

Мезомасштабные вихри южной части Тихого океана

В. С. Травкин^{1,2}, Т. В. Белоненко¹, А. В. Кочнев³, В. Н. Феокистова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: vtravkin99@gmail.com

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова
Москва, 119034, Россия

³ Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Архангельск, 163002, Россия

Анализируются свойства и траектории мезомасштабных вихрей южной части Тихого океана. Регион исследования — акватория, прилегающая к берегам Южной Америки: 20–50° ю. ш., 70–120° з. д. Для анализа используются два типа данных: Атлас траекторий мезомасштабных вихрей METAZ.2 DT, созданный на основе спутниковой альтиметрической информации, и реанализ Мирового океана GLORYS12V1, который применяется для построения средних полей течений и термохалинных характеристик. Установлено, что максимальное число мезомасштабных вихрей образуется в прибрежной зоне, на склонах Перуанского и Чилийского желобов. Рассчитано среднее количество вихрей в расчёте на одну ячейку 1×1° (по широте и долготе) и описано пространственное распределение этой характеристики, а также вихревой и средней кинетической энергии в регионе. Отмечается меридиональное смещение вихрей при их перемещении на запад: циклонов — к южному полюсу, антициклонов — к экватору. Диаграммы средних значений характеристик вихрей показывают, что большинство вихрей имеет радиус 50–75 км, амплитуду, превышающую 5 см, орбитальную скорость 5–15 см/с и продолжительность жизни не более 50 сут. Проанализированы особенности долгоживущих мезомасштабных вихрей с продолжительностью жизни, превышающей один и два года.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, южная часть Тихого океана, альтиметрия, циклоны, антициклоны, METAZ.2 DT

Одобрена к печати: 19.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-286-298

Введение

Мезомасштабные вихри являются одной из наиболее распространённых динамических структур Мирового океана, охватывая порядка 1/3 его площади (Gaube et al., 2019). Пространственный радиус мезомасштабных вихрей превышает бароклинный радиус деформации Россби и может достигать сотен километров, а их продолжительность жизни варьируется от суток до нескольких лет. За счёт переноса тепла, соли, морского льда, растворённого кислорода и биогенных элементов мезомасштабные вихри играют существенную роль в гидрохимических, биологических и биогеохимических процессах Мирового океана. В зависимости от полярности мезомасштабного вихря в его центре и на периферии возникают разнонаправленные вертикальные движения (Белоненко и др., 2017; Колдунов, Белоненко, 2020), оказывающие влияние на глубину термо- и галоклина, мутность и содержание биогенных элементов в верхнем слое океана. Так, известно, что на границах вихревых структур происходит интенсификация подъёма вод, приводящая к повышенной биологической продуктивности (Малинин, Гордеева, 2009; Микаэлян и др., 2020; McGillicuddy, 2016; Micaelyan et al., 2023).

Южная часть Тихого океана (ЮЧТО) относится к одной из наиболее высокопродуктивных областей Мирового океана и традиционно выступает важнейшим районом рыбного промысла (Бородин и др., 2014; Малинин, Гордеева, 2009). Один из самых перспективных ресурсов для российского рыболовства в открытых и конвенционных районах — перуанская ставрида, запасы которой в последнее время увеличились и уже несколько лет находятся на стабильном уровне (Аникеев, Гербер, 2018; Глубоков и др., 2018). Установлено, что наибо-

лее продуктивный российский промысел перуанской ставриды происходит в центре или на периферии мезомасштабных вихрей (Гордеева, Жарова, 2016; Дубишук, 2021). Поскольку в вихрях наблюдаются вертикальные движения биогенов, они представляются благоприятной средой для гидробионтов, при этом на периферии вихрей могут образовываться фронтальные зоны — области сильных градиентов температуры, солёности и плотности воды, где смешиваются различные водные массы. Фронтальные зоны создают благоприятные условия для образования промысловых скоплений рыб, так как здесь обитает большое количество планктона, который служит основным источником питания для многих видов рыб (Микаэлян и др., 2020; Mikaelyan et al., 2023).

Существенное воздействие на океанскую циркуляцию и динамику мезомасштабных вихрей оказывает морская топография, определяющая их местоположение, интенсивность и эволюцию. Акватории со значительными топографическими уклонами дна характеризуются повышенной синоптической активностью вихрей, чему способствуют уникальные динамические условия. В. Н. Зырянов одним из первых обратил внимание, что за счёт образования топографических вихрей биопродуктивность вод в районах подводных гор может на порядок и более превышать окружающий фон. Последнее является основной причиной формирования над некоторыми горами в открытом океане локализованных рыбных скоплений промыслового значения (Зырянов, 1995).

В ЮЧТО механизмы генерации мезомасштабных вихрей связаны с климатическими явлениями, такими как Эль-Ниньо, которое представляет собой аномальное повышение температуры поверхностных вод в центральной и восточной части Тихого океана. Различия между поверхностными водами в регионах Эль-Ниньо и более холодными окрестностями, смена его фаз могут стимулировать образование мезомасштабных вихревых структур (Seiki et al., 2009; Wang, 2005; Yu et al., 2011). В связи с этим изучение мезомасштабных вихрей продолжает оставаться актуальной и важной областью научных исследований, внёсших значительный вклад в понимание океанических процессов и их влияния на климат и экосистемы. Однако особенности мезомасштабных циклонов и антициклонов в ЮЧТО ранее детально не анализировались. Цель настоящей статьи состоит в описании особенностей распространения и выявления параметров мезомасштабных вихрей ЮЧТО по альтиметрическим данным. Регион исследования — акватория, прилегающая к берегам Южной Америки: 20–50° ю. ш., 70–120° з. д.

Используемые данные

Атлас траекторий мезомасштабных вихрей META3.2 DT

Мы используем данные Атласа траекторий мезомасштабных вихрей (*англ.* Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product META3.2 DT), доступные на портале AVISO+ (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data, Архив альтиметрической информации, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product/meta3-2-dt.html>). Массив основан на использовании альтиметрической информации (уровня моря) для идентификации и отслеживания траекторий циклонов и антициклонов Мирового океана (Pegliasco et al., 2022). Для идентификации вихрей используется поле абсолютной динамической топографии. Алгоритм идентифицирует вихри как скопления пикселей (максимальный размер 2000 пикселей), удовлетворяющие определённому набору критериев, таких как компактность, наличие экстремума аномалий уровня океана внутри вихревой структуры и т. д. Алгоритм выделяет изолированные вихревые структуры на ежесуточных картах и в дальнейшем следит за ними, фиксируя эволюцию вихревых структур во времени. Массив содержит информацию о типе вихрей, их радиусе и амплитуде, скорости вращения, продолжительности жизни. Кроме того, Атлас даёт для каждого вихря свой идентификационный номер и координаты его траектории. Рассматривались данные за 1993–2020 гг.

Реанализ Мирового океана GLORYS12V1

Для построения климатологических полей течений, а также карт температуры и солёности используется реанализ Мирового океана GLORYS12V1 (*англ.* Global Ocean Physics Reanalysis), доступный на портале системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS, <https://www.copernicus.eu>). Массив включает в себя такие параметры, как температура, солёность, скорость течений, высота поверхности моря и др. Реанализ основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. GLORYS12V1 ассимилирует спутниковые и *in situ* данные. Основа реанализа — модель NEMO (*англ.* Neural Models), где в качестве форсинга используется атмосферный реанализ ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). В уравнениях модели применяется приближение Буссинеска. Различные типы наблюдений ассимилируются с использованием фильтра Калмана. Аномалии уровня моря (*англ.* Sea Level Anomalies — SLA) получены с помощью спутникового альтиметра, температура поверхности моря (*англ.* sea surface temperature — SST) — со спутника AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) из NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований), а вертикальные профили температуры и солёности (*T/S in situ*) — из базы данных CORA (*англ.* Coriolis Ocean database ReAnalysis) с контролем качества CMEMS. В качестве эталона для ассимиляции альтиметрических данных также использовалась «гибридная» средняя динамическая топография (*англ.* medium dynamic topography — MDT), основанная на базе данных CNES-CLS13 MDT (CNES — *фр.* Centre National d'Etudes Spatiales, CLS — *фр.* Collecte Localisation Satellites). Пространственное разрешение GLORYS12V1 составляет $1/12^\circ$ по широте и долготе, по вертикали массив содержит 50 уровней. В работе использовались среднемесячные данные за 2010–2020 гг.

Краткое физико-географическое описание региона исследования

Рельеф морского дна ЮЧТО представлен узкой (в среднем несколько десятков километров) полосой континентального шельфа Южной Америки, переходящей в крутой материковый склон (*рис. 1*). У подножия материкового склона лежат Перуанский и Чилийский глубоководные желоба (наибольшая глубина — 6601 и 8064 м соответственно).

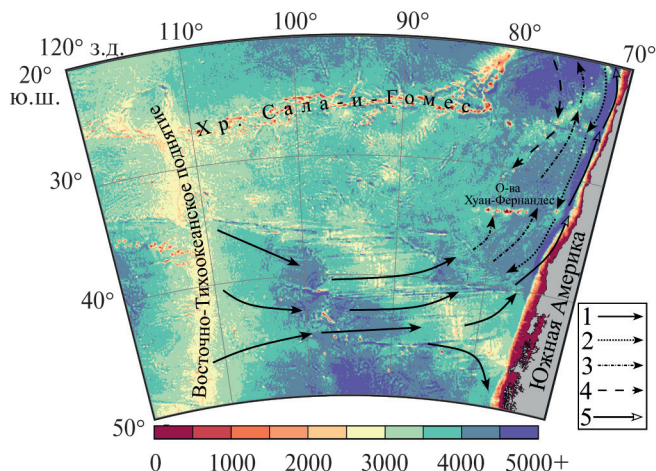


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследования (м). Стрелками показаны основные течения: 1 — Южно-Тихоокеанское течение; 2 — Перу-Чилийское противотечение; 3 — Перуанское океаническое течение; 4 — Перуанское противотечение; 5 — Перуанское прибрежное течение

Ложе Тихого океана имеет весьма сложный рельеф, поскольку крупные поднятия и горные хребты разделяют его на ряд относительно равнинных областей с глубиной порядка 3–4 тыс. м. Наиболее значительной морфологической провинцией данного района является меридионально направленное Восточно-Тихоокеанское поднятие, расположенное западнее 110° з.д.

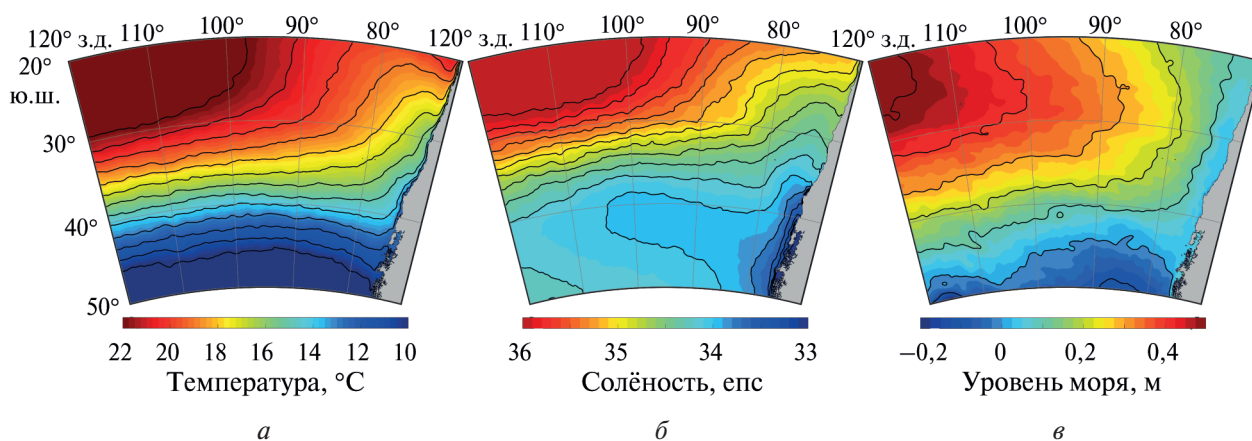


Рис. 2. Средние значения поверхностной температуры (а), солёности (б) и уровня моря (в), рассчитанные по данным GLORYS12V1 за 2010–2020 гг.

Циркуляция ЮЧТО представлена субтропическим антициклоническим круговоротом с системой пограничных течений, а также продолжением Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) (см. рис. 1). В ЮЧТО регистрируется существование термической фронтальной зоны — южного субтропического фронта, соответствующего изотерме 15 °С и разделяющего субтропическую и субантарктическую поверхностные водные массы (рис. 2). Эта фронтальная зона также отражается на картах солёности и уровня моря (см. рис. 2). Изолинии рассматриваемых характеристик в регионе исследования имеют тенденцию к зональному распределению с увеличением значений к северо-западу.

Мезомасштабная вихревая динамика в южной части Тихого океана по данным META3.2 DT и GLORYS12V1

По данным META3.2 DT в рассматриваемом регионе зафиксировано за 1993–2020 гг. 35 127 долгоживущих антициклонов и 39 739 циклонов с различными характеристиками. На рис. 3 (см. с. 290) показано число мезомасштабных вихрей в регионе на одну ячейку $1 \times 1^\circ$ (по широте и долготе) за 1993–2020 гг. Видно, что максимальное количество вихрей образуется в прибрежной зоне, на склонах Перуанского и Чилийского желобов, что, очевидно, обусловлено не только неустойчивостью течений, но также влиянием топографии и апвеллинга. В области, прилегающей к Южной Америке, число антициклонов максимально (>120) во всей прибрежной области, тогда как для циклонов максимальное число на одну ячейку характерно для прибрежного района 38–48° ю.ш. В полосе 30–40° ю.ш. число вихрей значительно меньше, что, по-видимому, связано с наименьшим воздействием здесь субтропического антициклонического круговорота (см. рис. 1).

Следует отметить, что в полосе 40–50° ю.ш. вихрей образуется существенно больше, чем в полосе 30–40° ю.ш., что можно объяснить влиянием АЦТ — самого мощного течения Мирового океана, расход которого по некоторым оценкам равен 144 Sv (Свердруп, норв. Harald Ulrik Sverdrup) ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) (Cunningham et al., 2003). Северная граница АЦТ в ЮЧТО проходит примерно по 40° ю.ш. (Belonenko et al., 2020), поэтому увеличение числа вихрей южнее данной широты можно объяснить влиянием АЦТ.

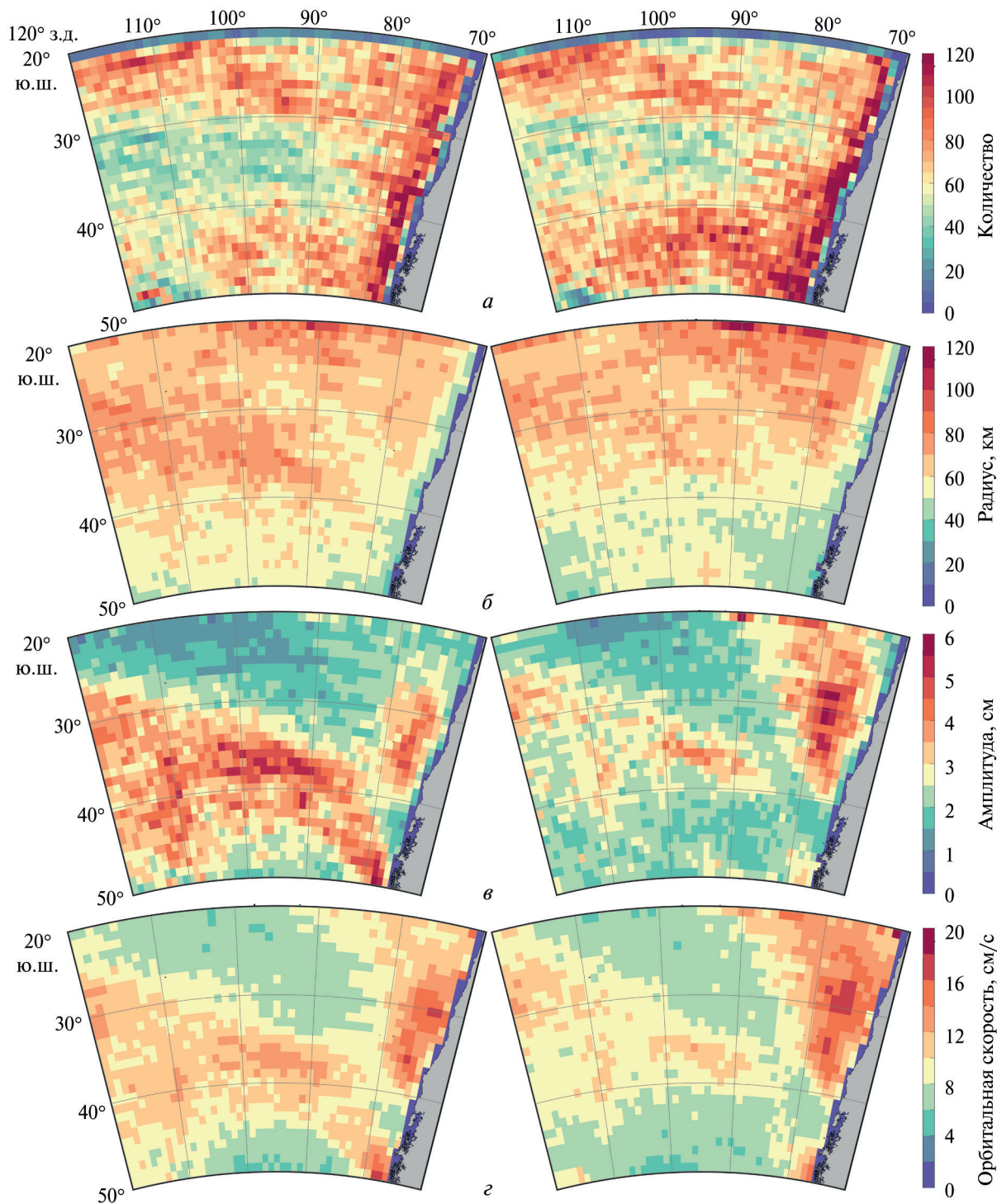


Рис. 3. Количество (а), радиус (б), амплитуда (в), орбитальная скорость (г) антициклонов (слева) и циклонов (справа) на ячейку $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе за 1993–2020 гг. по данным METAZ.2 DT

В работе (Гневашев и др., 2019) вихреобразование в струе АЦТ трактуется в терминах взаимодействия волн Россби с АЦТ. Известно, что волны Россби в океане проявляются в виде вихрей (Незлин, 1986), которые имеют тенденцию перемещения в западном направлении. Однако при взаимодействии с АЦТ их направление иногда меняется на противоположное из-за того, что вклад составляющей, связанной с меридиональным изменением сдвига зональной компоненты течения, превышает влияние β -эффекта. Это заставляет вихри, регистрируемые в атласе METAZ.2 DT, перемещаться на восток или по крайней мере замед-

лять перемещение на запад. Этим и объясняется увеличение числа мезомасштабных вихрей в районе АЦТ в расчёте на одну ячейку. Обратим внимание, что в полосе 40–50° ю. ш. число циклонов значительно превышает число антициклонов (см. рис. 3), что, очевидно, связано с особенностями меандрирования потока АЦТ.

Отметим, что, несмотря на минимальное число вихрей в полосе 30–40° ю. ш., вихревая кинетическая энергия (англ. eddy kinetic energy — ЕКЕ) здесь максимальна и достигает $120 \text{ см}^2/\text{с}^2$ на одну ячейку (рис. 4). Это связано с тем, что вихри, распространяющиеся в данной полосе, имеют максимальную амплитуду, радиус и орбитальную скорость (см. рис. 3). В то же время средняя кинетическая энергия (англ. mean kinetic energy — МКЕ) невелика по сравнению с ЕКЕ. Это означает, что в рассматриваемом диапазоне временных масштабов основной вклад в изменчивость даёт вихревая компонента. Вертикальные профили наиболее энергоактивных областей демонстрируют доминирование ЕКЕ над МКЕ в слое 0–550 м, а также резкое уменьшение ЕКЕ и МКЕ с увеличением глубины (см. рис. 4). Заметно, что максимум энергии характерен для поверхности моря, максимальная разница между ЕКЕ и МКЕ зафиксирована на глубине 30 м. На глубине 500 м значения МКЕ становятся близки к нулю (не показано), тогда как значения ЕКЕ уменьшаются более чем в два раза по сравнению со значениями на поверхности моря (см. рис. 4).

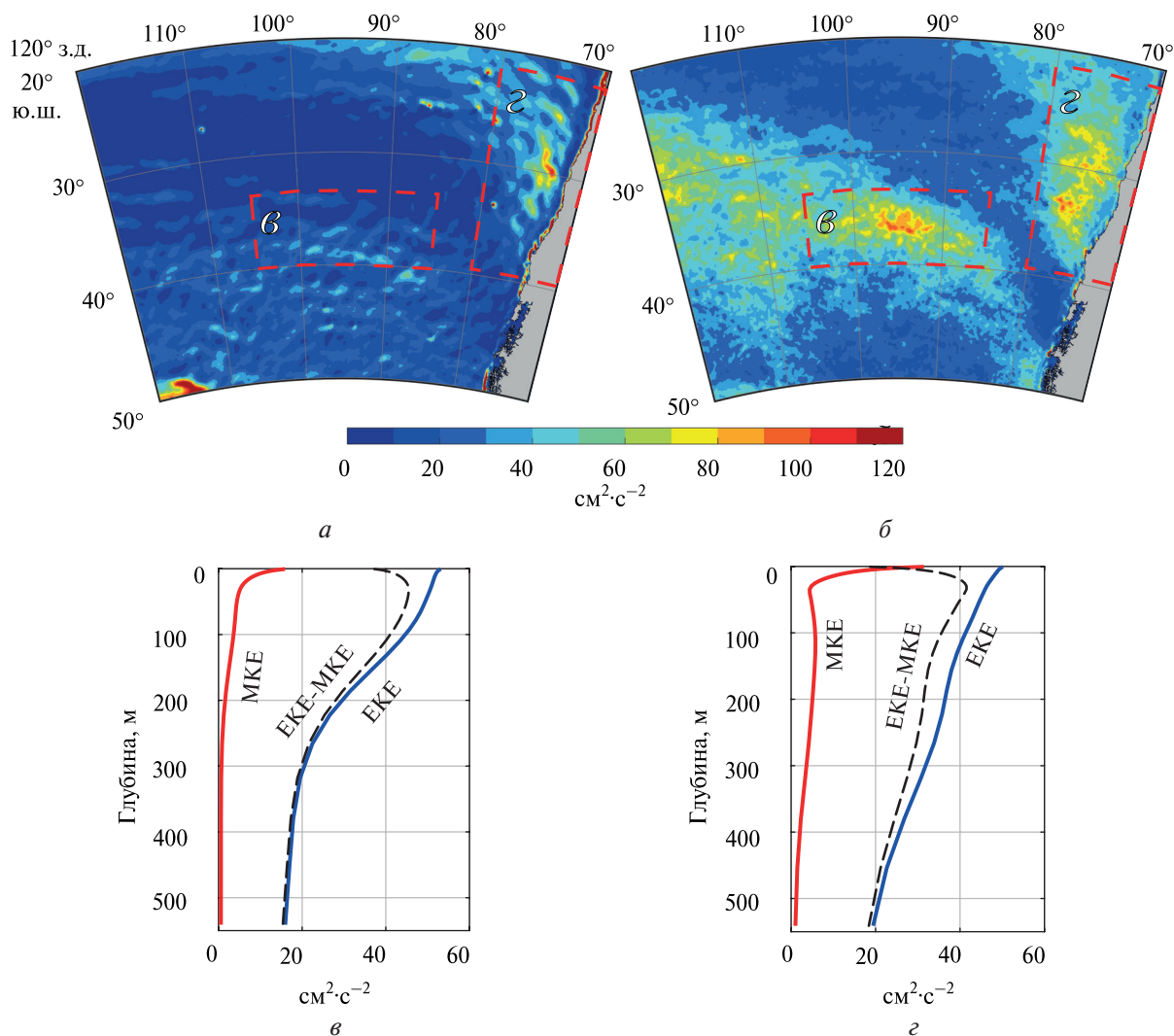


Рис. 4. Осреднённые за 2010–2020 гг. значения средней кинетической энергии МКЕ (а) и вихревой кинетической энергии ЕКЕ (б) на поверхности океана; осреднённые по площади в выделенных границах вертикальные профили МКЕ, ЕКЕ и ЕКЕ-МКЕ (в, г) по данным GLORYS12V1 ($\text{см}^2/\text{с}^2$). Красным пунктиром на рисунках (а, б) показаны выделенные районы (в, г)

На рис. 3 и 4 видно, что распределение картируемых характеристик отличается от зонального: области повышенных значений вытянуты в направлении к экватору. Однако такое наблюдение касается в основном антициклонов. Очевидно, указанный факт связан с так называемым меридиональным смещением вихрей. Меридиональное смещение мезомасштабных вихрей, перемещающихся на запад, отмечается во многих работах: как в теоретических, так и в тех, которые подготовлены на основе анализа спутниковых данных. При этом указывается, что треки циклонов имеют тенденцию смещаться к полюсу, а антициклонов — к экватору. Возможные физические механизмы меридионального смещения и существующие точки зрения приводятся в публикациях других авторов, но единый механизм данного явления до сих пор не выявлен. Подробный обзор исследований можно найти в работе (Gnevyshev et al., 2021), где авторы рассматривают возможные механизмы на примере вихрей для Южной Атлантики и предлагают свою версию, которая согласуется с узконаправленным угловым излучением длинных волн Россби незональными течениями.

По данным, приведённым в таблице, можно заметить, что число циклонов с продолжительностью жизни 10–90 сут существенно выше числа аналогичных антициклонов, при этом для вихрей с продолжительностью жизни >180 сут ситуация противоположна. Наибольшая амплитуда, орбитальная скорость и радиус характерны для вихрей с продолжительностью жизни >180 сут. Такие вихри перемещаются на значительные расстояния, проходя в среднем за свою жизнь более 400 км.

Средние оценки параметров антициклонов (АЦ) и циклонов (Ц) в ЮЧТО

Параметры	АЦ			Ц		
	[10–90)	[90–180)	180+	[10–90)	[90–180)	180+
Продолжительность жизни, сут	[10–90)	[90–180)	180+	[10–90)	[90–180)	180+
Число вихрей, шт.	28 779	4176	2172	33 828	4246	1665
Амплитуда, см	1,63±1,01	3,09±1,56	4,27±1,72	1,63±0,90	2,81±1,24	3,67±1,44
Орбитальная скорость, см/с	7,58±2,66	9,83±2,95	11,28±2,82	7,55±2,70	9,37±2,88	10,75±3,21
Радиус, км	47,61±13,77	65,43±16,38	73,68±15,53	46,98±12,66	64,47±15,45	74,65±16,77
Перемещение, км	60,32±52,42	200,24±126,41	442,07±324,85	58,46±50,23	201,65±130,35	490,99±354,52
Перемещение, км/сут	4,96±2,19	4,91±1,83	4,38±1,45	4,97±2,11	5.12±1.62	5,03±1,34

На рис. 5 (см. с. 293) показаны диаграммы распределения повторяемости основных характеристик вихрей. Видно, что большинство вихрей имеет радиус 25–75 км, амплитуду — менее 5 см, орбитальную скорость — 5–15 см/с и продолжительность жизни, не превышающую 50 сут.

Среднемесячное количество вихрей, их радиус, амплитуда и орбитальная скорость демонстрируют наличие сезонной изменчивости (рис. 6). Так, наибольшее число вихрей наблюдается в период июль–ноябрь, тогда как наименьшее — в феврале–марте. С февраля по июль фиксируется уменьшение среднего радиуса и амплитуды антициклонов, с января по июнь — у циклонов. Наибольшие значения орбитальной скорости прослеживаются с октября по декабрь (см. рис. 6).

Среди множества вихрей нас более всего интересуют долгоживущие вихри. На рис. 7 показаны треки и характеристики вихрей с продолжительностью жизни свыше 180 и 550 сут. Заметно, что подавляющее число антициклонов и циклонов перемещаются в западном и северо-западном направлении и лишь единичные вихри — в обратную сторону. Больше число антициклонов по сравнению с циклонами является следствием того, что антициклоны — более устойчивые образования. Этому факту дано объяснение в работе М. В. Незлина (1986) в терминах циклон-антициклонной асимметрии. Он объясняет большую устойчивость антициклонов по сравнению с циклонами тем, что у циклона ротор скорости параллелен вектору скорости вращения Земли, а у антициклона — антипараллелен.

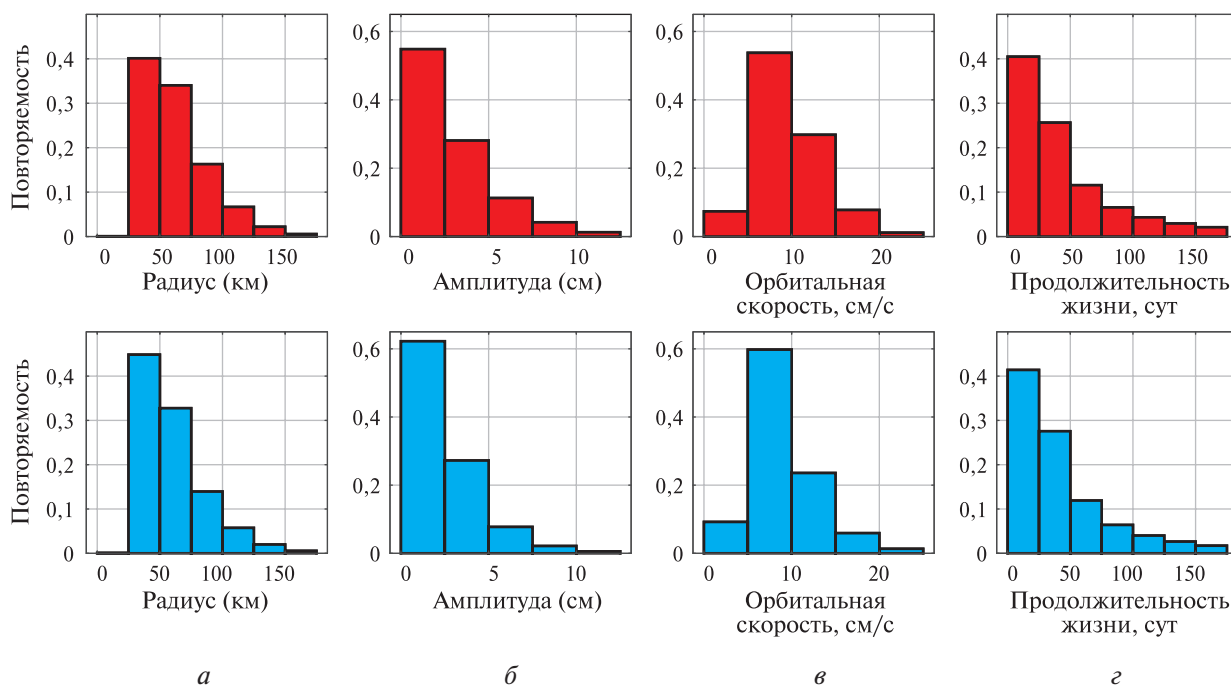


Рис. 5. Повторяемость радиуса (а), амплитуды (б), орбитальной скорости (в), продолжительности жизни (г) антициклонов (вверху) и циклонов (внизу) за 1993–2020 гг. по данным GLORYS12V1

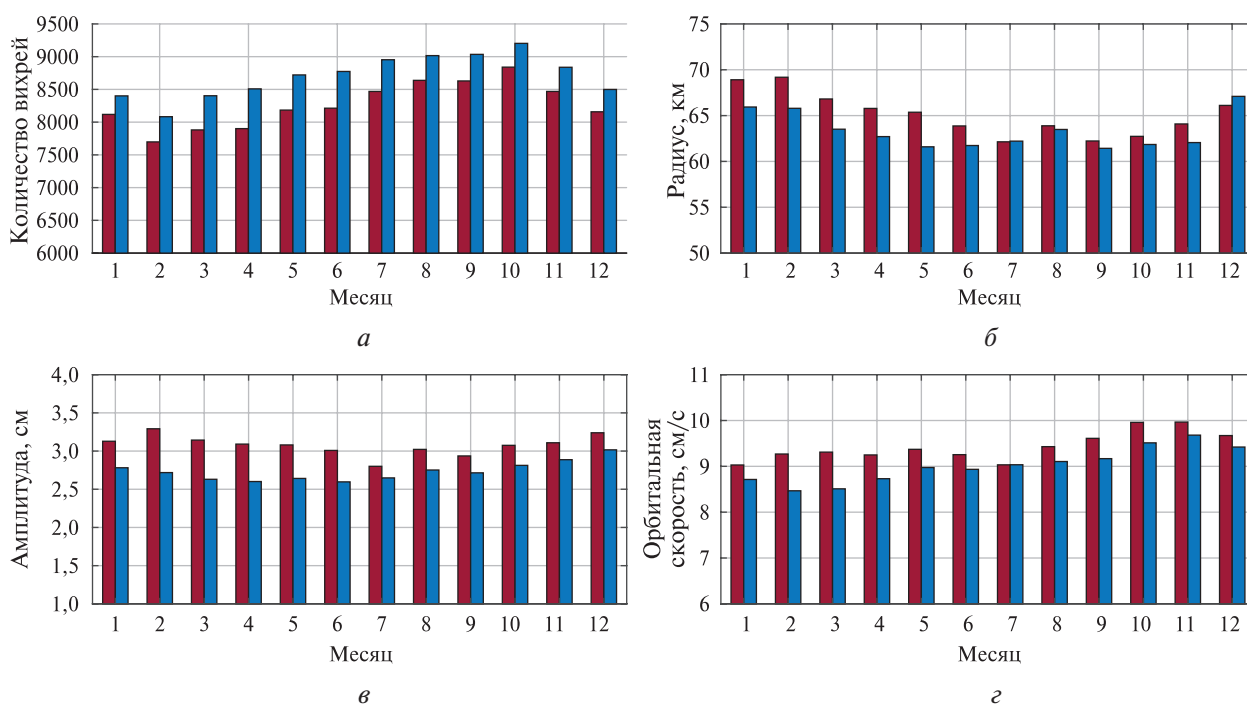


Рис. 6. Среднемесячные параметры вихрей за 1993–2020 гг. по данным MET3.2 DT: количество вихрей за месяц (а), радиус (б), амплитуда (в), орбитальная скорость (г) для антициклонов (красный цвет) и циклонов (синий цвет)

Это означает, что в уравнении сохранения потенциального вихря скалярная нелинейность может уравновесить дисперсию только в случае антициклона. У циклона же дисперсия и скалярная нелинейность имеют одинаковые знаки и, следовательно, не могут быть взаимно скомпенсированы. Таким образом, наблюдаемая циклон-антициклонная асимметрия — прямое следствие скалярной нелинейности и весьма принципиальное дисперсионно-нелинейное

свойство вихрей Россби. Среди антициклонов наибольшая продолжительность жизни равна 1696 сут, среди циклонов — 749 сут. За это время антициклон прошёл 4555 км, а циклон — 4163 км, при этом перемещение вихрей составило 1439 и 1366 км соответственно.

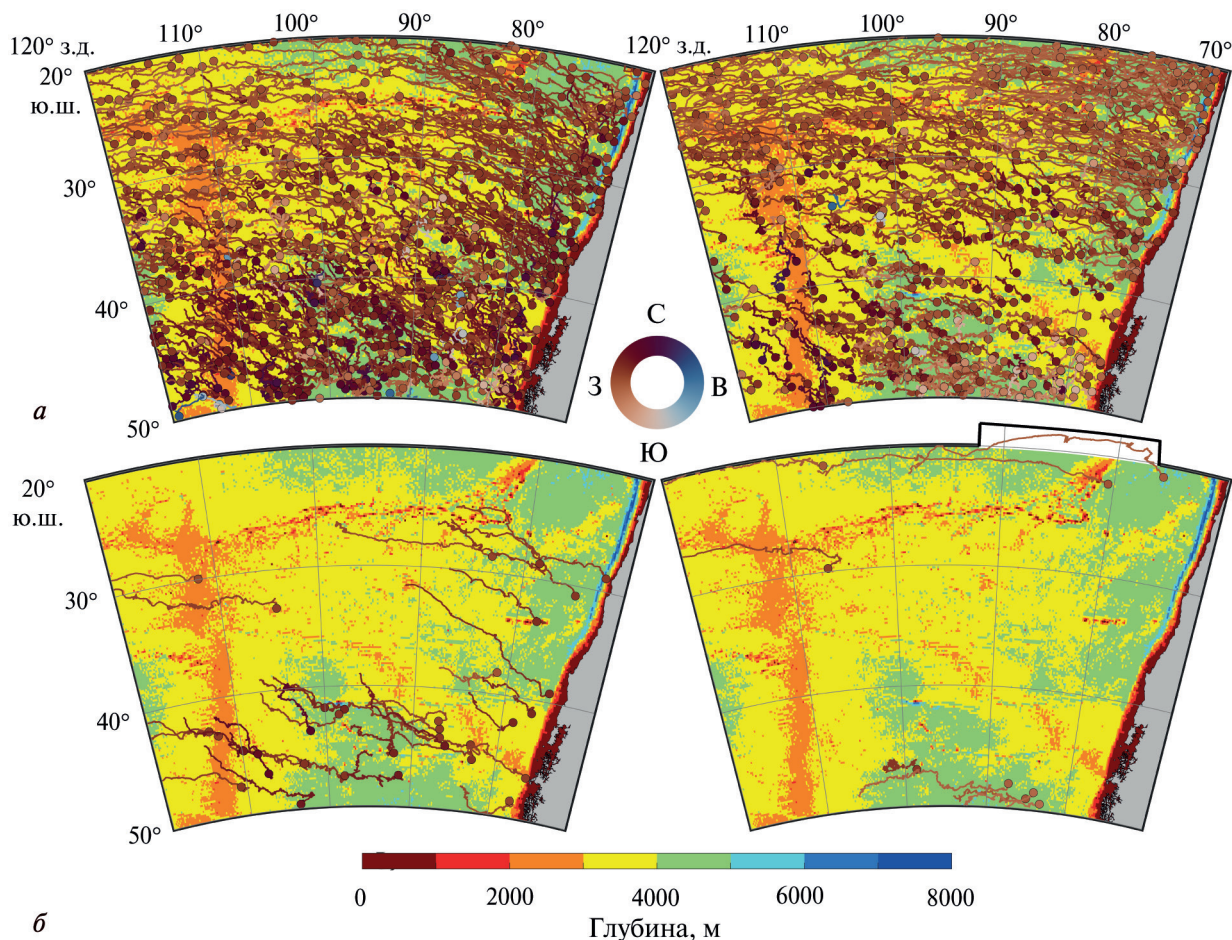


Рис. 7. Траектории антициклонов (слева) и циклонов (справа) с продолжительностью жизни более 180 сут (а) и 550 сут (б) за 2010–2020 гг. по данным МЕТАЗ.2 DT

Сравнение характеристик долгоживущих мезомасштабных вихрей южной части Тихого океана с характеристиками мезомасштабных вихрей Южной Атлантики

В исследовании (Gnevyshev et al., 2021) проанализированы треки долгоживущих вихрей Агульса (Южная Атлантика) с продолжительностью жизни, превышающей 2,5 года. В настоящей работе анализируются треки долгоживущих вихрей для ЮЧТО. В обоих случаях используется Атлас траекторий мезомасштабных вихрей, созданный на основе альтиметрических данных. Сравнение характеристик мезомасштабных вихрей приводит к следующим результатам.

Установлено, что только антициклоны являются долгоживущими вихрями Агульса. Они перемещаются на северо-запад почти прямолинейно, преодолевая тысячи километров и пересекая Южную Атлантику (Gnevyshev et al., 2021, table 1). В отличие от Южной Атлантики для ЮЧТО наблюдаются долгоживущие циклоны, хотя их общее число весьма невелико и значительно меньше числа долгоживущих антициклонов.

Долгоживущие вихри ЮЧТО уступают антициклонам южной Атлантики по большинству рассмотренных параметров: времени жизни, амплитуде, радиусу, орбитальной скорости, перемещению. Это обусловлено различиями в механизмах генерации данных вихрей.

Долгоживущие вихри в южной Атлантике образуются из-за разрушения рингов Агульяса, приводящего к образованию мощных и устойчивых антициклонов, перемещающихся на запад и способных пересекать южную Атлантику (*англ.* Agulhas Leakage). В ЮЧТО подобный механизм отсутствует, здесь мезомасштабные вихри образуются преимущественно из-за баротропной и бароклинной неустойчивости течений. Перемещение вихрей происходит под влиянием течений, топографии и β -эффекта. Сравнительный анализ этих факторов для различных районов Мирового океана представлен в работах (Гневывшев и др., 2019, 2021; Gnevyshev et al., 2022).

В южной Атлантике вихри перемещаются почти прямолинейно. Под влиянием топографии, в частности при пересечении Китового и Южно-Атлантического хребтов, треки изменяют азимут распространения, после чего снова распространяются прямолинейно. В ЮЧТО вихри не меняют азимут при пересечении Восточно-Тихоокеанского поднятия. Отметим, что в полосе $40\text{--}50^\circ$ ю. ш. отдельные треки антициклонов идут вдоль изобат (см. *рис. 7*).

Обсуждение и выводы

Установлено, что максимальное число мезомасштабных вихрей в ЮЧТО образуется в прибрежной области, на склонах Перуанского и Чилийского желобов.

Число антициклонов на одну ячейку максимально (>120) в прибрежной области в полосе широт $38\text{--}48^\circ$, а для циклонов такие значения характерны для всей прибрежной области.

В центральной части региона выделяется полоса от $20\text{--}30^\circ$ ю. ш., где число вихрей может превышать 80 и более как для антициклонов, так и для циклонов.

В полосе $30\text{--}40^\circ$ ю. ш. число вихрей уменьшается: $30\text{--}40$ на одну ячейку, однако при этом вихревая кинетическая энергия ЕКЕ здесь максимальна и достигает $120\text{ см}^2/\text{с}^2$ на одну ячейку. Это объясняется тем, что вихри тут имеют максимальную амплитуду, радиус и орбитальную скорость. В то же время средняя кинетическая энергия МКЕ невелика, так как в рассматриваемом диапазоне временных масштабов основной вклад в изменчивость даёт вихревая компонента. Наибольшие значения МКЕ и ЕКЕ наблюдаются в поверхностном слое, уменьшаясь с глубиной.

В полосе $40\text{--}50^\circ$ ю. ш. число вихрей, в особенности циклонов, увеличивается из-за влияния АЦТ.

Области повышенных значений характеристик вихрей (амплитуды, радиуса и орбитальной скорости) вытянуты по направлению к экватору, в особенности для антициклонов.

Диаграммы средних значений характеристик вихрей показывают, что большинство вихрей имеют радиус $25\text{--}75$ км, амплитуду, превышающую 5 см, орбитальную скорость $5\text{--}15$ см/с и продолжительность жизни не больше 50 сут.

Наибольшее число вихрей зафиксировано с июля по ноябрь, наименьшее — в феврале и марте. С октября по декабрь наблюдаются самые высокие значения орбитальной скорости вихрей.

Отмечается меридиональное смещение мезомасштабных вихрей, перемещающихся на запад. Треки циклонов смещаются к полюсу, а антициклонов — к экватору.

Среди долгоживущих вихрей с продолжительностью жизни более двух лет выделяется антициклон, который является самым долгоживущим вихрем в регионе с продолжительностью жизни >1600 сут и пройденным расстоянием >4500 км. Амплитуда этого антициклона достигала 14 см, а радиус — более 130 км.

Сравнение характеристик мезомасштабных вихрей ЮЧТО с аналогичными характеристиками вихрей южной Атлантики показывает, что вихри ЮЧТО уступают вихрям южной Атлантики по большинству параметров, за исключением одного: в ЮЧТО зафиксирован долгоживущий устойчивый циклон, в то время как в южной Атлантике подобных долгоживущих циклонов нет.

Практическая значимость результатов данной работы состоит в том, что разработанные автором оригинальные методы и подходы по исследованию мезомасштабной вихревой динамики

в южной части Тихого океана могут применяться для других районов Мирового океана, в том числе для промысловых задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00004.

Литература

1. Аникеев В. Г., Гербер Е. М. Современное состояние промысла ставриды *Trachurus murphyi* в южной части Тихого океана // Тр. АтлантНИРО. 2018. Т. 2. № 2. С. 84–101.
2. Белоненко Т. В., Башмачников И. Л., Колдунов А. В., Куйбин П. А. О вертикальной компоненте скорости в Лофотенском мезомасштабном вихре Норвежского моря // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 6. С. 728–737. DOI: 10.7868/S0003351517060071.
3. Бородин Е. В., Чуринов Д. А., Чернышков П. П. Влияние динамики вод на биомассу и распределение биологических ресурсов пелагиали южных частей Атлантического и Тихого океанов // Вестн. Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. 2014. Вып. 7. С. 142–154.
4. Глубоков А. И., Попова Н. Р., Глубоковский М. К. Промысловые пелагические рыбы юго-восточной части Тихого океана: международное регулирование промысла и состояние запасов // Тр. ВНИРО. 2018. Т. 174. С. 21–29.
5. Гневыйшев В. Г., Фролова А. В., Кубряков А. А. и др. Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для Антарктического циркумполярного течения // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 39–50. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555539-50>.
6. Гневыйшев В. Г., Фролова А. В., Колдунов А. В., Белоненко Т. В. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2021. Т. 14. № 1. С. 4–14. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
7. Гордеева С. М., Жарова А. Д. Оперативная оценка рыбопромысловой обстановки в юго-восточной части Тихого океана // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 96–103.
8. Дубищук М. М. Особенности промысла и биологического состояния перуанской ставриды *Trachurus murphyi* в открытых водах центрального подрайона Юго-Восточной части Тихого океана в августе – октябре 2020 года // Тр. АтлантНИРО. 2021. Т. 5. № 1(11). С. 122–135.
9. Зырянов В. Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 339 с.
10. Колдунов А. В., Белоненко Т. В. Гидродинамическое моделирование поля вертикальной скорости в Лофотенском вихре // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 575–585. DOI: 10.31857/S0002351520040045.
11. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Т. I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. 279 с.
12. Микаэлян А. С., Зацепин А. Г., Кубряков А. А. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 6. С. 646–675. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-6-646-675.
13. Незлин М. В. Солитоны Россби (Экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // Успехи физ. наук. 1986. Т. 150. Вып. 1. С. 3–60. DOI: 10.3367/UFNr.0150.198609a.0003.
14. Belonenko T., Frolova A., Gnevyshev V. Detection of waveguide for Rossby waves using satellite altimetry in the Antarctic Circumpolar Current // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. Iss. 16. P. 6232–6247. DOI: 10.1080/01431161.2020.1752955.
15. Cunningham S. A., Alderson S. G., King B. A., Brandon M. A. Transport and Variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. Iss. C5. Article 8084. DOI: 10.1029/2001JC001147.
16. Gaube P., McGillicuddy Jr. D. J., Moulin A. J. Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 1505–1512. DOI: 10.1029/2018GL080006.
17. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V. On Agulhas Eddies and Rossby Waves Travelling by Forcing Effects // Russian J. Earth Sciences. 2021. V. 21. Iss. 5. Article ES5003. DOI: 10.2205/2021ES000773.
18. Gnevyshev V. V., Frolova A. V., Belonenko T. V. Topographic Effect for Rossby Waves on Non-Zonal Shear Flow // Water Resources. 2022. V. 49. P. 240–248. DOI: 10.7868/S2073667321010019.
19. McGillicuddy Jr. D. J. Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale // Annual Review of Marine Science. 2016. V. 8. P. 125–159. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015606.

20. *Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Kubryakov A. A. et al.* Case where a mesoscale cyclonic eddy suppresses primary production: A Stratification-Lock hypothesis // *Progress in Oceanography*. 2023. V. 212. Article 102984. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.102984.
21. *Pegliasco C., Delepouille A., Mason E. et al.* META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 1087–1107. DOI: 10.5194/essd-14-1087-2022.
22. *Seiki A., Takayabu Y. N., Yoneyama K. et al.* The oceanic response to the Madden-Julian oscillation and ENSO // *SOLA*. 2009. V. 5. P. 93–96. DOI: 10.2151/sola.2009-024.
23. *Yu J.-Y., Kao H.-Y., Lee T., Kim S.* Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events // *Theoretical Applied Climatology*. 2011. V. 103. P. 337–344. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0307-6>.
24. *Wang B.* Theory // *Intraseasonal Variability in the Atmosphere–Ocean Climate System*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. P. 307–360. https://doi.org/10.1007/3-540-27250-X_10.

Mesoscale eddies in the South Pacific Ocean

V. S. Travkin^{1,2}, T. V. Belonenko¹, A. V. Kochnev³, V. N. Feoktistova¹

¹ *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*
E-mail: vtravkin99@gmail.com

² *N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow 119034, Russia*

³ *Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk 163002, Russia*

The paper analyzes the properties and trajectories of mesoscale eddies in the South Pacific Ocean. The study region is the area adjacent to the coast of South America: 20–50° S, 70–120° W. Two types of data are used for the analysis: Atlas of mesoscale eddy trajectories META3.2 DT created on the basis of satellite altimetry information, and GLORYS12V1 reanalysis of the World Ocean, which is used to construct average current fields and thermohaline characteristics. It has been established that the maximum number of mesoscale eddies is formed in the coastal zone, on the slopes of the Peruvian and Chilean trenches. The average values of the number of eddies per one 1×1° cell (in latitude and longitude) are calculated and the spatial distribution of this characteristic as well as eddy and average kinetic energy in the region are described. There is a meridional displacement of eddies as they move west: cyclones to the South Pole, anticyclones to the equator. Diagrams of average values of eddy characteristics show that most vortices have radii of 50–75 km, amplitudes exceeding 5 cm, orbital velocities of 5–15 cm/s and a lifetime not exceeding 50 days. The features of long-lived mesoscale eddies with lifetimes exceeding 1 and 2 years are analyzed.

Keywords: mesoscale eddies, South Pacific, altimetry, cyclones, anticyclones, META3.2 DT

Accepted: 19.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-286-298

References

1. Anikeev V. G., Gerber E. M., Current state of the mackerel fishery *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean, *Trudy AtlantNIRO*, 2018, Vol. 2, No. 2, pp. 84–101 (in Russian).
2. Belonenko T. V., Bashmachnikov I. L., Koldunov A. V., Kuibin P. A., On the vertical component of velocity in the Lofoten mesoscale eddy of the Norwegian Sea, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 6. pp. 728–737 (in Russian), DOI: 10.7868/S0003351517060071.
3. Borodin E. V., Churin D. A., Chernyshkov P. P., The influence of water dynamics on the biomass and distribution of biological resources of the pelagic zone of the southern parts of the Atlantic and Pacific oceans. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta imeni I. Kanta*, 2014, Vol. 7, pp. 142–154 (in Russian).
4. Glubokov A. I., Popova N. R., Glubokovsky M. K., Commercial pelagic fish of the south-eastern part of the Pacific Ocean: international regulation of fisheries and the state of stocks, *Trudy VNIRO*, 2018, Vol. 174, pp. 21–29 (in Russian).

5. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Kubryakov A. A. et al., Interaction between Rossby Waves and a Jet Flow: Basic Equations and Verification for the Antarctic Circumpolar Current, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 412–422, DOI: 10.1134/S0001433819050074.
6. Gnevyshev V. G., Frolova A. V., Koldunov A. V., Belonenko T. V., Topographic effect for Rossby waves on zonal shear flow, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 4–14 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667321010019.
7. Gordeeva S. M., Zharova A. D., Operational assessment of the fishing situation in the south-eastern part of the Pacific Ocean, *Uchenye zapiski RGGMU*, 2016, No. 44, pp. 96–103 (in Russian).
8. Dubishchuk M. M., Features of fishing and biological condition of the Peruvian horse mackerel *Trachurus murphyi* in the open waters of the central subregion of the Southeast Pacific Ocean in August–October 2020, *Trudy AtlantNIRO*, 2021, Vol. 5, No. 1(11), pp. 122–135 (in Russian).
9. Zyryanov V. N., *Topograficheskie vikhri v dinamike morskikh techenii* (Topographic eddies in the dynamics of sea currents), Moscow: IVP RAN, 1995, 339 p. (in Russian).
10. Koldunov A. V., Belonenko T. V., Hydrodynamic Modeling of Vertical Velocities in the Lofoten Vortex, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, No. 5, pp. 502–511, <https://doi.org/10.1134/S0001433820040040>.
11. Malinin V. N., Gordeeva S. M., *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoi chasti Tikhogo okeana. Tom I. Izmenchivost' faktorov sredy obitaniya* (Commercial oceanology of the south-eastern part of the Pacific Ocean. Volume I. Variability of environmental factors), Saint Petersburg: Izd. RGGMU, 2009, 279 p.
12. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Kubryakov A. A., Effect of Mesoscale Eddy Dynamics on Bioproductivity of the Marine Ecosystems (Review), *Physical Oceanography*, 2020, Vol. 27, No. 6, pp. 590–618, DOI: 10.22449/1573-160X-2020-6-590-61.
13. Nezlin M. V., Rossby solitons (Experimental investigations and laboratory model of natural vortices of the Jovian Great Red Spot type), *Soviet Physics Uspekhi*, 1986, Vol. 29, pp. 807–842, DOI: 10.1070/PU1986v029n09ABEH003490.
14. Belonenko T., Frolova A., Gnevyshev V., Detection of waveguide for Rossby waves using satellite altimetry in the Antarctic Circumpolar Current, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, Issue 16, pp. 6232–6247, DOI: 10.1080/01431161.2020.1752955.
15. Cunningham S. A., Alderson S. G., King B. A., Brandon M. A., Transport and Variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, Issue C5, Article 8084, DOI: 10.1029/2001JC001147.
16. Gaube P., McGillicuddy Jr. D. J., Moulin A. J., Mesoscale eddies modulate mixed layer depth globally, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, pp. 1505–1512, DOI: 10.1029/2018GL080006.
17. Gnevyshev V. G., Malysheva A. A., Belonenko T. V., Koldunov A. V., On Agulhas Eddies and Rossby Waves Travelling by Forcing Effects, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, Vol. 21, No. 5, Article ES5003, DOI: 10.2205/2021ES000773.
18. Gnevyshev V. V., Frolova A. V., Belonenko T. V., Topographic Effect for Rossby Waves on Non-Zonal Shear Flow, *Water Resources*, 2022, Vol. 49, No. 2, pp. 240–248, DOI: 10.7868/S2073667321010019.
19. McGillicuddy Jr. D. J., Mechanisms of Physical–Biological–Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale, *Annual Review of Marine Science*, 2016, Vol. 8, pp. 125–159, DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015606.
20. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Kubryakov A. A. et al., Case where a mesoscale cyclonic eddy suppresses primary production: A Stratification-Lock hypothesis, *Progress in Oceanography*, 2023, Vol. 212, Article 102984, DOI: 10.1016/j.pocean.2023.102984.
21. Pegliasco C., Delepoulle A., Mason E. et al., META3.1exp: a new global mesoscale eddy trajectory atlas derived from altimetry, *Earth System Science Data*, 2022, Vol. 14, pp. 1087–1107, DOI: 10.5194/essd-14-1087-2022.
22. Seiki A., Takayabu Y. N., Yoneyama K. et al., The oceanic response to the Madden-Julian oscillation and ENSO, *SOLA*, 2009. Vol. 5, pp. 93–96, DOI: 10.2151/sola.2009-024.
23. Yu J.-Y., Kao H.-Y., Lee T., Kim S., Subsurface ocean temperature indices for Central-Pacific and Eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events, *Theoretical Applied Climatology*, 2011, Vol. 103, pp. 337–344, <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0307-6>
24. Wang B., Theory, In: *Intraseasonal Variability in the Atmosphere–Ocean Climate System*, Berlin; Heidelberg: Springer, 2005, pp. 307–360, https://doi.org/10.1007/3-540-27250-X_10.