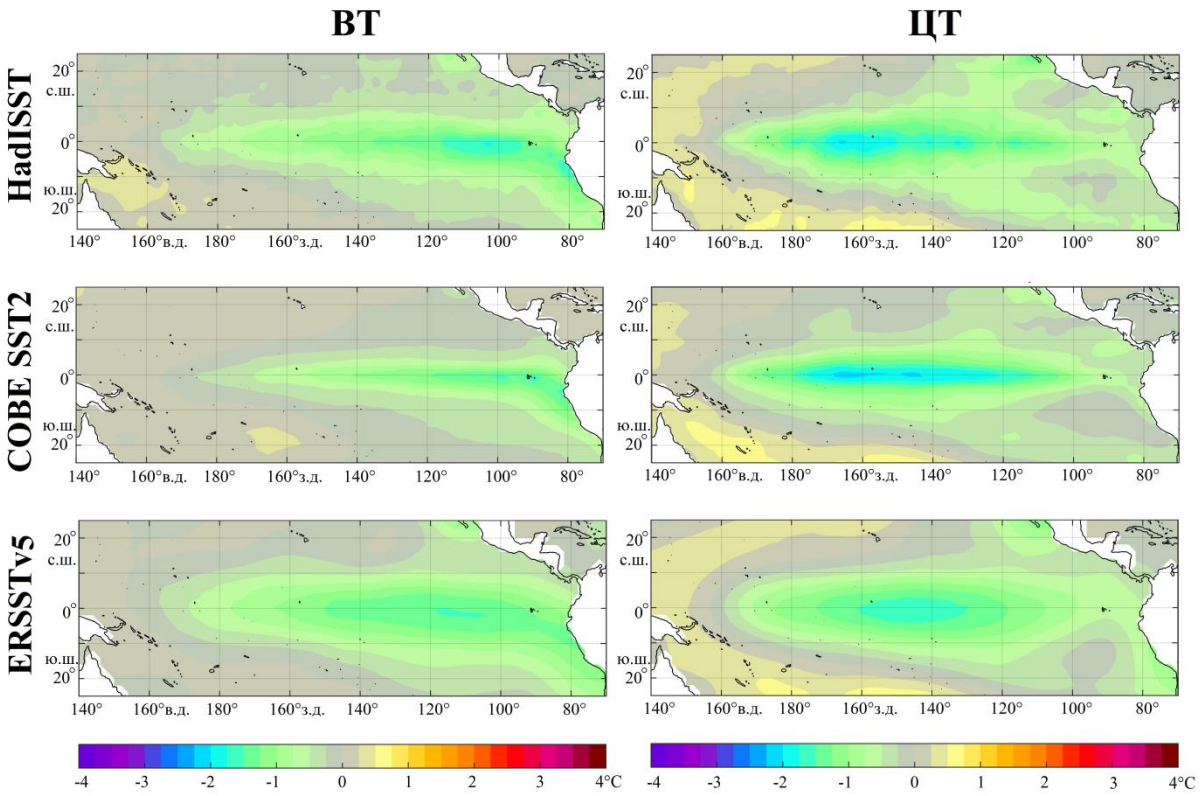


Рисунок 3.2.2 – Воспроизведение фазы максимального развития (нояб.-янв.) двух типов Ла-Нинья по разным реконструированным данным ТПО

В целом, зрелая фаза для Ла-Нинья по всем трем массивам воспроизводится хорошо (рис. 3.2.2). 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.

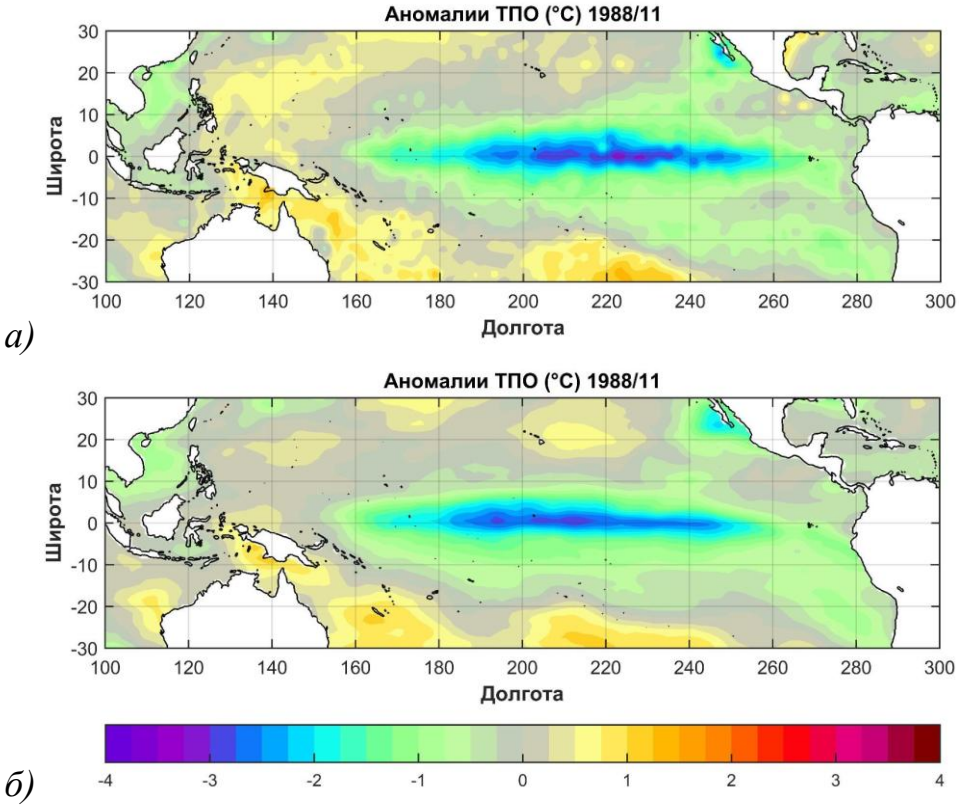


Рисунок 3.2.3 – Аномалии ТПО в экваториальной зоне Тихого океана в ноябре 1988 г. по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

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°с.ш. и 30°ю.ш., 100°в.д. и 60°з.д. Визуальный анализ необходим был для того, чтобы сравнить соответствие метода [Yeh et al., 2009] разделения на ВТ и ЦТ 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. 3.2.3, а) и COBE SST2 (рис. 3.2.3, б) при сравнивании индексов Nino3 и Nino4 относится к ВТ 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. 3.2.3). 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].

Подводя итоги по разделу 3.2., важно отметить, что ERSSTv5 в 1940-ые вдвое завышает количество ВТ типов Ла-Нинья 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.

3.3. 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 3.2 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° в.д. до 80°з.д.) и имел ограничения от 15°с.ш. до 15°ю.ш.

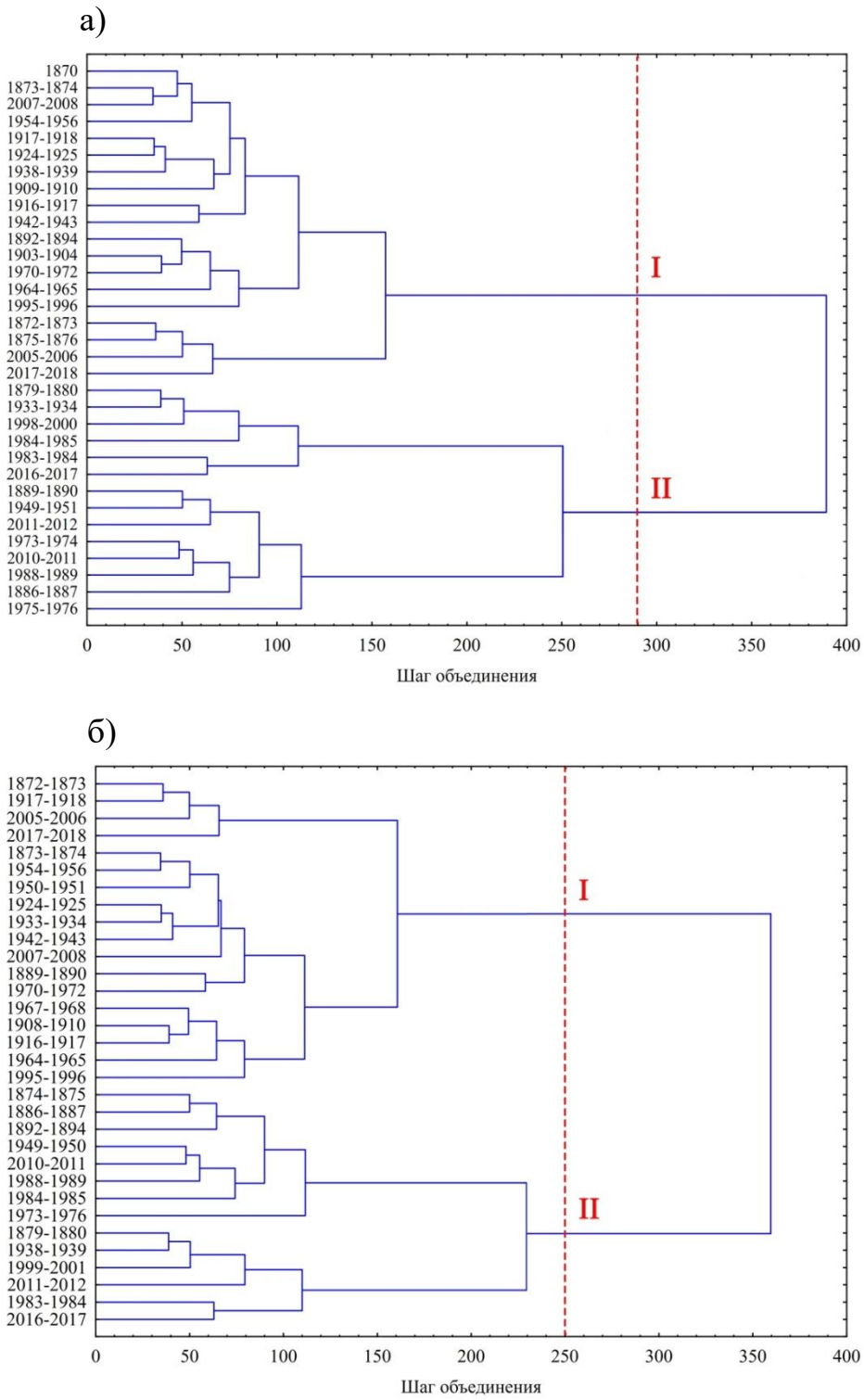


Рисунок 3.3.1 – Классификация событий Ла-Нинья в период с 1870 по 2019 гг. кластерным анализом по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

Таким образом, иерархический кластерный анализ по двум массивам данных, HadISST и COBE SST2, показал наличие двух кластеров, результат которого представлен в виде дендограммы рисунка 3.3.1. 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. 3.3.1).

В первый кластер по массиву HadISST вошло 19 холодных эпизодов ЭНЮК (рис. 3.3.1, а), а по COBE SST2 – 18 (рис. 3.3.1, 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. 3.3.1, а), а по COBE SST2 еще раньше – на 250 (рис. 3.3.1, 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 3.2.2 с помощью метода композитного анализа.

Композиты демонстрируют области формирования аномалий для ЦТ (рис. 3.3.2, б и г) и ВТ (рис. 3.3.2, 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 3.2.2.

Обобщенные характеристики всех событий Ла-Нинья первого и второго типов приведены в таблицах 3.3.1 и 3.3.2 по данным HadISST и COBE SST2 соответственно. Для каждого события были рассчитаны продолжительность (П, в месяцах), интенсивность (И, в °С), 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. 3.3.1) составила 12 месяцев; средняя интенсивность – примерно -1,46°С, а максимальная – -2,24°С (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. 3.3.2) составила 14 месяцев; средняя интенсивность – -1,41°С, а максимальная – -2,15°С (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. 3.3.2).

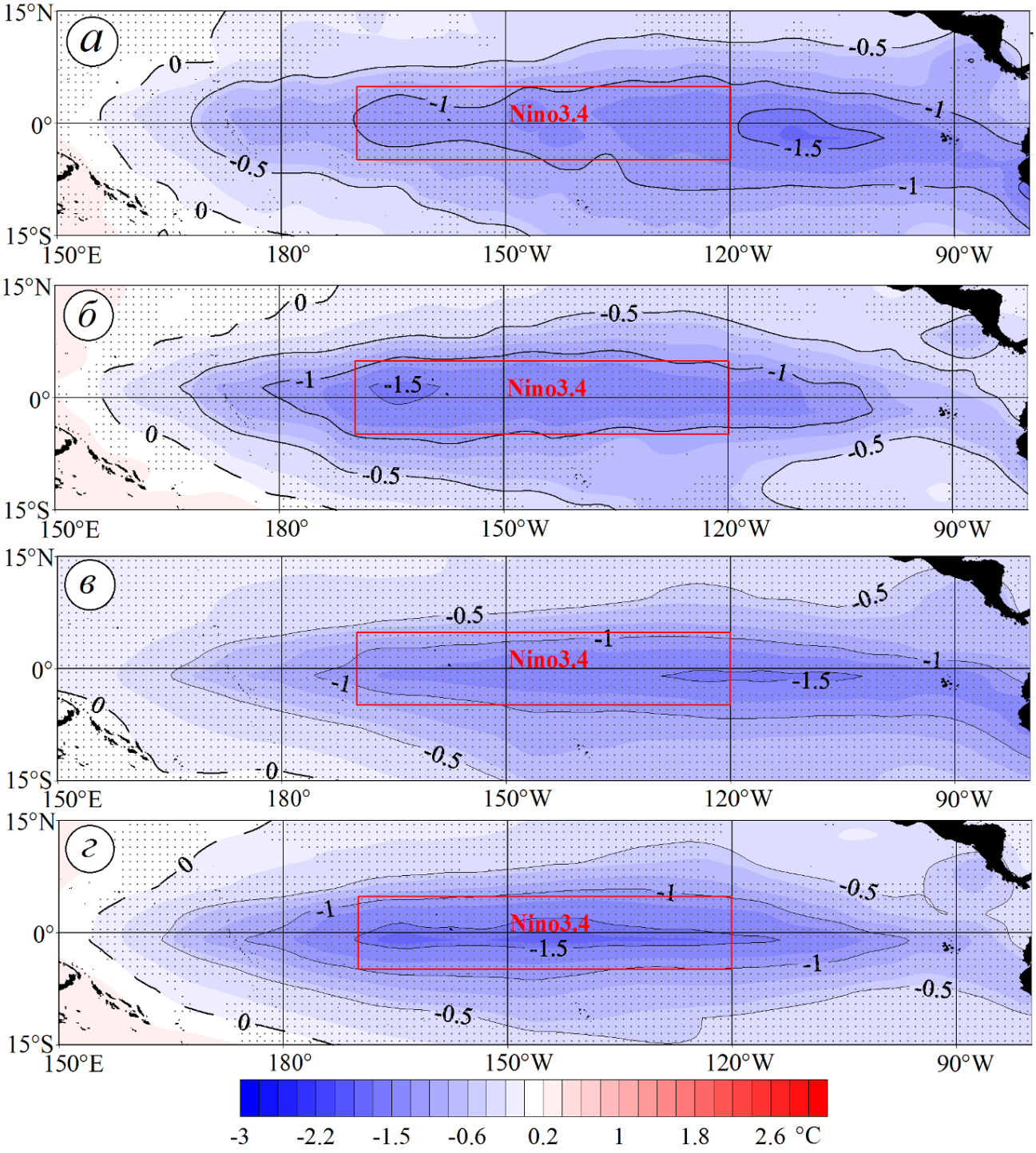


Рисунок 3.3.2 – композиты пространственного распределения аномалий ТПО по данным HadISST (а, б) и COBE SST2 (в, г) во время зрелой фазы, относительно периода 1870-2019 гг., для Центрально-Тихоокеанского типа (б, г) и Восточно-Тихоокеанского (а, в) типов Ла-Нинья. Мелкими точками обозначена 95% статистическая значимость

Таблица 3.3.1 – События Ла–Нинья с 1870 по 2019 гг. по данным HadISST

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±0,08	нояб–янв	1,16
	1886–1887	13	–1,23±0,08	окт–дек	1,8
	1889–1890	17	–2,24±0,08	дек–фев	1,51
	1933–1934	10	–1,11±0,06	окт–дек	0,81
	1949–1951	19	–1,38±0,07	дек–фев	3,06
	1973–1974	14	–2,08±0,08	нояб–янв	2,85
	1975–1976	13	–1,78±0,08	нояб–янв	2,15
	1983–1984	5	–0,96±0,08	окт–дек	0,91
	1984–1985	10	–1,47±0,07	нояб–янв	1,42
	1988–1989	14	–2,03±0,07	окт–дек	2,18
	1998–2001	30	–1,76±0,08	дек–фев	2,1
	2010–2011	12	–1,73±0,08	дек–фев	2,44
	2011–2012	7	–1,10±0,08	нояб–янв	2,45
	2016–2017	4	–0,69±0,07	нояб–янв	1,28
Восточно–Тихоокеанский тип	1870	8	–0,95±0,06	май–июл	1,06
	1872–1873	8	–1,02±0,07	янв–мар	1,14
	1873–1875	16	–1,11±0,08	окт–дек	2,19
	1875–1876	14	–0,97±0,06	фев–апр	2,57
	1892–1894	27	–1,38±0,07	окт–дек	2,35
	1903–1904	6	–0,85±0,07	дек–фев	2,15
	1909–1910	17	–1,30±0,08	окт–дек	1,66
	1916–1917	9	–1,53±0,08	нояб–янв	2,49
	1917–1918	5	–0,77±0,08	янв–мар	1,57
	1924–1925	9	–0,91±0,08	нояб–янв	1,19
	1938–1939	6	–0,88±0,08	янв–мар	2,01
	1942–1943	8	–1,35±0,08	окт–дек	1,42
	1954–1957	32	–1,77±0,08	окт–дек	1,92
	1964–1965	9	–1,05±0,08	окт–дек	1,78
	1970–1972	19	–1,42±0,08	янв–мар	2,58
	1995–1996	5	–0,71±0,07	окт–дек	0,82
	2005–2006	5	–0,99±0,08	дек–фев	1,32
	2007–2008	10	–1,77±0,08	дек–фев	2,05
	2017–2018	7	–0,89±0,07	нояб–янв	1,03

Таблица 3.3.2 – 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±0,08	окт–дек	2,19
	1879–1880	5	–1,69±0,06	нояб–янв	1,8
	1886–1887	16	–1,64±0,06	окт–дек	1,51
	1892–1894	29	–2,05±0,07	окт–дек	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 П=32 мес. (1954-1956 гг.) и 27 мес. (1892-1894 гг.), а так же короткие, со значением П=5 мес. (1995-1996, 2005-2006 гг.), т.е., порогом критерия выделения данных событий (табл. 3.3.1). Аналогично по данным COBE SST2 (табл. 3.3.2). Однако совсем не означает, что данные холодные эпизоды цикла ЭНЮК длились недолгого. Как отмечалось выше, Ла-Нинья в данной работе определялись по критериям центрального района *Nino*3.4, 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°С 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 3.3.2 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 атмосфера-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.

3.4. 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. 3.4.1). 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. 3.4.1). Однако это до конца не объясняет физические особенности образования двух типов Ла-Нинья.

Таблица 3.4.1 – 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

На рисунке 3.4.2 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.

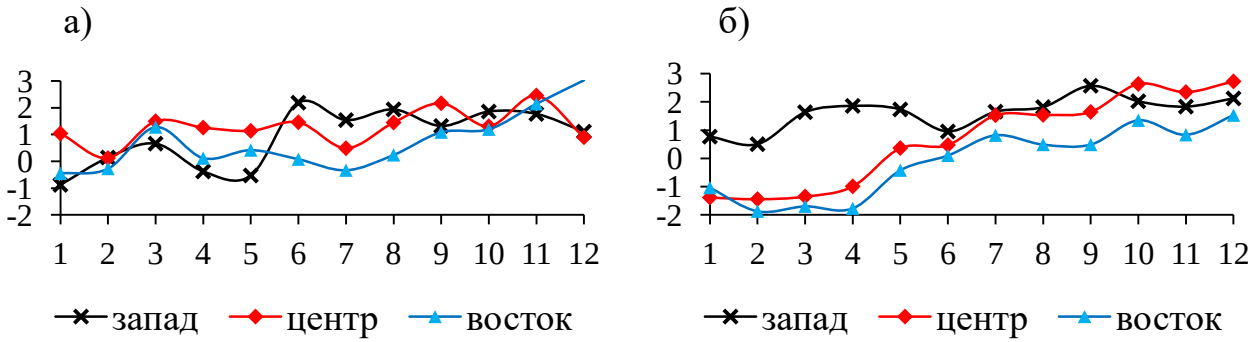


Рисунок 3.4.1 – Композиты изменения индексов Пассатных ветров в «0 год» для трех событий Ла-Нинья ВТ типа (а) и для восьми событий Ла-Нинья ЦТ (б).

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^3 до 0,6 мг/м^3 (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 3.4.3 (а, в, д) хорошо видно, что термоклин в центрально-экваториальной зоне Тихого океана более приподнят наверх (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. 3.4.3, 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^3 в центрально-экваториальной части Тихого океана в летний период (рис. 3.4.4). Это еще раз доказывает, что физическим объяснением образования Центрально-Тихоокеанского типа Ла-Нинья является заблаговременное формирование центрально-экваториального апвеллинга.

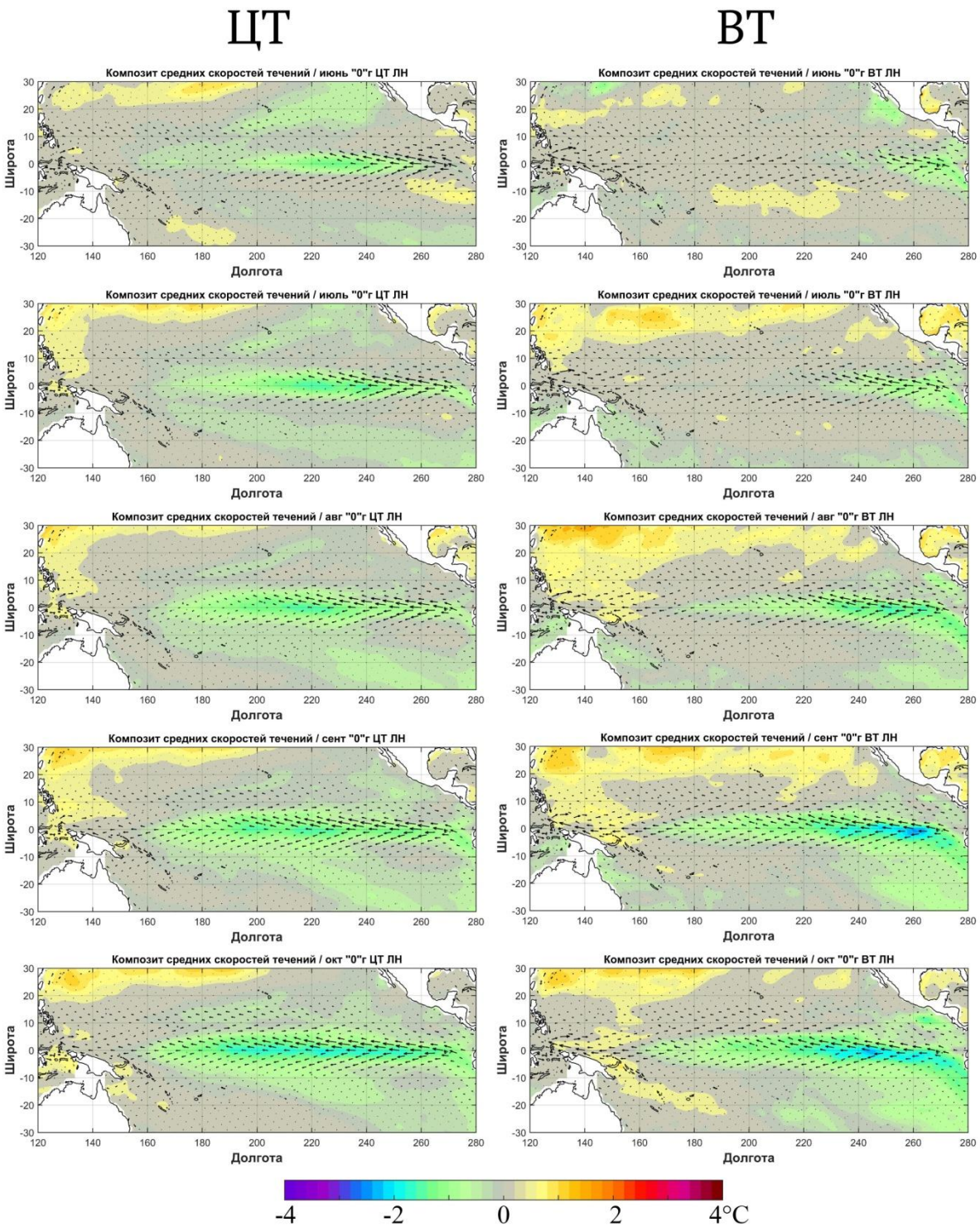


Рисунок 3.4.2 – Композиты среднемесячных значений скорости и направления течений на глубине 5 м и аномалии ТПО для 9 событий ЛН ЦТ типа и 4 ВТ ЛН типа по данным реанализа NCEP GODAS с 1980 по 2019 гг.

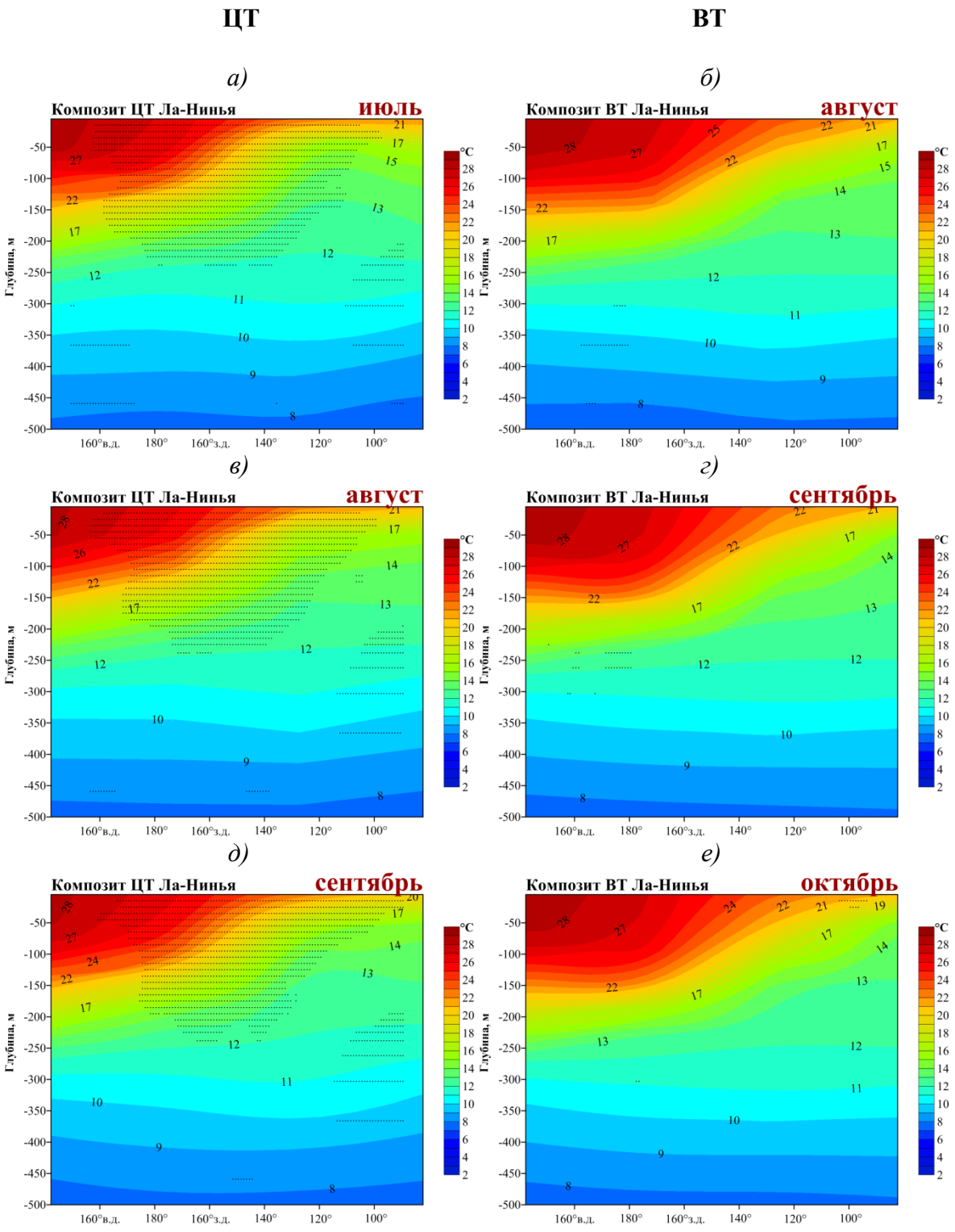


Рисунок 3.4.3 – Композиты изменения среднемесячной температуры по глубине на разрезе на экваторе (0°) от 150°в.д. до 90°з.д. по данным океанического реанализа NCEP/GODAS для ВТ (4 события) и ЦТ (8 событий) типов Ла-Нинья. Точками обозначена статистическая значимость на 95% уровне

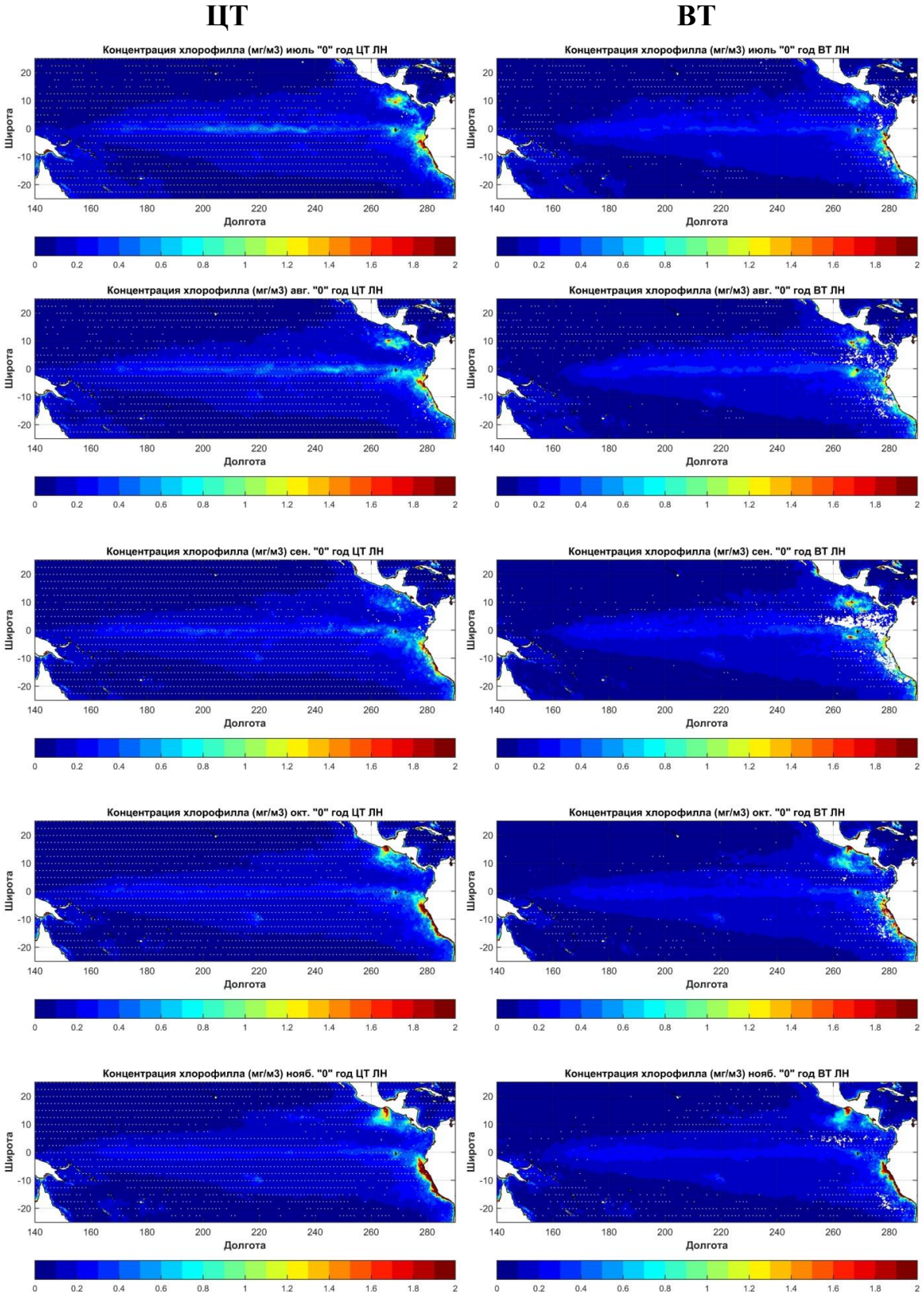


Рисунок 3.4.4 – Композиты пространственного изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла по спутниковым данным проекта GLOB COLOR для ВТ (3 события) и ЦТ (5 событий) типов Ла-Нинья. Белыми точками обозначена статистическая значимость на 95% уровне

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^3 до 0,8 мг/м^3), а термоклин в экваториальной зоне между 170°–100° з.д. поднимается до глубины 50 м. Этот центрально-экваториальный апвеллинг обусловливает 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 аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией Пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана.

3.5. 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,…N – количество объектов, j=1,…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°с.ш. до 0,5°ю.ш. для экваториальной зоны Тихого океана в пределах 150°в.д.–80°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. 3.5.1).

Из литературы известно, что природа формирования событий Ла-Нинья не симметрична 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. 3.5.1) были разложены на ЭОФ.

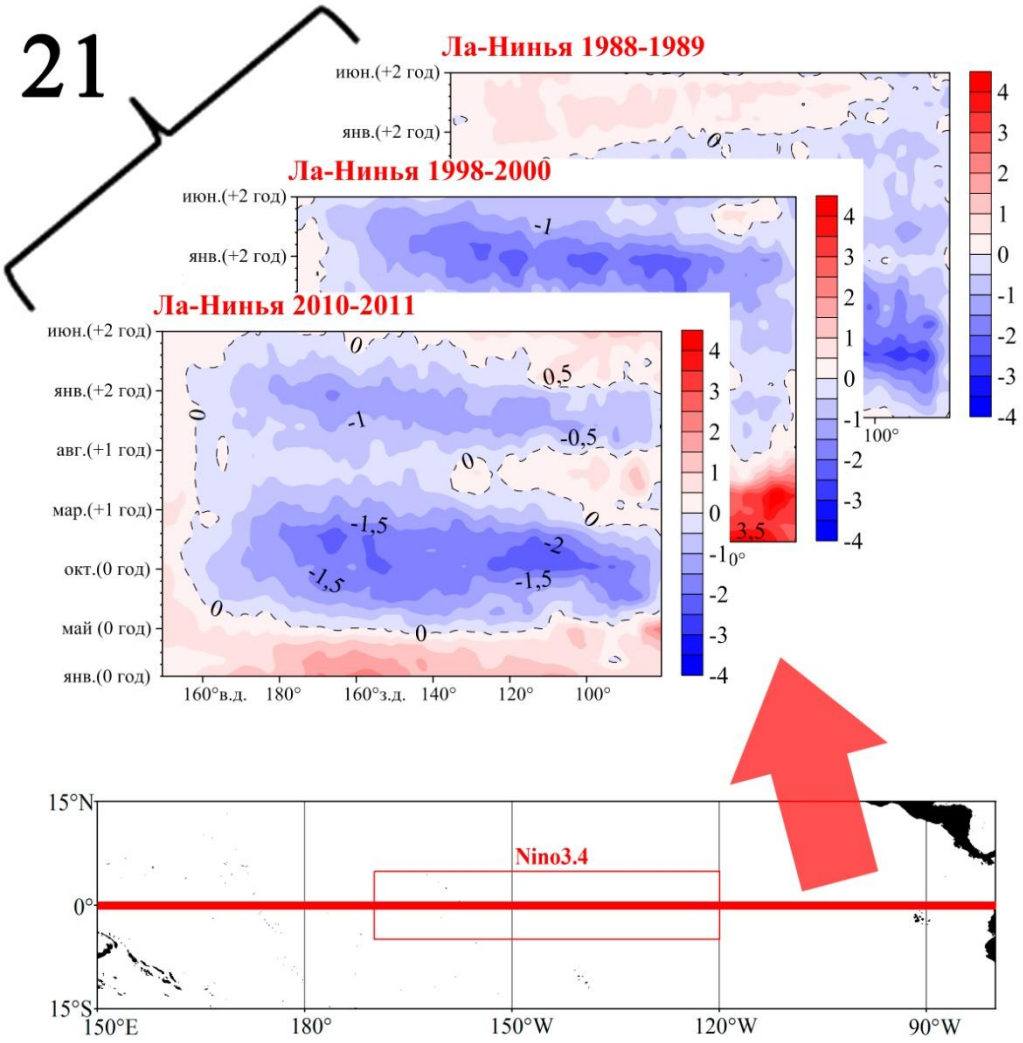


Рисунок 3.5.1 – Схема получения 2,5-летних долготно-временных диаграмм аномалий ТПО для ЭОФ анализа закономерностей формирования Ла-Нинья в экваториальной зоне Тихого океана. Красной жирной линией отмечен район осреднения аномалий ТПО по долготе

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. 3.5.1). Рассмотрим суммарную амплитуду каждой из трех полученных мод в 21 временной промежуток по 2,5 года, когда наблюдались события Ла-Нинья. На рисунке 3.5.2 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 3.5.1 – 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

Первый ЭОФ составила 43,6% по HadISST и 45,6% по COBE SST2. На рисунке 3.5.3 (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. Также на рисунке 3.5.3 (а, в) видно, что ровно через год возникает второй 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 первый ЭОФ демонстрирует два последовательных Ла-Нинья, которые возникают после сильного канонического Эль-Ниньо. То есть, после интенсивного Эль-Ниньо обычно возникает 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 ассиметричны друг к другу, подтверждая работы [Larkin, Harrison, 2002; Okumura et al., 2010; Hu et al., 2017].

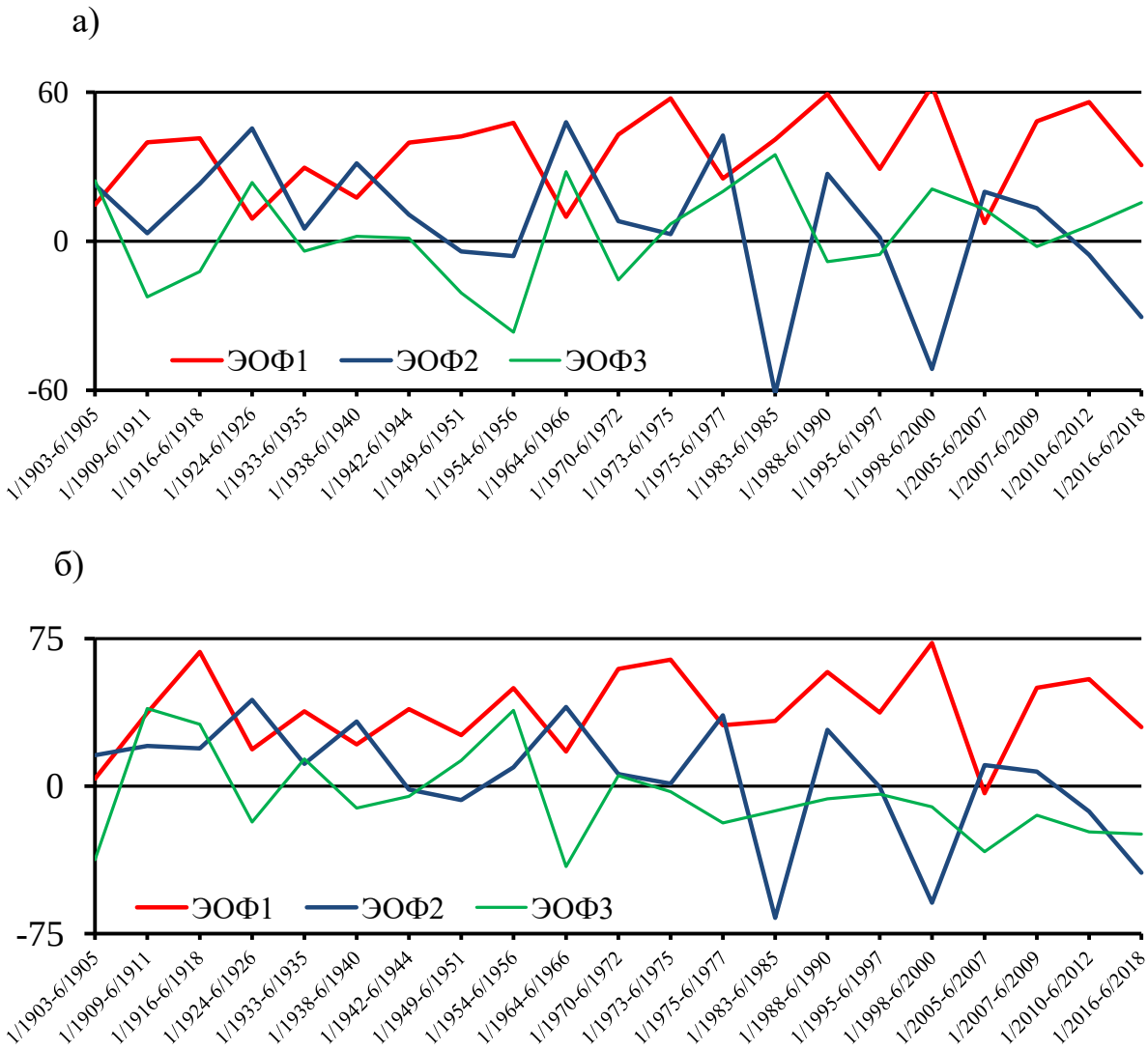


Рисунок 3.5.2 – Суммарные амплитуды трех полученных мод в 2,5-летние периоды, когда наблюдались одно или два события Ла-Нинья, по данным HadISST (а) и COBE SST2 (б)

Второй ЭОФ составил 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 второго 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.

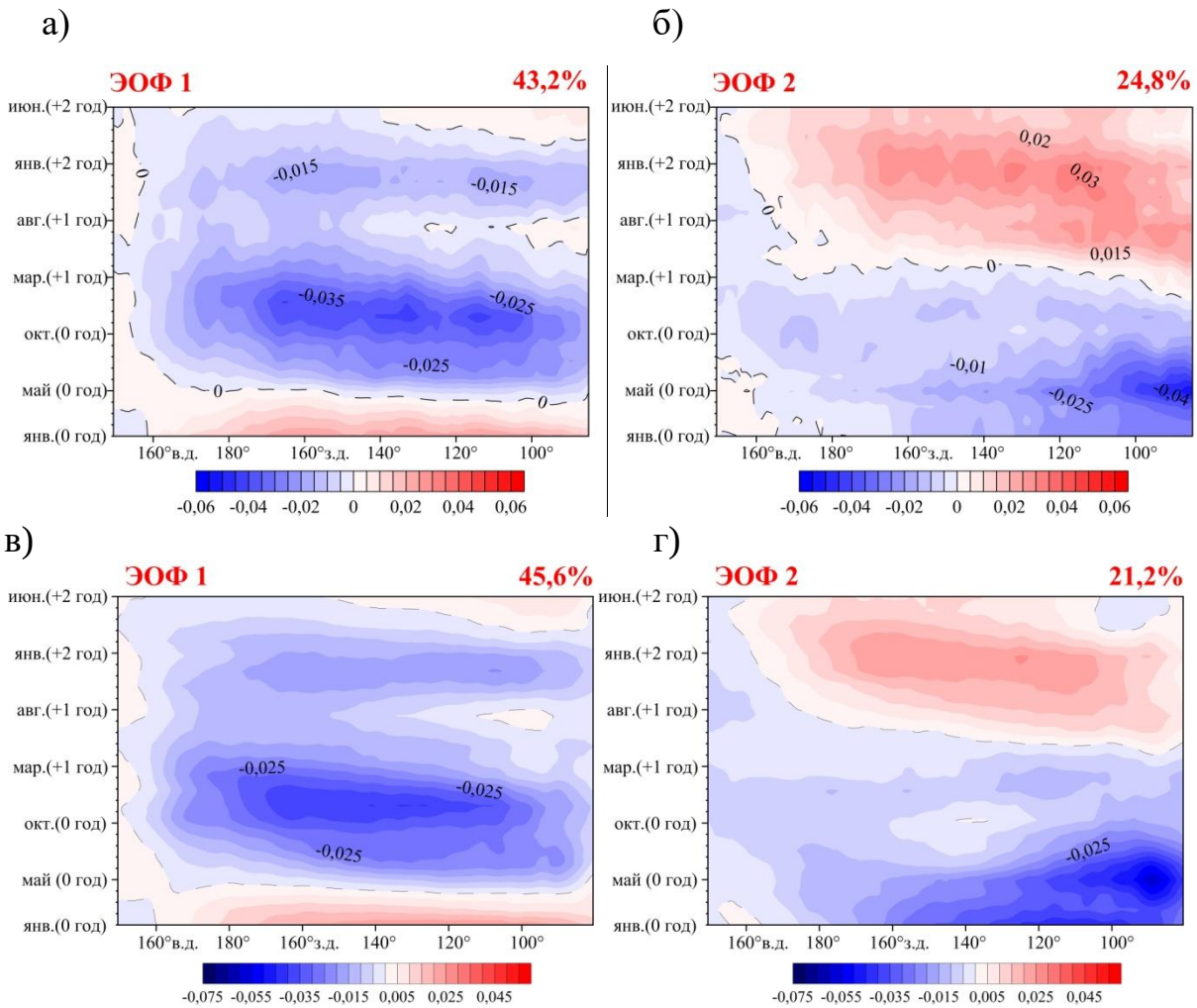


Рисунок 3.5.3 – Пространственно-временные диаграммы первых двух мод, полученных по данным HadISST (а, б) и COBE SST2 (в, г)

2,5-летние ряды изменений аномалий ТПО в экваториальной полосе Тихого океана в тоже время были проклассифицированы с помощью иерархического кластерного анализа (рис. 3.5.4). 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.

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.

а) б)

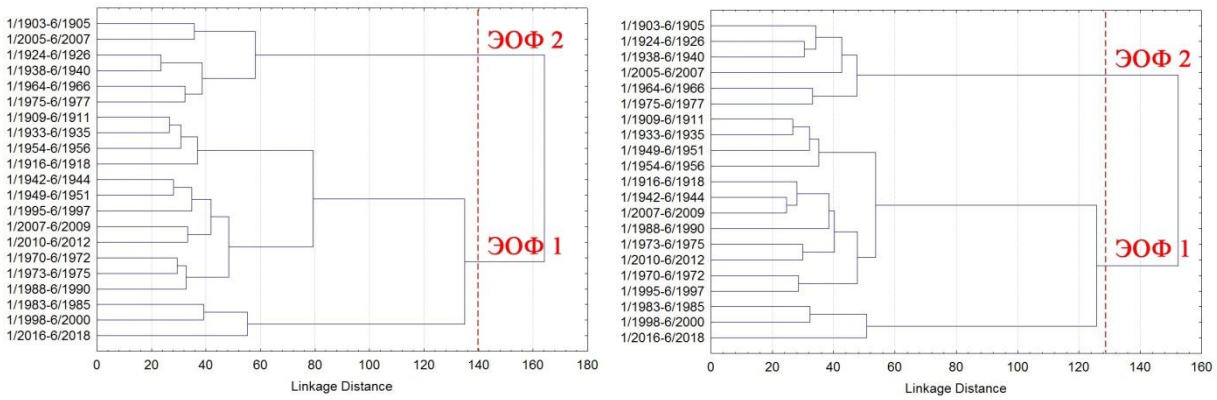


Рисунок 3.5.3 – Дендограммы иерархического кластерного анализа 2,5-летних периодов аномалий ТПО (годы Ла-Нинья) по массивам COBE SST2 (а) и HadISST (б) с 1900 по 2019 гг. в экваториальной зоне Тихого океана. Мера тесноты связи – Эвклидово расстояние

Выводы к Главе 3

С использованием оптимального критерия интенсивности (-0,5°С), минимальной продолжительности существования аномалии ТПО в районе Nino3.4 в течение пяти последовательных месяцев с 1870 по 2019 гг. по трем массивам данных HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5 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 мг/м^3 до 0,8 мг/м^3), 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.

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 ассиметричны 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».

Результаты данного раздела опубликованы в работах: Voskresenskaya and Marchukova [2015], Voskresenskaya and Marchukova [2017], Марчукова и др. [2018], Марчукова и др. [2019], Марчукова и др. [2020], Marchukova et al. [2020].

ГЛАВА 4. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ В ГОДЫ ЛА-НИНЬЯ

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 диссертационной работе 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).

4.1. Аномалии в полях 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 3 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.

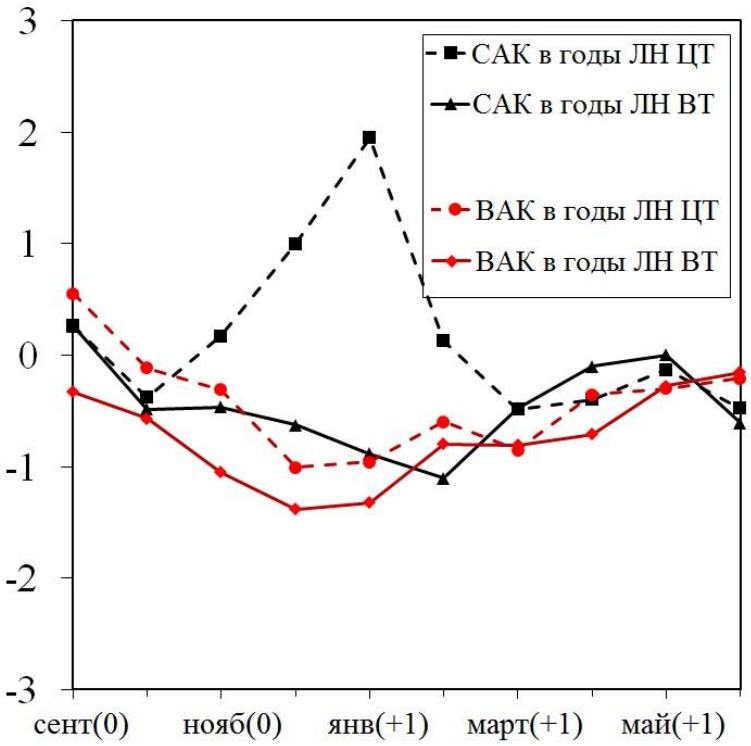


Рисунок 4.1.1 – Композиты индексов САК И ВАК для ЦТ и ВТ типов Ла-Нинья с 1950 по 2019 гг.

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 3). Выраженный значимый отклик в Атлантико-Европейском регионе в периоды Ла-Нинья фиксируется в зимний период – с декабря по март. То есть, через дальнодействующие 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 4.1.1 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. 4.1.1). 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 [Hurrel, 1995; Voskresenskya, 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 Европы 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. 4.1.1, индекс САК имеет отрицательные значения с максимумом в феврале. В соответствии с теорией [Hurrel, 1995; Voskresenskya, 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. 4.1.2 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. 4.1.2, а). На севере исследуемого региона формируется положительная аномалия приземного давления, в среднем равная 3-4 мб (рис. 4.1.2, 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 (см. приложение Б). К этому вернемся чуть позже.

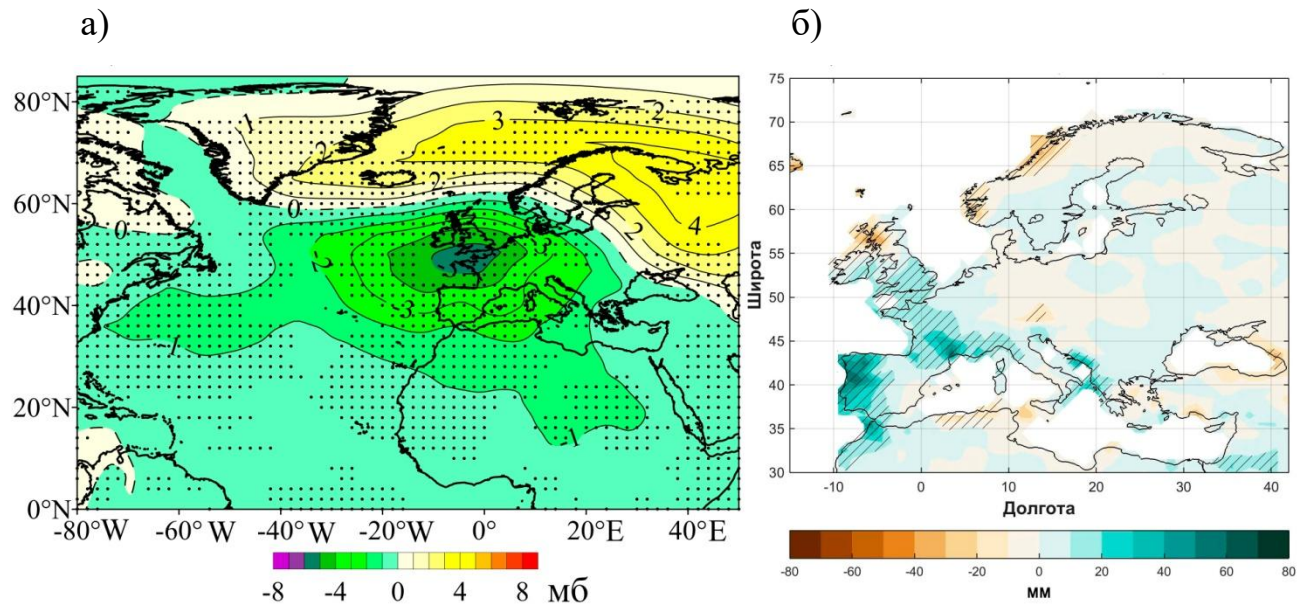


Рисунок 4.1.2 – Композиты в феврале «+1» года аномалий приземного давления по данным реанализа 20CR (а) и аномалий количества выпавших осадков по данным GPCC (б) в годы событий Ла-Нинья ВТ типа (14 событий). Точками отмечена статистическая 95% значимость для давления, линиями – для осадков

При **Центрально-Тихоокеанском типе Ла-Нинья** выявлена противоположная структура в поле приземного давления. Зимой над Атлантикой в умеренном поясе между 40° и 60° 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. 4.1.3, а). Подобная структура в поле давления соответствует положительной фазе САК. Согласно классической теории [Hurrel, 1995; Voskresenskya, Polonsky, 1995], траектория 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 (см. приложение Б). В то же время, интересно заметить, что при ЦТ типе 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 (см. приложение Б) в связи с активной циклонической деятельностью над этим регионом (рис. 4.1.3, б). 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. 4.1.3, б).

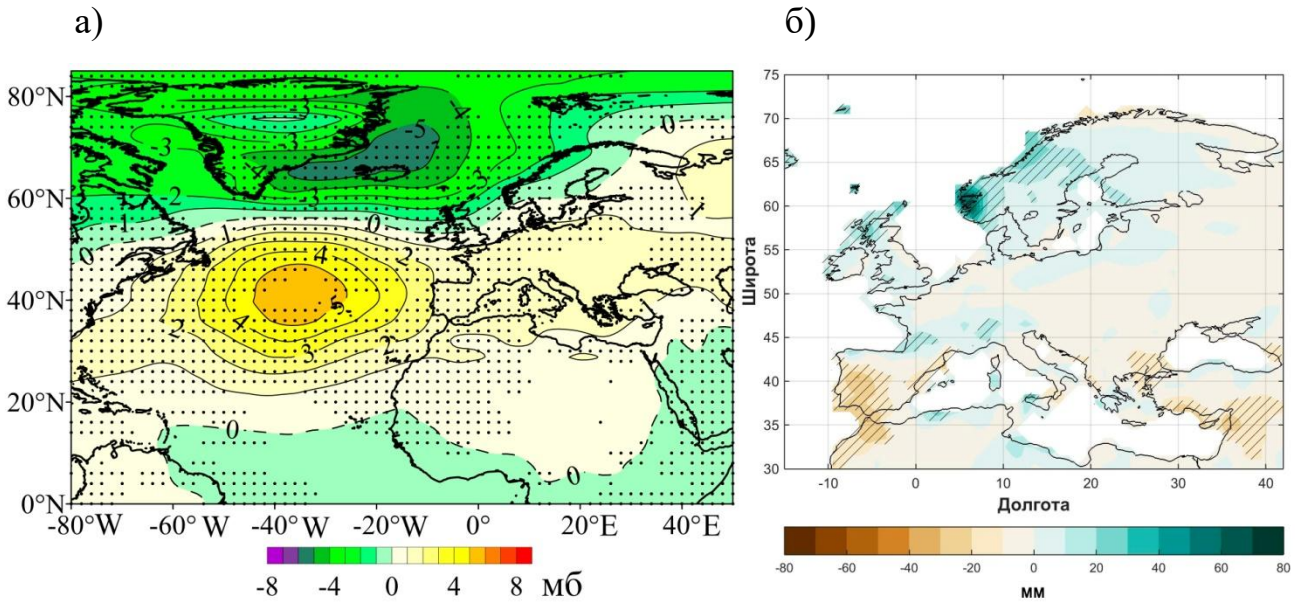


Рисунок 4.1.3 – Композиты в январе «+1» года аномалий приземного давления по данным реанализа 20CR (а) и аномалий количества выпавших осадков по данным GPCC (б) в годы событий Ла-Нинья ВТ типа (12 событий). Точками отмечена статистическая 95% значимость для давления, линиями – для осадков

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. 4.1.4) 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.

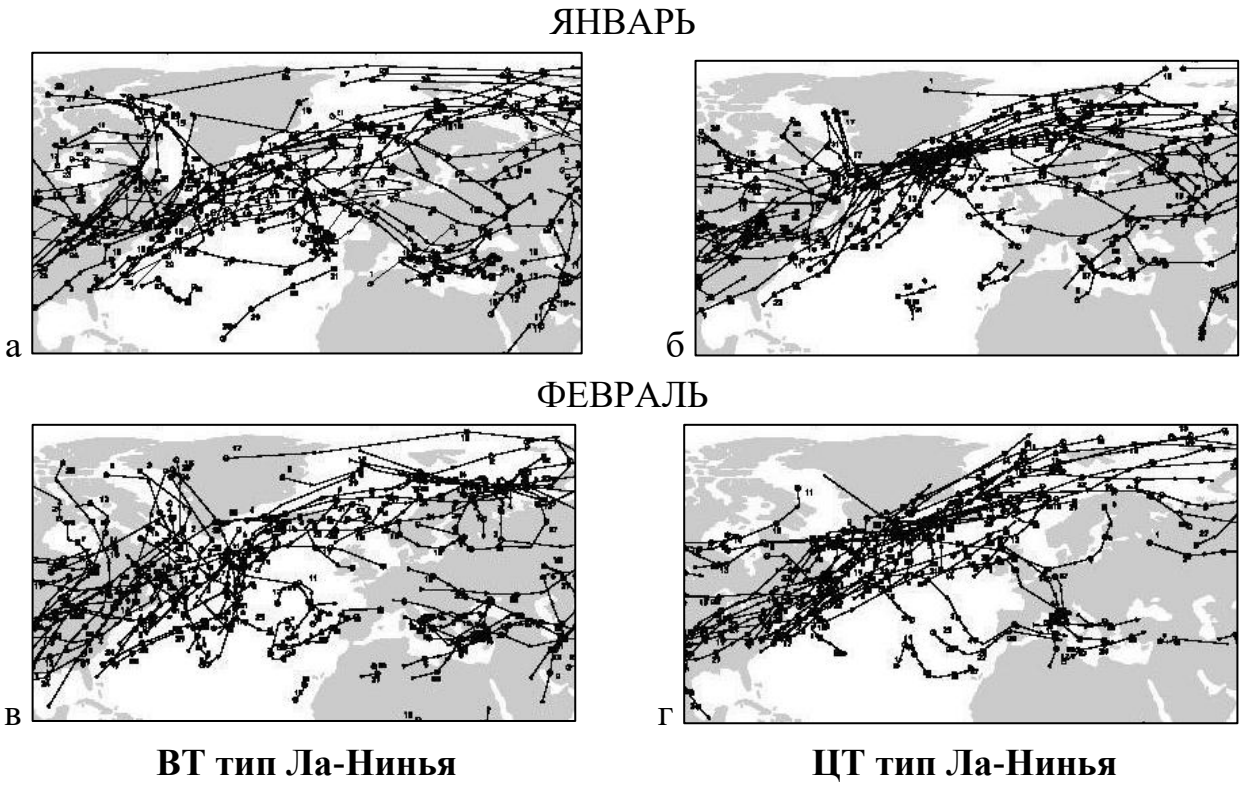


Рисунок 4.2.4 – Композиты траекторий циклонов в январе и феврале «+1» года для ВТ типа Ла-Нинья (а , в) ЦТ типа Ла-Нинья (б, г)

Композиты траекторий движения циклонов в январе и феврале «+1» года, построенные для 5 событий ВТ и 7 событий ЦТ типов Ла-Нинья (рис. 4.1.4), хорошо согласуются с композитами аномалий приземного давления и количества выпавших осадков, полученными для 14 ВТ ЛН и 12 ЦТ ЛН (рис. 4.1.2 и рис. 4.1.3). Траектории перемещения североатлантических циклонов более растянуты к югу Европы для ВТ типа Ла-Нинья (рис. 4.1.4, а, в), как для отрицательной фазы колебаний САК, и более сконцентрированы к северу для ЦТ типа Ла-Нинья (рис. 4.1.4 б, г), как в случае положительной фазы САК [Бардин, Полонский, 2005]. 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.

4.2. Температурные аномалии

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°×0,1° 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°×2° 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:

$$t_{\text{эмп}} = \frac{|\bar{x}-\bar{y}|}{\sqrt{n_x D_x + n_y D_y}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x+n_y-2)}{n_x+n_y}} \quad (4.2.1)$$

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 α = 0,05 приравнивались к отсутствию значения.

Таблица 4.2.1 – 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^2	S > 500 000км^2
ВТ (8)	37 %	13 %
ЦТ (11)	12 %	1 %

Дополнительно, в каждой узловой точке оценивалась повторяемость знака аномалии композитной карты следующим образом. В случае, если знак аномалии совпадал с композитным знаком и по модулю превышал 0,5°С, 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^2, и большие – более 500 000 км^2. Оценка вероятности получения неверного вывода для среднедекадной температуры воздуха проводилась на примере январей. Результаты такой оценки для разных типов Ла-Нинья указаны в таблице 4.2.1. 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).

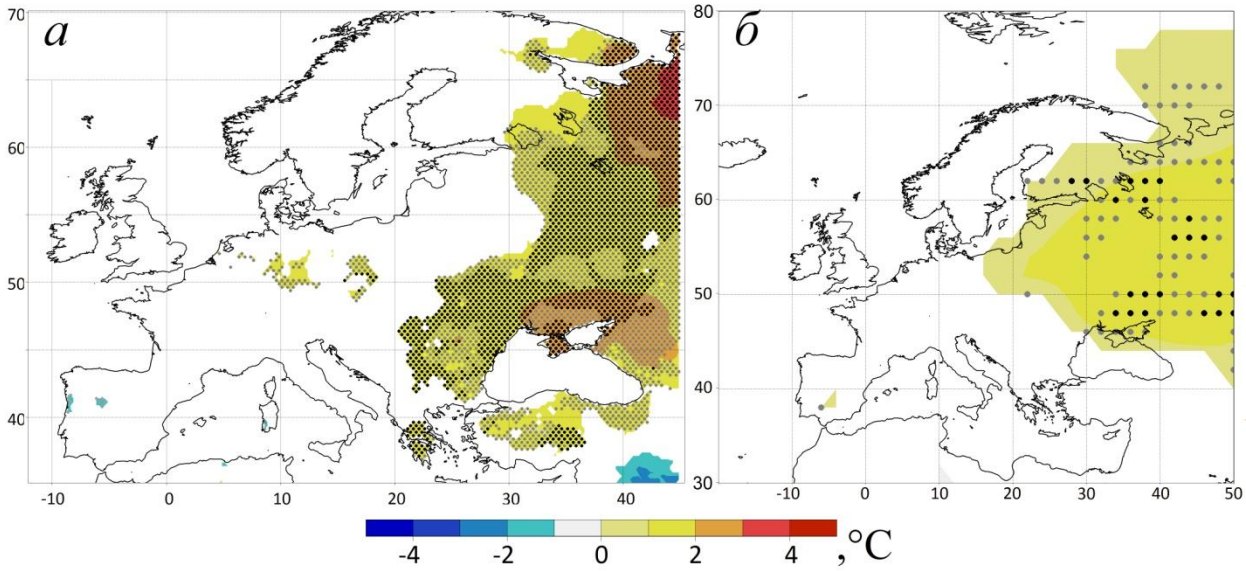


Рисунок 4.2.1 – Композиты аномалий температуры воздуха (°С) в третью декаду октября по данным E-OBS (а) и для октября в целом по данным 20CR (б) «0» года ВТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%

Восточно-Тихоокеанский тип Ла-Нинья. Значимая аномалия температуры воздуха 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°С в третьей декаде октября на востоке Европы и в Причерноморье (рис. 4.2.1, а). Положительная октябрьская аномалия подтверждается на более расширенных

композитах (15 событий ВТ ЛН) по данным реанализа 20CR (рис. 4.2.1, 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.

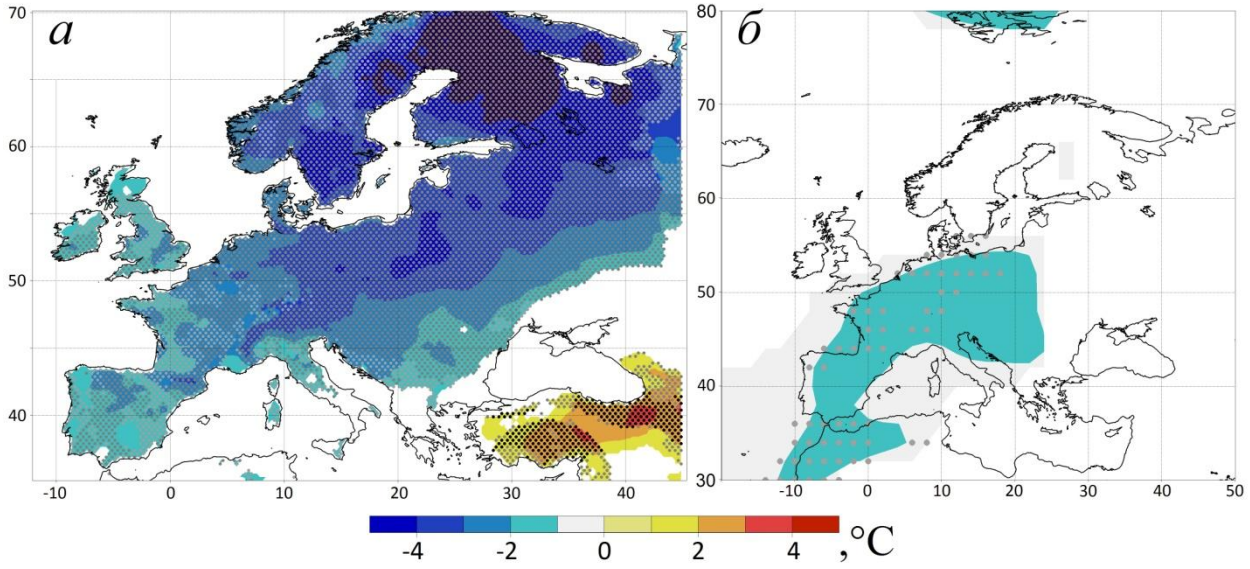


Рисунок 4.2.2 – Композиты аномалий температуры воздуха (°С) в первую декаду марта по данным E-OBS (а) и для марта в целом по данным 20CR (б) «+1» года ВТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%

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°С, приходятся на территорию Финляндии (рис. 4.2.2, а). В Скандинавском регионе формируются устойчивые холода с аномалией около –4…–5°С 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. 4.2.2, 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°С), расположенное над центральной и восточной Европой, характерно для второй и третьей декад ноября «0» года ЦТ ЛН. Повторяемость возникновения этой аномалии составляет 66% (4.2.3, а). Похолодание в ноябре месяце во время ЦТ типа статистически подтверждается на среднемесячных композитных картах по данным реанализа 20CR (4.2.3, 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.

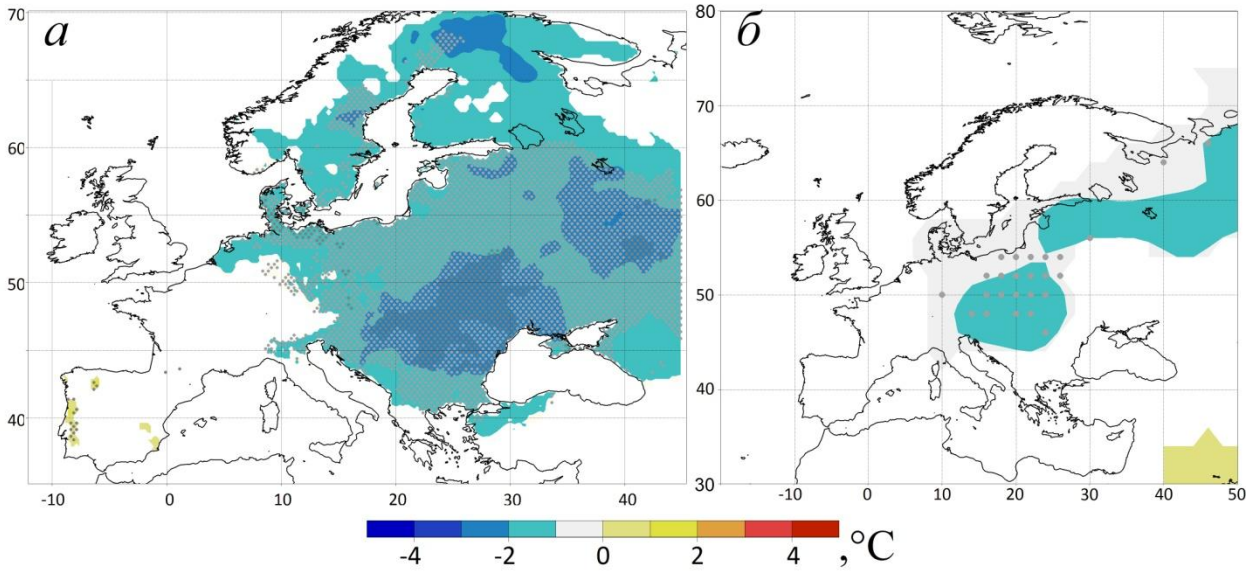


Рисунок 4.1.3 – Композиты аномалий температуры воздуха (°С) в третью декаду ноября по данным E-OBS (а) и для ноября в целом по данным 20CR (б) «0» года ЦТ типа Ла-Нинья. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

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 (см. приложение Б). Их максимальные значения составляют +2..+3°С. 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°С) в Восточной Европе, охватывающей Украину, Польшу, Белоруссию и страны Балтии. В целом зима и весна в большей 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.

4.3. Ла-Нинья 2020–2021 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°С), а закончилась спустя восемь месяцев в апреле 2020 г. (рис. 4.3.1). Максимальная фаза развития Ла-Нинья 2020–2021 пришлась на октябрь-декабрь, а интенсивность события составила -1,12°С.

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°С достигла района Nino3.4, но максимум аномалии пониженной температуры воды находился в восточном секторе Тихого океана.

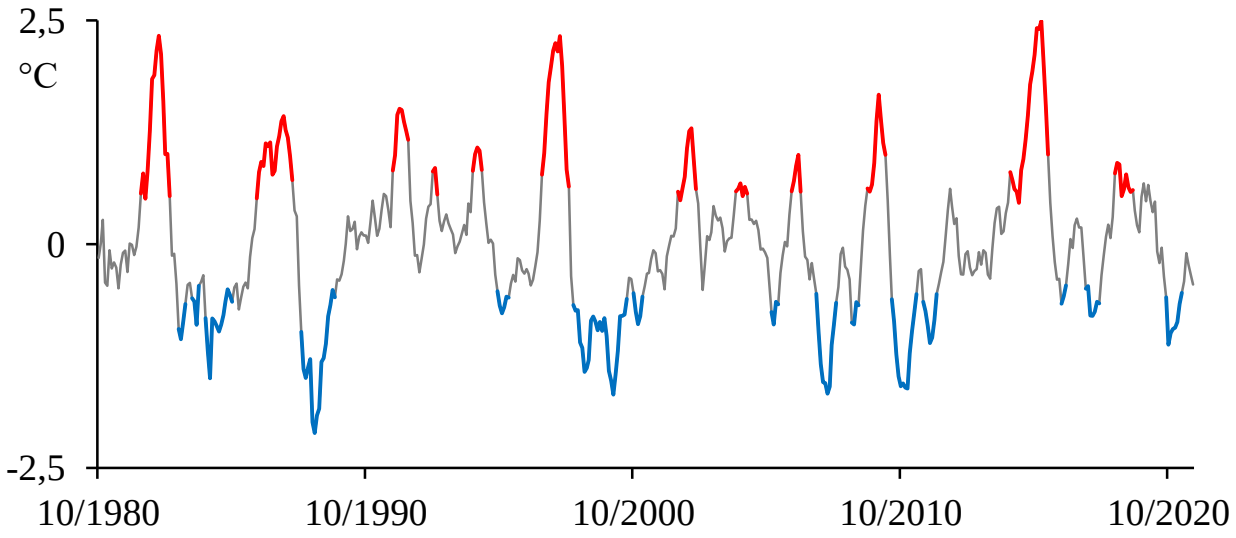


Рисунок 4.3.1 – Изменение индекса Nino3.4 с октября 1980 по сентябрь 2021 гг. по данным HadISST

Из рисунка 4.3.2 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°С, что больше по модулю аномалии в районе Nino4, составившей -0,7°С (рис. 4.3.3).

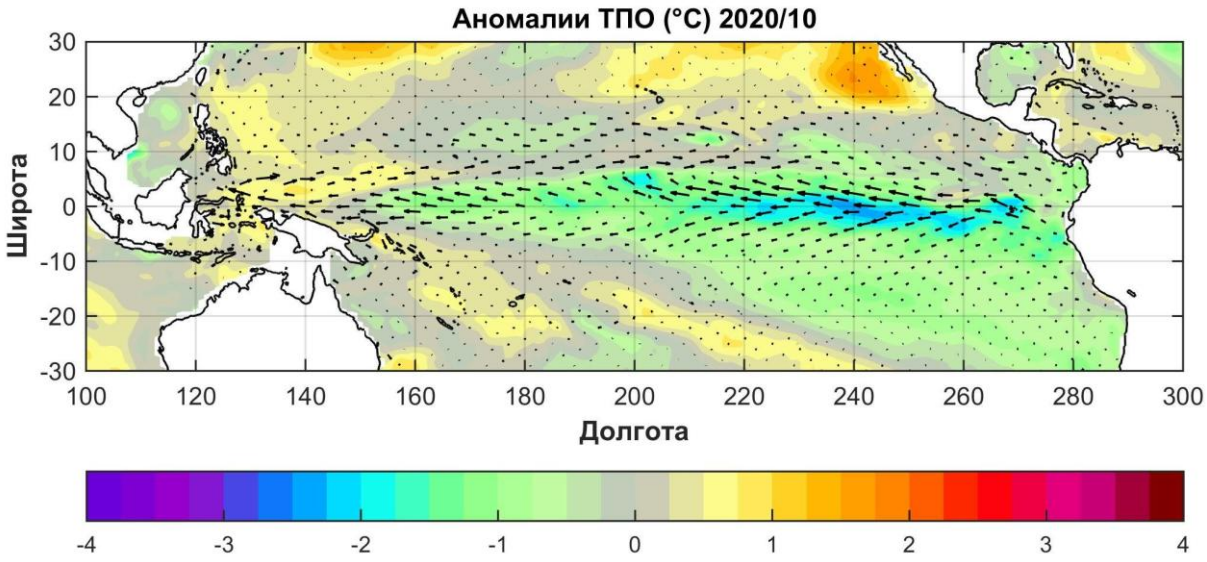


Рисунок 4.3.2 – Распределение аномалий температуры воды, направлений и скоростей течений на глубине 5 м для октября 2020 г. по данным реанализа NCEP/GODAS

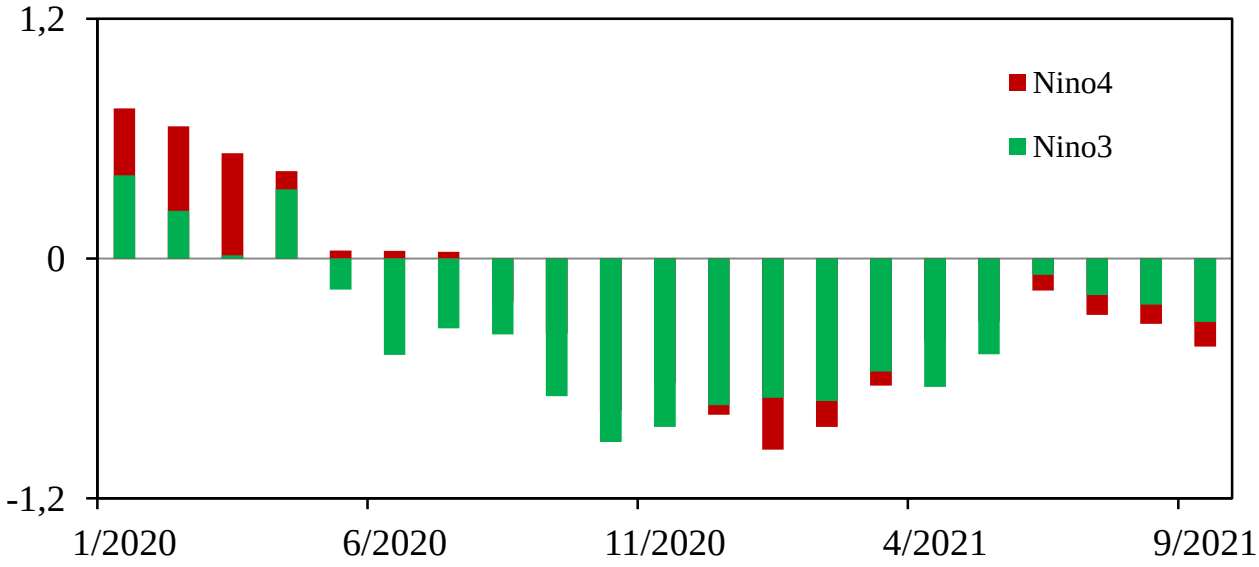


Рисунок 4.3.3 – Гистограммы индексов Nino3 и Nino4 данных массива HadISST с января 2020 по сентябрь 2021 гг.

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 счѐт экмановского транспортного переноса привело к перемещению поверхностных водных масс к северу от побережья Перу, тем самым интенсифицировав 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 разделе 4.1 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. Примечательно, что если осенние отклонения температуры от средней нормы были положительные, то зимние и весенние — отрицательные (рис. 4.3.4).

Почти все статистически-значимые аномалии температуры воздуха, приведенные на композитных картах слева на рисунке 4.3.4, 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 выявленным закономерностям проявлений Ла-Нинья ВТ типа и подтверждают полученный в работе результат.

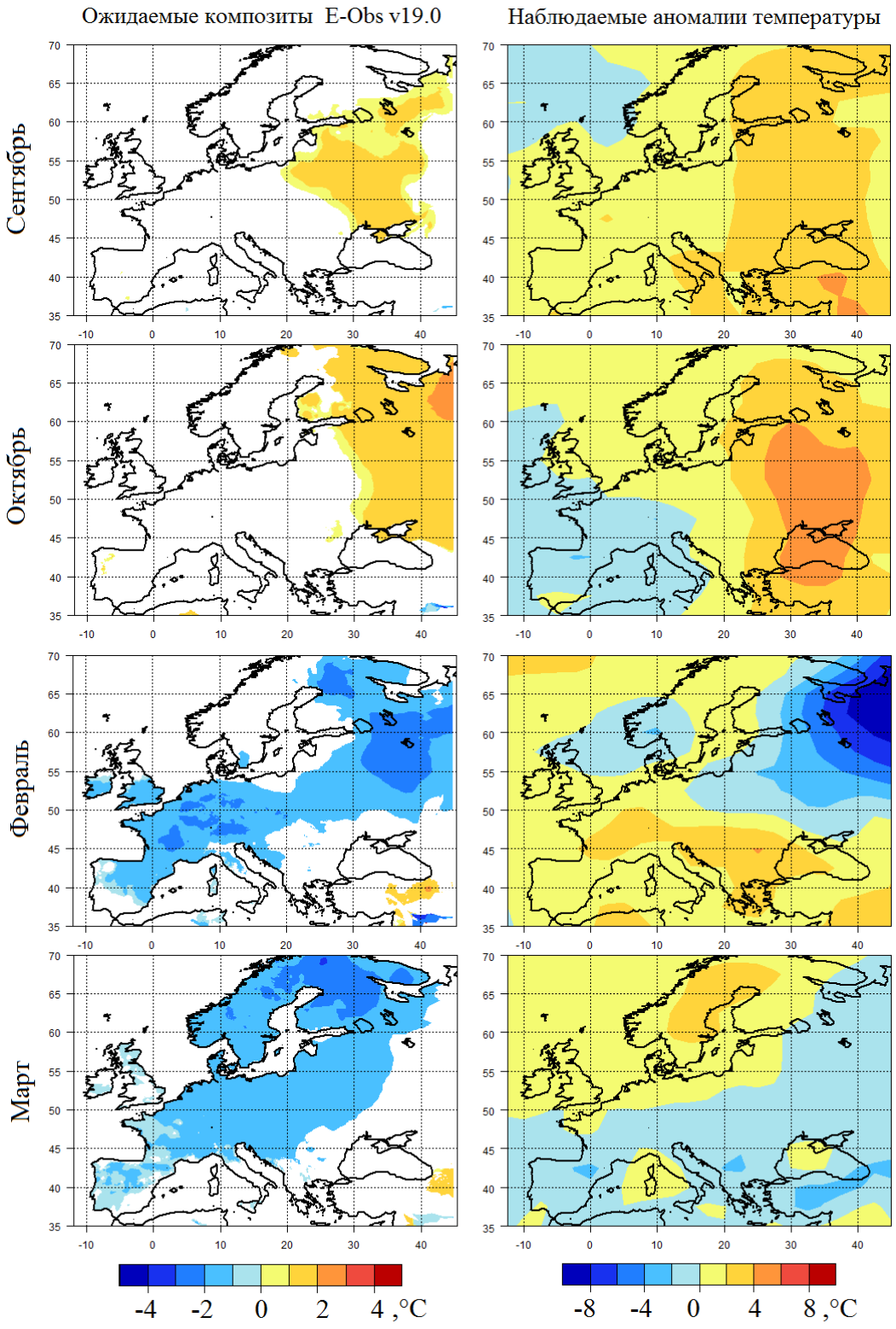


Рисунок 4.3.3 – Композиты значимых аномалий температуры воздуха для 8 событий Ла-Нинья BT типа в период 1950–2019 гг. в сентябре, октябре, феврале и марте по данным E-OBS (слева) и среднемесячные аномалии температуры воздуха в сентябре, октябре 2020 г. и феврале, марте 2021 г. по данным NCAP/NCAR (справа)

Выводы к Главе 4

Для Ла-Нинья Восточно-Тихоокеанского типа характерно усиление отрицательной фазы ВАК, что вызывает холодные зимы и позднюю весну в западной, северной и центральной частях Европы, со значением аномалий в феврале и первой декаде марта до -4°С. В то же время, структура в поле приземного давления соответствует отрицательной фазе САК. При этом основное количество циклонов из Атлантики проходит по югу Европы через Средиземноморский и Черноморский регионы, что проявляется в существенных положительных аномалиях осадков порядка 80 мм/мес. в зимний период над Пиренейским и Апеннинским полуостровами. Погодные условия в северной и восточной Европе, наблюдаемые с 2020 по 2021 гг., соответствовали проявлениям Ла-Нинья ВТ типа, что подтверждает полученный в работе результат.

В годы Центрально-Тихоокеанского типа Ла-Нинья характерно выраженное усиление положительной фазы САК в зимний период, при которой в западной и северной Европе наблюдается теплая и мягкая погода. В то же время, на юге и западе Скандинавии и Великобритании в период с декабря по март наблюдается значимая положительная аномалия в поле температуры воздуха в связи с активной циклонической деятельностью над этим регионом. При этом структура поля приземного давления над северной Атлантикой соответствует положительной фазе САК, при которой траектория циклонов из Атлантического океана через Европу смещается на 200-400 км севернее. Это отражается в поле аномалий среднемесячных осадков в зимний период в виде положительных аномалий ~100…150 мм/мес. над Скандинавией, особенно в ее юго-западной части, в то время как для южной и юго-западной части Европы характерны отрицательные аномалии осадков.

Результаты данного раздела опубликованы в работах: Марчукова и Воскресенская [2017], Voskresenskaya et. al [2018], Марчукова и Воскресенская [2018], Lubkov et. al [2020].

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 впервые по данным ТПО нескольких международных массивов продолжительностью более 100 лет на статистически значимом уровне 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^3 до 0,8 мг/м^3), 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 колебания (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°С 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 ~100…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 СОКРАЩЕНИЙ

20CR	Twentieth Century Reanalysis / Реанализ двадцатого столетия
3DVAR	Three-dimensional variational data assimilation / Трехмерное вариационное усвоение данных
AVHRR	Advanced very-high-resolution radiometer (Усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением)
CIRES	Cooperative Institute for Research In Environmental Sciences / Кооперативный институт исследований в области наук об окружающей среде
CMEMS	Copernicus marine environment monitoring service / Морская служба мониторинга окружающей среды им. Коперника
COADS	Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (Комплексный массив данных об океане и атмосфере)
CPC	Climate Prediction Center / Центр прогнозирования климата
DUE	Data User Element / Элемент данных для пользователей
ENSO	El Niño – Southern Oscillation
E-OBS	Ensembles daily gridded observational dataset in Europe / Ансамбли данных ежедневных наблюдений в Европе, привязанных к сетке
EOS	Earth Observing System / Система наблюдений за Землей
ESA	European Space Agency / Европейское космическое агенство
GCOS	Global Climate Observing System / Глобальная система наблюдений за климатом
GODAS	Global Ocean Data Assimilation System / Глобальная система усвоения океанических данных
GPCC	The Global Precipitation Climatology Centre / Глобальный климатический центр по осадкам

GTS	Global Telecommunications System (Глобальная система телекоммуникаций)
ICOADS	International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (Международный комплексный набор данных об океане и атмосфере)
MDB	Marine Data Bank (Морской банк данных Меторологической службы Великобритании)
MEI	Multivariate ENSO Index / Многомерный индекс ЭНЮК
MEI	The Multivariate ENSO Index
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument / спектрометрический прибор среднего разрешения
MODIS	Moderate Imaging Spectrometer / спектрометр умеренной визуализации
NCEP	National Centers for Environmental Prediction / Национальный центр прогнозов состояния окружающей среды
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (Национальный центр прогнозов состояния окружающей среды / Национальный центр атмосферных исследований США)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США)
RMSE	Root Mean Square Error / Среднеквадратическая ошибка
SeaWiFS	the Sea-viewing Wide Field of view Sensor / Спутниковый датчик с широким обзором океанического поля
TOGA-TAO	Tropical Ocean-Global Atmosphere and Tropical Atmosphere Ocean projects (Всемирный исследовательский проект «Тропический океан – Глобальная атмосфера» с 1985 по 1994 гг., и «Тропическая атмосфера и океан» с 1994 г. по настоящее время)
TWI	Trade Wind Index / Индекс пассатных ветров
АТПО	Аномалии температуры поверхности океана

ВАК	Восточно-Атлантическое Колебание
ВМО	Всемирная метеорологическая организация
ВТ	Восточно-Тихоокеанский
И	Интенсивность
ЛН	Ла-Нинья
П	Продолжительность
ПСО	Поверхностная соленость океана
САК	Североатлантическое Колебание
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СМИ	Средства массовой информации
ТДО	Тихоокеанская декадная осцилляция
ТПО	Температура поверхности океана
ЦТ	Центрально-Тихоокеанский
ЭН	Эль-Ниньо
ЭНЮК	Эль-Ниньо – Южное Колебание
ЭОФ	Эмпирическая ортогональная функция
ЮК	Южное Колебание
ЮНЕСКО	Специализированное учреждение Организации Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры (на англ. UNESCO; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристотель. Метеорологика // Сочинения в 4-х томах/ Перевод, вступ. Статья и примечания И.Д. Рожанский. М.: Мысль. 1981. Т. 3. С. 443–555.

2. 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.

3. Бондаренко А.Л. Эль-Ниньо – Ла-Нинья: механизм формирования// Природа. 2006. № 5. С. 39–47.

4. Бондаренко А.Л., Борисов Е.В., Серых И.В, Суркова Г.В., Филиппов Ю.Г. Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана // Метеорология и гидрология. 2012. № 11. С. 75–82.

5. Бондаренко А.Л., Жмур В.В. О природе и возможности прогнозирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С.39–49.

6. Бондаренко А.Л., Серых И.В. О формировании явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья Тихого океана// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2011. Т. 8. № 2. С.57–63.

7. Буреева 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.

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

9. 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.

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

11. 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

12. Всемирная история: В 24 т. Т. 14. Период английского завоевания Индии /А.Н. Бадак, И.Е. Войнич, Н.М. Волчек и др. Мн.: Современ. Литератор. 1999. 512 с.

13. Гордеева С.М. Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации. Практикум по дисциплине // СПб.: РГГМУ. 2010. 74 с.

14. 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.

15. 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.

16. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Аномалии циркуляции в центрах действия атмосферы в период восточно-тихоокеанского и центрально-тихоокеанского Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2016. №16. С. 41–56.

17. Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 36–50.

18. Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kareliameteo.ru/. – Дата обращения: 1.06.2021

19. 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

20. 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.

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

22. Марчукова О.В., Воскресенскся Е.Н., Лубков А.С. Явление Ла-Нинья: пространственно-временная типизация и гидрометеорологические аномалии в северном полушарии // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования / Тезисы докладов всероссийской научной конференции. г. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. С. 238–240.

23. 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

24. Марчуоква 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.

25. 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

26. 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.

27. 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.

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

29. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс. 2004. 513 с.

30. Орлов А.И. Математические методы теории классификации // Научный журнал КубГАУ. 2014. Т. 7. № 91. С. 1–28.

31. 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.

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

33. Северо-Евразийский Климатический Центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://seakc.meteoinfo.ru/training/volatility. – Дата обращения: 10.02.2020.

34. 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.

35. An S.-I. A review of interdecadal changes in the nonlinearity of the El Nino-Southern Oscillation. Theor // Appl. Climatol. 2009. V. 97. P. 29–40. DOI: 10.1007/s00704-008-0071-z

36. 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

37. 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

38. Ashok H. Yamagata T. Climate change: the El Nino with a difference // Nature. 2009. 461. P. 481–484. DOI: 10.1038/461481a

39. Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Nino Modoki and its possible teleconnection // Journal of Geophysical Research. 2007. V. 112. C11007. DOI: 10.1029/2006JC003798

40. Australian rainfall during El Niño and La Niña events [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bom.gov.au/climate/history/enso/ – Дата обращения: 20.12.2021

41. 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

42. Behringer D.W., Ji M., Leetmaa A. An improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system // Mon. Wea. Rev. 1998. V. 126. P. 1013–1021. DOI: 10.1175/1520-0493(1998)126<1022:AICMFE>2.0.CO;2

43. Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of Ocean temperature // Tellus. 1966. V. 18. №4. P. 820–829. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1966.tb00303.x

44. 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

45. Cai W., Cowan T. La Nina Modoki impacts Australia autumn rainfall variability // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L12805. DOI: 10.1029/2009GL037885

46. 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.

47. 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

48. 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

49. Catalogue of Indices and Definitions of El Niño and La Niña in Operational Use by WMO Members / WMO Commission for Climatology; CCl-XIII (2005) Expert Team on El Niño and La Niña Definitions // World Meteorological Organization. Geneva. 2006. 71 p.

50. Chang C.P., Zhang Y.S., Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific 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

51. Changnon S.A. Impacts of 1997–98 El Nino-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

52. Chen G., Tam C. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L01803. DOI: 10.1029/2009GL041708.

53. 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

54. 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

55. 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

56. 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

57. Climate Prediction Center / East Atlantic (EA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea.shtml. – Дата обращения: 10.02.2020.

58. Climate Prediction Center / North Atlantic Oscillation (NAO) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml. – Дата обращения: 11.02.2020.

59. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. Feasibility of a 100 year reanalysis using only surface pressure data // Bull. Amer. Met. Soc. 2006. V. 87. P. 175–190. DOI: 10.1175/BAMS-87-2-175

60. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S., Brunet M., Crouthamel R.I., Grant A.N., Groisman P.Y., Jones P.D., Kruk M.C., Kruger A.C., Marshall G.J., Maugeri M., Mok H.Y., Nordli Ø., Ross T.F., Trigo R.M., Wang X.L., Woodruff S.D., Worley S.J. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. P. 1–28 DOI: 10.1002/qj.776

61. Cornes R., van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M., Jones P.D. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets // J. Geophys. Res. Atmos. 2018. V. 123. DOI: 10.1029/2017JD028200

62. Cracknell A.P., Newcombe S.K., Black A.F., Kirby N.E. The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) Concerted Action // International Journal of Remote Sensing. 2001. V. 22. P. 205–247. DOI: 10.1080/014311601449916

63. Derber J., Rosati A.A. Global Oceanic Data Assimilation System // Journal of Physical Oceanography. 1989. V. 19. P. 1333–1347. DOI: 10.1175/1520-0485(1989)019<1333:AGODAS>2.0.CO;2

64. Deser C., Wallace J.M. Large-scale atmospheric circulation features of warm and cold episodes in the tropical Pacific // J. Clim. 1990. V. 3. P. 1254–1281. DOI: 10.1175/1520-0442(1990)003<1254:LSACFO>2.0.CO;2

65. 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

66. 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

67. Dommenget 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

68. 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

69. DuPenhoat Y., Eldin G. El Nino et l'oscillation austral. // Letters pour la Science. 2000. P. 89–91.

70. Enfield D.B., Mayer D.A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Nino-Southern Oscilation // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 929–946.

71. Enfield D.B., Mestas-Nuñez A.M. Multiscale Variabilities in Global Sea Surface Temperatures and Their Relationships with Tropospheric Climate Patterns // Journal of Climate. 1999. V. 12. Issue 9. P. 2719–2733. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2719:MVIGSS>2.0.CO;2

72. Feingold J.S. El Nino, La Nina, and ENSO // Encyclopedia of Modern Coral Reefs. Part of the series Encyclopedia of Earth Sciences Series. 2011. P. 365–368.

73. Feng J., Chen W., Tam C.Y., Zhou W. Different impacts of El Nino and El Nino Modoki on China rainfall in the decaying phases // Int. J. Climatol. 2010-a. V. 31. P. 2091-2101. DOI: 10.1002/joc.2217

74. Feng J., Li J. Influence of El Nino Modoki on spring rainfall over south China // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D13102. DOI: 10.1029/2010JD015160

75. Feng J., Wang L., Chen W., Fong S.K., Leong K.C. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D24122. DOI: 10.1029/2010JD014761

76. 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

77. 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

78. 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.

79. 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.

80. Gao C., Zhang R-H. The roles of atmospheric wind and entrained water temperature (T_e) in the second-year cooling of the 2010–12 La Nina event // Clim. Dyn. 2017. V. 48. P. 597–617. DOI: 10.1007/s00382-016-3097-4

81. Garnesson P., Mangin A., Fanton d'Andon O., Demaria J., Bretagnon M. The CMEMS GlobColour chlorophyll a product based on satellite observation: multi-sensor merging and flagging strategies // Ocean Sci. 2019. V. 15. P. 819–830. DOI: 10.5194/os-15-819-2019

82. Giese B.S., Seidel H.F., Compo G.P., Sardeshmukh P.D. An ensemble of ocean reanalyses for 1815–2013 with sparse observational input // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. V. 121. P. 6891–6910. DOI: 10.1002/2016JC012079

83. 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

84. 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.

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

86. 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.

87. 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

88. Global Climate Observing System / Niño 3.4 SST Index [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Nino34/. – Дата обращения: 10.02.2020.

89. Global Climate Observing System / Southern Oscillation Index (SOI) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/. – Дата обращения: 10.02.2020.

90. Goddard L., Dilley M. El Niño: Catastrophe or opportunity // Journ al of Climate. 2005. V. 18. P. 651–665. DOI: 10.1175/JCLI-3277.1

91. Goodrich G.B. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on winter precipitation and drought during years of neutral ENSO in the Western United States // Weather Forecast. 2007. V. 22. P. 116–124.

92. Graf H.F., Zanchettin D., Timmreck C., Bittner M. Observational constraints on the tropospheric and near-surface winter signature of the Northern Hemisphere stratospheric polar vortex // Climate Dyn. 2014. V. 43. № 12. P. 3245–3266. DOI: 10.1007/s00382-014-2101-0

93. 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

94. 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

95. 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.

96. 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

97. Historical El Nino / La Nina episodes (1950–present) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php – Дата обращения: 20.12.2021

98. Hoerling M.P., Kumar A., Zhong M. El Nino, La Nina, 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

99. Hoerling M., Kumar A. The perfect ocean for drought // Science. 2003. V. 299. P. 691–694. DOI: 10.1126/science.1079053

100. Hovmöller E. The Trough-andRidge Diagram // Tellus. 1949. V. 1. № 2. P. 62–66.

101. Hu Z.Z., Kumar A., Huang B., Zhu J., Zhang R.-H., Jin F.-F.Asymmetric evolution of El Niño and La Niña: the recharge/discharge processes and role of the off-equatorial sea surface height anomaly // Clim. Dyn. 2017. V. 49. 2737–2748. DOI: 1007/s00382-016-3498-4

102. 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

103. 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

104. Hurrel J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // Science. 1995. V. 269. P. 676–679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676

105. Ineson S., Scaife A.A. The role of the stratosphere in the European climate response to El Nino // Nat. Geosci. 2009. V. 2. P. 32–36. DOI: 10.1038/ngeo381

106. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

107. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

108. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

109. 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

110. Jin F.-F., Lin L., Timmermann A., Zhao J. Ensemblemean dynamics of the ENSO recharge oscillator under state-dependent stochastic forcing // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L03807. DOI: 10.1029/2006GL027372

111. 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

112. Kane R.P. Relationship of El Nino-Southern Oscillation and Pacific Sea Surface Temperature with Rainfall in Various Regions of the Globe // Mon. Wea. Rev. 1997. V. 125. P. 1792–1800.

113. 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

114. Kiladis G.N., Diaz H.Z. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscilation // J. Climate. 1989. V. 2. № 9. P. 1069–1090.

115. Kim H.M., Webster P.J., Curry J.A. Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic tropical cyclones // Science. 2009. V. 325. P. 77–80. DOI: 10.1126/science.117406

116. Kug J.S., Ham Y.G. Are there two types of La Niña? // Geophys. Res. Lett. 2011 V. 38. L16704. DOI: 10.1029/2011GL048237

117. 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

118. 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

119. 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

120. 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

121. Larkin N.K., Harrison D.E. On the definition of El Nino and associated seasonal average U. S. weather anomalies // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L13705. DOI: 10.1029/2005GL022738

122. Lee H.S., Yamashita T., Mishima T. Multi-decadal variations of ENSO, the Pacific Decadal Oscillation and tropical cyclones in the western North Pacific // Prog. Oceanogr. 2012. V. 105. P. 67–80. DOI: 10.1016/j.pocean.2012.04.009

123. Lee T., McPhaden M.J. Increasing intensity of El Nino in the central-equatorial Pacific // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L14603. DOI: 10.1029/2010GL044007

124. 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

125. 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

126. Lin R.P., Zheng F., Dong X. ENSO frequency asymmetry and the Pacific Decadal Oscillation in observations and 19 CMIP5 models // Adv. Atmos. Sci. 2018. V. 35(5). DOI: 10.1007/s00376-017-7133-z

127. 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

128. Liu Z., Alexander M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections // Rev. Geophys. 2007 V. 45. RG2005. DOI: 10.1029/2005RG000172

129. 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

130. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V., Evstigneev V.P. European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606 P. 012031. doi:10.1088/1755-1315/606/1/012031

131. 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

132. Manuel J. Drought in the Southeast: Lessons for water management // Environ Health Perspect. 2008. V. 116. A168-A171. DOI: 10.1289/ehp.116-a168

133. 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

134. Maritorena S., Hembise Fanton d'Andon O., Mangin A., Siegel D.A. Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 1791–1804 DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.002

135. 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

136. 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

137. McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H. ENSO as an integrating concept in Earth science // Science. 2006. V. 314. № 5806. P. 1740–1745. DOI: 10.1126/science.113258

138. 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

139. 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

140. Messinaa C.D., Hansenb 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

141. Miller J. La Niña and the Making of Climate Optimism // Springer Nature Switzerland AG. 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-76141-1

142. 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

143. 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

144. National weather service – Monthly atmospheric and SST Indices. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ – Дата обращения: 21.06.2021.

145. O'Brien J. Definition(s) of La Nina // La Nina and its impacts : facts and speculation / edited by Michael H. Glantz. New York: The United Nations University. 2002. P: 31–35.

146. Ogata T., Xie S.-P., Wittenberg A., Sun D.-Z. Interdecadal amplitude modulation of El Nino–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

147. 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

148. 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

149. 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

150. 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

151. 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

152. Philander S.G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation // Academic Press. San Diego, CA. 1990. 289 p.

153. 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

154. 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

155. 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

156. 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

157. 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

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

159. 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

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

161. 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

162. 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

163. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax 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

164. 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

165. 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

166. Ropelewski C.F., Jones P.D. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index // Monthly Weather Review. 1987. V. 115. № 9. P. 2161–2165. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<2161:AEOTTS>2.0.CO;2

167. 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

168. Rudolf B., Beck C., Grieser J., Schneider U. Global precipitation analysis products. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). DWD. Internet publication. 2005. P. 1–8.

169. Saha S., Nadiga S., Thiaw C., Wang J., Wang W., Zhang Q., Van Den Dool H.M., Pan H.-L., Moorthi S., Behringer D., Stokes D., Pena M., Lord S., White G., Ebisuzaki W., Peng P., Xie P. The NCEP Climate Forecast System // J. Climate. 2006. V. 19 P. 3483–3517. DOI: 10.1175/JCLI3812.1

170. Schneider U., Ziese M., Meyer-Christoffer A., Finger P., Rustemeier E., Becker A. The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources // Proc. IAHS. 2016. V. 374. P. 29–34. DOI: 10.5194/piahs-374-29-2016

171. 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

172. Shabbar A., Khandekar M. The impact of El Nino-Southern Oscillation on the temperature field over Canada // Atmosphere-Ocean. 1996. V. 34. № 2. P. 401–416. DOI: 10.1080/07055900.1996.9649570

173. Shinoda T., Hurlburt H.E., Metzger E.J. Anomalous tropical ocean circulation associated with La Nina Modoki // J. Geophys. Res. 2013. V. 116. C12001. DOI: 10.1029/2011JC007304

174. Singh A., Delcroix T., Cravatte S. Contrasting the flavors of El–Nino–Southern Oscillation using sea surface salinity observations // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C06016. DOI: 10.1029/2010JC006862

175. 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

176. 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

177. 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

178. 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

179. 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

180. 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

181. Taschetto A.S., England M.H. El Nino Modoki impacts on Australian rainfall // J. Clim. 2009. V. 22. P. 3167–3174. DOI: 10.1175/2008JCLI2589.1

182. The Bureau of Meteorology (Australian Government) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bom.gov.au/climate/enso/ . – Дата обращения: 13.10.2021.

183. The KNMI Climate Explorer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://climexp.knmi.nl/. – Дата обращения: 1.06.2021

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

185. 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.

186. 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.

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

188. Trenberth K.E. The Definition of El Niño // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1997. V. 78. P. 2771–2777 DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2

189. Trenberth K.E., Stepaniak D.P. Indices of El Nino evolution // J. of Climate. 2001. V. 14. P. 1697–1701. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2

190. 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

191. Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Qualitative classification of the La Nina events // Physical Oceanography. 2015. V. 3. P. 14–24. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-14-24

192. 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

193. 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

194. Voskresenskya 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.

195. Walker G.T. Correlations in seasonal variations of weather. I. A further study of world weather // Mem. Indian Meteorol. Dep. 1924. V. 24. P. 275–332.

196. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // Mon. Wea. Rev. 1981. V. 109. P. 784-812. DOI: 10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2

197. Wang G., Hendon H.H. Sensitivity of Australian rainfall to inter-El Nino variations // J. Clim. 2007. V. 20. P. 4211–4226. DOI: 10.1175/JCLI4228.1

198. Wang X., Li T., Chen M. Mechanism for asymmetric atmospheric responses in the western North Pacific to El Niño and La Niña // Clim. Dyn. V. 53. P. 3957–3969 DOI: 10.1007/s00382-019-04767-4

199. Webb E.J., Magi B.I. The Ensemble Oceanic Niño Index // International Journal of Climatology. 2022. P. 1–21 DOI: 10.1002/joc.7535

200. 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

201. Weng H., Ashok K., Behera S. K., Rao S.A., Yamagata T. Impacts of recent El Nino Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer // Clim. Dyn. 2007. V. 29. P. 113–129. DOI: 10.1007/s00382-007-0234-0

202. Weng H., Behera S.K., Yamagata T. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Nino Modoki and El Nino events // Clim. Dyn. 2009. V. 32. P. 663–674. DOI: 10.1007/s00382-008-0394-6

203. Weng H., Wu G.X., Liu Y.M., Behera S.K., Yamagata T. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans // Clim. Dyn. 2011. V. 36. P. 769–782. DOI: 10.1007/s00382-009-0658-9

204. Wittenberg A.T., Rosati A., Delworth T.L., Vecchi G.A., Zeng F.R. ENSO modulation: Is it decadally predictable? // J. Climate. 2014. V. 27. P. 2667–2681. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00577.1

205. 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

206. 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

207. 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

208. 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

209. 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.

210. 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

211. Yuan Y., Yan H.M. Different types of La Nina events and different responses of the tropical atmosphere // Chinese Science Bulletin. 2013. V. 58. V. 406–415. DOI: 10.1007/s11434-012-5423-5

212. Yuan Y., Yang H., Li C.Y. Study of El Nino events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China (in Chinese) // Acta Meteorol. Sin. 2012. V. 70. P. 467–478.

213. Yuan Y., Yang S. Impacts of different types of El Nino on the EastAsian climate: Focus on ENSO Cycles // J. Clim. 2012. DOI: 10.1175/ JCLI-D-11-00576.1

214. Yuan Y., Yang S., Zhang Z. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between eastern and central Pacific El Nino: Possible effect of Indian Ocean SST // J. Clim. 2012-a. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00004.1

215. 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

216. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Основные характеристики событий Ла-Нинья по трём реконструированным массивам данных ТПО: HadISST, COBE SST2 и ERSSTv5

Таблица А.1. События Ла–Нинья в районе Nino3.4 с 1870 по 2019 гг. по данным HadISST и их основные характеристики

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Продолжительность (количество месяцев)	Зрелая фаза (месяцы)
1	1870	–0,95±0,06	8	май–июл
2	1872–1873	–1,02±0,07	8	янв–мар
3	1873–1875	–1,11±0,08	16	окт–дек
4	1875–1876	–0,97±0,06	14	фев–апр
5	1879–1880	–0,85±0,08	6	нояб–янв
6	1886–1887	–1,23±0,08	13	окт–дек
7	1889–1890	–2,24±0,08	17	дек–фев
8	1892–1894	–1,38±0,07	27	окт–дек
9	1903–1904	–0,85±0,07	6	дек–фев
10	1909–1910	–1,30±0,08	17	окт–дек
11	1916–1917	–1,53±0,08	9	нояб–янв
12	1917–1918	–0,77±0,08	5	янв–мар
13	1924–1925	–0,91±0,08	9	нояб–янв
14	1933–1934	–1,11±0,06	10	окт–дек
15	1938–1939	–0,88±0,08	6	янв–мар
16	1942–1943	–1,35±0,08	8	окт–дек
17	1949–1951	–1,38±0,07	19	дек–фев
18	1954–1957	–1,77±0,08	32	окт–дек
19	1964–1965	–1,05±0,08	9	окт–дек
20	1970–1972	–1,42±0,08	19	янв–мар
21	1973–1974	–2,08±0,08	14	нояб–янв
22	1975–1976	–1,78±0,08	13	нояб–янв
23	1983–1984	–0,96±0,08	5	окт–дек
24	1984–1985	–1,47±0,07	10	нояб–янв
25	1988–1989	–2,03±0,07	14	окт–дек
26	1995–1996	–0,71±0,07	5	окт–дек
27	1998–2001	–1,76±0,08	30	дек–фев
28	2005–2006	–0,99±0,08	5	дек–фев
29	2007–2008	–1,77±0,08	10	дек–фев
30	2010–2011	–1,73±0,08	12	дек–фев
31	2011–2012	–1,10±0,08	7	нояб–янв
32	2016–2017	–0,69±0,07	5	нояб–янв
33	2017–2018	–0,89±0,07	7	нояб–янв

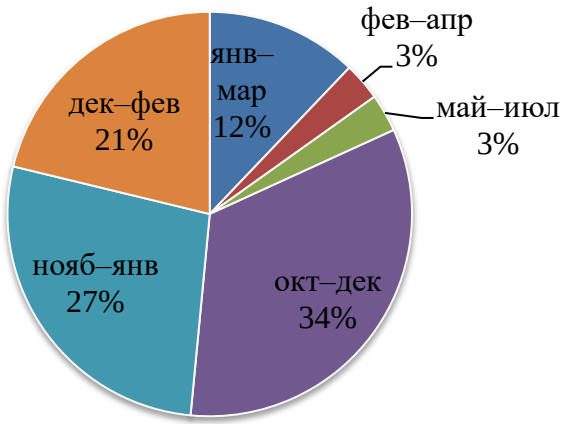
Таблица А.2. События Ла–Нинья в районе Nino3.4 с 1870 по 2019 гг. по данным COBE SST2 и их основные характеристики

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Продолжительность (количество месяцев)	Зрелая фаза (месяцы)
1	1872–1873	–1,01±0,06	6	фев–апр
2	1873–1874	–1,10±0,08	6	янв–мар
3	1874–1875	–1,34±0,08	7	окт–дек
4	1879–1880	–1,69±0,06	5	нояб–янв
5	1886–1887	–1,64±0,06	16	окт–дек
6	1889–1890	–1,94±0,08	15	сен–нояб
7	1892–1894	–2,05±0,07	29	окт–дек
8	1908–1910	–1,05±0,06	25	нояб–янв
9	1916–1917	–2,44±0,06	13	окт–дек
10	1917–1918	–1,85±0,07	6	нояб–янв
11	1924–1925	–1,09±0,07	11	дек–фев
12	1933–1934	–1,19±0,08	12	сен–нояб
13	1938–1939	–1,08±0,08	10	нояб–янв
14	1942–1943	–1,37±0,08	9	окт–дек
15	1949–1950	–0,82±0,08	7	дек–фев
16	1950–1951	–1,14±0,08	7	нояб–янв
17	1954–1956	–1,49±0,08	29	окт–дек
18	1964–1965	–1,19±0,07	9	окт–дек
19	1967–1968	–0,72±0,06	6	янв–мар
20	1970–1972	–1,61±0,07	20	дек–фев
21	1973–1976	–2,15±0,07	35	нояб–янв
22	1983–1984	–0,80±0,08	5	окт–дек
23	1984–1985	–1,02±0,08	14	дек–фев
24	1988–1989	–1,89±0,07	14	нояб–янв
25	1995–1996	–1,17±0,07	7	нояб–янв
26	1999–2001	–1,61±0,07	30	нояб–янв
27	2005–2006	–0,95±0,06	5	дек–фев
28	2007–2008	–1,77±0,08	9	дек–фев
29	2010–2011	–1,80±0,06	12	нояб–янв
30	2011–2012	–1,12±0,07	7	нояб–янв
31	2016–2017	–0,68±0,08	5	окт–дек
32	2017–2018	–0,97±0,08	5	дек–фев

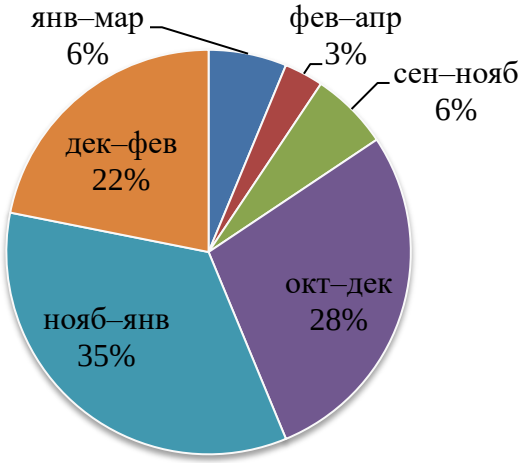
Таблица А.3. События Ла–Нинья в районе Nino3.4 с 1870 по 2019 гг. по данным ERSSTv5 и их основные характеристики

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Продолжительность (количество месяцев)	Зрелая фаза (месяцы)
1	1870	–1,31±0,06	11	фев–апр
2	1872–1873	–1,02±0,06	7	янв–мар
3	1874	–1,03±0,08	12	фев–апр
4	1879–1880	–1,07±0,07	8	нояб–янв
5	1886–1887	–1,84±0,07	13	дек–фев
6	1889–1890	–1,77±0,07	7	дек–фев
7	1892–1894	–1,27±0,08	29	окт–дек
8	1898	–0,73±0,08	6	июл–сен
9	1903–1904	–1,35±0,06	8	янв–мар
10	1908–1911	–1,62±0,07	32	янв–мар
11	1916–1918	–2,10±0,07	22	нояб–янв
12	1921	–1,93±0,06	5	фев–апр
13	1922–1923	–1,05±0,06	9	авг–окт
14	1924–1925	–1,46±0,08	9	нояб–янв
15	1933–1934	–1,50±0,08	16	окт–дек
16	1938–1939	–1,65±0,08	14	июн–авг
17	1942–1943	–1,71±0,08	10	дек–фев
18	1944–1945	–0,72±0,08	7	фев–апр
19	1946	–1,34±0,07	5	июл–сен
20	1948	–1,03±0,07	5	сен–нояб
21	1949–1951	–1,54±0,08	17	дек–фев
22	1954–1956	–1,91±0,07	30	окт–дек
23	1964–1965	–1,09±0,07	9	окт–дек
24	1970–72	–1,48±0,07	19	дек–фев
25	1973–1974	–1,89±0,08	15	нояб–янв
26	1975–1976	–1,78±0,08	16	нояб–янв
27	1984–1985	–1,07±0,08	8	нояб–янв
28	1988–1989	–1,73±0,06	13	нояб–янв
29	1995–1996	–0,78±0,07	6	нояб–янв
30	1998–2001	–1,55±0,08	28	дек–фев
31	2005–2006	–0,83±0,07	4	дек–фев
32	2007–2008	–1,59±0,07	10	дек–фев
33	2010–2011	–1,50±0,07	11	нояб–янв
34	2011–2012	–1,00±0,08	8	нояб–янв
35	2017–2018	–0,91±0,08	5	нояб–янв

HadISST



COBE SST2



ERSSTv5

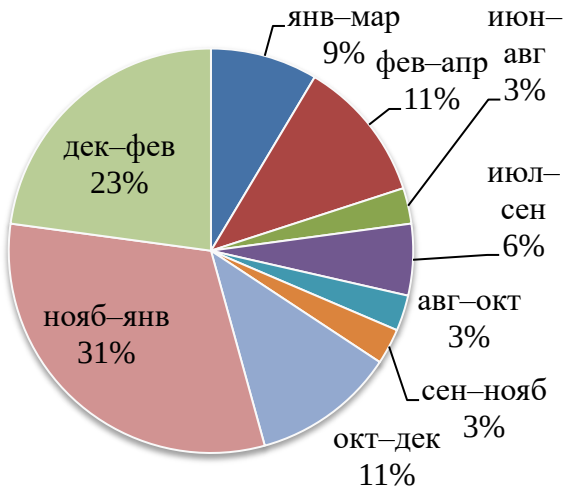


Рисунок А.1 – Повторяемость (%) максимальной фазы развития Ла-Нинья по индексу Nino3.4 с 1870 по 2019 гг.

Таблица А.4. Типы событий Ла–Нинья с использованием методики классификации [Yeh et al., 2009] с 1870 по 2019 гг. по данным HadISST и их визуальное соответствие

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Тип по методу (Yeh et al., 2009)	Визуальный анализ
1	1870	–0,95±0,06	ВТ	соответствует
2	1872–1873	–1,02±0,07	ВТ	соответствует
3	1873–1875	–1,11±0,08	ВТ	соответствует
4	1875–1876	–0,97±0,06	ВТ	соответствует
5	1879–1880	–0,85±0,08	ЦТ	соответствует
6	1886–1887	–1,23±0,08	ВТ	не соответствует
7	1889–1890	–2,24±0,08	ЦТ	соответствует
8	1892–1894	–1,38±0,07	ВТ	соответствует
9	1903–1904	–0,85±0,07	ВТ	соответствует
10	1909–1910	–1,30±0,08	ВТ	соответствует
11	1916–1917	–1,53±0,08	ВТ	соответствует
12	1917–1918	–0,77±0,08	ВТ	соответствует
13	1924–1925	–0,91±0,08	ЦТ	не соответствует
14	1933–1934	–1,11±0,06	ЦТ	соответствует
15	1938–1939	–0,88±0,08	ВТ	соответствует
16	1942–1943	–1,35±0,08	ВТ	соответствует
17	1949–1951	–1,38±0,07	ВТ	соответствует
18	1954–1957	–1,77±0,08	ВТ	соответствует
19	1964–1965	–1,05±0,08	ЦТ	не соответствует
20	1970–1972	–1,42±0,08	ВТ	соответствует
21	1973–1974	–2,08±0,08	ЦТ	соответствует
22	1975–1976	–1,78±0,08	ЦТ	соответствует
23	1983–1984	–0,96±0,08	ЦТ	соответствует
24	1984–1985	–1,47±0,07	ЦТ	соответствует
25	1988–1989	–2,03±0,07	ВТ	не соответствует
26	1995–1996	–0,71±0,07	ВТ	соответствует
27	1998–2001	–1,76±0,08	ЦТ	соответствует
28	2005–2006	–0,99±0,08	ВТ	соответствует
29	2007–2008	–1,77±0,08	ВТ	соответствует
30	2010–2011	–1,73±0,08	ЦТ	соответствует
31	2011–2012	–1,10±0,08	ЦТ	соответствует
32	2016–2017	–0,69±0,07	ВТ	не соответствует
33	2017–2018	–0,89±0,07	ВТ	соответствует

Таблица А.5. Типы событий Ла–Нинья с использованием методики классификации [Yeh et al., 2009] с 1870 по 2019 гг. по данным COBE SST2 и их визуальное соответствие

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Тип по методу (Yeh et al., 2009)	Визуальный анализ
1	1872–1873	–1,01±0,06	ВТ	соответствует
2	1873–1874	–1,10±0,08	ВТ	соответствует
3	1874–1875	–1,34±0,08	ВТ	не соответствует
4	1879–1880	–1,69±0,06	ВТ	не соответствует
5	1886–1887	–1,64±0,06	ЦТ	соответствует
6	1889–1890	–1,94±0,08	ВТ	соответствует
7	1892–1894	–2,05±0,07	ВТ	не соответствует
8	1908–1910	–1,05±0,06	ВТ	соответствует
9	1916–1917	–2,44±0,06	ВТ	соответствует
10	1917–1918	–1,85±0,07	ВТ	соответствует
11	1924–1925	–1,09±0,07	ЦТ	не соответствует
12	1933–1934	–1,19±0,08	ЦТ	соответствует
13	1938–1939	–1,08±0,08	ВТ	соответствует
14	1942–1943	–1,37±0,08	ВТ	соответствует
15	1949–1950	–0,82±0,08	ВТ	не соответствует
16	1950–1951	–1,14±0,08	ВТ	соответствует
17	1954–1956	–1,49±0,08	ВТ	соответствует
18	1964–1965	–1,19±0,07	ВТ	соответствует
19	1967–1968	–0,72±0,06	ВТ	соответствует
20	1970–1972	–1,61±0,07	ВТ	соответствует
21	1973–1976	–2,15±0,07	ЦТ	соответствует
22	1983–1984	–0,80±0,08	ЦТ	соответствует
23	1984–1985	–1,02±0,08	ЦТ	соответствует
24	1988–1989	–1,89±0,07	ВТ	не соответствует
25	1995–1996	–1,17±0,07	ВТ	соответствует
26	1999–2001	–1,61±0,07	ЦТ	соответствует
27	2005–2006	–0,95±0,06	ВТ	соответствует
28	2007–2008	–1,77±0,08	ВТ	соответствует
29	2010–2011	–1,80±0,06	ЦТ	соответствует
30	2011–2012	–1,12±0,07	ЦТ	соответствует
31	2016–2017	–0,68±0,08	ВТ	не соответствует
32	2017–2018	–0,97±0,08	ВТ	соответствует

Таблица А.6. Типы событий Ла–Нинья с использованием методики классификации [Yeh et al., 2009] с 1870 по 2019 гг. по данным ERSSTv5 и их визуальное соответствие

№	События Ла-Нинья (гг.)	Интенсивность (°C)	Тип по методу (Yeh et al., 2009)	Визуальный анализ
1	1870	–1,31±0,06	ЦТ	соответствует
2	1872–1873	–1,02±0,06	ВТ	соответствует
3	1874	–1,03±0,08	ВТ	соответствует
4	1879–1880	–1,07±0,07	ВТ	не соответствует
5	1886–1887	–1,84±0,07	ЦТ	соответствует
6	1889–1890	–1,77±0,07	ВТ	соответствует
7	1892–1894	–1,27±0,08	ВТ	соответствует
8	1898	–0,73±0,08	ВТ	не соответствует
9	1903–1904	–1,35±0,06	ЦТ	не соответствует
10	1908–1911	–1,62±0,07	ЦТ	соответствует
11	1916–1918	–2,10±0,07	ЦТ	соответствует
12	1921	–1,93±0,06	ВТ	соответствует
13	1922–1923	–1,05±0,06	ВТ	соответствует
14	1924–1925	–1,46±0,08	ВТ	соответствует
15	1933–1934	–1,50±0,08	ЦТ	соответствует
16	1938–1939	–1,65±0,08	ЦТ	соответствует
17	1942–1943	–1,71±0,08	ВТ	соответствует
18	1944–1945	–0,72±0,08	ЦТ	соответствует
19	1946	–1,34±0,07	ВТ	не соответствует
20	1948	–1,03±0,07	ВТ	соответствует
21	1949–1951	–1,54±0,08	ВТ	соответствует
22	1954–1956	–1,91±0,07	ВТ	соответствует
23	1964–1965	–1,09±0,07	ЦТ	соответствует
24	1970–72	–1,48±0,07	ВТ	не соответствует
25	1973–1974	–1,89±0,08	ЦТ	соответствует
26	1975–1976	–1,78±0,08	ЦТ	не соответствует
27	1984–1985	–1,07±0,08	ВТ	не соответствует
28	1988–1989	–1,73±0,06	ЦТ	соответствует
29	1995–1996	–0,78±0,07	ВТ	соответствует
30	1998–2001	–1,55±0,08	ЦТ	соответствует
31	2005–2006	–0,83±0,07	ВТ	соответствует
32	2007–2008	–1,59±0,07	ВТ	соответствует
33	2010–2011	–1,50±0,07	ЦТ	соответствует
34	2011–2012	–1,00±0,08	ЦТ	соответствует
35	2017–2018	–0,91±0,08	ВТ	соответствует

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Композитные поля аномалий температуры воздуха в Европе по данным E-OBS в годы разных типов Ла-Нинья

ВТ ТИП ЛА-НИНЬЯ

а) б) в)

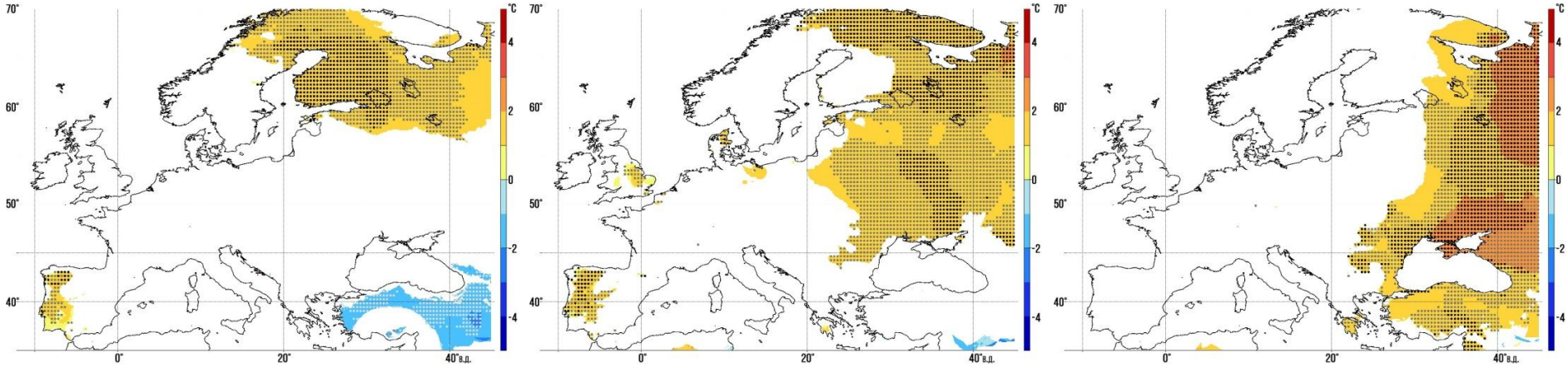


Рисунок Б.1 – Композитные поля откликов на ВТ ЛН аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады октября «0» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

а) б) в)

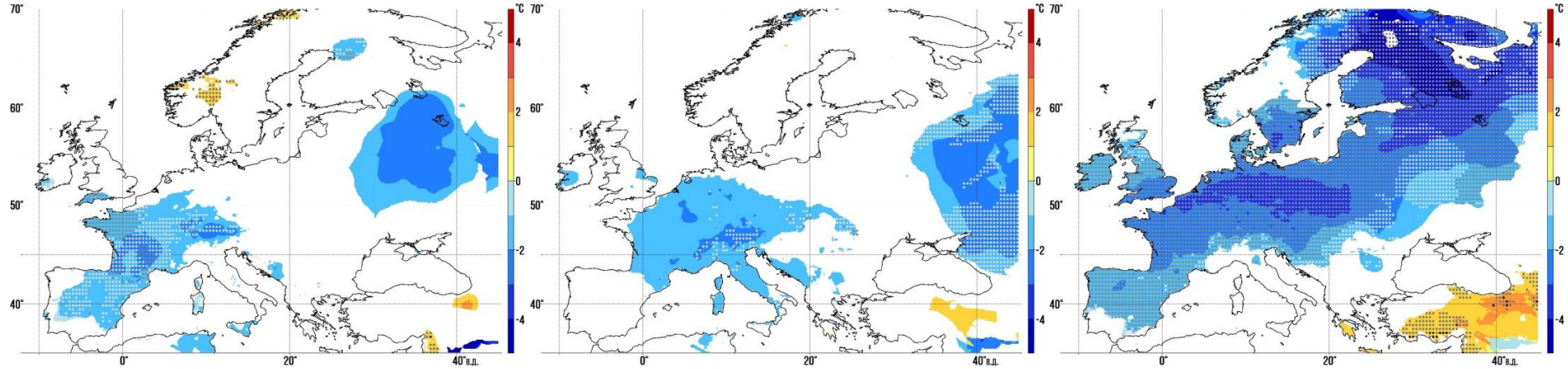


Рисунок Б.2 – Композитные поля откликов аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады февраля «+1» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

а) б) в)

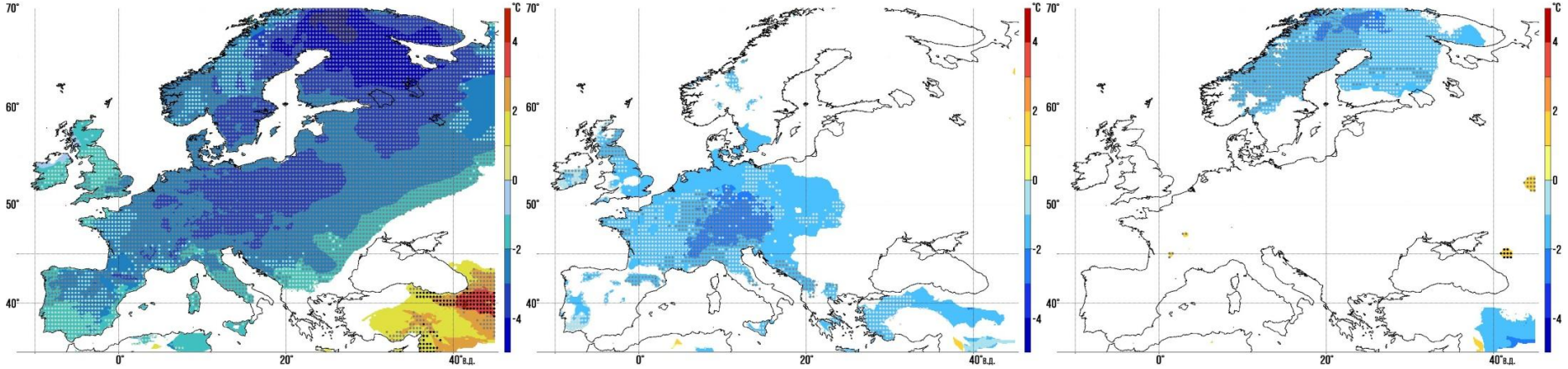


Рисунок Б.3 – Композитные поля откликов аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады марта «+1» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

ЦТ ТИП ЛА-НИНЬЯ

а) б) в)

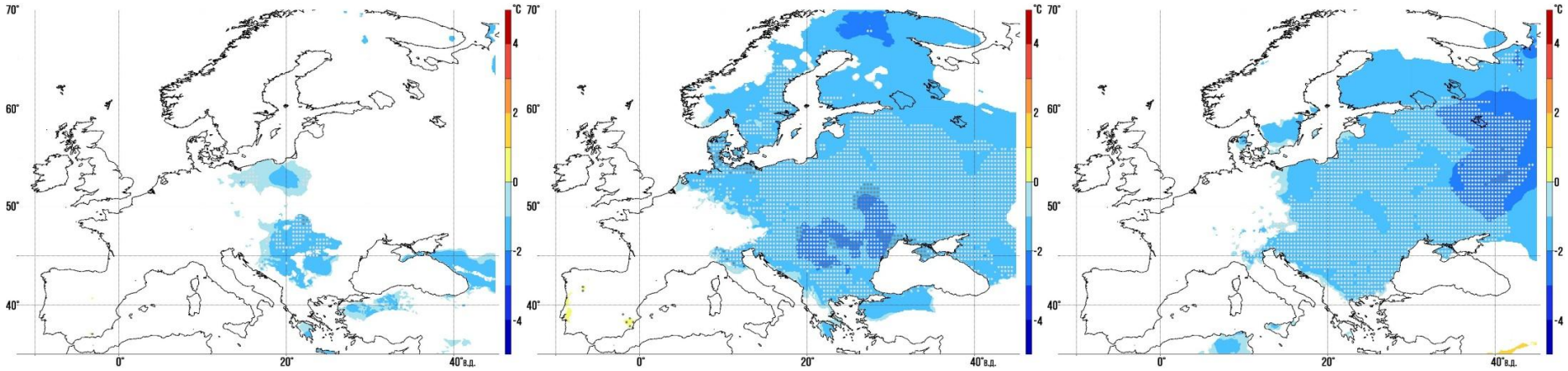


Рисунок Б.4 – Композитные поля откликов на ЦТ ЛН аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады ноября «0» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

а) б) в)

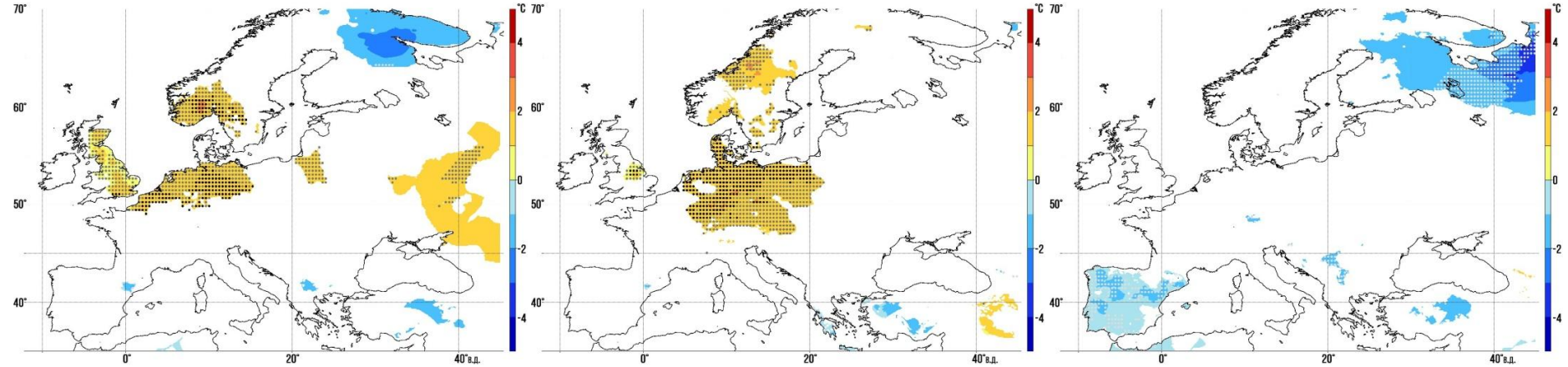


Рисунок Б.5 – Композитные поля откликов аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады января «+1» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.

а) б) в)

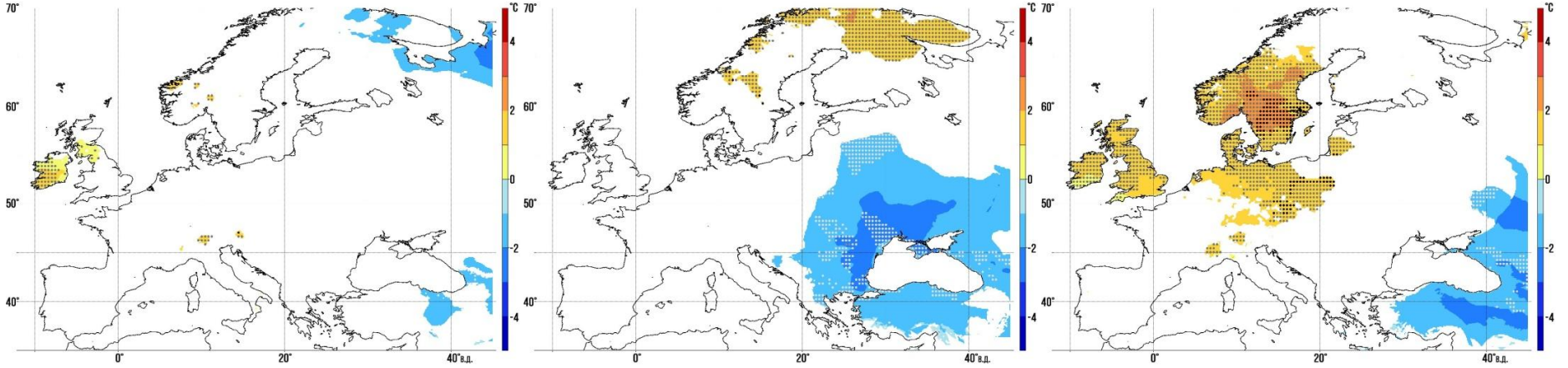


Рисунок Б.6 – Композитные поля откликов аномалий температуры воздуха (°С) в первую (а), вторую (б) и третью (в) декады февраля «+1» года. Светлыми узловыми точками отмечена повторяемость больше 66%, темными – 80%.