

На правах рукописи



ТОРБИНСКИЙ АНТОН ВИКТОРОВИЧ

**ИНДООКЕАНСКИЙ ДИПОЛЬ: МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И
ВЛИЯНИЕ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Институт природно-технических систем»

Научный руководитель: **Полонский Александр Борисович**,
член-корреспондент Российской академии наук, доктор географических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем»

Официальные оппоненты: **Крупчатников Владимир Николаевич**,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук»

Фомин Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук»

Защита состоится «30» сентября 2022 г. в 14–00 ч. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем» и Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» по адресу: **299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» и на сайте www.iptc.spb.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь объединенного диссертационного совета Д 999.231.02 кандидат физико-математических наук



В.П. Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Индоокеанский диполь (ИД) представляет собой одну из основных мод, характеризующих межгодовую изменчивость крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в экваториально-тропической зоне Мирового океана. Это явление оказывает значительное влияние на климат региона и, как следствие, на экономику стран Индоокеанского бассейна. При этом ИД – не до конца изученный природный феномен. Первоначально считалось (см. Y. M. Tourre, K. Ashok, S. Behera и T. Yamagata), что характерный временной масштаб ИД определяется фазовой скоростью планетарных волн в экваториально-тропической зоне Индийского океана и тесно связан с событиями Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), но современные исследования (например, S. Iizuka, H. Saji и S. A. Rao) говорят, что только около 50% событий ИД происходят одновременно с ЭНЮК.

Возникает вопрос: почему не все тихоокеанские аномалии, формирующиеся в период событий ЭНЮК, сопровождаются Индоокеанским диполем? Изучение этой проблемы и описание механизма возникновения независимых от ЭНЮК событий ИД является одной из фундаментальных проблем современной климатологии, актуальность решения которой не вызывает сомнений. Кроме того, влияние ИД на климат Европы, в отличие от его региональных проявлений в странах Индоокеанского бассейна, практически не изучено, что также говорит о важности этого исследования.

Современные данные реанализов, таких как ORAS-5 и JRA, с высоким пространственным разрешением, а также данные натурных наблюдений, осуществляемых в районах рекомендованных курсов коммерческих судов, дают возможность изучить пространственно-временную структуру Индоокеанского диполя, а также механизмы формирования этого явления и его влияние на крупномасштабную изменчивость в системе океан – атмосфера и региональные погодно-климатические аномалии.

Объект исследования – экваториально-тропическая часть Индоокеанского бассейна и Средиземноморско-Черноморский регион.

Предмет исследования – механизм формирования Индоокеанского диполя и его вклад в климатическую изменчивость Средиземноморско-Черноморского региона.

Цель работы – выявить механизм, определяющий возникновение независимых от ЭНЮК событий Индоокеанского диполя, и оценить вклад ИД в региональные климатические аномалии.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1. Изучить особенности изменения гидрофизических полей экваториально-тропической зоны Индийского и Тихого океанов во время развития ИД и генерирующие их механизмы на основе данных различных реанализов, инструментальных измерений и критического обзора литературных источников.

2. Выделить независимые от ЭНЮК события Индоокеанского диполя и определить вероятную причину их формирования.

3. Изучить региональные проявления ИД и оценить его вклад в региональную изменчивость полей приземной температуры воздуха, приземного давления и осадков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология» по пункту 3 «Взаимодействие атмосферы и океана, явление Эль-Ниньо и глобальная атмосфера», отрасль наук – физико-математические науки. Соответствие пункту 3 подтверждается результатами, представленными в положениях, выносимых на защиту.

Научная и практическая значимость результатов. Результаты диссертационной работы направлены на решение одной из фундаментальных проблем современной климатологии – взаимодействия двух основных тропических мод – ЭНЮК и ИД, региональные проявления которых на межгодовом масштабе недостаточно хорошо изучены.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что механизм формирования ИД, описанный в работе, может использоваться для интерпретации модельных расчетов динамических процессов в системе океан – атмосфера для бассейна Индийского океана, а результаты оценки влияния событий ИД на поля приземной температуры воздуха, давления и осадков в Средиземноморско-Черноморском регионе – для совершенствования региональных долгосрочных прогнозов.

Диссертация выполнялась в рамках реализации плановых исследований по базовым темам государственных заданий Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт природно-технических систем» (ИПТС) (№ 0012-2016-0004 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-криосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость глобального и регионального климата», № 0012-2019-0002 и № 0012-2021-0003 «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов») и гранту РФФИ (№ 20-05-00183 «Интерактивная система “Индоокеанский диполь - Эль-Ниньо-Южное колебание”: механизмы и региональные проявления»). Результаты работ по теме диссертации вошли составной частью в отчеты по этим темам и гранту.

Материалы и методы исследования. В работе использовались несколько видов данных:

1. Данные разных типов реанализа: среднемесячные данные о потоках тепла на поверхности океана из реанализа NCEP/NCAR с 1950 по 2001 гг. с пространственным разрешением около $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; среднемесячные данные о потенциальной температуре, солености и зональной компоненте вектора скорости течений за период 1979 – 2018 гг. из реанализов ORA-S5, GLORYS12V1, SODA3 на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ (приведены к указанному разрешению методом бинарной интерполяции); данные с месячным разрешением по приземной температуре

воздуха и приземному давлению за 1979 – 2006 гг. из реанализа JRA-25 в узлах сетки $5^\circ \times 5^\circ$.

2. Данные инструментальных наблюдений: среднемесячные данные о потенциальной температуре, солености и зональной компоненте вектора скорости течений с MRB-станций (заякоренных буях) проекта RAMA (Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction program) с 2000 по 2018 гг.; данные ХВТ (Xpendable Bathy Thermograph) и СТД (Conductivity, Temperature and Depth) наблюдений по температуре и солености из архива WOCE (World Ocean Circulation Experiment) за период с 1986 по 2003 гг.; среднемесячные данные о величинах расходов реки Дунай за период 1947 – 2001 гг.

3. Климатические индексы: индекс моды диполя (ИМД), который представляет собой разницу между температурой морской поверхности (ТПО) в западной экваториальной части Индийского океана (50° – 70° в. д. и 10° ю. ш. – 10° с. ш.) и юго-восточной экваториальной части Индийского океана (90° – 110° в. д. и 10° ю. ш. – 0° с. ш.), индекс Niño 3.4 (аномалии ТПО, осредненные по площади от 5° ю. ш. до 5° с. ш. и от 170° до 120° з. д.)

Для определения вероятной причины формирования независимых от ЭНЮК события Индоокеанского диполя привлекалась классическая теория планетарных волн и спектральный анализ. Оценка вклада региональных проявлений ИД в региональную изменчивость полей приземной температуры воздуха, приземного давления и осадков проводилась с помощью хорошо известных, многократно апробированных методов анализа пространственно-временных полей, таких как разложение на эмпирические ортогональные функции, корреляционный и композитный анализ с оценкой уровня статистической значимости полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту, содержат результаты, полученные автором впервые, что и определяет их **научную новизну**, которая состоит в следующем:

1. На основании обобщенного анализа межгодовой изменчивости гидрофизических параметров в экваториально-тропической зоне Индийского океана изучена роль планетарных волн и струйных течений в механизме возникновения событий ИД. Показано, что скорость адвективного переноса термических аномалий в верхнем слое Индийского океана определяется суперпозицией фазовой скорости распространения планетарных волн и зональной скорости струйных течений. Впервые продемонстрировано, что неустойчивость системы зональных течений может быть причиной генерации независимых от ЭНЮК событий ИД и приводить к асимметрии амплитуды между позитивными и негативными событиями диполя.

2. Описано влияние ИД на региональную климатическую изменчивость метеорологических полей. Впервые количественно оценен вклад событий ИД в пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха, приземного давления и осадков Средиземноморско-Черноморского региона. Показано, что ИД может оказывать существенное влияние на эти параметры. Обнаружено, что в отрицательную фазу ИД возникают значимые положительные

аномалии осадков над площадью водосбора р. Дунай, а в положительную фазу ИД количество осадков над этим водосбором уменьшается, что приводит к формированию соответствующих аномалий расходов Дуная.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: (1) использованием современных данных независимых массивов реанализов и данных контактных наблюдений из Мирового банка океанографических данных; (2) применением классической теории планетарных волн; (3) использованием известных, многократно апробированных методов статистического анализа. Все полученные в диссертации результаты дополняют друг друга и развивают современные представления о динамике системы «океан-атмосфера» и их региональных проявлениях.

Личный вклад автора. Автору диссертационной работы принадлежит ведущая роль в выполнении расчетов и паритетная роль в постановке основных научных задач, а также в интерпретации и анализе результатов расчетов. Все научные результаты и количественные оценки, представленные в работе, получены с личным участием автора. Подготовка основных публикаций проводилась с соавторами, при этом вклад автора был основным. Кроме того, соискатель лично представлял результаты на всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАНУ (2005–2014 гг.) и Лаборатории морских климатических исследований ИПТС (2016–2022 гг.), общепитетском научном семинаре ИПТС (2022 г.). Кроме того, полученные результаты были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях, школах и семинарах: международной научной конференции «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке» (Севастополь, 19 – 24 августа 2006 г.); международной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых «Шевченковская весна. Современное состояние науки: достижения, проблемы и перспективы развития» (Киев, 2 – 3 марта 2006 г.); международной научно-практической конференции «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского региона в условиях глобального потепления климата» (Севастополь, п. Кацивели, 2010 г.); ежегодной научной конференции Московского Государственного Университета «Ломоносовские чтения» (Севастополь, 2005–2021 гг.); международном научно-техническом семинаре «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2006–2020 гг.); международной конференции «WCRP-CLIVAR Workshop on Climate Interactions among the Tropical Basins-2021» (Циндао, 24 – 25 февраля 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 статей: 3 статьи, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science; 5 статей в изданиях, соответствующих п.10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской

Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов - Республики Крым и города федерального значения Севастополя», 6 статей в журналах, входящих в систему РИНЦ. Кроме того, опубликовано 11 тезисов докладов, представленных на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Каждая глава разбита на параграфы и завершается выводами. Диссертационная работа содержит 171 страницу машинописного текста, 3 приложения, 64 рисунков и 18 таблиц в основном тексте работы, 6 таблиц и 3 рисунка в приложениях. Список использованных источников включает 224 наименования.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, члену-корреспонденту РАН Полонскому А.Б. за многочисленные конструктивные консультации. Автор глубоко благодарен доктору географических наук, профессору Воскресенской Е.Н. и доктору физико-математических наук Фомину В.В. за внимательное отношение и полезные обсуждения результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выбранной темы исследования, поставлены цель и задачи, описаны теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту и определяющие новизну диссертационного исследования, а также личный вклад автора, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

Глава 1 полностью посвящена анализу литературных источников, описывающих события ИД. Индоокеанский диполь – это уникальное явление, которое представляет собой одну из основных мод, характеризующих межгодовую изменчивость крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в экваториально-тропической зоне Мирового океана. Аномалии атмосферной циркуляции, которые сопровождают этот климатический сигнал в его экстремальные фазы, оказывают сильное влияние на погодно-климатические аномалии в Индоокеанском регионе (рисунок 1). Поэтому изучению ИД в настоящее время уделяется большое внимание. В результате детального изучения литературных источников, посвященных ИД, выяснено, что большинство исследователей, занимающихся этой проблемой, пришло к выводу, что ИД является независимой модой климатической изменчивости, которая в значительном числе проанализированных случаев (но далеко не всегда!) взаимодействует с тихоокеанской модой - ЭНЮК.

Причем, события ИД, судя по всему, поддерживаются взаимодействием океана и атмосферы в экваториальной области, происходящим на фоне интенсивной сезонной изменчивости гидрофизических полей экваториально-тропической зоны Индийского океана. Детальное изучение и учет этого явления могут значительно улучшить перспективы долгосрочных прогнозов погодно-

климатических аномалий не только для Индоокеанского региона, но и в общепланетарном масштабе. Поэтому актуальность исследования этого вопроса не вызывает сомнений.

В параграфе 2.1 Главы 2 описываются используемые в работе данные реанализов и инструментальных наблюдений. Для анализа характеристик верхнего слоя экваториально-тропической зоны Индийского океана привлекались данные ХВТ и СТД-наблюдений (карта ХВТ-разрезов представлена на рисунке 2). Сведения о ежемесячных потоках тепла на поверхности океана за временной промежуток с 1950 по 2001 г. заимствовались из реанализа NCEP/NCAR.

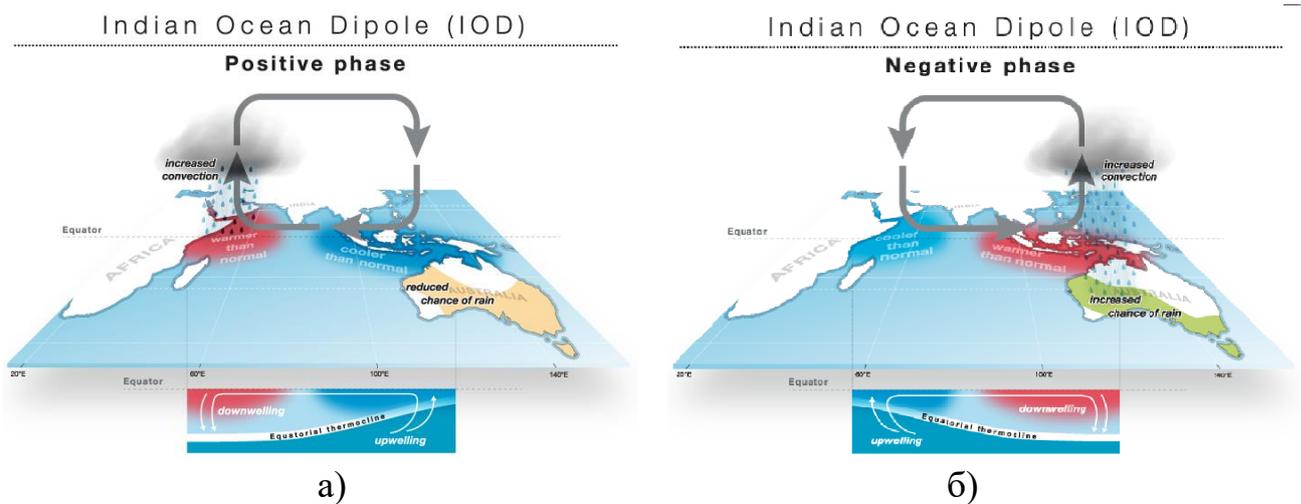


Рисунок 1 – Положительная (а) и отрицательная (б) фазы Индоокеанского диполя и состояние экваториального термоклина в Индийском океане во время этой фазы (красным отмечены области Индийского океана в которых температура аномально выше средней, синим – аномально ниже) ¹

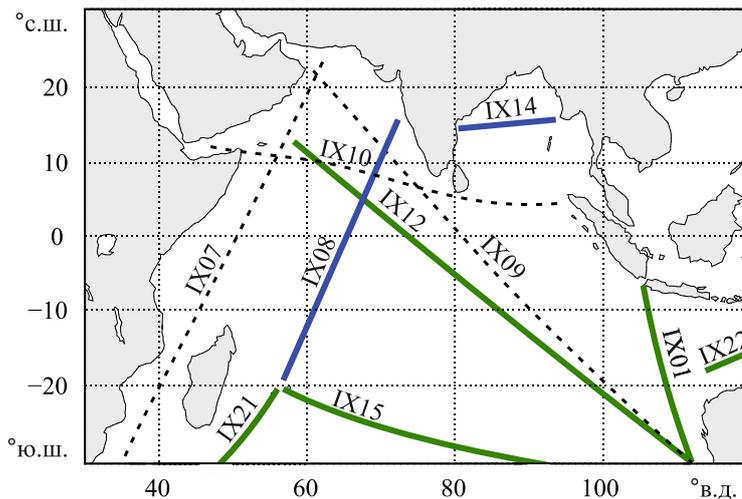


Рисунок 2 – Сеть ХВТ-разрезов в Индийском океане по состоянию на 2003 г. (зеленая линия – регулярная выборка с общедоступными данными; синяя – регулярная выборка, но с ограниченной доступностью данных; штриховая – нерегулярные выборки)

¹ Бюро метеорологии правительства Австралии (Bureau of Meteorology of Australian Government): [сайт]. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/about/australian-climate-influences/images/iod-neutral.png> (дата обращения: 25.06.2022).

Параграф 2.2 полностью посвящен верификации океанических реанализов ORA-S5, GLORYS12V1 SODA3, которая проводится путем сравнения их с натурными наблюдениям программы RAMA. Показано, что данные реанализов ORA-S5, GLORYS12V1 SODA3 достаточно хорошо описывают реальную термогалинную структуру в Индийском океане в местах расположения выбранных MBR-станций программы RAMA, при этом данные о потенциальной температуре незначительно завышены (см. таблицу 1). Обнаружено, что все три реанализа имеют общую тенденцию к занижению величин зональной компоненты вектора течений. Наименьшим занижением значений этого параметра (в среднем около 12%) охарактеризовались данные реанализа ORA-S5. В связи с этим для изучения механизмов генерации ИД в диссертационной работе использовались данные именно этого реанализа.

Таблица 1. Осредненные по трем MRB-станциям среднемноголетние значения зональной компоненты вектора течений, полученные из массива RAMA ($\langle \bar{U} \rangle^R$) и по данным реанализов ORA-S5 ($\langle \bar{U} \rangle^O$), SODA3 ($\langle \bar{U} \rangle^S$) и GLORYS ($\langle \bar{U} \rangle^G$) за период 2013–2018 гг. в точках с координатами 12° ю. ш., 55° в. д.; 12° ю. ш., 67° в. д.; 12° ю. ш., 93° в. д. на горизонте 10 м; отношения среднемноголетних значений прямых наблюдений к соответствующим данным реанализов

Глубина, м	Осредненная среднемноголетняя зональная компонента вектора скорости, м/с				Отношение осредненной среднемноголетней зональной компоненты вектора течений		
	$\langle \bar{U} \rangle^R$	$\langle \bar{U} \rangle^O$	$\langle \bar{U} \rangle^G$	$\langle \bar{U} \rangle^S$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/O}$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/G}$	$\langle \bar{U} \rangle^{R/S}$
10	-17,6	-15,7	-15,2	-15,2	1,12	1,16	1,16

Далее в **параграфе 2.3** описываются результаты вейвлет-разложения январских турбулентных потоков тепла, рассчитанные по данным реанализа NCEP за 1950–2001 гг. для центральной и восточной частей экваториальной зоны Индийского океана. Показано, что коэффициенты вейвлет-разложения суммарных турбулентных потоков тепла ярко демонстрируют противофазный характер изменчивости турбулентных потоков тепла в рассматриваемых районах на временных масштабах от нескольких до десяти лет. Сделан вывод, что изменчивость океанографических характеристик в подповерхностном слое экваториальной зоны Индийского океана решающим образом определяет пространственно-временные характеристики ИД.

Далее, в этом же параграфе анализируется временной ход теплозапаса верхнего 260-метрового слоя для двух ХВТ-разрезов Индийского океана: с координатами 22°–6° ю. ш., 105°–110° в. д. (IX01) и 6° ю. ш. – 11° с. ш., 52°–73° в. д. (IX12) (см. рисунок 2). Показано, что сдвиг фаз между вариациями теплозапаса,

наблюдаемыми в центральной и восточной частях региона, составляет примерно 2 года. Причем если считать, что аномалии теплозапаса распространяются с востока на запад, а межгодовая изменчивость теплозапаса определяется главным образом адвекцией тепла Южным Пассатным течением, то можно сделать следующий вывод: скорость распространения возмущения в зональном направлении составляет около 4 см/с. Далее, анализируется взаимосвязь поверхностных и подповерхностных процессов в экваториальной зоне Индийского океана через сравнение графиков скорости изменения теплозапаса в центральной и восточной частях региона (7° – 8° ю. ш., 77° в. д. и 7° – 8° ю. ш., 105° в. д. соответственно) и межгодовых вариаций суммарных турбулентных потоков тепла на поверхности океана.

В результате такого сравнения была обнаружена малая зависимость изменений теплозапаса от вариаций локальных турбулентных потоков тепла на поверхности океана. Поэтому был сделан вывод, что изменения теплозапаса не могут быть объяснены только изменениями потоков тепла, так как первые не только существенно превышают последние по абсолютной величине, но в ряде случаев даже совпадают по знаку. Сделано заключение, что эти изменения в значительной степени обусловлены адвекцией тепла, связанной с динамикой экваториальной зоны Индийского океана.

В параграфе 2.4 с помощью данных ХВТ- и СТД-зондирований и данных реанализа ORA-S5 проанализирована роль зональных течений и планетарных волн в распространении термических аномалий в экваториально-тропической зоне Индийского океана. Для определения фазовых скоростей волновых возмущений исследовалась область Индийского океана, ограниченная координатами 3° – 14° ю. ш., 72° – 74° в. д. и привлекалась стандартная теория волн. С использованием результатов классических работ, было выписано выражение для фазовой скорости волн Россби в декартовой (правой) системе координат. Плоскость xy совпадает с поверхностью океана. Ось x направлена на восток, ось y – на север. Вертикальная ось z – направлена вверх. Исходное уравнение для возмущений давления P' в случае безбрежного океана постоянной глубины H , заполненного стратифицированной невязкой жидкостью, которая характеризуется частотой Вайсяля – Брента $N(z)$, было записано в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\nabla^2 P' - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f_0^2}{N^2} \frac{\partial P'}{\partial z} \right) \right] + \beta \frac{\partial P'}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

с граничными и начальными условиями

$$z=0 : \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{g}{N^2} \frac{\partial P'}{\partial z} + P' \right) = 0, \quad z=H : \frac{\partial^2 P'}{\partial z \partial t} = 0, \quad t=0 : P' = P^0(x, y, z). \quad (1a)$$

Здесь β – параметр, описывающий изменение параметра Кориолиса f_0 с широтой φ :

$$\beta = \frac{2\Omega \cos \varphi}{R}, \quad f_0 = 2\Omega \sin \varphi, \quad (2)$$

где $\Omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ – угловая частота вращения Земли; $R \approx 6370 \text{ км}$ – радиус Земли.

Решение задачи (1) – (1a) было представлено как:

$$P' = \sum_0^{\infty} P_m(x, y, t) \Psi_m(z), \quad (3)$$

где функции $P_m(x, y, t)$ удовлетворяют следующему уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla^2 P_m - \frac{f_0^2}{gh_m} P_m \right) + \beta \frac{\partial P_m}{\partial x} = 0, \quad m = 0, 1, \dots, \quad (4)$$

а h_m и $\Psi_m(z)$ есть собственные значения и собственные функции одномерной задачи.

Уравнение (5) описывает распространение баротропных ($m = 0$) и бароклиных ($m = 1, 2, \dots$) волн Россби с дисперсионным соотношением:

$$\omega_m = - \frac{\beta k}{k^2 + l^2 + \gamma_m^2}, \quad (5)$$

где $m = 0, 1, \dots$ – номер моды; k и l – волновые числа по осям x и y , а γ_m^2 можно представить в виде:

$$\gamma_m^2 = f_0^2 / gh_m. \quad (6)$$

Эти волны в классической гидродинамике известны давно и описаны, например, в историческом обзоре Г. Платцмана, но К. Россби первым показал их исключительную важность для метеорологии (см., например, работу А.В.Фролова). Поэтому в метеорологической и океанографической литературе их называют волнами Россби. Дисперсионное соотношение (5) для случая, когда распространение волновых возмущений происходит только в зональном направлении ($l = 0$) записывается следующим образом:

$$\omega_m = - \frac{\beta k}{k^2 + \gamma_m^2}. \quad (7)$$

Подставив выражение (6) в формулу (7) получаем соотношение (8):

$$\omega_m = - \frac{\beta k}{k^2 + \frac{f_0^2}{gh_m}}, \quad (8)$$

где h_m (для $m > 0$) является эквивалентной глубиной, определяющей скорость распространения длинной планетарной бароклиной волны, и может быть выражена как

$$h_m = \frac{N^2 H^2}{gm^2 \pi}. \quad (9)$$

Так как фазовая скорость в общем случае выражается в виде:

$$c_m = \frac{\omega_m}{k}, \quad (10)$$

то для первой бароклиной моды ($m = 1$) длинной волны Россби ($\lambda = 2\pi/k > 1000$ км) величина k^2 примерно на порядок меньше, чем отношение f_0^2/gh_m выражение для фазовой скорости может быть записано в следующем виде:

$$c_1 = -\frac{\beta g h_1}{f_0^2}. \quad (11)$$

Это соотношение определяет фазовую скорость длинных недиспергирующих волн Россби, и оно было использовано в диссертации для получения величин фазовых скоростей.

В этой же главе в **параграфе 2.4** было дано определение критического слоя, с помощью дисперсионного соотношения для баротропных ($m = 0$) и бароклиных ($m = 1, 2, \dots$) волн Россби, распространяющихся в потоке, средняя скорость которого равна U :

$$U - c_m = -\frac{\beta k}{k^2 + l^2 + \gamma_m^2}. \quad (12)$$

Если U – положительная величина, то течение направлено на восток (восточный поток), если же отрицательная, то течение направлено на запад (западный поток). Если распространение волновых возмущений происходит только в зональном направлении $l = 0$ в зональном потоке, а $m = 1$ (т.е. для первой бароклиной моды), то дисперсионное соотношение (12) примет вид:

$$k^2 + \gamma_l^2 = -\frac{\beta k}{U - c_l}. \quad (13)$$

В случае, когда знаменатель в дисперсионном соотношении (13) обращается в нуль (фазовая скорость волны Россби равна зональной компоненте скорости среднего течения), в решении возникнет сингулярность – критический слой. В критических слоях энергия может передаваться от волн к среднему течению, что приводит к уменьшению их амплитуды до нуля, т. е. происходит поглощение волновой энергии. В другом случае энергия может поступать от среднего течения к растущим волновым возмущениям, т. е. реализуется неустойчивость средней циркуляции. Именно в этом слое возможно развитие растущих возмущений, определяющих возникновение независимых от ЭНЮК событий ИД.

Расчет среднегодовых значений частоты Вяйсяля – Брента производился по данным о вертикальном распределении среднемесячных величин потенциальной температуры θ и солёности S морской воды. По данным для каждого конкретного месяца вычислялось среднее значение потенциальной плотности, затем по формуле (14) – среднемесячная частота Вяйсяля – Брента:

$$N(z) \equiv \sqrt{-\frac{g \partial \rho}{\rho \partial z}}, \quad (14)$$

здесь ρ – потенциальная плотность морской воды, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\partial \rho / \partial z$ – вертикальный градиент плотности.

Значения фазовой скорости распространения возмущений термических аномалий в зональном направлении ($V_{\text{фаз}}$) рассчитывались с использованием результатов анализа взаимных спектров изменения теплозапаса к югу от экватора в восточной и западной частях Индоокеанского бассейна. Для этого по

архивным материалам реанализа ORA-S5 были получены данные за период 1960–2005 гг. о вертикальном распределении температуры воды 300-метрового слоя океана на двух меридиональных разрезах в окрестности 50° и 110° в.д. с 8° по 14° ю. ш. Эти данные позволили рассчитать среднемноголетнее значение температуры, а затем и величину изменения теплозапаса на каждом разрезе.

Далее с помощью спектрального анализа, включая кросс-спектральные оценки, были получены средние значения теплозапаса $\langle Q \rangle$, стандартные отклонения от этой величины δQ , а также сдвиг фаз Δt между значениями изменчивости термических характеристик верхнего слоя в различных частях экваториально-тропической зоны Индийского океана. Фазовая скорость распространения термических возмущений вычислялась с помощью формулы $V_{\text{фаз}} = \Delta x / \Delta t$, где Δx – расстояние между исследуемыми областями, равное 60° . Среднегодовые величины зональной компоненты скорости течения U заимствовались из данных реанализа ORA-S5.

На рисунке 3 представлено изменение средней величины скоростей зональных течений в слое 0–300 м (I), фазовой скорости планетарных волн с широтой (II), алгебраическая сумма величин скоростей зональных течений и фазовой скорости планетарных волн (III), а также скорость распространения аномалий теплозапаса в зональном направлении (IV). Видно, что результирующая кривая III изменяется с широтой почти так же, как и кривая IV, характеризующая распространение аномалий теплозапаса вод верхнего слоя океана в зональном направлении и оцененная по натурным данным.

Из рисунка 3 так же видно, что в окрестности 13° ю. ш. образуется критический слой, в котором фазовая скорость волн Россби равна средней скорости зонального течения. В этом слое за счет неустойчивости системы зональных течений возможна генерация растущих возмущений, проявляющихся в виде планетарных бароклинных волн. Высказано предположение, что наличие или отсутствие этого слоя в некоторые сезоны (вследствие интенсивной внутригодовой изменчивости системы зональных течений в экваториальной зоне Индийского океана) определяет существование Индоокеанского диполя как независимой от событий Тихоокеанского региона межгодовой моды системы «океан – атмосфера».

В **Главе 3** анализируется взаимодействие ЭНЮК и ИД. Критический анализ литературы, выполненный в **параграфе 3.1** показал, что 65% сильных эпизодов ИД возникали в отсутствие событий ЭНЮК, а 35% оставшихся событий ИД всегда сопровождалось теплыми событиями ЭНЮК, что подтверждается работами S. Iizuka и S. A. Rao (таблица 2).

Если предположить, что независимое от ЭНЮК событие ИД возникает в следствие неустойчивости системы индоокеанских зональных течений в критическом слое, в котором фазовая скорость равна скорости зональных течений, то анализируя время возникновения этого слоя и начала ЭНЮК можно произвести типизацию ИД на предмет поиска независимых от ЭНЮК событий, вызванных этим механизмом.

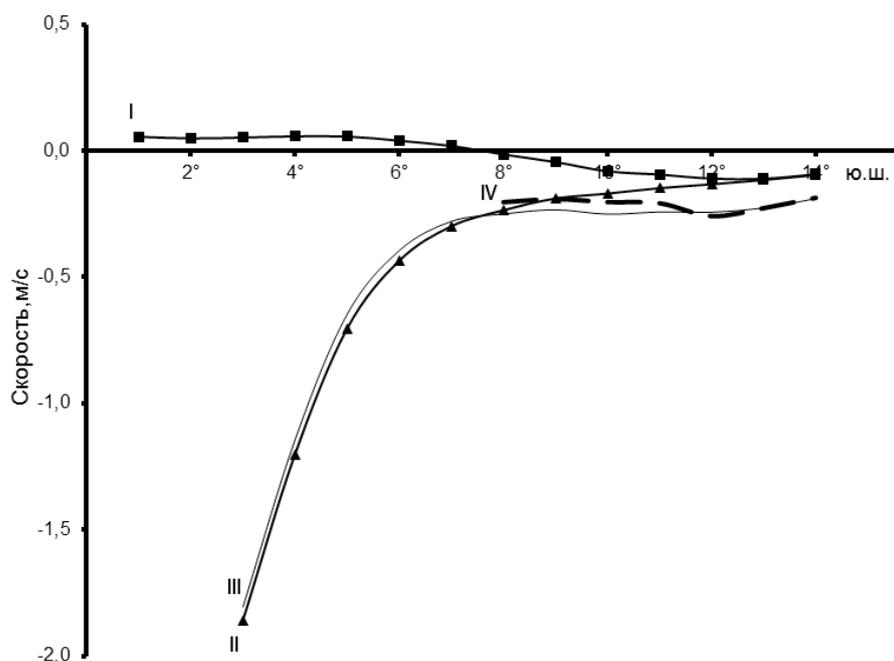


Рисунок 3 – Среднегодовое распределение зональных скоростей (знак минус соответствует распространению возмущений на запад) на меридиональном разрезе: I – зональная компонента скорости течений U в слое 0–300 м, осредненная за период 1960–2005 гг.; II – фазовая скорость первой бароклинной моды волны Россби; III – суммарная скорость планетарных волн и зональных течений; IV – скорость распространения возмущений в зональном направлении $V_{\text{фаз}}$, оцененная по изменению теплозапаса в центральной и восточной частях Индийского океана по ХВТ- данным разрезов IX01 и IX12 (см. рисунок 2)

Таблица 2. Годы сильных положительных (отрицательных) событий ИД, совпадающие и не совпадающие с событиями ЭНЮК

Фаза ИД	Годы
Отрицательная	1884 1879 1889 1893 1899 1901 1906 1910 1917 1920
	1954 1958 1964 1975 1984 1989 1975 1992 1996
Положительная	1887 1902 1923 1926 1935 1944 1946 1953 1961 1963
	1972 1982 1994 1997

Примечание – синим выделены годы Ла-Ниньо; красным – Эль-Ниньо по модельным данным S. A. Rao за период 1884 – 1997 г.

В параграфе 3.2 анализируется пространственно-временное распределение критических слоев, полученное для Индоокеанского региона к югу от экватора с помощью данных реанализа ORA-S5. Показано, что эти критические слои

возникают в два раза чаще и с большей протяженностью в годы положительной фазы Индоокеанского диполя. Причем, чаще всего протяженные слои формируются весной, за один – два месяца до начала развития события ИД, который начинается в начале лета (рисунок 4).

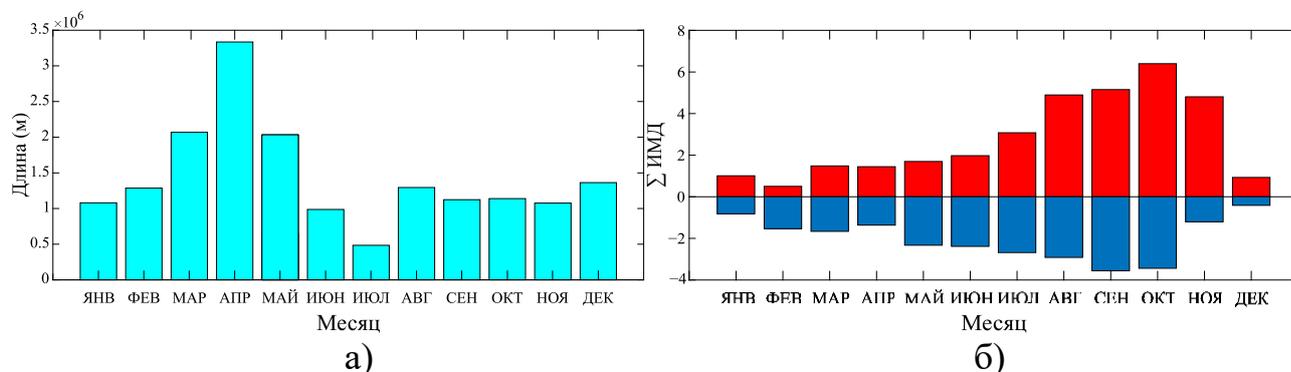


Рисунок 4 – Распределение общей длины критических слоев (бирюзовые столбцы), 10^6 м (а), и ИИМД по абсолютной величине с величиной более 0,4 в положительную (красные столбцы) и в отрицательную (синие столбцы) фазу ИД (б), усредненных за каждый месяц. Использованы данные реанализа за период 1979–2018 гг.

Этот результат говорит о том, что наличие неустойчивости системы зональных течений, обычно возникающей вследствие появления критического слоя перед началом развития положительной фазы Индоокеанского диполя, может быть причиной его генерации и асимметрии амплитуды (см. рисунок 4б) между позитивными и негативными событиями.

Далее, в **параграфе 3.3** проводится типизация событий ИД. Принцип типизации заключался в сравнении временных рядов ИИМД, общей длины критического слоя и индекса Niño 3.4 за период 1979–2018 гг. Выделено три типа событий ИД. Первый тип – это события ИД, которые происходят после событий ЭНЮК и, вероятнее всего, являются результатом воздействия ЭНЮК. Второй тип ИД представляет собой события, происходящие до начала ЭНЮК и, возможно, являющиеся причиной его появления. Третий тип – события ИД, развивающиеся независимо от явлений Эль-Ниньо (ЭН) или происходящие во время Ла-Ниньо (ЭН).

К первому типу ИД было отнесено событие 1998 г., когда ИД развивался с запаздыванием относительно события ЭНЮК. В июле 1998 г. ИД перешел в отрицательную фазу на месяц позже, чем ЭНЮК, индекс которого в июне принял отрицательное значение.

Второй тип, когда событие ИД начинается раньше, чем Эль-Ниньо, хорошо иллюстрируется временным рядом ИИМД и индекса Niño 3.4 за 1994 г. (рисунок 5а). При этом ИИМД принял положительное значение 0,3 уже в марте 1994 г., тогда как ЭНЮК все еще находился в отрицательной фазе. В апреле, когда индекс Niño 3.4 пересек ноль, ИИМД уже имел значительное положительное значение (0,4), которое обычно характеризует сильное событие ИД. Следует отметить, что в этом месяце появляются критические слои большой протяженности. Следовательно,

неустойчивость океанических течений в окрестности этих слоев может быть причиной повышенной величины ИМД.

Третий тип событий ИД, действующих в отсутствие Эль-Ниньо, можно увидеть на примере 2017 г. (рисунок 5б). На этом рисунке ясно видно, что события ИД могут быть вызваны неустойчивостью зональных течений Индийского океана без какой-либо видимой связи с явлениями Эль-Ниньо. Действительно, в районе Южно-Пассатного течения в Индийском океане именно в этом случае находились наиболее протяженные критические слои за весь рассматриваемый период, что подтверждает высказанные выше предположения. Следует особенно отметить нетипичное развитие положительной фазы ИД во время Ла-Ниньо.

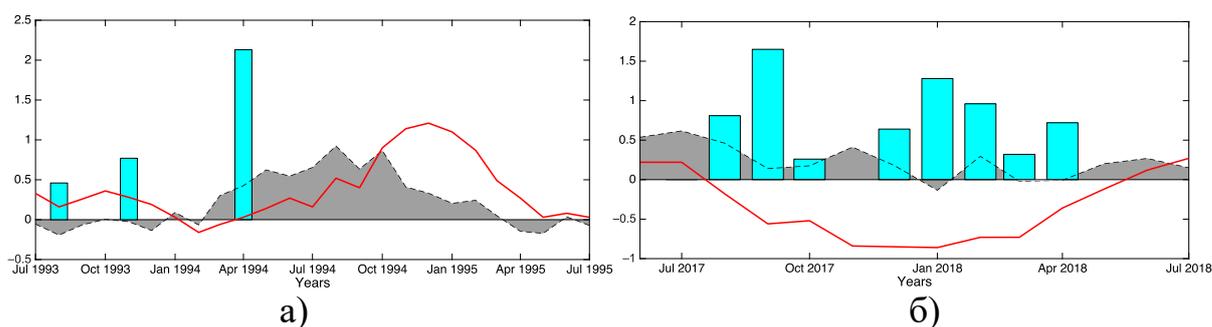


Рисунок 5 – Индекс моды диполя (ИМД) (черная штриховая кривая и серая область), индекс Niño 3.4 (сплошная кривая) и общая длина критических слоев, 10^5 м (столбцы), за период с июля 1993 г. по июль 1995 г. (а) и за период с декабря 1996 г. по июнь 1998 г. (б)

В итоге, в главе 3 в параграфе 3.3 на примере разных событий ИД и ЭНЮК продемонстрировано, что образование протяженного критического слоя, весьма вероятно, является причиной возникновения события ИД, не зависящего от Эль-Ниньо и развивающегося раньше ЭН. Этот оригинальный результат может прояснить механизм генерации Индоокеанского диполя.

В Главе 4 исследуются региональные проявления ИД. В параграфах 4.1 и 4.2 дается критический обзор литературы, посвященный влиянию событий ИД на климат стран Индоокеанского бассейна, а также описывается возможный механизм влияния ИД на Европу. Выяснено, что изменение состояния системы океан – атмосфера, связанное с событиями ИД, оказывает существенное влияние на метеорологические параметры в прилегающих к Индийскому океану районах и влечет за собой серьезные последствия для общества, экономики и экосистемы. Делается вывод, что это влияние хорошо описано для экваториально-тропической области в Индо-Тихоокеанском секторе Мирового океана и прилегающих материковых районах, но для Европы почти не изучено.

Параграф 4.3 посвящен оценке вклада событий Индоокеанского диполя в изменчивость полей приземной температуры воздуха (ПТВ) и приземного давления (ПД) Средиземноморско-Черноморского региона.

С помощью данных реанализа JRA-25 и разложения полей ПТВ и ПД на эмпирически ортогональные функции было получено распределение

процентного вклада первых четырех эмпирических мод поля ПТВ и поля ПД в их общую дисперсию для парных месяцев за период 1979–2006 г. Этот результат представлен в таблице 3.

Таблица 3. Распределение процентного вклада первых четырех эмпирических мод полей ПТВ и ПД в их общую дисперсию

Мода	Январь – Февраль	Март – Апрель	Май – Июнь	Июль – Август	Сентябрь – Октябрь	Ноябрь– Декабрь
<i>Приземная температура воздуха</i>						
1	67,7	70,0	40,0	32,3	44,7	51,2
2	14,6	13,7	26,9	27,5	20,1	23,0
3	9,1	6,5	11,4	14,8	15,0	11,6
4	2,5	1,9	5,8	6,3	4,7	4,7
<i>Приземное давление</i>						
1	59,5	53,0	68,3	46,4	58,9	48,5
2	29,1	28,7	13,8	21,7	23,7	33,9
3	7,6	11,2	7,6	13,4	6,1	8,2
4	1,8	2,7	4,5	6,5	3,9	4,3

Если просуммировать величину вклада каждой моды поля ПТВ для соответствующей пары месяцев, становится ясно, что с ноября по апрель первые четыре моды ответственны за более чем 90% дисперсии суммарной пространственно-временной изменчивости. С мая по октябрь это значение снижается в среднем до 80%. Максимум дисперсии, приходящейся на первые четыре моды (почти 95%), наблюдается в январе – феврале. В поле ПД величина суммарного вклада первых четырех мод превышает 90% во все месяцы, кроме июля – августа, когда эта величина равна 88%. Значения процентных вкладов из таблицы 3 использовались для количественного анализа влияния ИД на климатическую изменчивость в Средиземноморско-Черноморском регионе.

Далее для каждого временного ряда за парные месяцы были выделены линейные тренды ПТВ и ПД. Результаты показали, что летом тренды ПТВ достигают максимальных значений. Причем на большей части рассматриваемого региона тренды оказались значимы. Так как процедура удаления трендов из рядов температуры и давления позволила более надежно выделить короткопериодные компоненты климатической изменчивости, а четвертая мода вносит незначительный процентный вклад (см. таблицу 3), то впоследствии в диссертации

были использованы и проанализированы только первые три детрендрованные моды. Для описания влияния ИД на климатическую изменчивость Средиземноморско-Черноморского региона обратимся к результатам, представленным в таблице 4.

Таблица 4. Распределение коэффициентов корреляций между первыми тремя модами поля ПТВ и ПД и средним индексом ИД для парных месяцев за 1979–2006 гг.

Мода	Январь – Февраль	Март – Апрель	Май – Июнь	Июль – Август	Сентябрь – Октябрь	Ноябрь – Декабрь
<i>Приземная температура воздуха</i>						
1	-0,15	0,20	-0,09	-0,30*	-0,19	-0,15
2	0,18	-0,23**	0,21**	-0,22**	-0,11	-0,36*
3	-0,21**	0,22**	-0,25*	0,20**	0,16	-0,06
<i>Приземное давление</i>						
1	0,04	0,06	-0,02	0,18	-0,22**	-0,13
2	-0,04	0,02	-0,30*	-0,24**	0,18	0,19
3	-0,09	0,03	-0,24**	-0,49*	0,09	-0,14

Примечание – Знаком «*» отмечены коэффициенты корреляции, значимые на доверительном уровне 95%, «**» – значимые на доверительном уровне 90%

Из таблицы 4 видно, что ИД влияет на первые три эмпирические моды поля ЭОФ в июле – августе как в поле ПТВ, так и в поле ПД с максимальными (по абсолютной величине) значениями коэффициентов корреляции $-0,30$ (первая мода ПТВ) и $-0,49$ (третья мода ПД). ИД вносит соответственно 9 и 15% в дисперсию этих мод. Исходя из данных, представленных в таблице 4, был сделан вывод, что влияние ИД проявляется в структуре эмпирических мод давления и температуры со времени максимального развития ИД (весной). Следует заметить, что полученные в данной работе результаты можно считать абсолютно новыми, так как влияние ИД ранее подробно описывалось только для экваториально-тропического региона.

Параграф 4.4 посвящен проверке (подтверждению) модельных экспериментов, выполненных в 2018 году в работе А.Б. Полонского. Эти эксперименты показали, что ИД значимо влияет на аномалии количества осадков над площадью водосбора р. Дунай. Для проверки этого модельного результата был

проведен корреляционный анализ связи аномалий стока р. Дунай с событиями ИД за три периода: 1947–1964 гг., 1947–1971 гг. и 1947–2001 гг. Выбор таких периодов был обусловлен тем, что в 1964 году была заложена и в мае 1972 г. открыта Джердапская ГЭС и началось искусственное зарегулирование стока реки. Поэтому по причине невозможности узнать точное время начала зарегулирования был выбран период до начала строительства ГЭС и период до ввода ее в эксплуатацию с целью исключить из исследуемых данных величины стоков Дуная после его зарегулирования. К сожалению, это существенно уменьшило длину ряда, но зато позволило оценить эффективность воздействия ИД на расходы Дуная до начала зарегулирования стока реки.

Полученные отрицательные значения коэффициентов корреляции, представленные в таблице 5, говорят о том, что в поле осадков отрицательная фаза ИД способствует росту положительных аномалий количества осадков над площадью водосбора р. Дунай, а положительная фаза ИД ведет к уменьшению количества осадков над этим водосбором. Этот результат, в свою очередь, подтверждает выводы, полученные на основании анализа результатов численных экспериментов.

Таблица 5. Распределение синхронных коэффициентов корреляции r между среднемесячными величинами расходов р. Дунай и индексами ИД с мая по август

Коэффициент корреляции	Май	Июнь	Июль	Август
r_{64}	-0,25**	-0,31**	-0,24**	-0,22**
r_{71}	-0,04	-0,26*	-0,13**	-0,1
r_{01}	-0,03	-0,16*	-0,19*	-0,005

Примечание – r_{64} – коэффициент корреляции за 1947–1964 гг.; r_{71} – коэффициент корреляции за 1947–1971 гг.; r_{01} – коэффициент корреляции за 1947–2001 гг.; знаком «*» отмечены коэффициенты корреляции, значимые на доверительном уровне 90%; «**» – значимые на доверительном 75%-ном уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе с помощью материалов архивных инструментальных измерений гидрофизических характеристик в экваториально-тропической зоне Индийского океана, данных атмосферных и океанических реанализов продемонстрирована роль океанических планетарных волн и струйных течений в механизме возникновения событий Индоокеанского диполя. Произведена типизация событий ИД, в рамках которой выделены независимые от ЭНЮК случаи, а также проанализированы случаи, при которых ИД и ЭНЮК взаимодействовали между собой. Изучено влияние событий Индоокеанского

диполя на климатическую изменчивость гидрометеорологических параметров различных районов Земного шара, включая Средиземноморско-Черноморский регион. Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основании современных данных реанализов для тропической части Индийского океана получено, что скорость адвективного переноса аномалий теплозапаса верхнего слоя в зональном направлении определяет характерный временной масштаб Индоокеанского диполя. Показано, что величина этой скорости имеет порядок 10 см/с и определяется суперпозицией фазовой скорости первой бароклинной моды волн Россби и средней скорости зональных течений.

2. Впервые для тропической зоны Индийского океана построено пространственно-временное распределение характеристик критического слоя, в котором фазовая скорость волн Россби и средних скоростей зональных течений равны между собой. Показано, что появление критического слоя обычно на один – два месяца предшествует началу события Индоокеанского диполя. Выделено два типа ИД, развивающихся независимо от Эль-Ниньо: первый тип представляет собой события, возникающие в Индийском океане до начала ЭН, а второй – это события ИД, происходящие во время Ла-Ниньо. Впервые продемонстрировано, что события ИД могут развиваться независимо от ЭН в случае наличия протяженного критического слоя.

3. Обнаружен статистически значимый сигнал в гидрометеорологических полях Средиземноморско-Черноморского региона в летний период, связанный с ИД. Показано, что вклад Индоокеанского диполя в дисперсию региональных среднемесячных гидрометеорологических полей составляет порядка 10%. Найдена статистически значимая (на уровне 90%) связь между расходами р. Дунай и событиями Индоокеанского диполя, обусловленная влиянием ИД на аномалии осадков над площадью водосбора этой реки.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Polonsky A., Meyers G., **Torbinsky A.** Interannual variability of the heat content of the upper layer in the equatorial Indian Ocean and the Indian-Ocean dipole. // *Physical Oceanography*. – 2007. – Vol. 17, issue 3. – P. 129–140. DOI: 10.1007/s11110-007-0011-y.

2. Polonsky A., **Torbinsky A.** Velocity of propagation of temperature anomalies in the tropical zone of the Indian Ocean. // *Physical Oceanography*. – 2009. – Vol. 19, issue 2. – P. 63–71. DOI: 10.1007/s11110-009-9042-x.

3. Polonsky A., **Torbinsky A.** The IOD–ENSO Interaction: The Role of the Indian Ocean Current’s System. // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, issue 12. – P. 1662. DOI: 10.3390/atmos12121662.

Статьи, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК Украины (в соответствии с п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 723):

1. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.** Межгодовая изменчивость

термических характеристик верхнего слоя экваториально-тропической зоны Индийского океана и Индоокеанский диполь. // Системы контроля окружающей среды. – 2006. – Вып. 9. – С. 300–302.

2. **Торбинский А.В.** Фазовые скорости распространения термических аномалий в экваториально-тропической части. // Системы контроля окружающей среды. – 2007. – Вып. 10. – С. 267–269.

3. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.**, Башарин Д.В. Влияние Северо-Атлантического колебания, Эль-Ниньо-Южного колебания и Индоокеанского диполя на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферного давления Средиземноморско-Черноморского региона. // Вестник Одесского государственного экологического университета. – 2008. – Вып. 6. – С. 181–197.

4. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.** Влияние Индоокеанского диполя на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферного давления Средиземноморско-Черноморского региона. // Системы контроля окружающей среды. – 2008. – Вып. 11. – С. 303–305.

5. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.** Роль зональных течений и планетарных волн в распространении термических аномалий в экваториально-тропической зоне Индийского океана. // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 6. – С. 35–44. ISSN 0233-7584.

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в РИНЦ:

1. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.** Оценка влияния Индоокеанского диполя на летние стоки р. Дунай. // Системы контроля окружающей среды. – 2018. – Вып. 4(34). – С. 89–93. DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-89-93.

2. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.** Критический слой в экваториально-тропической зоне и Индоокеанский диполь. // Системы контроля окружающей среды. – 2019. – Вып. 2(36). – С. 88–92. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-88-92.

3. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.**, Губарев А.В. Идентификация механизмов формирования Индоокеанского диполя. // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – Вып. 2 (40). – С. 13–18. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-2-13-18.

4. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.**, Губарев А.В. Верификация данных ре-анализов для тропической зоны Индийского океана. Часть 1. Среднемноголетние гидрофизические характеристики. // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – Вып. 3 (41). – С. 30–38.

5. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.**, Губарев А.В. Верификация данных ре-анализов для тропической зоны Индийского океана. Часть 2. Характеристики осредненного сезонного цикла и межгодовой изменчивости. // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – Вып. 4 (42). – С. 119–126. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-4-119-126

6. Полонский А.Б., **Торбинский А.В.**, Губарев А.В. К механизму формирования Индоокеанского диполя. // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – Вып. 2 (40). – С. 13–18. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-3-5-14

Иные публикации: по теме диссертации опубликовано 11 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Торбинского Антона Викторовича

Подписано к печати 28.07.2022

Выход в свет 28.07.2022

Заказ 26. Тираж 120 экз.

Распространяется бесплатно

Отпечатано ИК ИПТС
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1022302946489 от 24.05.2012
Тел.: +7(8692) 54-44-10
ph@instpts.ru