

УДК 551.465

МНОГОЛЕТНИЙ ЛИНЕЙНЫЙ МЕРИДИОНАЛЬНЫЙ СДВИГ СТРУЙНОЙ СТРУКТУРЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ К ЮГУ ОТ АФРИКИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ: ЗОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

© 2024 г. Р. Ю. Тараканов*

Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36

* e-mail: rtarakanov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

Для периода спутниковых альтиметрических наблюдений 1993–2018 гг. выполнена оценка зонального распределения линейного меридионального сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений в секторе Антарктического циркумплярного течения (АЦТ) к югу от Африки (9.875° з.д. – 25.125° в.д.). Под струйной структурой понимается чередование в меридиональном направлении зон повышенных и пониженных значений модуля градиента абсолютной динамической топографии (АДТ), $|\nabla\zeta|$. Работа проведена с использованием разработанной ранее и дополненной в настоящей статье методики, базирующейся на расчетах линейных регрессий, включающей также оценку ошибок расчетов. Для оценки зональных распределений сектор был разделен на меридиональные полосы, для каждой из которых проводился расчет. Оптимальная ширина полосы оценена в 2.5° д. Показано наличие заметной зональной неоднородности сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений. С этой неоднородностью очевидно связаны количественные расхождения в расчетах указанных параметров с разделением на полосы, с последующим их осреднением по зональному ряду, и без разделения на полосы. Качественно картины сдвигов струйной структуры и изменения интенсивности течений с разделением на полосы и без него сходны.

Ключевые слова: динамическая топография, спутниковая альтиметрия, струи, Антарктическое циркумплярное течение

DOI: 10.31857/S0030157424060031, **EDN:** FITNTS

1. ВВЕДЕНИЕ

Самое мощное по расходу воды в Мировом океане Антарктическое циркумплярное течение (АЦТ), опоясывающее антарктический континент с запада на восток, разделяется на струи [1, 13], т. е. зоны, характеризующиеся на поверхности океана повышенными скоростями течения. В силу геострофической природы АЦТ, на поверхности океана струи проявляются увеличенным наклоном абсолютной динамической топографии (АДТ, ζ), изолинии которой (изогипсы) являются линиями тока геострофического течения на поверхности океана, а в толще океана – увеличенным наклоном изопикнических поверхностей. В Южном полушарии большие значения АДТ остаются слева от направления течения, в Северном – справа. Соответственно струям на картах АДТ соответствуют сгущения изогипс

(зоны увеличенных градиентов АДТ, $\nabla\zeta$). Чередование в поперечном к течению направлении зон повышенных и пониженных значений модуля градиента АДТ формирует струйную структуру АЦТ.

В соответствии с представлениями [13], считающимися на сегодняшний день классическими, в зоне АЦТ во всем циркумплярном круге выделяется три струи (в терминологии авторов этой работы): Субантарктический фронт, Полярный фронт и Южный фронт АЦТ. Следуя работе [2], эти струи мы будем называть Субантарктическим (САТ), Южным полярным (ЮПТ) и Южным антарктическим (ЮАТ) течениями соответственно. Более поздние исследования, опирающиеся на данные спутниковой альтиметрии, выделяют большее количество струй – до 9 во всем циркумплярном круге [14] и до 12 в региональных

исследованиях [5, 6, 7]. Согласно выводам работы [15], струи АЦТ во всем циркумполярном круге и во времени привязываются к одним и тем же изогипсам. Вместе с тем большая часть современных исследований не обнаруживает систематического долгосрочного меридионального смещения струй АЦТ (см. обзор в [10], а также в [16]). Кроме того, на сегодняшний день ряд исследований [9, 11, 17] не свидетельствует о том, что какой-либо один фронт поддерживает непрерывную структуру на всем протяжении АЦТ.

В работе [16] автором настоящей статьи на основе оригинальной методики, опирающейся на линейный регрессионный анализ, было проведено исследование линейного меридионального сдвига струйной структуры и линейного изменения интенсивности течений в АЦТ в секторе Южного океана к югу от Африки (от 10° з.д. до 25° в.д.) (рис. 1) за период 1993–2018 гг. Причем под сдвигом, в контексте этой работы, понималось смещение за весь период наблюдений формы осредненных по указанному сектору Южного океана среднегодовых кривых зависимости $|\nabla\zeta|$ от широты или значений АДТ, а под интенсивностью течений – величины $|\nabla\zeta|$. Отметим, что расчет именно меридионального сдвига связан с тем, что струи АЦТ в этом секторе квазизональны (рис. 1). В работе [4] методика была доработана и расширена в отношении оценок сдвигов струйной структуры по производным от модуля градиента АДТ величинам: собственно, по модулю градиента АДТ, модулю геострофической скорости $|u|$ на поверхности океана, удельной кинетической энергии $\frac{1}{2}u^2$ и половины квадрата модуля градиента АДТ $\frac{1}{2}|\nabla\zeta|^2$. Показано, что хотя качественно картины сдвигов и изменения интенсивности течений, рассчитанные по этим четырем параметрам, сходны, количественные различия в расчетах могут быть существенны, т. е. больше их ошибок, даже в паре параметров $|\nabla\zeta|$ и $|u|$, которые отличаются друг от друга лишь зависящим от широты множителем $|g/f|$ (g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса). При расчете через $|\nabla\zeta|$ смещение всей струйной структуры в полосе АЦТ (57° – 42° ю.ш.) составило $0.05^\circ \pm 0.03^\circ$ ш. (величина сдвига \pm стандартная ошибка), а относительно шкалы АДТ (в полосе от -130 до 20 см по шкале АДТ, приведенной к середине интервала 1993–2002 гг.) – 8.6 ± 0.3 см, что хорошо согласуется со средней величиной роста уровня Мирового океана, оцениваемого за

22 года (1993–2014 гг.) спутниковых альтиметрических наблюдений в 7.5 см [8]. В работе [3] методика, предложенная в [16], была модифицирована и дополнена для анализа сезонных гармонических колебаний меридионального сдвига струйной структуры АЦТ.

В настоящей работе, используя методику [16] с изменениями [4], проводится оценка зонального распределения сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения практически для того же сектора АЦТ к югу от Африки, что и в работах [3, 4, 16]. Исходя из методических соображений, сектор смещен на восток на одну восьмую градуса и простирается от 9.875° з.д. до 25.125° в.д. Как и в указанных работах, анализ проводится через модуль градиента АДТ. Сдвиг струйной структуры АЦТ исследуется не только относительно широты, но и относительно шкалы АДТ. В разделе 2 описаны данные, на основе которых выполнен анализ, в разделе 3 – метод анализа данных, в разделе 4 детально рассматриваются результаты расчетов, в разделе 5 содержится обсуждение результатов и основные выводы работы, а в Приложении описана процедура оценки ошибок расчетов средних по зональному распределению величин сдвига и изменения интенсивности течений.

2. ДАННЫЕ

Как и в [3, 4, 16], в настоящей работе использовались ежедневные данные по АДТ с сеткой $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ из продукта SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047 за период 1993–2018 гг., который производится и распространяется Службой мониторинга морской и окружающей среды Copernicus (CMEMS) (<http://marine.copernicus.eu>). Данные АДТ приводятся на нецелые значения градусов – $0.125, 0.375, 0.625, 0.875$. Пример карты АДТ, построенной по этим данным, показан на рис. 1.

Синоптическая (мгновенная, т. е. в определенный момент времени) АДТ представляет собой сумму средней (по времени) АДТ и мгновенной аномалии уровня океана (АУО), определяемой на основе измерений спутниковых альтиметров. В указанном выше продукте использована версия средней АДТ MDT CNES-CLS18 [12], которая рассчитывается для периода 1993–2012 гг. на основе данных разнообразных измерений гидрофизических параметров в толще океана, данных спутниковых альтиметрических наблюдений, моделей геоида и средней уровенной поверхности моря и данных реанализа ветра. Данные АУО

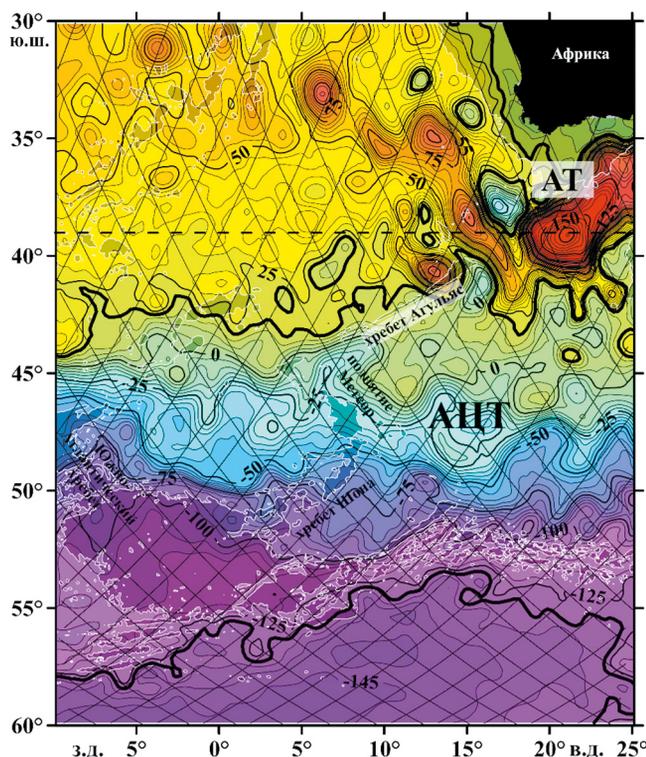


Рис. 1. Абсолютная динамическая топография (изолинии и заливка цветом) в районе к югу от Африки (9.875° з.д. – 25.125° в.д.) на 01.01.2003 г. Жирные изолинии -130 и 20 см показывают ориентировочные границы АЦТ. Аббревиатура АГТ – Агульясское течение, в котором значения АДТ также попадают в диапазон, характерный для АЦТ. Затемненные области, оконтуренные белыми линиями, соответствуют районам океана с глубинами менее 3000 м. Косыми линиями показаны основные треки спутников Т/Р, Jason-1, -2, -3. Штриховая линия на 39° ю.ш. показывает ограничение с севера для расчета кривых зависимости h от ζ .

интерполированы с треков спутников, прописываемых на поверхности Земли, на регулярную сетку для каждых суток. На рис. 1 приведена схема расположения в районе к югу от Африки так называемых основных треков спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1, -2, -3 с альтиметрами, которые повторяются с периодичностью $\tau \approx 10$ сут в течение всего периода спутниковых альтиметрических наблюдений. Дополнительные треки располагаются посередине между основными, т. е. вся сетка дополнительных треков сдвинута на полшага по пространству в зональном направлении относительно основных треков, а также на $\approx \tau/2$ суток по времени. Измерения вдоль них проводятся только в периоды полета одновременно двух указанных спутников с альтиметрами и также учитываются в расчете АУО. Используемый продукт включает в себя также данные других спутников с альтиметрами, имеющих большие углы наклона орбиты.

Вследствие этого их треки создают более частую сетку по пространству, но существенно более разреженную по времени.

3. МЕТОДИКА

Основой для оценки долговременного линейного меридионального сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений в АЦТ служит метод линейного регрессионного анализа. Вначале по ежедневным данным АДТ рассчитываются ежедневные же карты модуля градиента АДТ, которые затем осредняются за некоторый промежуток времени и по направлению на поверхности океана. В нашем случае осреднение проводится за год и вдоль широты или изогипс. Полученный ряд годовых кривых анализируется на многолетнее изменение их формы. Линейный регрессионный анализ позволяет разделить это изменение на линейные сдвиг поперек широты, т. е. вдоль меридиана, или поперек изогипс, т. е. вдоль шкалы АДТ, и изменение интенсивности течения, т. е. модуля градиента АДТ. В работах [4, 16] осреднение по направлению проводилось целиком для всего сектора АЦТ от 10° з.д. до 25° в.д. В нашем случае этот сектор смещен на восток до 9.875° з.д. – 25.125° в.д. и делится на отдельные меридиональные полосы, для каждой из которых выполняется подобный анализ. Полученные оценки сдвигов и изменения интенсивности течения осредняются по набору меридиональных полос. Вопрос выбора ширины меридиональных полос обсуждается ниже в подразделе 4.1 статьи.

3.1. Линейный регрессионный анализ

Изложим кратко, следуя работе [4], алгоритм линейного регрессионного анализа. Для исследуемой физической величины, в нашем случае $|\nabla\zeta|$, рассчитываются средние по меридиональной полосе и за каждый год кривые ее зависимости от параметра a (широты, φ , или АДТ, ζ). Обозначим полученные таким образом кривые как $h(a)$. Для района к югу от Африки расчет $h(a)$, как и в [4, 16], ограничивается с севера 39° ю.ш. с целью отсечения северной периферии Агульясского течения и его циклонических вихрей, значения ζ в которых попадают в диапазон, характерный для АЦТ (рис. 1). Детально способы расчета подобных кривых описаны в работе [16]. Таким образом, для каждой физической величины получается набор из 26-ти среднегодовых кривых.

На основе рассчитанного выше набора среднегодовых кривых вычисляются два распределения: $x(a)$ – производная по a от распределения h ,

которое является средним за все время наблюдений; $y(a)$ – линейные изменения значений h за весь период наблюдений для каждого сеточного значения a , рассчитываемые через коэффициент линейной регрессии зависимости значений h от времени, приведенного к единичному интервалу. Пара распределений $x(a)$ и $y(a)$ может быть представлена на одной плоскости с параметрической зависимостью от a . На этой плоскости для какого-либо диапазона a , например, соответствующего полосе АЦТ, оценивается линейная регрессия между x и y . При этом коэффициент k линейной регрессии с обратным знаком представляет собой линейный сдвиг струйной структуры АЦТ за весь период наблюдений, а свободный член регрессии b – изменение h по этому диапазону за тот же период. Разница между крайними значениями диапазона a далее нами будет пониматься как масштаб расчета \check{a} , а центральное значение a_0 – как срединная широта или срединное значение АДТ, в зависимости от выбора параметра a .

Процедура оценки ошибки расчета линейных сдвигов и изменения интенсивности течения описана в Приложении 1 в работе [4].

3.2. Осреднение по меридиональным полосам

Пусть D – ширина отдельной меридиональной полосы в градусах долготы такая, что полная ширина исследуемого сектора по широте делится на D без остатка. Тогда для пары величина масштаба, срединная широта (или срединное значение АДТ) средние по набору меридиональных полос величины коэффициента \bar{k} (с обратным знаком равного линейному меридиональному сдвигу) и свободного члена \bar{b} (равного изменению интенсивности течения) определяются следующим образом:

$$\bar{k} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M k_m, \quad (1a)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M b_m. \quad (1б)$$

Здесь двойная черта обозначает осреднение по индексу m , т. е. по набору меридиональных полос, M – количество меридиональных полос, k_m и b_m – меридиональный сдвиг (с обратным знаком) и изменение интенсивности течения для m -й полосы. Величина D выбирается кратной шагу исходной сетки 0.25° д. Тогда, поскольку градиент АДТ рассчитывается на середину квадрата сетки, число меридиональных линий исходных четверть-градусных данных АДТ, необходимых для расчета, составляет $n = D/0.25 + 1$. При этом

соседние меридиональные полосы для расчета градиента АДТ имеют общие граничные меридиональные линии данных АДТ. Процедура оценки ошибки расчета изложена в Приложении к настоящей работе.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

4.1. Выбор ширины меридиональных полос

Идея выбора ширины меридиональных полос D исходит из соображений соответствия этой ширины разрешению поверхности океана основными треками спутников Т/Р, Jason-1, -2, -3. Общее количество таких треков одинакового наклона для всего Земного шара – 127. Таким образом, расстояние вдоль широты между соседними треками спутника составляет $360^\circ/127 \approx 2.83^\circ$ д. Ближайшее наименьшее значение, кратное шагу исходной сетки 0.25° , которое одновременно является делителем числа 360° без остатка, равно 2.5° д. Именно это значение и было нами выбрано в качестве ширины меридиональной полосы для представленного в двух следующих подразделах анализа.

На рис. 2а приведен 26-летний ряд среднегодовых распределений h , т. е. $\langle |\nabla \zeta| \rangle$ (угловые скобки здесь и далее обозначают осреднение по направлению, т. е. вдоль широты или изогипс, и за годовой промежуток времени), для всего исследуемого сектора в зависимости от ϕ . В соответствии с работой [16], широтные полосы, охватывающие зоны повышенных градиентов АДТ, мы условно будем называть течениями САТ, ЮПТ и ЮАТ, а зоны максимальных значений указанных параметров – ядрами этих течений. Граничные широты для каждой из полос указаны в табл. 1.

На рис. 2б, в показаны оценки линейного сдвига струйной структуры и линейного изменения указанного параметра (изменения интенсивности течения) за 26 лет наблюдений в зависимости от масштаба расчета и срединной широты, выполненные без разбиения на меридиональные полосы, а на рис. 2г, д – с разбиением на 14 полос шириной 2.5° д. Расчет проводился с шагом 0.5° ш. по оси масштабов и 0.25° ш. по оси срединной широты. Каждой точке на рисунках 2б, в соответствует один расчет, выполненный по методике, описанной в разделе 3.1, а на рис. 2г, д – с разбиением на меридиональные полосы и осреднением по алгоритму раздела 3.2. Например, для АЦТ северная и южная границы условно принимаются равными 42° ю.ш. и 57° ю.ш. Тогда расчет для полосы АЦТ на указанных рисунках соответствует 15° ш. по оси масштабов и 49.5° ю.ш. по оси срединной широты.

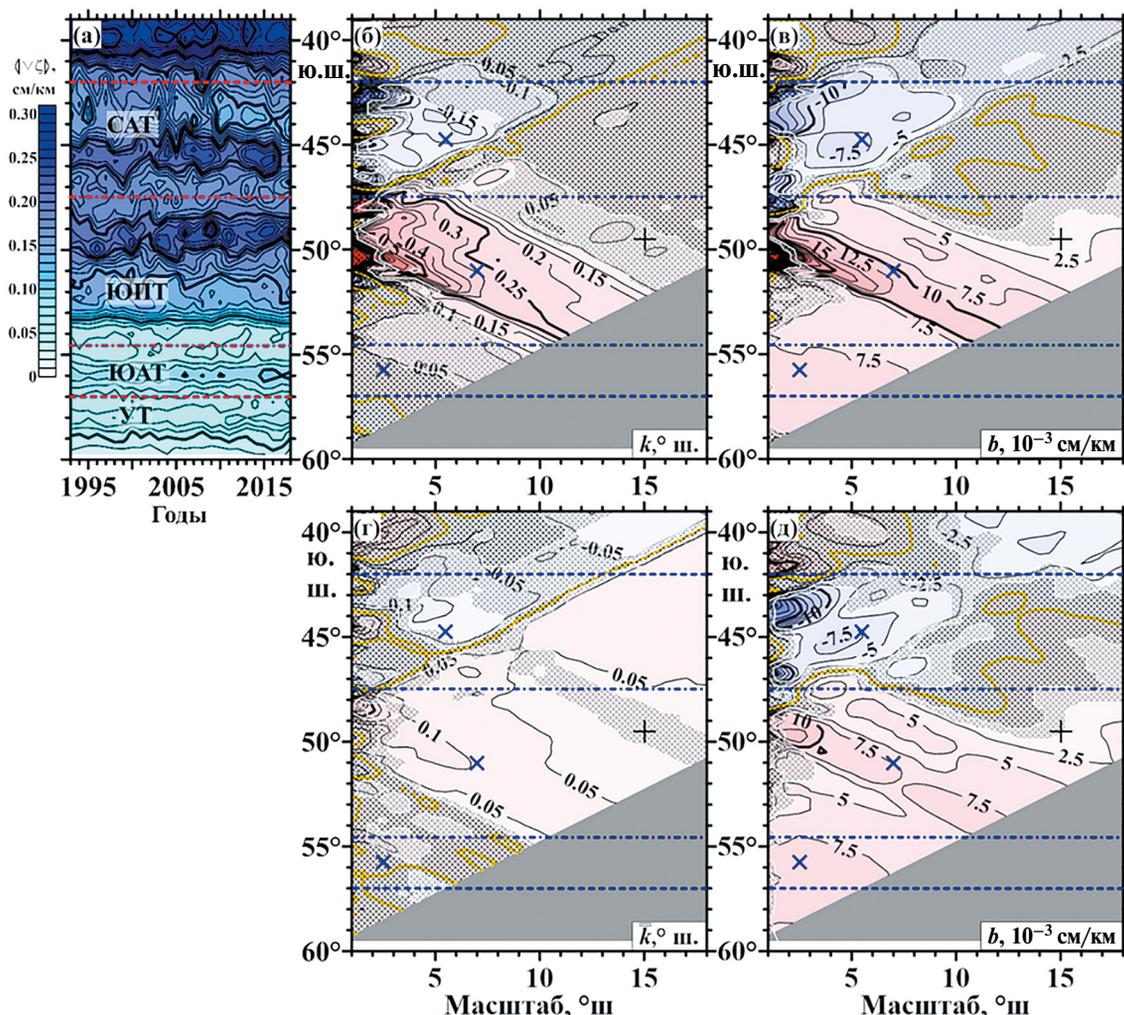


Рис. 2. К расчету сдвига струйной структуры АЦТ к югу от Африки относительно широты и изменения интенсивности течений: (а) – 26-летние ряды среднегодовых распределений $|\nabla\zeta|$ в зависимости от широты φ ; (б), (г) – линейные сдвиги ($^{\circ}$ ш.) струйной структуры течений в зависимости от срединной широты и масштаба расчета, соответственно без разделения и с разделением на меридиональные полосы; положительные значения сдвига – сдвиг на север; темная штриховка соответствует областям расчетных точек с оценкой сдвига, меньшей стандартной ошибки расчета, светлая – меньшей 95% уровня вероятности (по t-критерию Стьюдента); (в), (д) – соответствующие изменения интенсивности течений (10^{-3} см/км); 10^{-3} см/км в исследуемом секторе примерно соответствует 1 мм/с. Штриховые и штрих-пунктирные горизонтальные линии – условные границы АЦТ и границы между зонами повышенных градиентов АДТ внутри АЦТ. Кресты на рис. 2б, в, г, д обозначают точки, соответствующие полосам расчета САТ, ЮПТ и ЮАТ, а также АЦТ в целом; результаты расчетов для этих точек приведены в табл. 1. Аббревиатуры на рис. 2а: САТ – Субантарктическое течение, ЮПТ – Южное полярное течение, ЮАТ – Южное антарктическое течение, УТ – течение Уэдделла.

Таблица 1. Оценки сдвига меридиональной струйной структуры АЦТ и изменения $|\nabla\zeta|$ в полосе АЦТ относительно широты за 26 лет наблюдений

Струя АЦТ	Условные границы, $^{\circ}$ ю.ш.	Расчет без разбиения на меридиональные полосы		Расчет с разбиением на меридиональные полосы	
		Сдвиг струйной структуры, $^{\circ}$ ш. \pm ст. ошибка	Изменение абсолютных значений градиента АДТ, 10^{-3} см/км \pm ст. ошибка	Сдвиг струйной структуры, $^{\circ}$ ш. \pm ст. ошибка	Изменение абсолютных значений градиента АДТ, 10^{-3} см/км \pm ст. ошибка
САТ	42...47.5	-0.16 ± 0.05	-8.3 ± 1.7	-0.08 ± 0.04	-7.4 ± 1.6
ЮПТ	47.5...54.5	0.29 ± 0.05	10.7 ± 1.5	0.10 ± 0.02	7.4 ± 1.2
ЮАТ	54.5...57	0.02 ± 0.05	8.6 ± 1.2	0.01 ± 0.04	7.8 ± 1.3
АЦТ	42...57	0.05 ± 0.03	1.9 ± 0.9	0.02 ± 0.02	1.5 ± 0.8

Сравнение попарно рисунков 2б и 2г, а также 2в и 2д показывает качественное соответствие друг другу расчетов без разбиения и с разбиением на меридиональные полосы. В частности, области сдвигов струйной структуры одного знака на рис. 2б и 2г практически совпадают. То же касается и сходства в изменении интенсивности течений (рис. 2в и 2д). Вместе с тем, обнаруживаются количественные различия в результатах расчетов, особенно существенные в случае сдвига струйной структуры. Эти количественные различия обусловлены тем, что коэффициенты в линейных регрессионных зависимостях являются некоторым оптимумом (т. е. решением задачи о минимизации дисперсии остатка от линеаризации). В случае расчета по всему исследуемому сектору это оптимум по всем точкам сектора, попадающим в расчет. В случае разбиения на полосы отыскиваются оптимумы по каждой из полос, а затем рассчитывается их среднее. Ясно, что оптимум по всему множеству не обязан быть равным среднему от оптимумов по подмножествам. Таким образом, очевидно, что конечный результат расчета может зависеть от шага разбиения на меридиональные полосы.

Полученный выше вывод позволяет проверить корректность выбора шага меридиональных полос в 2.5 градуса. Для этого были выполнены дополнительные расчеты меридионального сдвига струйной структуры с разбиением на 2 полосы ($D = 17.5^\circ$ д.), 4 полосы ($D = 8.75^\circ$ д.), 7 полос ($D = 5^\circ$ д.), 28 полос ($D = 1.25^\circ$ д.) и 140 полос ($D = 0.25^\circ$ д.). В результатах расчета (рис. 3, а также рис. 2б) видны существенные количественные различия в картинах сдвигов между разбиениями от одной до 14 полос. Вместе с тем картина сдвигов с разбиениями от 14 до 140 полос практически не меняется даже несмотря на то, что использованный нами для анализа продукт является мульти-спутниковым, т. е. построен на данных всех имеющихся спутниковых альтиметров, включая дополнительные треки основных спутников, а также треки спутников с большими углами наклона орбиты. Первые образуют вместе с основными треками сетку с зональным межтрековым расстоянием около 1.42° д., а вторые характеризуются еще меньшими расстояниями между треками. Кроме того, очевидно, что при уменьшении шага увеличивается локальная, т. е. для одной полосы, ошибка расчетов. Таким образом, шаг именно в 2.5° д. представляется оптимальным для исследования зонального распределения меридионального сдвига струйной структуры.

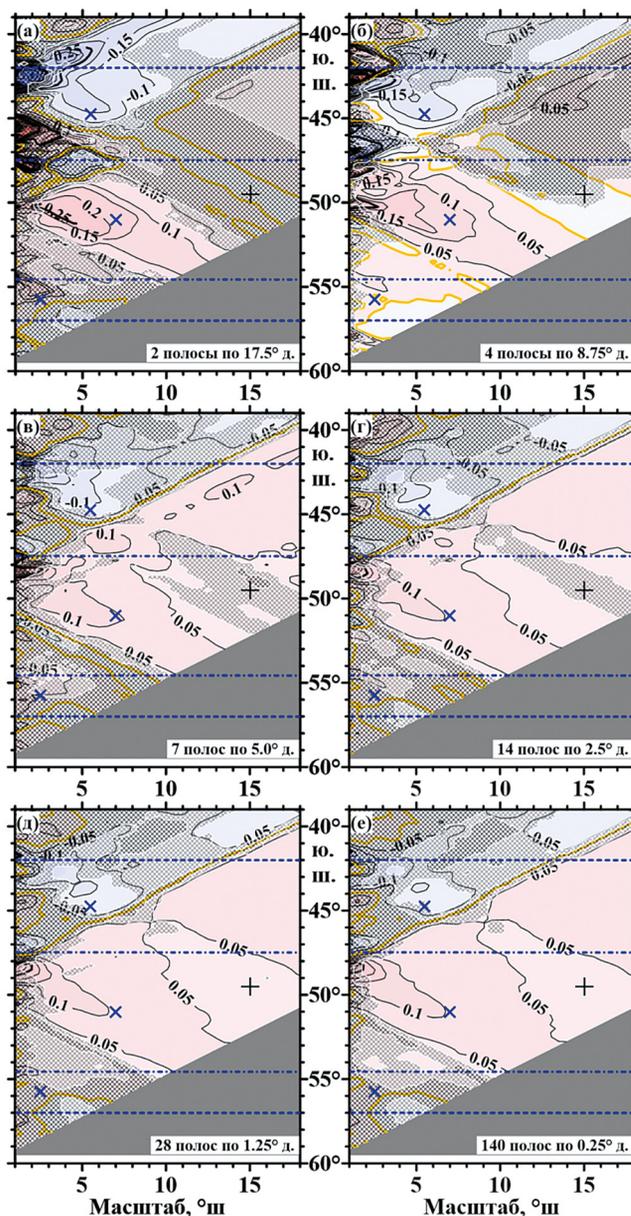


Рис. 3. Оценки среднего сдвига струйной структуры АЦТ ($^\circ$ ш.) в расчетах с разделением исходного сектора к югу от Африки на меридиональные полосы в зависимости от срединной широты и масштаба расчета: (а) – на 2 полосы шириной 17.5° д.; (б) – на 4 полосы шириной 8.75° д.; (в) – на 7 полос шириной 5.0° д.; (г) – на 14 полос шириной 2.5° д.; (д) – на 28 полос шириной 1.25° д.; (е) – на 140 полос шириной 0.25° д. Остальное – как на рис. 2.

4.2. Расчеты относительно шкалы широты

На рис. 4 приведено несколько 26-летних рядов среднегодовых распределений h в зависимости от φ для отдельных меридиональных 2.5° -градусных полос. Для каждой из полос на рис. 4 выделены примерные условные границы АЦТ в целом, а также САТ, ЮПТ и ЮАТ в соответствии с положением граничных изогипс на

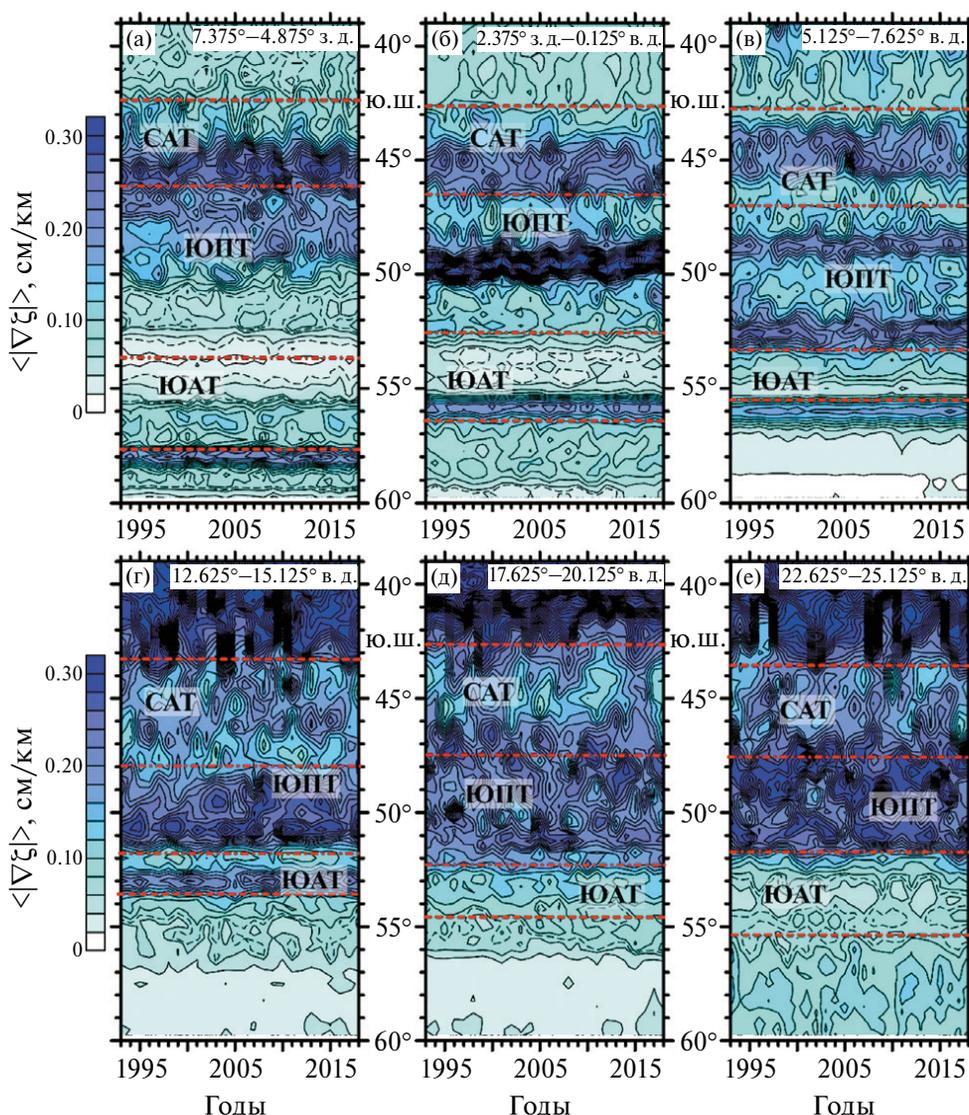


Рис. 4. 26-летние ряды среднегодовых распределений $|\nabla\xi|$ в зависимости от широты φ для отдельных 2.5-градусных меридиональных полос: (а) – 7.375°–4.875° з.д.; (б) – 2.375° з.д. – 0.125° в.д.; (в) – 5.125°–7.625° в.д.; (г) – 12.625°–15.125° в.д.; (д) – 17.625°–20.125° в.д.; (е) – 22.625°–25.125° в.д. Остальное – как на рис. 2а.

рис. 2а. Количество зон максимальных градиентов АДТ в полосе АЦТ в этих рядах составляет от 3-х до 6-ти. По меньшей мере две зоны максимальных градиентов АДТ наблюдается внутри ЮПТ во всех рядах 2.5-градусных меридиональных полос, при этом в полосах к западу от нулевого меридиана южное ядро ЮПТ оказывается слабым. Отметим, что ядра ЮПТ от полосы к полосе меняют свое положение по широте (рис. 4). Это обстоятельство приводит к тому, что при осреднении рядов по всему исследуемому сектору в ЮПТ на рис. 2а наблюдается только одна зона максимальных градиентов АДТ. Наличие дополнительных зон во всей зоне АЦТ в рядах на рис. 4 может быть связано с локальным продольным расщеплением струй и с изменением

положения ядер струй по широте внутри полос. Последнее, в частности, может иметь место к западу от нулевого меридиана, где над поднятием Буве на южной периферии АЦТ наблюдается разворот изогипс на север и даже их отклонение к западу по ходу течения (см. рис. 1). Отметим отсутствие явно выраженной зоны максимальных градиентов АДТ в ЮАТ в меридиональной полосе 5.125°–7.625° в.д. (рис. 4в). К западу от 12.625° в.д. струйная структура АЦТ устойчива во времени, т. е. количество максимумов градиента АДТ не меняется, а их положение по широте меняется незначительно или квазимонотонно. К востоку от указанной долготы струйная структура может меняться как по количеству максимумов (например, в полосе 12.625°–15.125° в.д., рис. 4г), так и по их

положению (та же меридиональная полоса). Наиболее ярко разрушение струйной структуры АЦТ наблюдается в полосе 17.625° – 20.125° в.д., где положение северного ядра АЦТ несколько раз за 26 лет меняется от 46° до 49° ю.ш.

Зональные распределения линейных сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения для нескольких масштабов расчета вдоль широты (рис. 5) имеют общие черты, которые воспроизводят особенности средних распределений как при осреднении по меридиональным по-

лосам, так и в расчетах без разделения на полосы (см. рис. 2). Во-первых, с увеличением масштаба расчета абсолютные значения обоих параметров в основном уменьшаются. Во-вторых, распределения обоих параметров можно разделить примерно по срединной широте 47° ю.ш. К югу от указанной широты оба параметра преимущественно положительны. К северу изменение интенсивности течений преимущественно отрицательное, сдвиг на малых масштабах отрицательный, меняясь на больших масштабах.

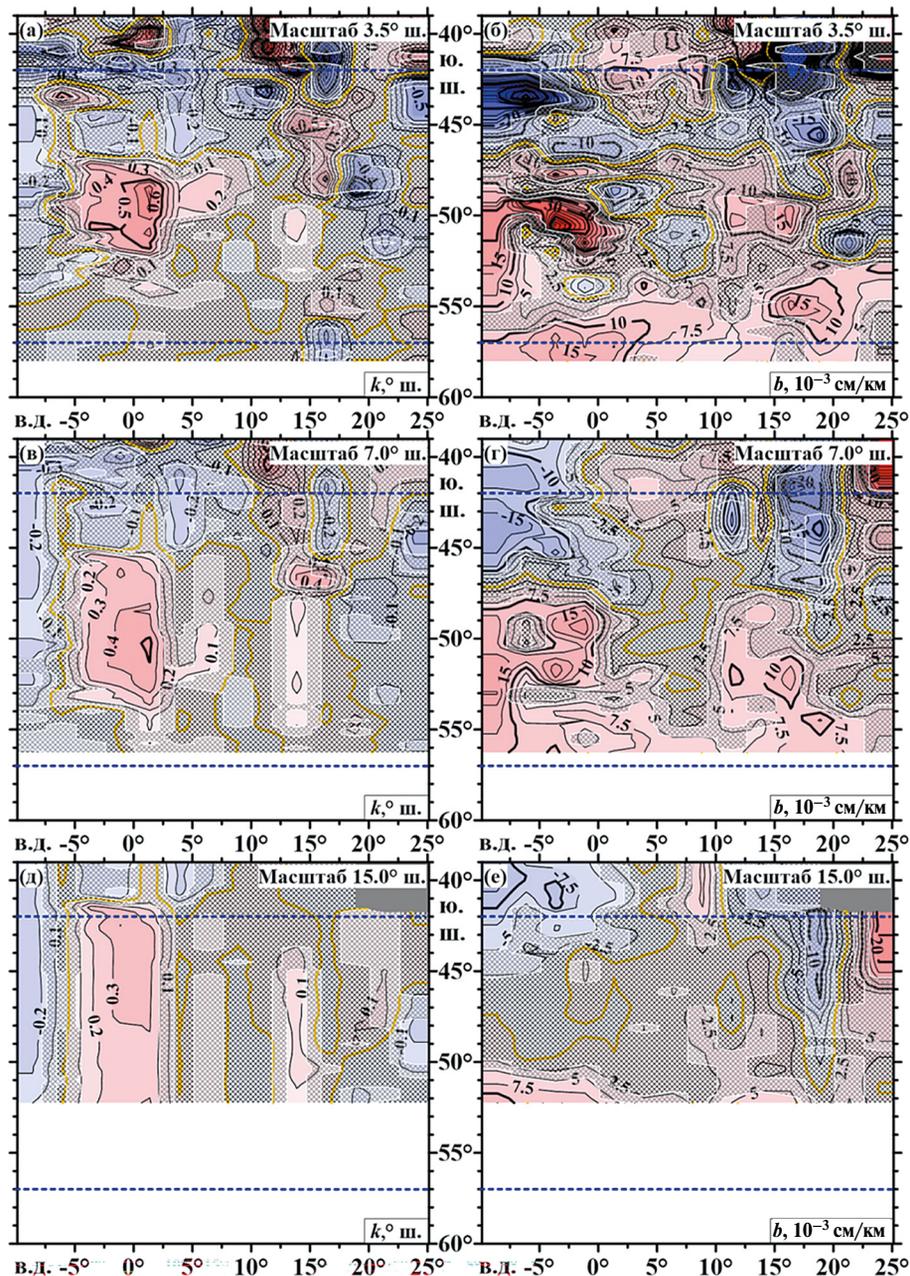


Рис. 5. Распределения меридионального сдвига ($^{\circ}$ ш.) и изменения интенсивности течения (10^{-3} см/км) в зависимости от долготы и срединной широты, построенные по 2.5-градусным меридиональным полосам: (а), (в), (д) – сдвиг; (б), (г), (е) – изменение интенсивности течения. Рис. 5а и 5б – масштаб расчета 3.5° ш., 5в и 5г – масштаб расчета 7° ш., 5д и 5е – масштаб расчета 15° ш. Синие штриховые линии – широты, ограничивающие АЦТ.

Абсолютные значения параметров в зональных распределениях на рис. 5 в основном оказываются меньше или на грани точности расчета. Значимые их величины наблюдаются в отдельных областях этих распределений. Отметим достоверный положительный сдвиг струйной структуры в диапазоне долгот 5.125° з.д. -7.625° в.д. с экстремальными значениями до 0.9° ш. на малых масштабах расчета примерно в зоне ядра ЮПТ. Этот диапазон соответствует району океана между Южно-Атлантическим хребтом и цепочкой возвышенностей хребет Агульяс – поднятие Метеор – хребет Шона (см. рис. 1). С увеличением масштаба расчета эта область расширяется от ядра ЮПТ практически на весь широтный диапазон АЦТ. Еще одна полоса положительного значимого сдвига до 0.15° ш. к югу от 47° ю.ш. соответствует $12.625^\circ-15.125^\circ$ в.д.; к северу от 47° ю.ш. в этой полосе на больших масштабах наблюдается достоверный положительный сдвиг до 0.5° ш. Значимые отрицательные сдвиги до -0.3° ш. отмечаются в крайней восточной меридиональной полосе и в полосе $2.625^\circ-5.125^\circ$ в.д., а также до -0.5° ш. в крайней западной полосе к северу от 47° ю.ш.

Суммарно область достоверных значений изменения интенсивности течений больше, чем сдвига струйной структуры. В частности, к югу от срединной широты 54° ю.ш. изменение интенсивности почти повсеместно достоверное и строго положительное. В зоне $47^\circ-54^\circ$ ю.ш. наблюдается область достоверных положительных изменений в диапазоне $4.875^\circ-2.375^\circ$ з.д. с экстремальными значениями до 50×10^{-3} см/км на малых масштабах расчета примерно в ядре ЮПТ. В этой же зоне на малых масштабах крайняя западная меридиональная полоса ($9.875^\circ-7.375^\circ$ з.д.) и частично следующая за ней на восток ($7.375^\circ-4.875^\circ$ з.д.), а также несколько включений на $10.125^\circ-17.125^\circ$ в.д. тоже характеризуются достоверными положительными изменениями интенсивности. При увеличении масштаба расчета эти области разрастаются, образуя два очага достоверных значений – западного (9.875° з.д. -5.125° в.д.) и восточного ($10.125^\circ-17.125^\circ$ в.д.). В зоне $47^\circ-42^\circ$ ю.ш. наблюдаются два очага достоверных отрицательных изменений интенсивности – западного в диапазоне $9.875^\circ-2.375^\circ$ з.д. и восточного в диапазоне $15.125^\circ-20.125^\circ$ в.д. Западный очаг заметно разрастается при увеличении масштаба расчета.

В предыдущем подразделе статьи уже указывалось на количественные различия между расчетами с разбиением на меридиональные полосы и без него (см. рис. 2). Соответствующие оцен-

ки по зонам отдельных струй и в целом по АЦТ приведены в табл. 1. Величины сдвига струйной структуры в зоне АЦТ в расчете с разбиением на меридиональные полосы в 2–5 раз меньше, чем без разбиения, а максимальные различия соответствуют ядру ЮПТ. При этом область достоверных значений оказывается больше именно в первом случае (см. рис. 2б, г). В расчете с разбиением максимальные достоверные значения среднего сдвига составляют 0.3° ш. на север на северной периферии ЮПТ и 0.15° ш. на юг на северной периферии САТ на малых масштабах расчета. Различия в оценках изменения интенсивности существенны только в полосе ЮПТ, где в расчете с разбиением они меньше в 1.5–2 раза, чем в расчете без разбиения (см. рис. 2в, д). Максимальные значения изменения интенсивности в расчете без разбиения достигают 13×10^{-3} см/км в ядре ЮПТ на малых масштабах расчета.

4.3. РАСЧЕТЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ШКАЛЫ АДТ

При построении рядов зависимостей h от ζ был учтен полученный в [4, 16] по расчетам через $\langle |\nabla \zeta| \rangle$ сдвиг струйной структуры АЦТ к югу от Африки в целом на 8.6 см за период спутниковых альтиметрических наблюдений с 1993 по 2018 г. Эти ряды были приведены к шкале ζ' , соответствующей середине временного интервала 1993–2012 гг., в свою очередь, соответствующего интервалу осреднения средней динамической топографии MDT CNES-CLS18. На рис. 6а приведен 26-летний ряд среднегодовых для всего исследуемого сектора распределений h в зависимости от ζ' . В соответствии с работой [16], зона АЦТ разделена на три полосы, соответствующие САТ, ЮПТ и ЮАТ. Граничные значения АДТ для каждой полосы приведены в табл. 2. Отметим, что в зоне АЦТ выделяется четыре ядра течения, в т. ч. в ЮПТ – два, т. е. осреднение вдоль изогипс по всему сектору, в отличие от осреднения вдоль широты, сохраняет разделение ЮПТ на ядра (рис. 6а), наблюдающееся в узких 2.5-градусных полосах в рядах $h(\varphi)$ (рис. 4).

На рис. 6б, в показаны оценки линейного сдвига струйной структуры и линейного изменения интенсивности течения за 26 лет наблюдений в зависимости от масштаба расчета и срединного значения АДТ, выполненные без разбиения на меридиональные полосы, а на рис. 6г, д – с разбиением на 14 полос шириной 2.5° д. Расчет проводился с шагом 0.5 см по оси масштабов и 0.5 см по оси срединных значений ζ' . Оценки сдвигов

Таблица 2. Оценки сдвига струйной структуры АЦТ относительно АДГ, приведенной к середине интервала 1993–2012 гг., и изменения $|\nabla\zeta|$ в полосе АЦТ за 26 лет наблюдений

Струя АЦТ	Условные границы, см	Расчет без разбиения на меридиональные полосы		Расчет с разбиением на меридиональные полосы	
		Сдвиг струйной структуры, см \pm ст. ошибка	Изменение абсолютных значений градиента АДГ, 10^{-3} см/км \pm ст. ошибка	Сдвиг струйной структуры, см \pm ст. ошибка	Изменение абсолютных значений градиента АДГ, 10^{-3} см/км \pm ст. ошибка
САТ	-32...20	1.7 ± 0.8	-3.0 ± 1.8	1.7 ± 0.6	-0.2 ± 2.6
ЮПТ	-104...-32	0.5 ± 0.4	9.8 ± 1.5	1.6 ± 0.3	11.9 ± 1.4
ЮАТ	-130...-104	-1.3 ± 1.5	5.9 ± 1.6	0.0 ± 0.4	5.2 ± 2.3
АЦТ	-130...20	0.0 ± 0.3	4.3 ± 1.0	1.1 ± 0.2	5.2 ± 0.9

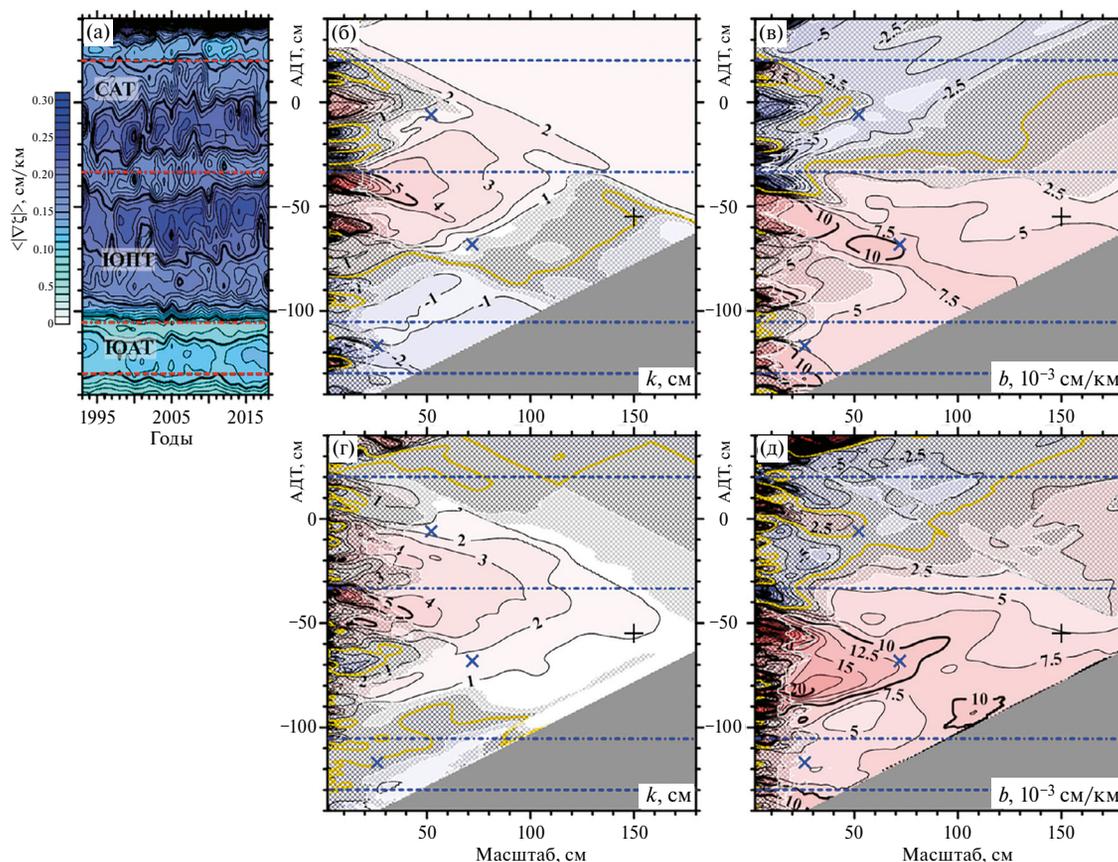


Рис. 6. К расчету сдвига струйной структуры АЦТ к югу от Африки относительно приведенной шкалы АДГ, ζ' и изменения интенсивности течений: (а) – 26-летние ряды среднегодовых распределений $\langle |\nabla\zeta| \rangle$ в зависимости от ζ' ; (б), (г) – линейные сдвиги (см) струйной структуры течений в зависимости от средних значений АДГ и масштаба расчета, соответственно без разделения и с разделением на меридиональные полосы; (в), (д) – соответствующие изменения интенсивности течений (10^{-3} ·см/км). Кресты на рис. бб, в, г, д обозначают точки, соответствующие полосам расчета САТ, ЮПТ и ЮАТ, а также АЦТ в целом; результаты расчетов для этих точек приведены в табл. 2. Остальное – как на рис. 2.

по отдельным зонам и АЦТ в целом приведены в табл. 2. Сравнение рисунков бб и бг показывает хорошее соответствие друг другу качественно и количественно оценок сдвигов струйной структуры в пределах АЦТ без разделения и с разделением на полосы. Наибольшие значения положительного сдвига отмечаются в зоне между ядрами

САТ и ЮПТ. Из различий отметим в случае расчета без разделения на полосы общий положительный сдвиг зоны АЦТ на 1.1 см и практически нулевые значения сдвига на южной периферии АЦТ. Картины изменения интенсивности течений в обоих способах расчета качественно также сходны (бв и бд), а также сходны с результатами

расчетов по широте (рис. 2в и 2д), т. е. наблюдаются ослабление интенсивности течения в САТ и его интенсификация в ЮПТ и ЮАТ. Однако в случае расчета относительно шкалы АДТ количественно изменение интенсивности течения в варианте с разделением на полосы больше (до трех раз), чем без разделения. При расчете относительно широты наблюдалась обратная картина.

На рис. 7 приведено несколько 26-летних рядов среднегодовых распределений h в зависимости от ζ' для отдельных меридиональных 2.5-градусных полос. Полосы выбраны те же, что и при расчете через широту. Из сравнения рис. 7 и рис. 4 видно, что осреднение вдоль изогипс приводит к исчезновению некоторых ядер, наблюдавшихся при осреднении вдоль широты, в полосах за-

падной части исследуемого сектора. Так, во всей зоне АЦТ в рядах $h(\zeta')$ к западу от нулевого меридиана наблюдаются только три ядра вместо пяти–шести, а в ЮПТ – только одно вместо двух–трех. Указанный эффект, так или иначе, связан с незональностью изогипс в этих узких зонах. Например, точки максимума модуля градиента АДТ на карте могут располагаться вдоль незональных изогипс. Тогда осреднение вдоль широты может приводить к формированию дополнительного ядра (ядер) в $h(\varphi)$, а вдоль изогипс этого происходить не будет. Если же цепочка максимумов градиента АДТ располагается на карте зонально, то осреднение вдоль незональных изогипс может приводить к исчезновению соответствующего ядра в $h(\zeta')$. Отметим, что к востоку от нулевого меридиана в узких 2.5-градусных полосах в зоне

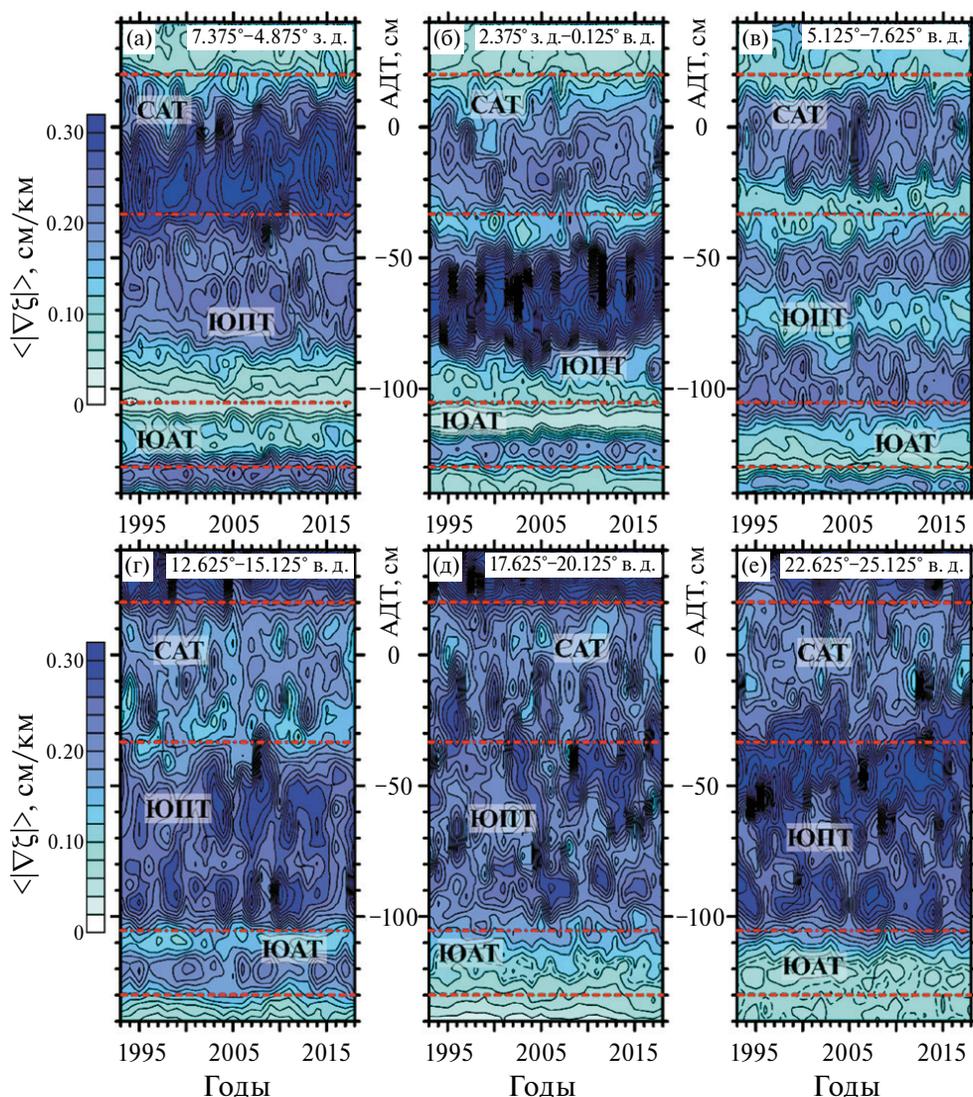


Рис. 7. 26-летние ряды среднегодовых распределений $\langle |\nabla \zeta| \rangle$ в зависимости от приведенной АДТ, ζ' для отдельных 2.5-градусных меридиональных полос: (а) – 7.375°–4.875° з.д.; (б) – 2.375° з.д. – 0.125° в.д.; (в) – 5.125°–7.625° в.д.; (г) – 12.625°–15.125° в.д.; (д) – 17.625°–20.125° в.д.; (е) – 22.625°–25.125° в.д. Остальное – как на рис. 6а.

АЦТ наблюдаются три–четыре ядра, а в ЮПТ – всегда два ядра. Кроме того, в этой части сектора может отсутствовать ядро в ЮАТ, как, например, в полосе 5.125° – 7.625° в.д. В распределениях $h(\xi')$, как и в $h(\varphi)$, в западной части исследуемой области струйная структура устойчива во времени, а в восточной части может быть неустойчива, как, например, в полосе 17.625° – 20.125° в.д. за счет неоднократного по ходу временного ряда

перемещения северного ядра АЦТ вдоль шкалы АДТ от -10 до -50 см.

Зональные распределения линейных сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения для нескольких масштабов расчета вдоль изогипс (рис. 8), как и в случае расчета вдоль широты, имеют общие черты со средними распределениями как без разделения на полосы, так и с разделением. Сдвиг в основном

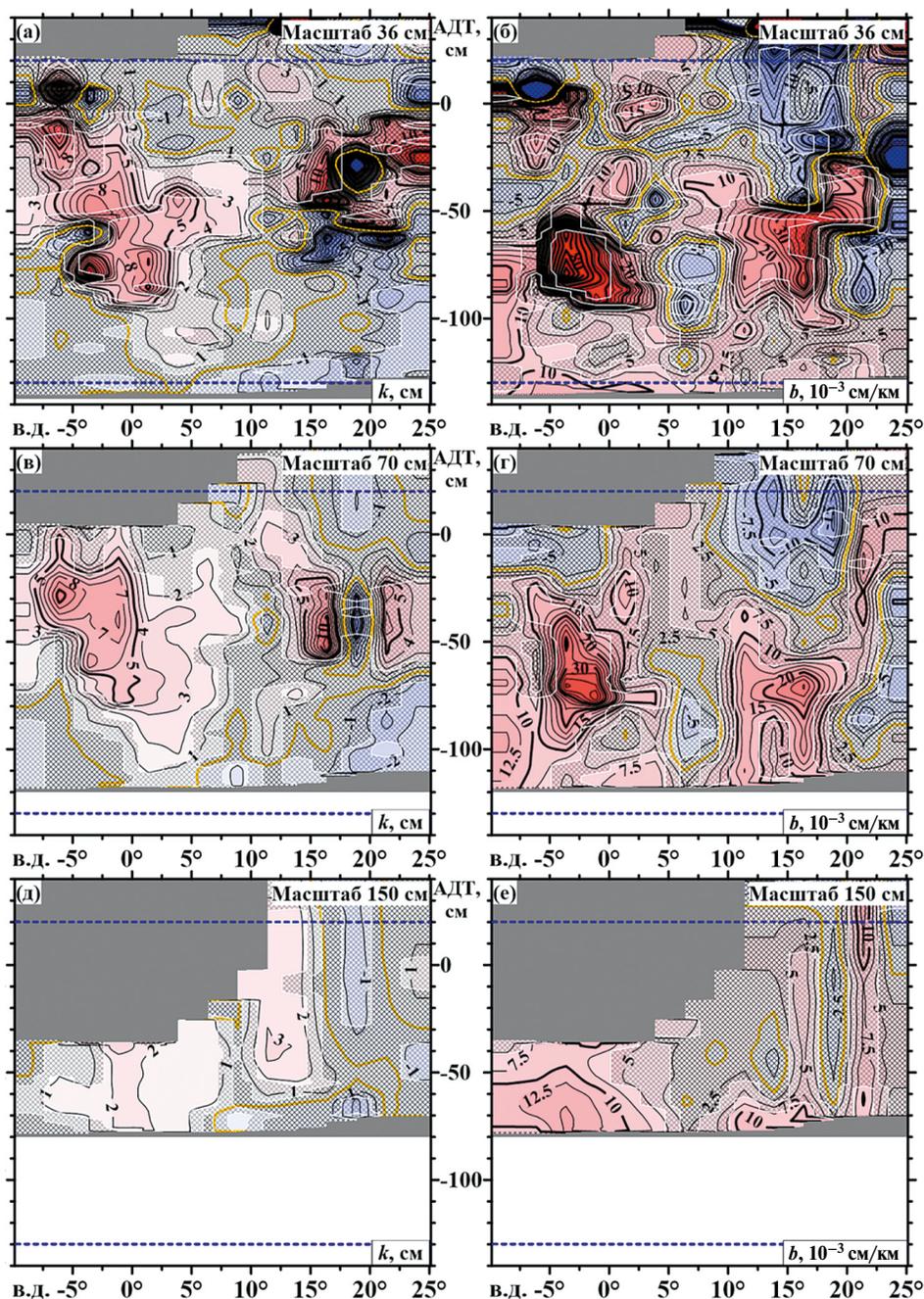


Рис. 8. Распределения меридионального сдвига (см) и изменения интенсивности течения (10^{-3} ·см/км) в зависимости от долготы и средних значений АДТ, построенные по 2.5-градусным меридиональным полосам: (а), (в), (д) – сдвиг; (б), (г), (е) – изменение интенсивности течения. Рис. 8а и 8б – масштаб расчета 36 см, 8в и 8г – масштаб расчета 70 см, 8д и 8е – масштаб расчета 150 см. Синие штриховые линии – изогипсы, ограничивающие АЦТ.

положительный в зонах САТ и ЮПТ и отрицательный в ЮАТ. Качественно картина распределения изменения интенсивности в расчете вдоль изогипс сходна с результатами расчета вдоль широты. Изменение интенсивности течения в основном положительное в ЮПТ и ЮАТ и отрицательное в САТ на малых масштабах расчета, меняясь на положительное на больших. При увеличении масштаба расчета уменьшаются абсолютные значения сдвигов и изменения интенсивности течения.

Достоверные положительные значения сдвига наблюдаются в западной части исследуемого сектора (к западу от 10° в.д.) с экстремальными значениями до 10–15 см на малых масштабах расчета в ЮПТ и южной части САТ в области 5° з.д. – 5° в.д. (рис. 8) между Южно-Атлантическим хребтом и цепочкой возвышенностей хребет Агульяс – поднятие Метеор – хребет Шона (см. рис. 1). Достоверные отрицательные сдвиги практически отсутствуют. Достоверные положительные значения изменения интенсивности течения наблюдаются в двух очагах в западной и восточной частях исследуемого сектора в ЮПТ, а также в зоне ЮАТ практически по всей протяженности сектора. В западной части максимальные достоверные значения изменения интенсивности достигают на малых масштабах расчета 0.08 см/км (приблизительно 8 см/с) примерно на 4.875° з.д. – 0.125° в.д., в восточной – 0.04 см/км (примерно 4 см/с), в ЮАТ – 5×10^{-3} – 15×10^{-3} см/км. Включения достоверных отрицательных значений изменения интенсивности отмечаются в зонах САТ и ЮПТ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье на основе разработанной ранее ее автором методики [4, 16], опирающейся на линейный регрессионный анализ, по данным АДТ, публикуемым на сайте <http://marine.cornpius.eu>, выполнена оценка зонального распределения долговременного (за период спутниковых альтиметрических наблюдений 1993–2018 гг.) меридионального сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений в зоне АЦТ в секторе к югу от Африки (9.875° з.д. – 25.125° в.д.). Под струйной структурой течений понимается чередование в каком-то выделенном (в меридиональном в случае АЦТ) направлении зон повышенных и пониженных значений модуля градиента АДТ, $|\nabla\zeta|$. В рамках указанной методики сдвиг структуры представляет собой смещение формы осредненных по исследуемому сектору

Южного океана среднегодовых кривых зависимости $|\nabla\zeta|$ от широты или значений АДТ за весь период наблюдений. Причем сдвиг струйной структуры и изменение интенсивности течения зависят от подвергнутого обработке диапазона широт или АДТ, т. е. от ширины (масштаба) этого диапазона, и положения его середины на оси широты или АДТ. Для оценки зонального распределения указанных параметров исходный сектор был разделен на меридиональные полосы равной ширины, для каждой из которых были проведены расчеты по упомянутой выше методике. Кроме того, по всему набору полос были вычислены средние значения этих параметров в зависимости от масштаба расчета и срединной широты (или АДТ). Методика [4, 16] была доработана в отношении расчета ошибок этих средних значений.

Расчеты, проведенные для разных значений ширины меридиональных полос, показали, что качественно картины распределений средних величин сдвига струйной структуры (в зависимости от масштаба расчета и срединной широты) почти не зависят от ширины полос, но существенно зависят количественно, причем в определенных диапазонах ее изменения. Количественные различия наблюдаются при изменении ширины полос примерно от 2.5° д. в большую сторону, тогда как при изменении в меньшую сторону их практически не наблюдается. При этом очевидно, что при уменьшении ширины увеличивается локальная, т. е. для одной полосы, ошибка расчетов. Отметим также, что 2.5° д. – ближайшее (с меньшей стороны) значение к величине расстояния вдоль широты между основными треками спутников с альтиметрами (2.83° д.), которое кратно шагу исходной четверть-градусной сетки и одновременно является делителем без остатка для 360° . Таким образом, ширина меридиональной полосы в 2.5° д. является оптимальной для представления зонального распределения сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений.

Зональные распределения сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения сохраняют качественные черты средних по сектору к югу от Африки распределений. В случае осреднения вдоль широты в зоне САТ наблюдается в основном сдвиг на юг и ослабление интенсивности течения, в ЮПТ – сдвиг на север и усиление интенсивности течения, а в ЮАТ – интенсификация течения и отсутствие существенного сдвига. При осреднении вдоль изогипс (за вычетом долговременного подъема уровня на 8.6 см) картина изменения интенсивности течения – сходная с осреднением вдоль

широты, сдвиг положительный в САТ и ЮПТ и отрицательный, на грани точности расчета, в ЮАТ. Абсолютные значения сдвигов и изменения интенсивности с увеличением масштаба расчета уменьшаются.

Сдвиги струйной структуры и изменения интенсивности течения демонстрируют заметную неоднородность распределения по долготе. В частности, положительный достоверный сдвиг относительно широты (до 0.8° ш. на малых масштабах расчета) наблюдается почти исключительно в полосе ЮПТ в западной части исследуемого сектора между Южно-Атлантическим хребтом и цепочкой возвышенностей хребет Агульяс – поднятие Метеор – хребет Шона. Области достоверной интенсификации течения связаны в основном с тем же районом (до 40×10^{-3} см/км, что примерно соответствует изменению скорости 4 см/с) и со всей зоной ЮАТ (до 15×10^{-3} см/км). Области ослабления интенсивности течения (до -40×10^{-3} см/км) наблюдаются в зоне САТ. При расчетах относительно приведенной АДТ, достоверные положительные значения сдвига (до 9 см) отмечаются главным образом в той же западной части ЮПТ. Здесь же наблюдаются достоверные положительные значения изменения интенсивности течений (до 80×10^{-3} см/км), а также в ЮАТ по всему сектору (до 15×10^{-3} см/км) и в ЮПТ в восточной части сектора (до 40×10^{-3} см/км). С неоднородностью зональных распределений указанных параметров очевидно связаны количественные расхождения в их расчетах с разделением на меридиональные полосы и без него. Более детально этот вопрос будет рассмотрен в отдельной работе.

Финансирование. Настоящая работа поддержана темой госзадания 0128-2021-0002 (Разработка методики) и грантом Российского Научного Фонда 22-77-10004 (Подготовка и анализ данных).

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В.А. Антарктические струи // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 2. С. 169–177.
2. Кошляков М.Н., Гладышев С.В., Тараканов Р.Ю., Федоров Д.А. Течения в западной части пролива Дрейка по данным наблюдений в январе 2010 г. // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 2. С. 197–209.
3. Тараканов Р.Ю. О сезонном меридиональном смещении струйной структуры Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 2. С. 182–199.
4. Tarakanov R.Yu. Comparative analysis of jet detection methods on the basis of satellite altimetry data by example of the Antarctic Circumpolar Current sector to the south of Africa // *Oceanology*. 2023. V. 63. № Suppl. P. S23-S41.
5. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Структура струй и фронтов к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 4. С. 437–450.
6. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 6. С. 725–736.
7. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 4. С. 541–555.
8. Ablain M., Legeais J.F., Prandi P. et al. Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales // *Surv. Geophys.* 2017. V. 38. P. 7–31.
9. Chapman C.C. New perspectives on frontal variability in the Southern Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 2017. V. 47. P. 1151–1168.
10. Chapman C.C., Lea M.A., Meyer A. et al. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate // *Nat. Clim. Change*. 2020. V. 10. P. 210–219. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0705-4>
11. Graham R.M., de Boer A.M., Heywood K.J. et al. Southern Ocean fronts: controlled by wind or topography? // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2012. V. 117. <https://doi.org/10.1029/2012JC007887>
12. Mulet S., Rio M.-H., Etienne H. et al. New CNES-CLS18 Mean dynamic topography // *Ocean Sci.* 2021. V. 17. № 6. P. 789–808.
13. Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W.D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Res.* 1995. V. 42. № 5. P. 641–673.
14. Sokolov S., Rintoul S.R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part A: Mean circumpolar paths // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11018. <https://doi.org/10.1029/2008JC005108>
15. Sokolov S., Rintoul S.R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part B: Variability and relationship to sea surface height // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11019. <https://doi.org/10.1029/2008JC005248>
16. Tarakanov R. Yu. On the long-term linear meridional shift of the jet structure of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 6. P. 815–829.
17. Thompson A.F., Haynes P.H., Wilson C., Richards K.J. Rapid Southern Ocean front transitions in an eddy-resolving ocean GCM // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. № 23. L23602.

LONG-TERM LINEAR MERIDIONAL SHIFT OF THE JET STRUCTURE OF THE ANTARCTIC CIRCUMPOLAR CURRENT SOUTH OF AFRICA ON THE BASIS OF THE SATELLITE ALTIMETRY DATA: ZONAL DISTRIBUTION

R. Yu. Tarakanov*

P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nakhimovskiy pr-t, 36, Moscow, 117997, Russia

** e-mail: rtarakanov@gmail.com*

For the period of satellite altimetry observations 1993–2018, the zonal distribution of the linear meridional shift of the jet structure and the change in the intensity of currents in the sector of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) south of Africa (9.875°W–25.125°E) were estimated. The jet structure is understood as the alternation in the meridional direction of zones of increased and decreased values of the modulus of the absolute dynamic topography (ADT) gradient, $|\nabla\zeta|$. The work was carried out using the methodology developed earlier and supplemented in this article, based on the calculations of linear regressions, which also includes an assessment of calculation errors. To estimate the zonal distributions, the sector was divided into meridional bands, for each of which a calculation was carried out. The optimum width of the band is estimated at 2.5° lon. The presence of a noticeable zonal inhomogeneity in the shift of the jet structure and changes in the intensity of the currents are shown. This inhomogeneity is obviously associated with quantitative discrepancies in the calculations of these parameters with division into bands, with their subsequent averaging over the zonal series, and without division into bands. Qualitatively, the patterns of shifts in the jet structure and changes in the intensity of flows with and without separation into bands are similar.

Keywords: dynamic topography, satellite altimetry, jets, Antarctic Bircumpolar Current

ОЦЕНКА ОШИБОК РАСЧЕТОВ СРЕДНЕГО ЛИНЕЙНОГО СДВИГА СТРУЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Полная ошибка расчетов складывается из ошибок процедур вычислений и ошибок данных. Полный квадрат ошибки расчетов среднего коэффициента \bar{k} представляется в виде:

$$\delta^2(\bar{k}) = \delta_{\bar{k}}^2 + \delta_{k_M}^2 + \delta_{k_\zeta}^2 + \delta_{k_\zeta}^2, \quad (\text{П1.1})$$

где

$$\delta_{\bar{k}}^2 = \frac{1}{M} \frac{A}{\dot{a}} \frac{\tau}{\Delta T} \sum_{m=1}^M (k_m - \bar{k})^2, \quad (\text{П1.2})$$

$$\delta_{k_M}^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M \delta_{k_m}^2, \quad (\text{П1.3})$$

$$\delta_k^2 = \frac{1}{M^2} \frac{1}{R_M^2} \left(\sum_{m=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L k_{h_{i,l}} \right)_m \right)^2 \delta^2, \quad (\text{П1.4})$$

$$\delta_k^2 = \frac{1}{M^2} \frac{1}{R_M^2} \left(\sum_{m=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L k_{h_{i,l}} \right)_m \right)^2 \delta^2. \quad (\text{П1.5})$$

В формуле (П1.2) $\delta_{\bar{k}}$ – стандартная ошибка расчета среднего \bar{k} по набору значений k_m , $m = 1, M$. В формуле (П1.3) $\delta_{k_M}^2$ – вклад ошибок процедур расчета k_m по исходным данным, δ_{k_m} – величина этой ошибки для m -й меридиональной полосы; соответствующие формулы ее расчета приведены в [4]. В формуле (П1.4) δ_k^2 – вклад ошибки данных по аномалии уровня океана; δ_ζ – величина этой ошибки, под которой мы понимаем среднеквадратичное значение формальной ошибки картирования за весь период наблюдений и по всей полосе расчета; $k_{h_{i,l}}$ – частная производная от k по $h_{i,l}$ (формула (П1.20) из [4]), при этом следует подчеркнуть, что набор этих производных меняется по индексу m ; N и L – общее число значений аргумента a и количество лет при расчетах линейных сдвигов и изменения интенсивности течений для отдельных меридиональных полос. В формуле (П1.5) δ_k^2 – вклад ошибки данных средней динамической топографии; δ – оценка этой ошибки, под которой понимается среднеквадратичное ее значение по всей полосе расчета.

В вышеприведенных формулах масштабы A и τ соответствуют единичному измерению по оси аргумента и по времени, \dot{a} – масштаб расчета, т. е. разница между крайними точками обчитываемого диапазона по оси a . На карте участок единичного измерения соответствует “квадрату”, образованному соседними треками спутника (рис. 1 в основном теле статьи). Для исследуемого сектора Южного океана линейный размер R такого “квадрата” оценивается в 167 км. Если J – количество “квадратов”, попадающих на карте в полосу течения, то, при осреднении по какому-либо направлению (вдоль широты или вдоль изогипсы), масштаб единичного измерения A по оси аргумента оценивается как отношение ширины этой полосы к J . Согласно [16], для этого сектора масштаб $A = 0.1^\circ$ ш. для $a = \varphi$; масштаб $A = 1$ см для $a = \zeta$. Отметим, что масштаб единичного измерения для отдельной меридиональной полосы равен MA , где M – количество таких полос в исследуемом секторе. $\Delta T = 365.25$ – количество суток, эквивалентное шагу по оси времени.

Форма записи вклада ошибок данных (П1.4) и (П1.5) исходит из двух обстоятельств. Во-первых, эти ошибки являются зависимыми по индексу m . Во-вторых, единичный масштаб, в случае оценок ошибок данных (как для аномалии уровня океана, так и для средней АДТ), зависит только от линейных размеров обчитываемой области. Величина R_M формулах (П1.4) и (П1.5) представляет собой меньший линейный размер рассматриваемой зоны течения на карте всего исследуемого сектора. В частности, для сектора Южного океана в 35° д. меньший размер для $a = \varphi$ соответствует ширине полосы между крайними широтами, а для $a = \zeta$ – ширине полосы между крайними изогипсами, исходя из того, что 1 см АДТ в среднем эквивалентен 0.1° ш.

Для расчетов полной ошибки \bar{b} формулы (П1.1–П1.5) полностью аналогичны с заменой k на b .