

УДК 551.465

СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ СИНОПТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОКЕАНСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА И МОРЕ СКОТИЯ

© 2019 г. М. Н. Кошляков^{1*}, И. А. Репина², Д. С. Савченко¹, Р. Ю. Тараканов¹, В. К. Тароян¹¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

*e-mail: mnkoshl@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.09.2017 г.

Принята к публикации 08.02.2018 г.

Двадцатидвухлетние данные спутниковых альтиметрических наблюдений используются для анализа структуры и изменчивости поля синоптических возмущений океанских течений в проливе Дрейка и море Скотия. Вейвлет-анализ временных рядов абсолютной динамической топографии поверхности океана в ряде точек в исследуемой области выявил высокую степень статистической нестационарности этих рядов, проявляющейся в относительно небольшой (немногие годы) продолжительности интенсивных колебаний абсолютной динамической топографии поверхности океана, разделенных длительными интервалами слабых колебаний. Анализ синоптических карт абсолютной динамической топографии поверхности океана показал, что периоды сильных колебаний течений обусловлены чередованием в окрестности данной точки эпизодов формирования циклонических и антициклонических вихрей-меандров отдельных струй Антарктического циркумполярного течения, ростом и последующим падением их интенсивности и заключительным слиянием вихрей с материнскими струями. Помимо статистической нестационарности, зафиксирована также большая пространственная изменчивость статистических характеристик синоптических возмущений течений на расстояниях порядка 150–200 км.

Ключевые слова: Антарктическое циркумполярное течение, пролив Дрейка, вихри, струи, вейвлет-анализ, спутниковая альтиметрия

DOI: 10.31857/S0030-1574592191–200

В работе [1] посредством анализа многочисленных данных спутниковых альтиметрических наблюдений в проливе Дрейка и море Скотия показана существенная синоптическая нестационарность струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), связанная с их меандрированием, формированием циклонических и антициклонических синоптических вихрей и их обратным поглощением струями. В настоящей работе для дополнительного исследования характера изменчивости АЦТ привлекается вейвлет-анализ альтиметрических данных, представляющий собой обобщение классического анализа Фурье на случай статистической нестационарности рядов наблюдений [6]. В основу работы положены ежесуточные цифровые карты абсолютной динамической топографии поверхности океана (АДТПО) за 1993–2014 гг., построенные во французском агентстве CLS (Collecte Localisation Satellites) по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и находящиеся в открытом доступе в Интернете (DT Global-MADT-Upd product, <http://www.aviso.altimetry.fr>).

Под АДТПО подразумевается обусловленное океанской циркуляцией отклонение поверхности океана от равновесной формы геоида. Изолинии АДТПО (изогипсы) одновременно являются линиями тока геострофического течения, причем в Южном полушарии течение направлено так, что более высокие значения АДТПО остаются слева от течения. С целью выделения синоптических вихрей на картах CLS авторами настоящей работы сначала были определены узлы исходной горизонтальной сетки AVISO ($\frac{1}{4}^\circ$ ш. \times $\frac{1}{4}^\circ$ д.), принадлежащие вихрям, и значения АДТ, соответствующие замкнутым контурным (граничным) изогипсам для каждого вихря. Затем значения АДТ на этих картах были проинтерполированы на узлы сетки с шагами $\Delta y = 1^\circ/40 = 111 \text{ км}/40 = 2775 \text{ м}$ по широте и $\Delta x = 1^\circ/20 = 111 \text{ км} \cdot \cos\varphi/20$ по долготе (φ — широта), после чего узлы этой новой сетки были маркированы на принадлежность тому или иному вихрю. Таким способом на полученных картах высокого разрешения были выделены области с замкнутыми изогипсами, которые были

интерпретированы как циклонические (локальные минимумы АДТ, вращение воды по часовой стрелке) и антициклонические (противоположные по знаку возмущения АДТ и направлению вращения воды) вихри. Полученные карты и были положены в основу дальнейшего анализа изменчивости АДТПО. На рис. 1 представлена усредненная за весь двадцатидвухлетний период наблюдений карта АДТПО для пролива Дрейка и моря Скотия.

Наблюдения показывают, что АЦТ имеет многоструйный характер [2, 5]. В работе [5] в результате анализа данных спутниковой альтиметрии и других наблюдений на разных участках антарктического кольца были выявлены восемь струй АЦТ, достаточно устойчиво привязанных к определенным диапазонам значений АДТПО. Выполненный авторами настоящей работы анализ карт АДТПО в проливе Дрейка и море Скотия позволил скорректировать эти диапазоны в приложении к упо-

мянутому району океана, в результате чего были определены значения АДТПО в стречнях и на границах струй АЦТ в этом районе (рис. 1, таблица). В отличие от рис. 1, на котором представлена климатическая карта АДТПО, что подразумевает усреднение меандров струй и, таким образом, «размазанность» картины АДТПО в горизонтальной плоскости, струи АЦТ хорошо просматриваются на синоптических картах АДТПО, включая карты, приведенные ниже в настоящей статье.

Вейвлет-анализ изменчивости АДТПО в проливе Дрейка и море Скотия был выполнен для ряда узлов упомянутой выше интерполяционной сетки высокого разрешения, располагающихся вблизи точек пересечения основных галсов альтиметрических спутников на поверхности океана. В соответствии с теорией вейвлет-анализа [6], вейвлет-преобразование $W(n,s)$ временного ряда значений возмущений АДТПО в этих узлах рассчитывалось по формуле:

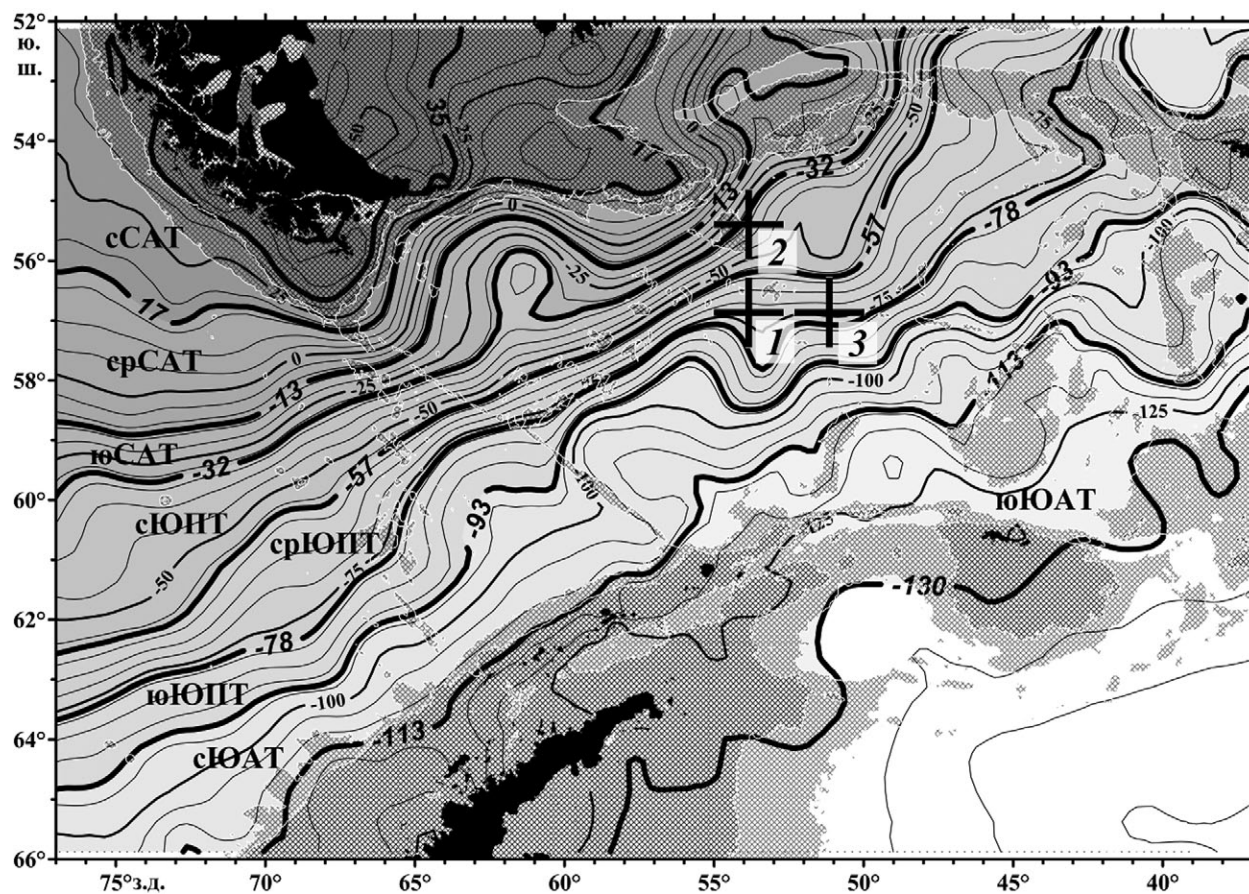


Рис. 1. Средняя за 1993–2014 гг. абсолютная динамическая топография поверхности океана (АДТПО, см) в проливе Дрейка и море Скотия. Выделены изогипсы, являющиеся границами между струями АЦТ; расшифровка названий струй дана в примечании к таблице. Темная и светлая клетчатые штриховки соответственно показывают участки дна с глубиной менее 1000 м и от 1000 до 3000 м. Кресты и цифры около них показывают положения и номера точек, для которых в статье приведены результаты вейвлет-анализа изменчивости АДТПО (см. рис. 2, 8, 9).

Таблица. Значения АДТПО (см) в стряхах и на границах струй АЦТ

Струя АЦТ	Стрежень струи, см	Границы струи, см
		35
сСАТ	25	
		17
срСАТ	0	
		-13
юСАТ	-23	
		-32
сЮПТ	-40	
		-57
срЮПТ	-68	
		-78
юЮПТ	-85	
		-93
сЮАТ	-103	
		-113
юЮАТ	-120	
		-130

Примечание. Расшифровка названий струй (сверху вниз): северные, средние и южные струи Субантарктического и Южного полярного течений, северная и южная струи Южного антарктического течения.

$$W(n,s) = \sum_{n=0}^{N-1} \zeta(n) \psi \left[\frac{(n'-n)\delta t}{s} \right], \quad (1)$$

где ζ — отклонение АДТПО от ее среднего за 22 года наблюдений значения в данной точке, n — порядковый номер суток внутри периода наблюдений, $N = 365 \cdot 22 + 5 = 3035$ — число суток за период наблюдений, $\delta t = 1$ сутки — дискретность ряда наблюдений, s (в сутках) — временной масштаб (период) колебаний $\zeta(t)$, ψ — вейвлет-функция, с которой производилась свертка анализируемого ряда. В настоящей работе был выбран вейвлет Морле [6]:

$$\psi = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{\delta t}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{(n'-n)^2 \delta t^2}{2s^2} \right) \exp \left(i \frac{5(n'-n)\delta t}{s} \right), \quad (2)$$

где n' следует рассматривать как аргумент вейвлет-функции, а n и s — как ее параметры, соответственно определяющие положение вейв-

лет-функции на оси времени и период колебаний $\zeta(t)$. При этом в качестве минимального значения s принималось $s_0 = 2\delta t$.

Величина $|W(n,s)|$ определяется как вейвлет-амплитуда колебаний $\zeta(t)$ в данной точке и для данных значений n и s , а $|W(n,s)|^2$ — как вейвлет-спектр мощности этих колебаний. $|W(n,s)|^2/\sigma^2$ есть спектр колебаний $\zeta(t)$, нормированный на дисперсию σ^2 этих колебаний в данной точке, рассчитанную по всему исследованному интервалу времени $N\delta t$. Как видно из (1) и (2), вейвлет-анализ, в отличие от анализа Фурье, допускает зависимость амплитуд и начальных фаз гармоник, составляющих исследуемый ряд, от времени. В частности, формулы (1) и (2) позволяют анализировать для данной точки в океане как распределение мощности $|W(n,s)|^2$ колебаний АДТПО по периодам для данного момента времени, так и эволюцию этой величины по времени для данного периода. Термин «глобальный спектр» применяется к вейвлет-спектру, усредненному по интервалу $N\delta t$:

$$\overline{W^2}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W(n,s)|^2, \quad (3)$$

а $\overline{W^2}(s)/\sigma^2$ есть глобальный спектр, нормированный на σ^2 .

Спектр мощности, усредненный по масштабам (периодам) колебаний $\zeta(t)$ в диапазоне масштабов от s_0 до некоторой выбранной максимальной величины s_m , рассчитывался по формуле [6]:

$$\tilde{W}^2(n) = \frac{\delta s}{0.776} \sum_{s=s_0}^{s_m} \frac{|W(n,s)|^2}{s}, \quad (4)$$

где $\delta s = 0.5$ суток — шаг по оси s при расчете $\tilde{W}^2(n)$. Намерение ограничиться в настоящей работе исследованием синоптических колебаний АДТПО, не затрагивая климатические колебания, определило выбор $s_m = 500$ суток.

На рис. 2 приведены результаты вейвлет-анализа изменчивости АДТПО в точке 1 (56.85° с.ш., 53.85° з.д.), в среднем располагающейся в зоне срЮПТ (рис. 1, таблица). Как видно из рис. 2, в этой точке оказалась особенно ярко выраженной статистическая нестационарность колебаний АДТПО, проявившаяся в резком усилении этих колебаний на периодах от 200 до 400 суток в интервале времени от начала 2005 г. до конца 2007 г. (рис. 2а) на фоне слабых колебаний АДТПО как для всех остальных периодов

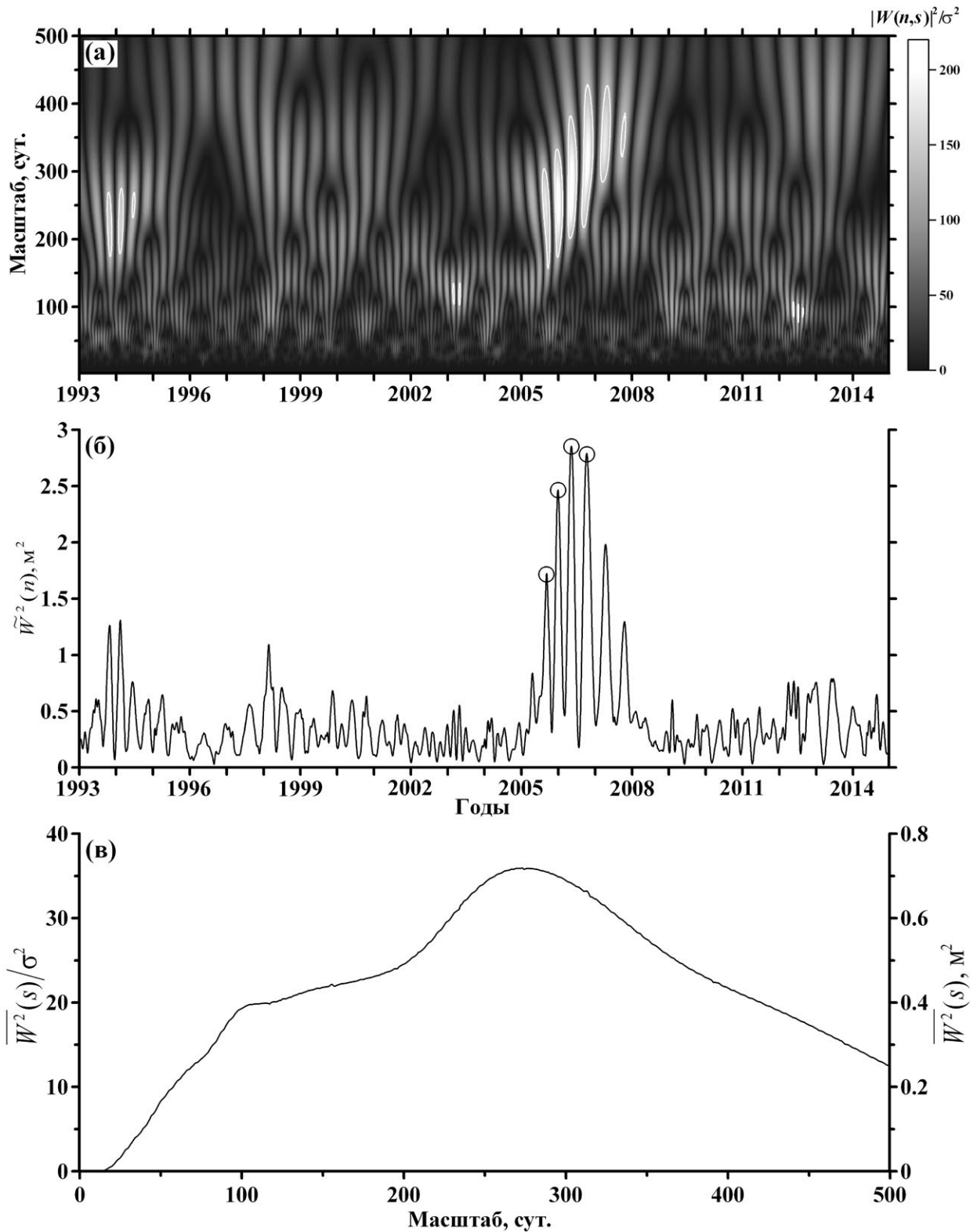


Рис. 2. Результаты вейвлет-анализа изменчивости АДТПО для точки 56.85° ю.ш., 53.85° з.д. (точка 1 на рис. 1, 3, 6 и 7). (а) — Спектр мощности $|W(n,s)|^2$ колебаний АДТПО (формула (1)), нормированный на дисперсию $\sigma^2 = 0.021 \text{ м}^2$ этих колебаний в указанной точке; (б) — мощность колебаний АДТПО, усредненная по масштабам (периодам) колебаний (формула (4)); (в) — глобальный спектр колебаний АДТПО (формула (3)) в нормированном (вертикальная ось слева) и ненормированном (ось справа) вариантах. Засечки на горизонтальных осях на рис. (а) и (б) соответствуют началу данного года. Белой изолинией на рис. 2а показан уровень безразмерной спектральной плотности, равный 130. Обведенные кружками максимумы мощности колебаний АДТПО на рис. 2б соответствуют датам карт на рис. 3.

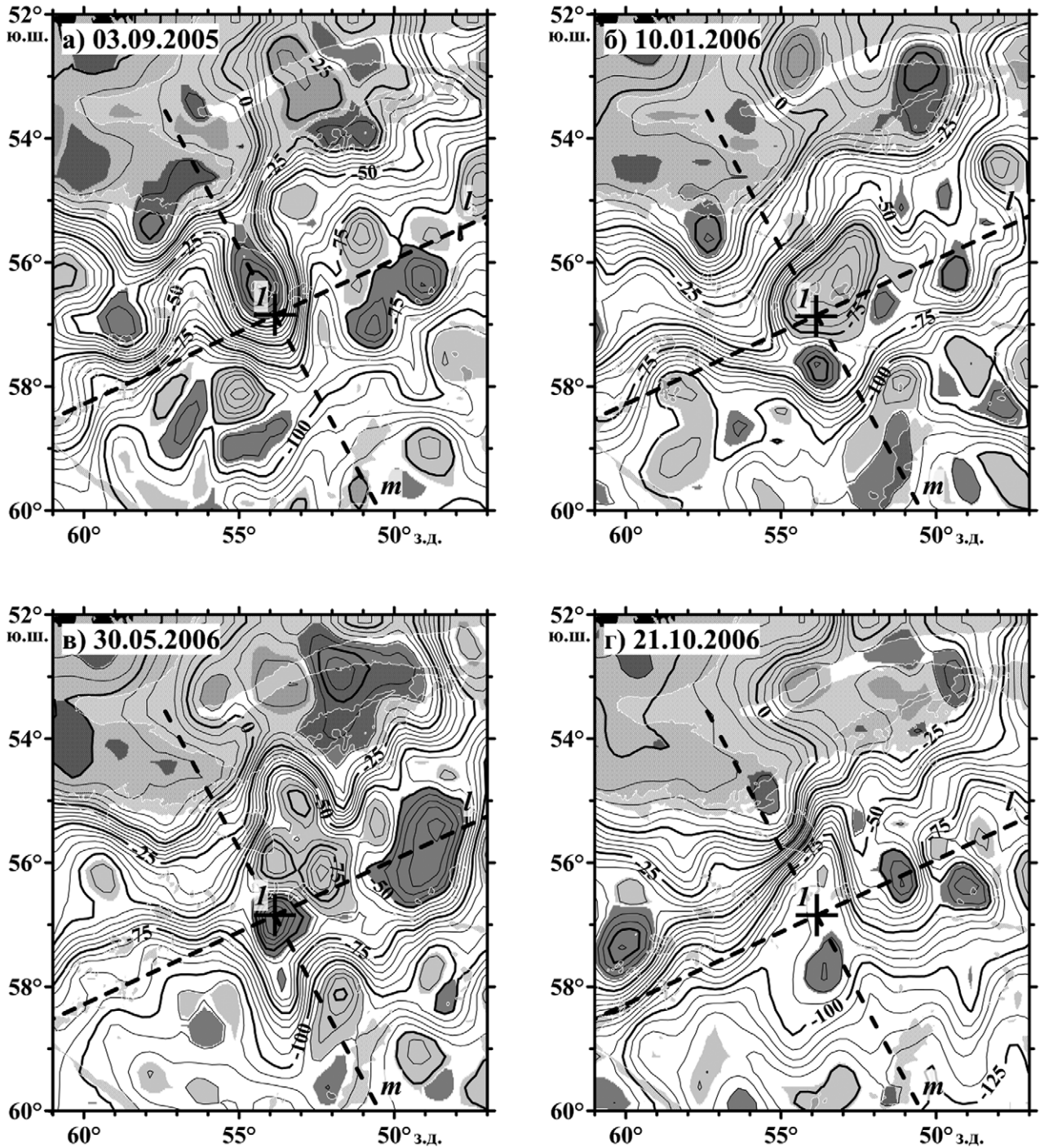


Рис. 3. АДТПО (см) в восточной части пролива Дрейка и западной части моря Скотия 03.09.2005 г. (а), 10.01.2006 г. (б), 30.05.2006 г. (в) и 21.10.2006 г. (г) (перечисленным датам соответствуют обедненные кружками максимумы мощности колебаний АДТПО на рис. 2б). Светлая тушевка показывает циклонические (вращение воды по часовой стрелке), темная — антициклонические вихри. Крест с цифрой 1 показывает положение точки, для которой даны результаты вейвлет-анализа колебаний АДТПО на рис. 2. Жирные штриховые прямые дают положения осей *l* (см. рис. 4) и *m* (см. рис. 5).

колебаний, так и для всех остальных моментов времени на периодах 200–400 суток.

С целью синоптической интерпретации интенсивных колебаний АДТПО в точке 1 в 2005–2007 гг.

(рис. 2) на рис. 3 представлены карты АДТПО для четырех дат, соответствующих максимумам мощности этих колебаний, помеченных кружками на рис. 2б. Карты на рис. 3 показывают, что рас-

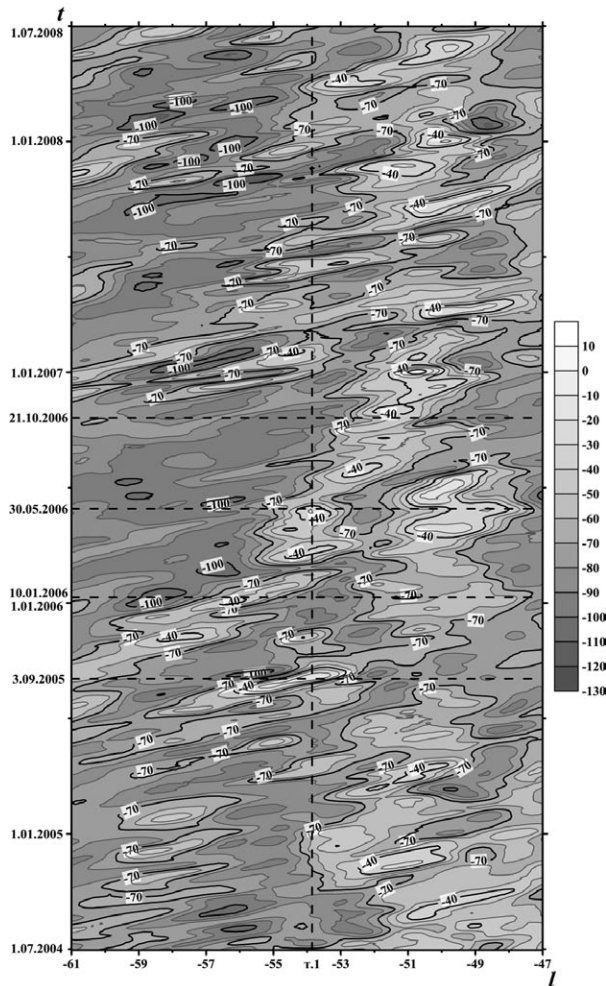


Рис. 4. Изоплеты АДТПО (в см) в зависимости от расстояния вдоль прямой I (см. рис. 3) и времени; на оси I отложена долгота. Штриховые прямые показывают даты карт на рис. 3 и положение точки I на оси I .

смаатриваемые колебания связаны с чередованием в районе точки I глубоких антициклонических и циклонических вихрей-меандров срСАТ, юСАТ, сЮПТ, срЮПТ и юЮАТ (см. рис. 1 и таблицу). Для лучшего понимания механизма изменчивости АДТПО в исследуемом районе на рис. 4 и 5 приведены изоплеты АДТПО в зависимости от расстояния вдоль двух взаимно перпендикулярных прямых, пересекающихся в точке I (рис. 3), и времени. Прямая I проведена параллельно среднему направлению юСАТ, сЮПТ, срЮПТ, юЮПТ и сЮАТ в исследуемом районе (рис. 1). Основной особенностью картины изоплет на рис. 4 является постоянный по I и по времени наклон изоплет к оси I , свидетельствующий об увлечении синоптических возмущений (меандров и вихрей) океанской циркуляции струями АЦТ на восток-северо-восток со средней скоростью 6 км/сутки — результат, согласующийся с общим выводом о преобладании восточного переноса синоптических вихрей в зоне АЦТ, полученным в [4] и [3] в итоге анализа спутниковых альтиметрических данных в глобальном масштабе.

На рис. 5 прежде всего обращают на себя внимание чередующиеся по времени «выбросы» антициклонической (локальные максимумы АДТПО) и циклонической (минимумы АДТПО) завихренности течения соответственно в юго-юго-восточном и северо-северо-западном направлениях вдоль оси m , что, очевидно, связано с процессом генерации меандров и вихрей струй АЦТ и их дальнейшим жизненным циклом. Очевидно, что более полное представление о харак-

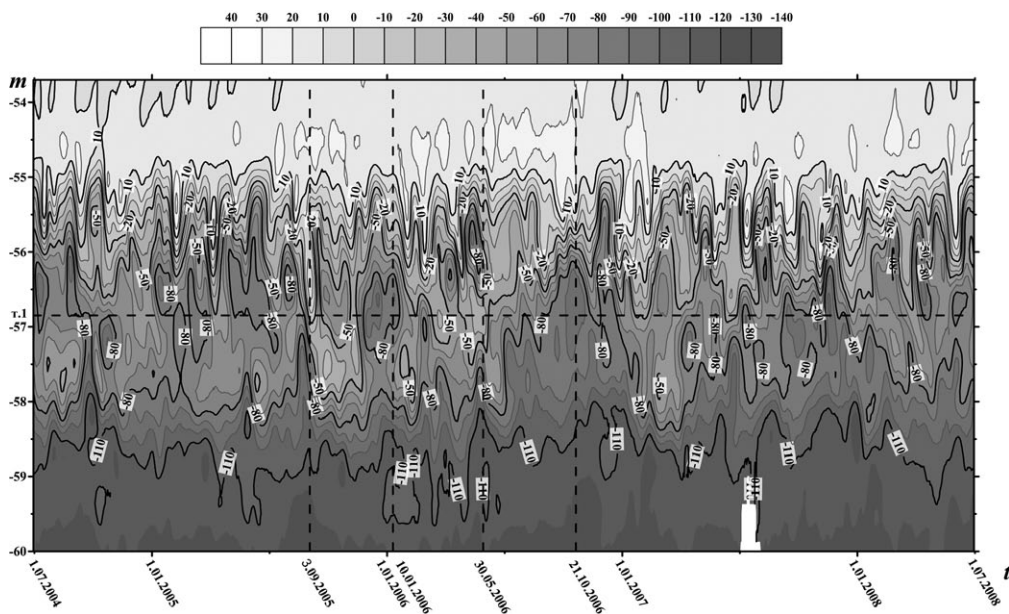


Рис. 5. Изоплеты АДТПО (в см) в зависимости от расстояния вдоль прямой m (см. рис. 3) и времени; на оси m отложена широта. Штриховые прямые показывают даты карт на рис. 3 и положение точки I на оси m .

тере эволюции поля синоптических возмущений течений могут предоставить только частые по времени синоптические карты течений, примеры которых даются ниже.

В качестве первого примера рассмотрим эволюцию антициклонического вихря-меандра августа–сентября 2005 г., сформированного струями срСАТ, юСАТ и сЮПТ (рис. 3а). На рис. 6 этот вихрь-меандр показан сразу после начала его формирования, в момент его наибольшего развития и непосредственно перед его обратным слиянием с материнской струей. Как следует из рис. 6, продолжительность существования этого образования составляла несколько более месяца. За это время средняя скорость перемещения вихря-меандра на восток-северо-восток составляла 5.3 км/сутки.

По аналогии с рис. 6, на рис. 7 показана эволюция циклонического вихря-меандра декабря 2005 г.–февраля 2006 г. (рис. 3б), сформиро-

ванного струями юЮПТ и срЮПТ. Продолжительность жизни этого образования составляла несколько более двух с половиной месяцев, а средняя скорость его перемещения на восток-северо-восток была равна 2.1 км/сутки.

Рассмотренные примеры показывают, что основными процессами, развивающимися на фоне восточного перемещения синоптических возмущений океанской циркуляции и определяющими характер временной изменчивости поля этих возмущений в рассматриваемом районе океана, являются процессы формирования синоптических меандров и вихрей струями АЦТ, интенсификации вихрей, их последующего ослабления и заключительного обратного слияния вихрей и меандров с материнскими струями, как это более детально описано в [1]. При этом продолжительность жизни вихря как индивидуального образования (35–40 суток и 75–80 суток в приведенных выше

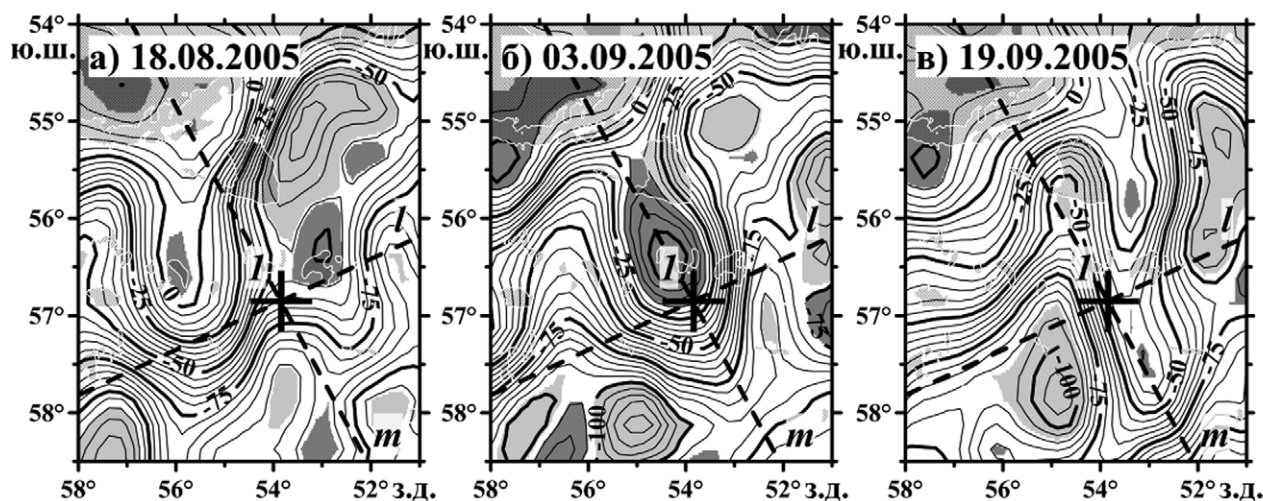


Рис. 6. АДТПО (в см) в западной части моря Скотия 18.08.2005 г. (а), 03.09.2005 г. (б) и 19.09.2005 г. (в). Остальное см. рис. 3.

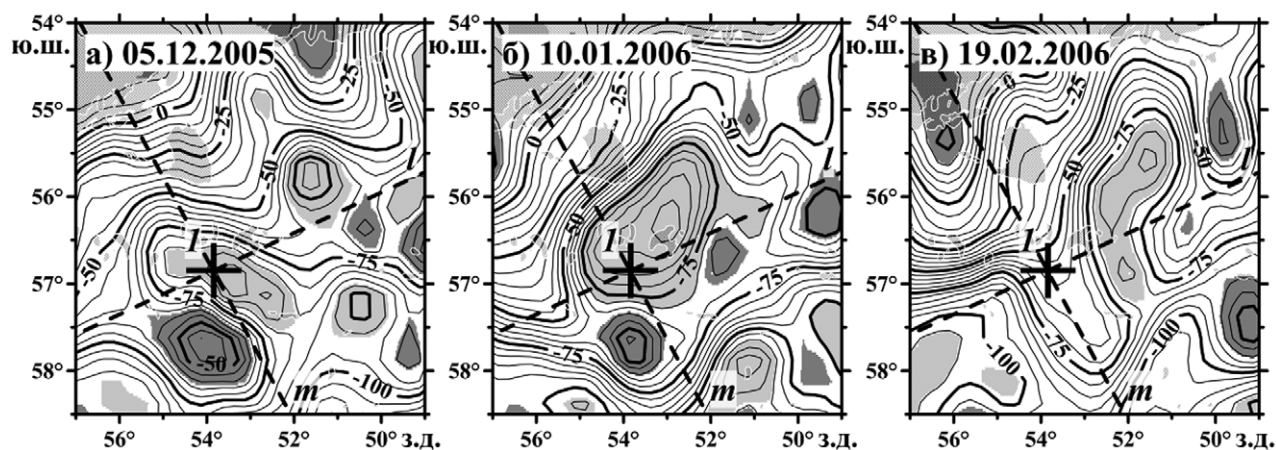


Рис. 7. АДТПО (в см) в западной части моря Скотия 05.12.2005 г. (а), 20.01.2006 г. (б) и 19.02.2006 г. (в). Остальное см. рис. 3.

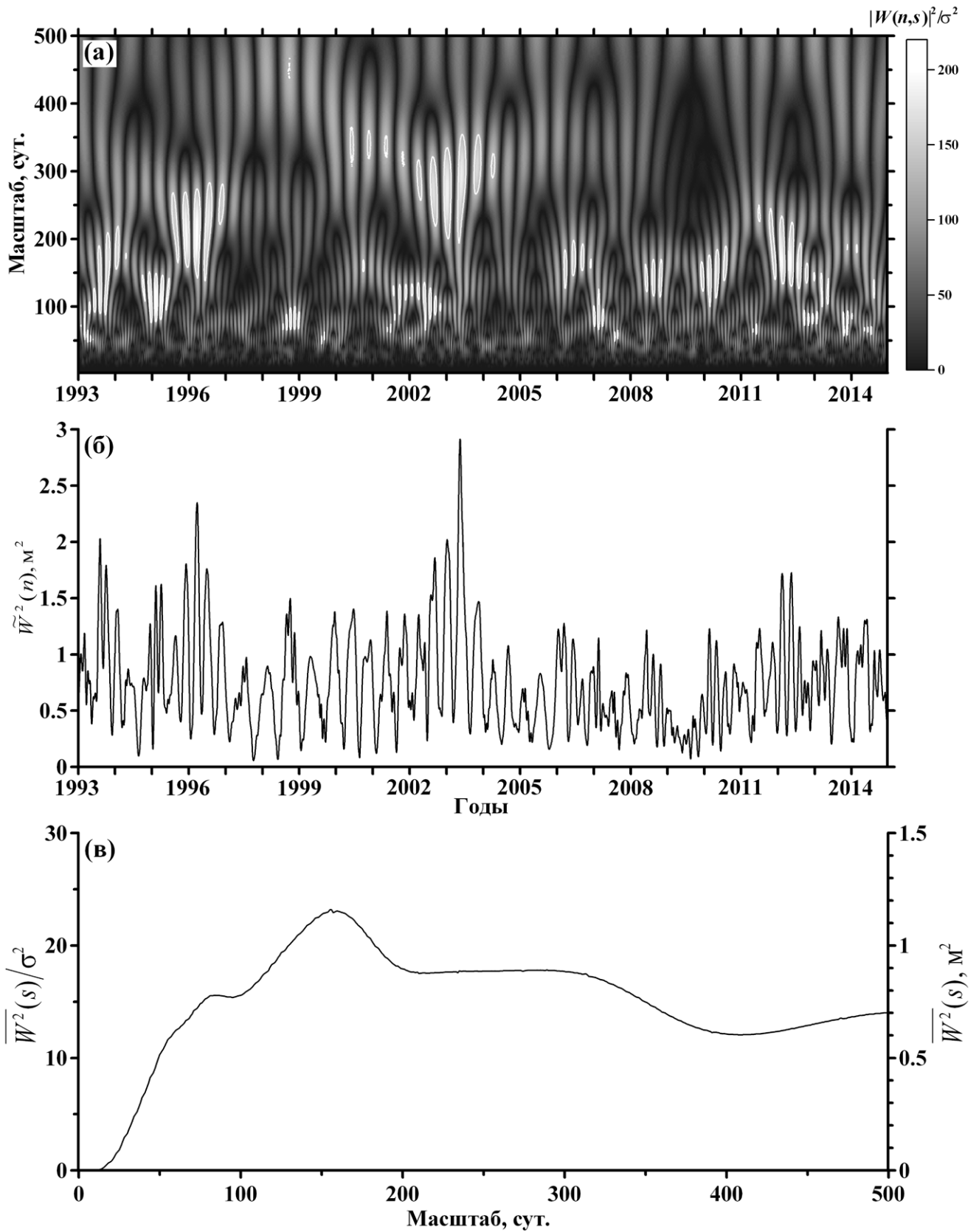


Рис. 8. То же, что на рис. 2, но для точки 2 (55.35° ю.ш., 53.85° з.д., см. рис. 1) с дисперсией колебаний АДПО $\sigma^2 = 0.047 \text{ м}^2$.

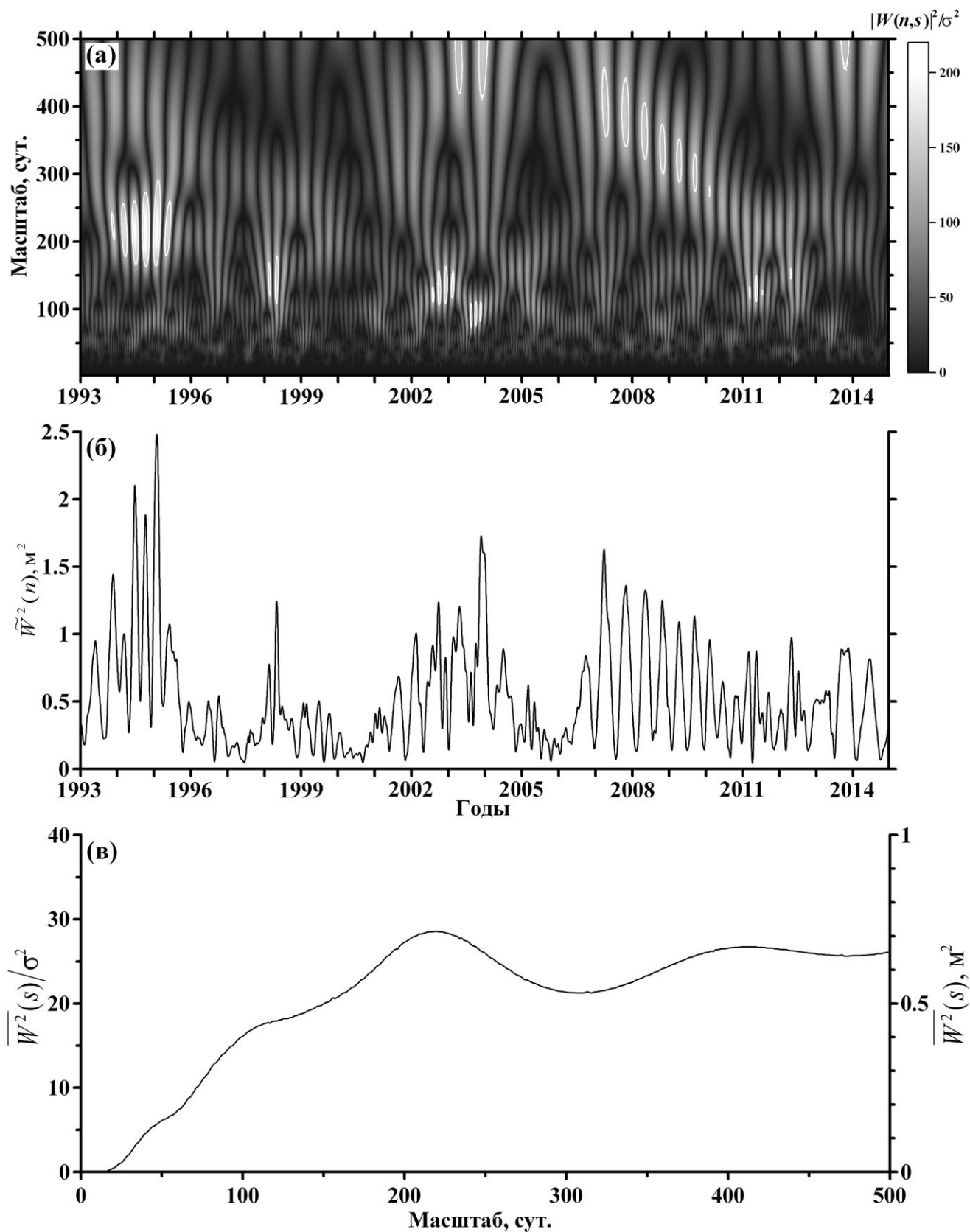


Рис. 9. То же, что на рис. 2, но для точки 3 (56.85° ю.ш., 51.15° з.д., см. рис. 1) с дисперсией колебаний АДТПО $\sigma^2 = 0.024 \text{ м}^2$.

примерах) оказывается в разы меньшей, чем полученный в результате вейвлет-анализа преобладающий полупериод колебаний АДТПО в рассматриваемый период времени в исследуемом районе океана (135 суток согласно рис. 2), — обстоятельство, согласующееся с результатами анализа эволюции многих других вихрей в этом районе и свидетельствующее не о гармоническом, а, скорее, об импульсном характере изменчивости АДТПО.

Сравнение результатов вейвлет-анализа колебаний АДТПО в точках 1, 2 и 3 (рис. 2, 8 и 9, положение точек дано на рис. 1) показывает весьма существенные различия в спектральной структуре и временной изменчивости этих колебаний, несмотря на относительно малые расстояния между рассматриваемыми точками (160, 150 и 220 км соответственно между точками 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3). Единственным заметным совпадением в спектральных картинах для этих точек является совпадение максимумов мощности колебаний АДТПО на периодах 180–280 суток в 1993–1994 гг. в точках 1 и 3 (рис. 2а и 9а), что, возможно, связано с их средним расположением в одной и той же струе АЦТ (рис. 1). Наиболее примечательная особенность спектров на рис. 1а, 8а и 9а, подтверждаемая результатами вейвлет-анализа колебаний АДТПО более чем в трех десятках других точек в пределах показанного на рис. 1 района океана, состоит в квазиодиночном характере резких максимумов мощности этих колебаний, разделяемых про-

должительными по времени интервалами слабых колебаний, — обстоятельство, требующее дальнейшего детального исследования.

Источник финансирования. Настоящая работа поддержана грантом РФФИ № 16-17-10149 в части разработки алгоритма выделения вихрей на альтиметрических картах АДТ и создания базы данных по вихрям и грантом РФФИ № 18-05-00283 в части анализа изменчивости синоптических возмущений океанских течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошляков М. Н., Савченко Д. С., Тараканов Р. Ю. Энергообмен между струями Антарктического циркумполярного течения и синоптическими вихрями в проливе Дрейка и море Скотия // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 3. С. 347–357.
2. Тараканов Р. Ю., Гриценко А. М. Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // *Океанология*. 2014. Т. 52. № 6. С. 725–736.
3. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progr. Oceanogr.* 2011. V. 91. P. 167–216.
4. Fu L.-L. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11017, doi: 10.1029/2009JC005349.
5. Sokolov S., Rintoul S. R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part 1: Mean circumpolar paths // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11018, doi: 10.1029/2008J005108.
6. Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998. V. 79. № 1. P. 1–78.

STRUCTURE AND VARIABILITY OF THE SYNOPTIC DISTURBANCES OF OCEAN CURRENTS IN THE DRAKE PASSAGE AND SCOTIA SEA

© 2019 M. N. Koshlyakov^{1*}, I. A. Repina², D. S. Savchenko¹, R. Yu. Tarakanov¹, V. K. Taroyan¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: mnkoshl@ocean.ru

Received September 28, 2017

After revision February 08, 2018

Twenty two years data of the satellite altimeter observations are used for the analysis of structure and variability of the ocean current synoptic disturbances in the Drake Passage and Scotia Sea. Wavelet analysis of the time series of ocean surface absolute dynamics topography (OSADT) at a set of points in the studied ocean area has revealed a high degree of the statistical nonstationarity of these series appearing as short (few years) intervals of intensive fluctuations of OSADT separated by long intervals of weak fluctuations. Analysis of the synoptic OSADT maps has showed that the intervals of the strong ocean current fluctuations at a point are conditioned by the alternation of processes of cyclonic and anticyclonic eddy-meanders formation by the jets of Antarctic Circumpolar Current, strengthening of the eddies, their following attenuation and final eddy confluence with the mother jets. Besides of the statistical nonstationarity, a considerable spatial variability of the statistical characteristics of the ocean current synoptical disturbances has been revealed for the scales of 150–200 km.

Keywords: Antarctic Circumpolar Current, Drake Passage, eddies, jets, wavelet-analysis, satellite altimetry