

УДК 551.465

## ЭНЕРГООБМЕН МЕЖДУ СТРУЯМИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ И СИНОПТИЧЕСКИМИ ВИХРЯМИ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА И МОРЕ СКОТИЯ

© 2018 г. М. Н. Кошляков, Д. С. Савченко, Р. Ю. Тараканов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: mnkoshl@ocean.ru*

Поступила в редакцию 02.10.2016 г.

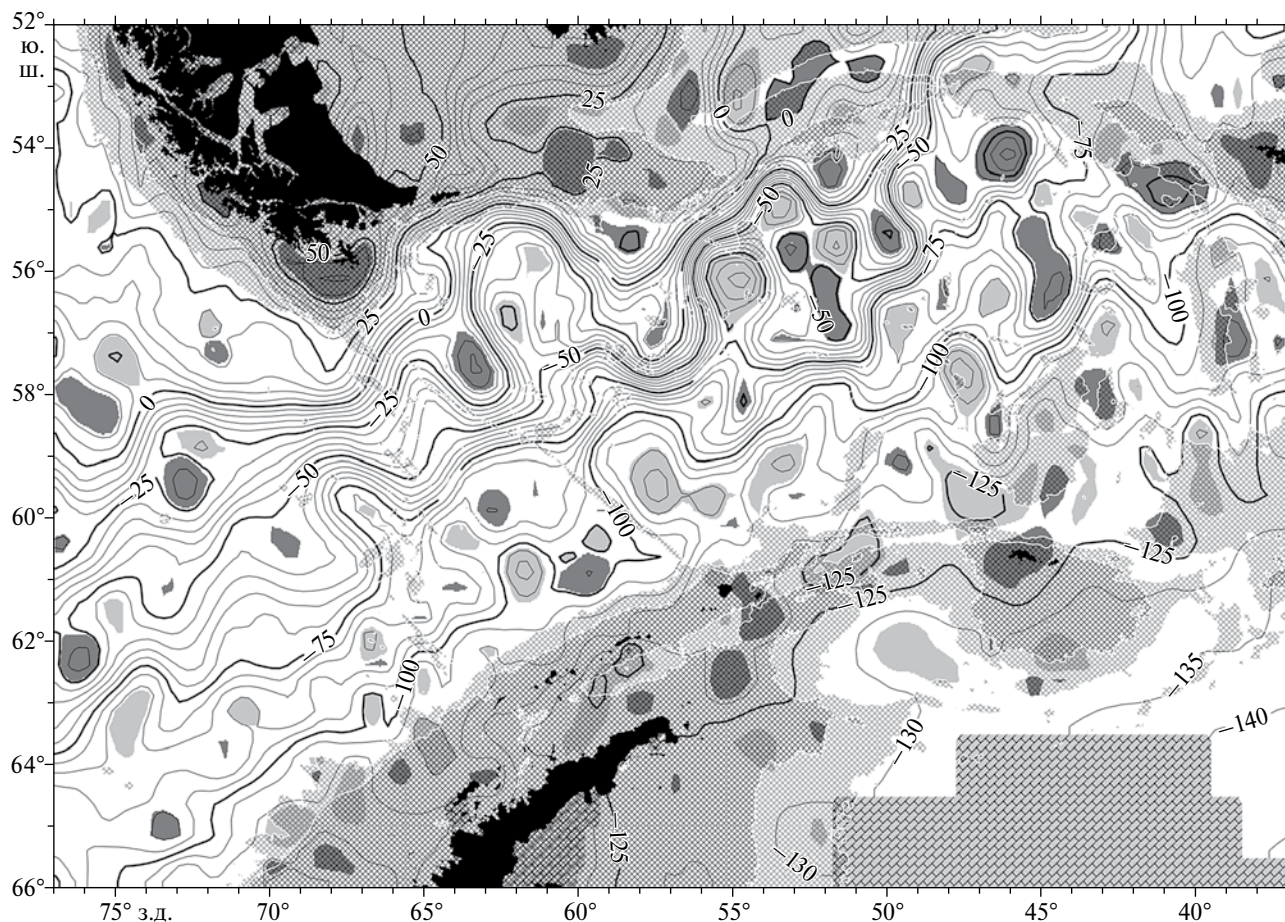
Энергообмен между струями Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и порождаемыми ими синоптическими вихрями в приповерхностном слое пролива Дрейка и моря Скотия изучается на базе 22-летнего массива спутниковых альтиметрических данных французского агентства CLS (DT Global–MADT–Upd product, <http://www.avis0.altimetry.fr>), основанного на результатах наблюдений. Исследование проводится в предположении, что каждая из этих струй заключена между фиксированными изолиниями абсолютной динамической топографии поверхности океана. Рассчитывается и анализируется эволюция за 22 года кинетической энергии каждой из струй АЦТ и генерируемых ею циклонических и антициклонических вихрей. Показана принципиальная зависимость колебаний энергии струй от фаз их меандрирования, а также процессов формирования вихрей и их обратного поглощения струями. Рассчитываются средние и экстремальные энергетические характеристики струй и вихрей, приводится сравнение струй между собой в отношении интенсивности генерации вихрей.

DOI: 10.7868/S0030157418030012

Целью настоящей работы является исследование обмена кинетической энергией между струями Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и океанскими синоптическими вихрями в приповерхностном слое пролива Дрейка и моря Скотия (рис. 1, 2). В основу исследования положены ежесуточные цифровые карты абсолютной динамической топографии (АДТ) поверхности океана за 1993–2014 гг., построенные во французском агентстве CLS по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и находящиеся в открытом доступе в Интернете (DT Global–MADT–Upd product, <http://www.avis0.altimetry.fr>). Под АДТ поверхности океана подразумевается обусловленное океанской циркуляцией отклонение этой поверхности от равновесной формы геоида. Изолинии АДТ (изогипсы) являются линиями тока геострофического течения, причем в Южном полушарии течение направлено так, что более высокие значения АДТ остаются слева от течения. Для выделения вихрей на картах АДТ авторами настоящей работы сначала были определены узлы исходной горизонтальной сетки AVISO ( $1/4^\circ$  ш.  $\times$   $1/4^\circ$  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 ( $\varphi$  – 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 направление вращения воды) вихри. Пример построенной таким образом карты АДТ поверхности океана представлен на рис. 1; на рис. 2 показана карта АДТ, усредненная за 1993–2014 гг.

Вихри, выделяемые на картах, построенных по данным спутниковой альтиметрии, традиционно интерпретируются как вихри синоптического масштаба (напр., [2, 4]). Однако в реальности среди этих вихрей встречаются более мелкие мезомасштабные вихри с радиусом порядка шага исходной сетки AVISO ( $1/4^\circ$ ). Анализ, проведенный нами на основе описанных выше данных, показал, что такие вихри, несмотря на их относительную многочисленность, вносят пренебрежимо малый вклад в баланс кинетической энергии вихрей исследуемого района. При этом следует обратить внимание на то, что кинетическая энергия струйных течений и синоптических вихрей не заключена лишь

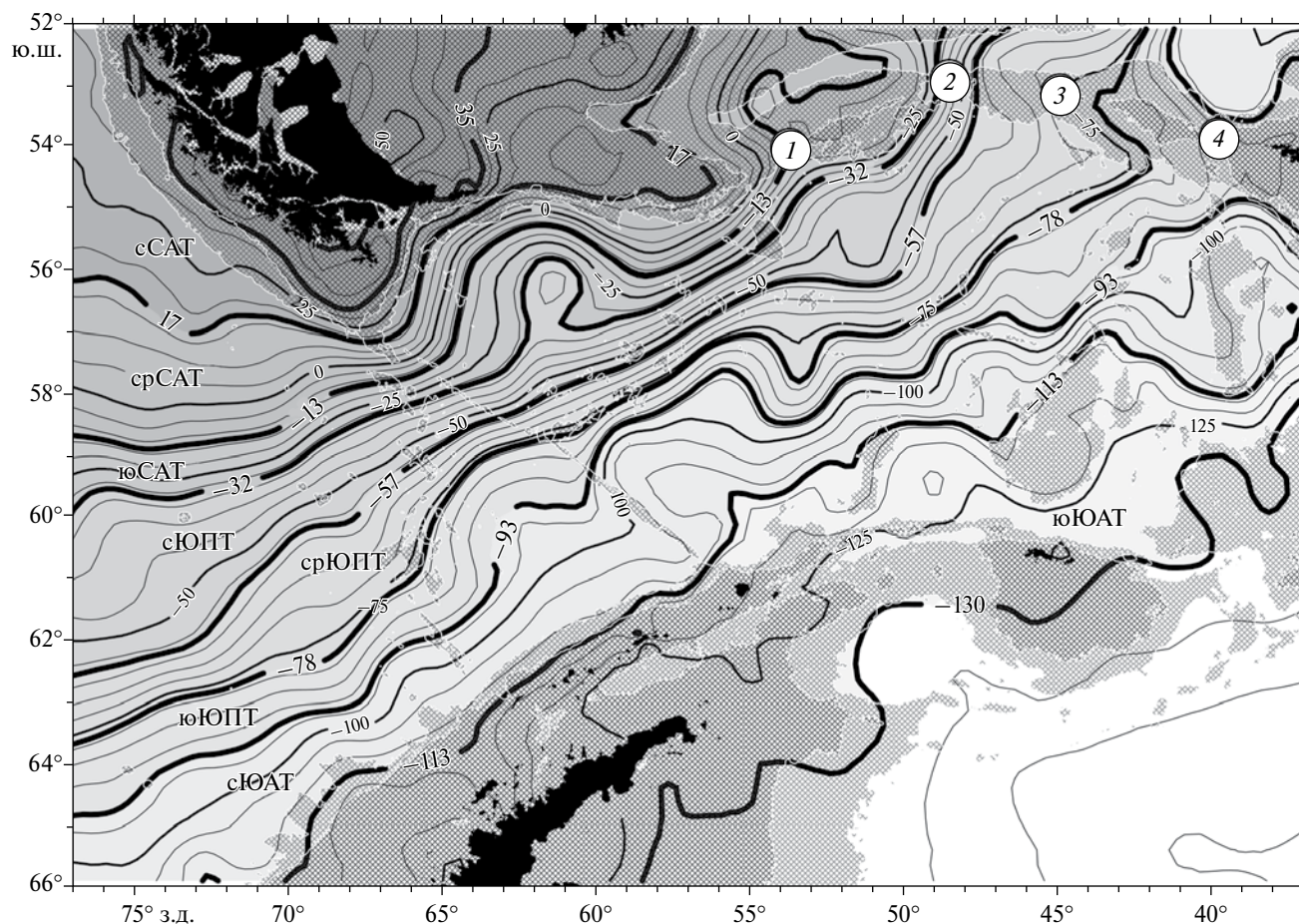


**Рис. 1.** Абсолютная динамическая топография (АДТ, см) поверхности океана в проливе Дрейка и море Скотия 9.05.2013 г. Локальные максимумы АДТ и более темная тушевка соответствуют антициклоническим (вращение воды против часовой стрелки в Южном полушарии), а минимумы АДТ и светлая тушевка – циклоническим вихрям. Темная и светлая клетки соответственно показывают участки дна с глубиной менее 1000 м и от 1000 до 3000 м. Косая штриховка показывает районы океана с отсутствием данных альтиметрических измерений из-за морского льда.

в тонком верхнем слое океана, поскольку эти динамические структуры захватывают его значительную толщину, в пределах которой они обладают некоторыми особенностями. В частности, известны случаи, когда абсолютный максимум кинетической энергии синоптических вихрей, например, в эксперименте ПОЛИМОДЕ, был обнаружен на глубине 300 м [1]. Хотя использованные в работе неконтактные спутниковые измерения пока еще не способны “проникать” в глубину океана, они позволяют иметь беспрецедентный, фактически синхронный охват громадной исследуемой акватории в горизонтальной плоскости. Поэтому, в связи с отсутствием других конкурентных измерительных методов, мы получаем возможность проводить анализ динамической ситуации в океане на основе спутниковой информации, которая единственная в настоящее время способна дать наиболее адекватное представление о некоторых

гидрофизических характеристиках его поверхностного слоя.

Наблюдения показывают, что АЦТ имеет многоструйный характер [3, 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 АДТ поверхности океана. Выполненный авторами настоящей работы анализ карт АДТ за 2012–2014 гг. в проливе Дрейка и море Скотия позволил скорректировать эти диапазоны в приложении к упомянутому району океана, в результате чего были определены значения АДТ в стрежнях и на границах струй АЦТ в этом районе (рис. 2, таблица). В отличие от рис. 2, на котором представлена климатическая карта АДТ, что подразумевает усреднение меандров струй и, таким образом, “размазанность” картины АДТ



**Рис. 2.** Средняя за 1993–2014 гг. АДТ поверхности океана (в см) в проливе Дрейка и море Скотия. Выделены изогипсы, являющиеся границами между струями АЦТ; расшифровка названий струй дана в примечании к таблице. Цифры в кружках показывают проходы в хребте Норт-Скотия: 1 – проход 54° 54'; 2 – проход Шег Рокс; 3 – Безымянный проход; 4 – проход Блэк Рок. Остальное как на рис. 1.

в горизонтальной плоскости, струи АЦТ хорошо просматриваются на синоптических картах АДТ, включая карту на рис. 1.

В согласии с [5], анализ синоптических карт АДТ поверхности океана показал устойчивую приуроченность струй АЦТ к определенным глубоководным проходам в хребте Норт Скотия (рис. 2): струи срСАТ – к проходу 54/54, юСАТ и сЮПТ – к проходу Шег Рокс, срЮПТ – к Безымянному проходу, юЮПТ – к проходу Блэк Рок, сЮАТ и юЮАТ – к проходу Георгия к востоку от восточной границы карт на рис. 1 и 2. Указанное обстоятельство ощутимо помогает интерпретации струй АЦТ в море Скотия и проливе Дрейка. На некоторых участках АЦТ в отдельные интервалы времени несколько струй могут сливаться в единую “суперструю”, как это произошло, например, со срСАТ, юСАТ и сЮПТ в мае 2013 г. в районе 55.5° ю.ш., 56° з.д. (рис. 1).

Все струи АЦТ динамически неустойчивы, что проявляется в их меандрировании, возникновении внутри меандров циклонических и антициклонических вихрей, усилении вихрей до достижения ими максимумов содержащейся в них энергии и последующим ослаблением вихрей с их обратной трансформацией в меандры и, таким образом, их слиянием с породившими их струями. На рис. 1 хорошо видны вихри обоих знаков на разных стадиях их существования. Рисунки 3 и 4 дают примеры эволюции циклона и антициклона. Сравнение значений АДТ на рис. 3б и 4б с таблицей и рис. 2 показывает, что циклон на рис. 3 был сформирован струей сЮПТ и частично струей юСАТ, а антициклон на рис. 4 – струей юСАТ и частично струями срСАТ и сЮПТ. Внимательное рассмотрение рисунков 3 и 4 показывает, что процессы усиления и ослабления вихря связаны с перезамыканием изогипс в основании меандра. Так, в период между 22 сентября и 20 октября 2013 г. произошло

Значения АДТ (см) в стрежнях и на границах между струями АЦТ

Струя АЦТ	Стрежень струи	Границы струй
		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.

замыкание изогипс  $-40$ ,  $-35$  и  $-30$  см в циклоническом вихре, а в период между 20 октября и 5 ноября 2013 г. – размыкание этих изогипс и изогипс  $-45$  и  $-50$  см. В антициклоне (рис. 4) в период между 29 июля и 10 августа 2012 г. замкнулись изогипсы от  $-15$  до  $-40$  см, а в период между 10 и 22 августа 2012 г. разомкнулись те же изогипсы кроме  $-15$  см. В результате подобной перестройки течения центральная часть вихря в течение всей его эволюции оказывается заполненной водой из одного и того же источника, в то время как состав воды в периферийной части вихря постоянно меняется.

Описанное выше взаимодействие струй АЦТ и вихрей нуждается в количественной оценке. С этой целью, для каждых суток периода с 1993 по 2014 гг. и для каждой точки описанного выше проинтерполированного в горизонтальной плоскости массива значений АДТ в пределах показанной на рис. 1 и 2 части океана, были рассчитаны зональная  $u$  и меридиональная  $v$  компоненты скорости геострофического течения на поверхности океана:

$$u = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad v = \frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – значение АДТ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – параметр Кориолиса ( $f < 0$  в Южном полушарии); ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  – на север, ось  $z$  – вертикально вверх. Далее выполнялся расчет кинетической энергии каждой из шести струй от срСАТ до сЮАТ (таблица и рис. 2)

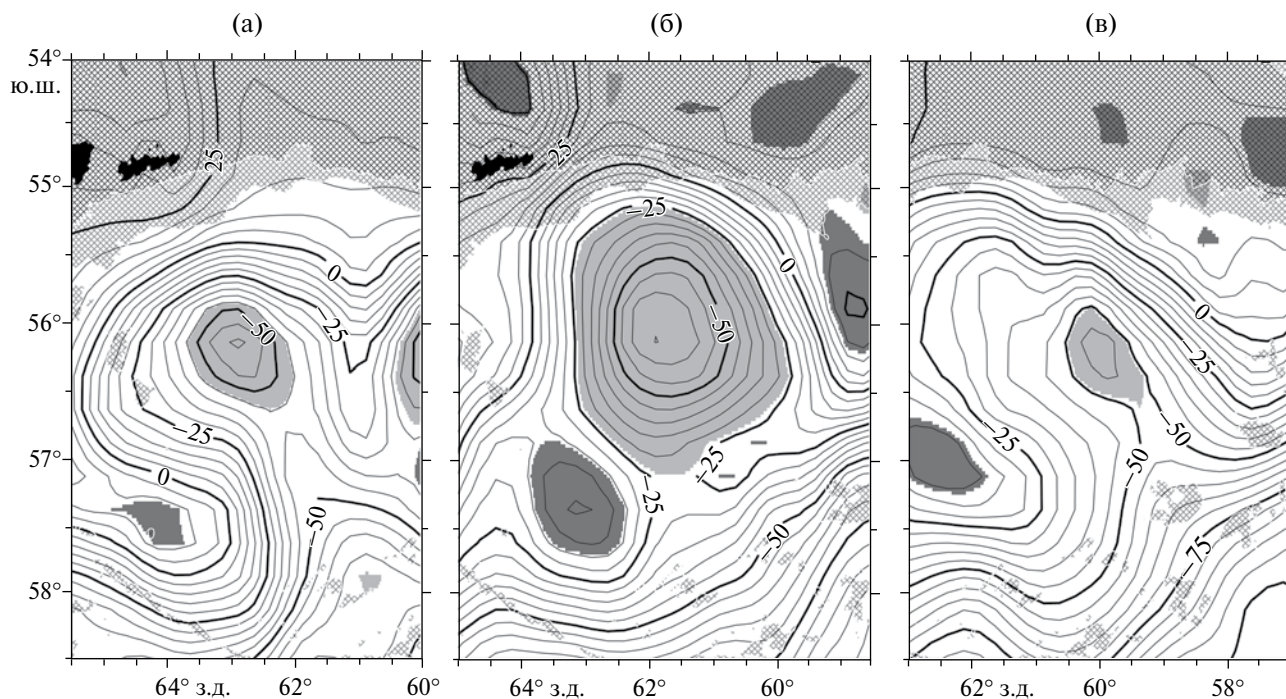
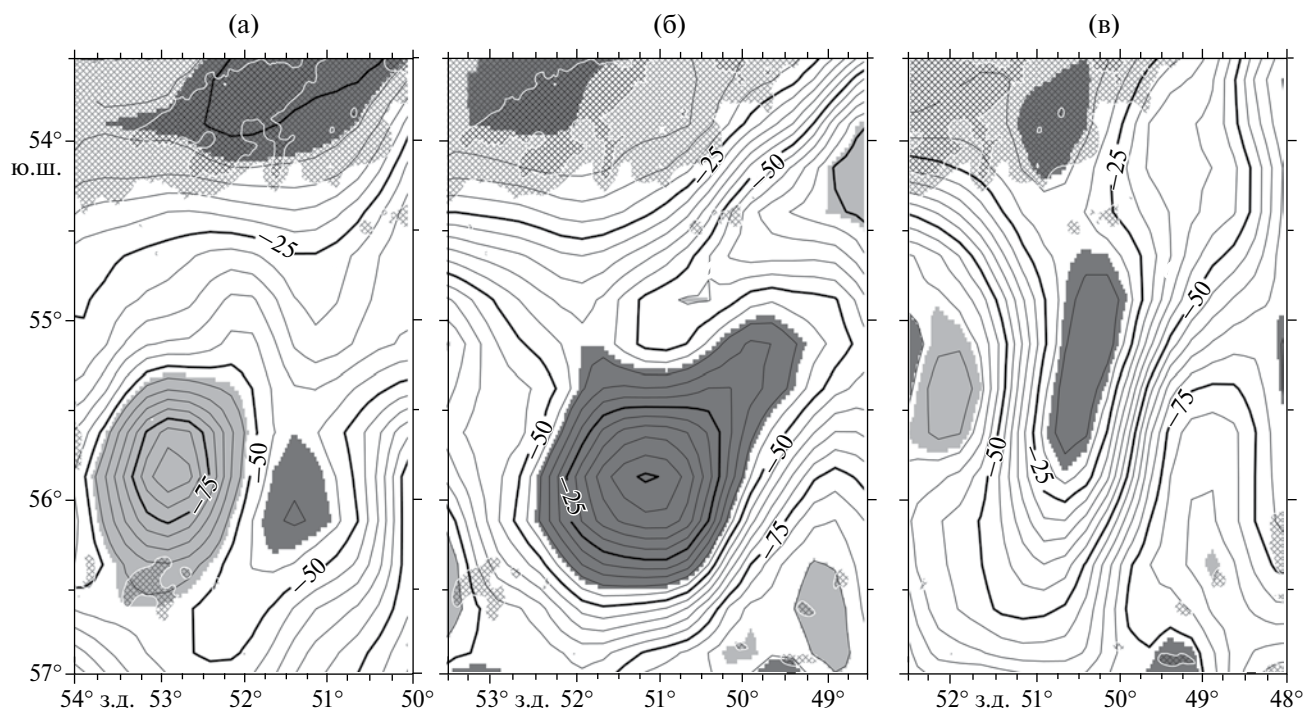


Рис. 3. АДТ (в см) поверхности океана в северо-восточной части пролива Дрейка 22.09.2013 г. (а), 20.10.2013 г. (б) и 5.11.2013 г. (в). Остальное как на рис. 1.



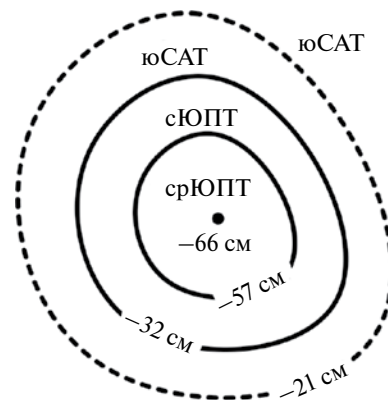
**Рис. 4.** АДТ (в см) поверхности океана в северо-западной части моря Скотия 29.07.2012 г. (а), 10.08.2012 г. (б) и 22.08.2012 г. (в). Остальное как на рис. 1.

и каждого вихря в приповерхностном слое океана толщиной  $h_e$  в 1 метр:

$$E(t) = \frac{\rho_0 h_e}{2} \int_{S(t)} (u^2(t) + v^2(t)) dS, \quad (2)$$

где  $t$  – время,  $E$  – кинетическая энергия,  $S$  – площадь интегрирования,  $\rho_0 = 1035 \text{ кг/м}^3$  – средняя плотность океанской воды. При расчете энергии струи интегрирование велось по всей площади струи в пределах рассматриваемого района океана (рис. 1, 2) за вычетом участков, занятых вихрями. Расчет энергии вихрей велся отдельно для циклонов и антициклонов. При этом интегрирование выполнялось отдельно для кольцевых участков области данного вихря (см. схему на рис. 5), заполненных водой из различных струй АЦТ (от срСАТ до сЮАТ) в соответствии со значениями АДТ на границах между струями, приведенными на рис. 2 и в таблице. Затем результаты интегрирования для данных суток, относящиеся к воде из одной и той же струи АЦТ, суммировались по всем циклонам и отдельно по всем антициклонам в пределах исследуемого района. В заключение этого этапа анализа, для каждой из шести струй и каждого из двадцати двух лет строились четыре кривые эволюции  $E(t)$  (примеры на рис. 6, 7 и 8): кривая эволюции энергии собственно струи; суммарная по всем циклонам кривая эволюции энергии частей

этой струи, вовлеченных в циклонические вихри; аналогичная кривая для антициклонов; суммарная кривая для циклонов и антициклонов. На кривой 2 на рис. 6 хорошо виден локальный максимум энергии, соответствующий циклону октября 2013 г. (рис. 3), и на кривой 3 рис. 7 – максимум энергии, соответствующий антициклону августа 2012 г. (рис. 4). Замечательно, что эти максимумы энергии совпадают по времени с локальными минимумами

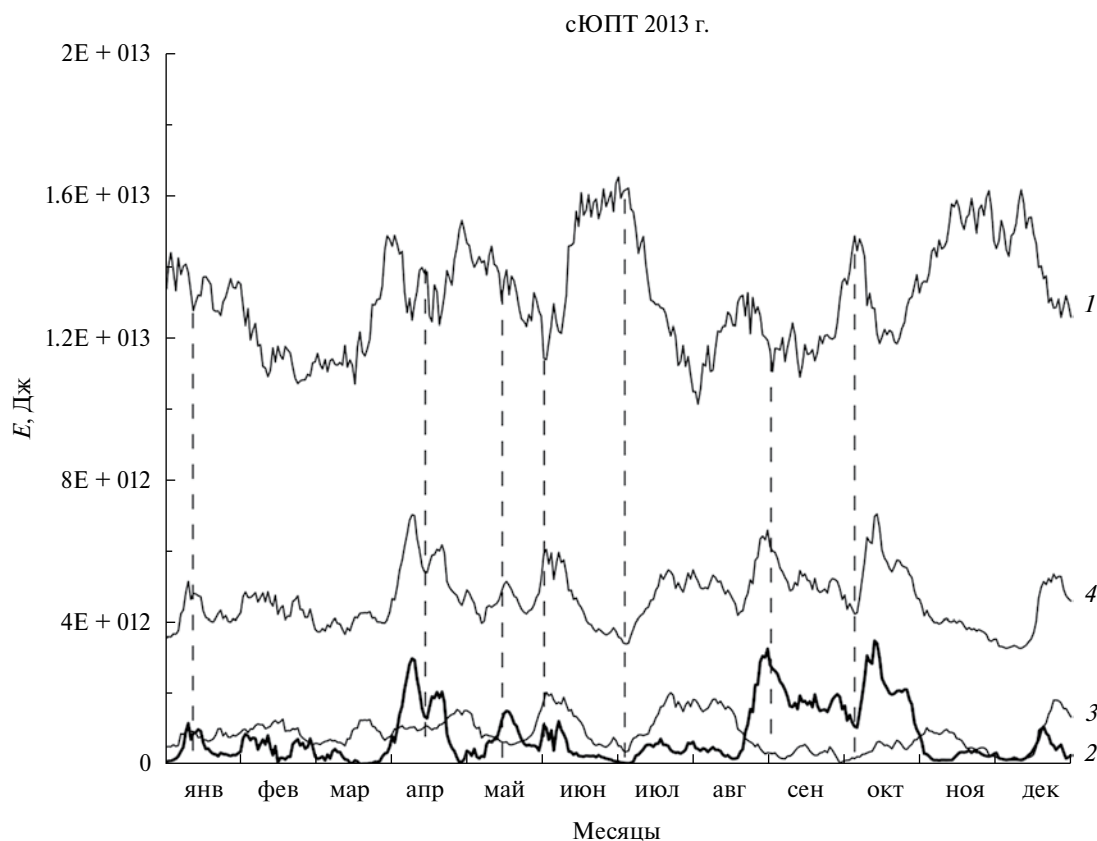


**Рис. 5.** Схема заполненных водой из разных струй АЦТ кольцевых участков циклонического вихря с  $\zeta = -66 \text{ см}$  в центре вихря и  $\zeta = -21 \text{ см}$  на внешней замкнутой изолипе, показанной штриховой линией.

энергии собственно струй сЮПТ (рис. 6) и юСАТ (рис. 7). Всего на рис. 6 отмечается 7 аналогичных совпадений, на рис. 7—9 совпадений и на рис. 8 — 2 совпадения, что вполне согласуется с идеей о том, что формирование и обратное поглощение вихрей струями АЦТ играет весьма заметную роль в колебаниях их энергии. Заметим, наконец, что причиной исключения струй сСАТ и юЮАТ из описанного выше анализа энергообмена между струями АЦТ и вихрями является непосредственное прилегание этих струй к Южной Америке и Антарктиде (рис. 2), что затрудняет развитие процессов меандрирования и вихреобразования в этих струях.

Рассмотрение графиков эволюции энергии струй АЦТ для различных струй и различных лет, подобных показанным на рис. 6, 7 и 8, приводит к заключению, что наиболее сильные скачки энергии струй непосредственно не связаны с энергией вихрей. Пример такой ситуации демонстрирует рис. 8, показывающий скачок энергии юСАТ в приповерхностном слое океана с  $0.70 \cdot 10^{13}$  Дж в середине марта до  $1.25 \cdot 10^{13}$  Дж 10 апреля 2013 г. и последующее за этим падение энергии юСАТ до  $0.80 \cdot 10^{13}$  Дж к концу апреля 2013 г.

Анализ рисунков 9, 10 и 1 приводит к заключению, что описанная резкая изменчивость энергии юСАТ была обусловлена меандрированием этой струи (см. значение АДТ в стрежне юСАТ в таблице) с минимальным развитием меандров в середине марта, максимальным в середине апреля и умеренным в конце апреля — начале мая 2013 г. Чтобы понять природу этого явления, представим себе, что в результате меандрирования длина какой-то из струй АЦТ на некотором ее участке увеличилась в два раза. Ввиду того, что эта струя ограничена изогидами с фиксированными значениями АДТ и поэтому ее расход в приповерхностном слое океана остается постоянным как вдоль струи, так и во времени, увеличение длины струи в два раза влечет за собой, вследствие необходимости удовлетворения условию неразрывности движения, уменьшение ширины струи на упомянутом выше участке также в два раза, а, значит, увеличение ее скорости в два раза и кинетической энергии в четыре раза. Рисунки 9, 10 и 1 показывают, что изменения формы и параметров юСАТ в марте—мае 2013 г. имели как раз такой характер, как описано выше.



**Рис. 6.** Эволюция кинетической энергии северной струи Южного полярного течения (кривая 1) и ее частей, вовлеченных в циклонические (кривая 2) и антициклонические (кривая 3) вихри в приповерхностном слое пролива Дрейка и моря Скотия в 2013 г. Кривая 4, представляющая собой сумму кривых 2 и 3, для наглядности сдвинута вверх вдоль оси  $E$  на величину  $(3 \cdot 10^{12})$  Дж. Вертикальные прямые отмечают даты совпадений по времени локальных максимумов (минимумов) кривой 4 и минимумов (максимумов) кривой 1.

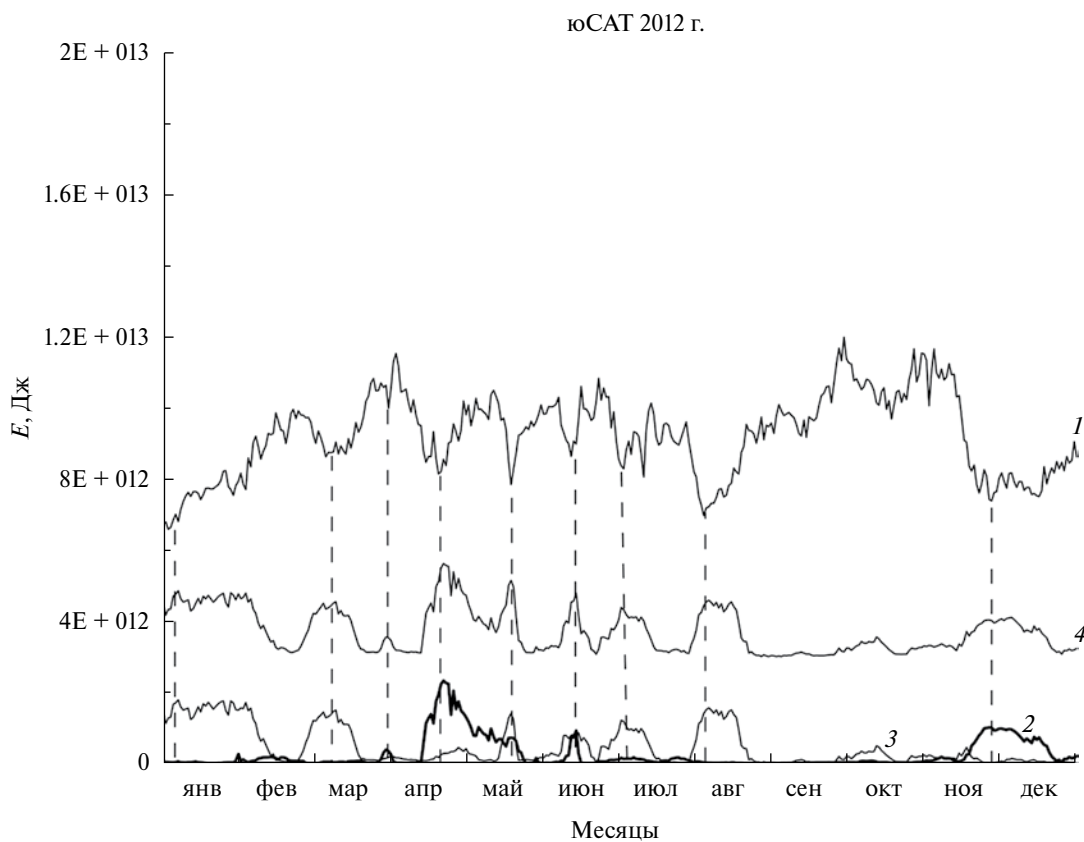


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для южной струи Субантарктического течения и 2012 года.

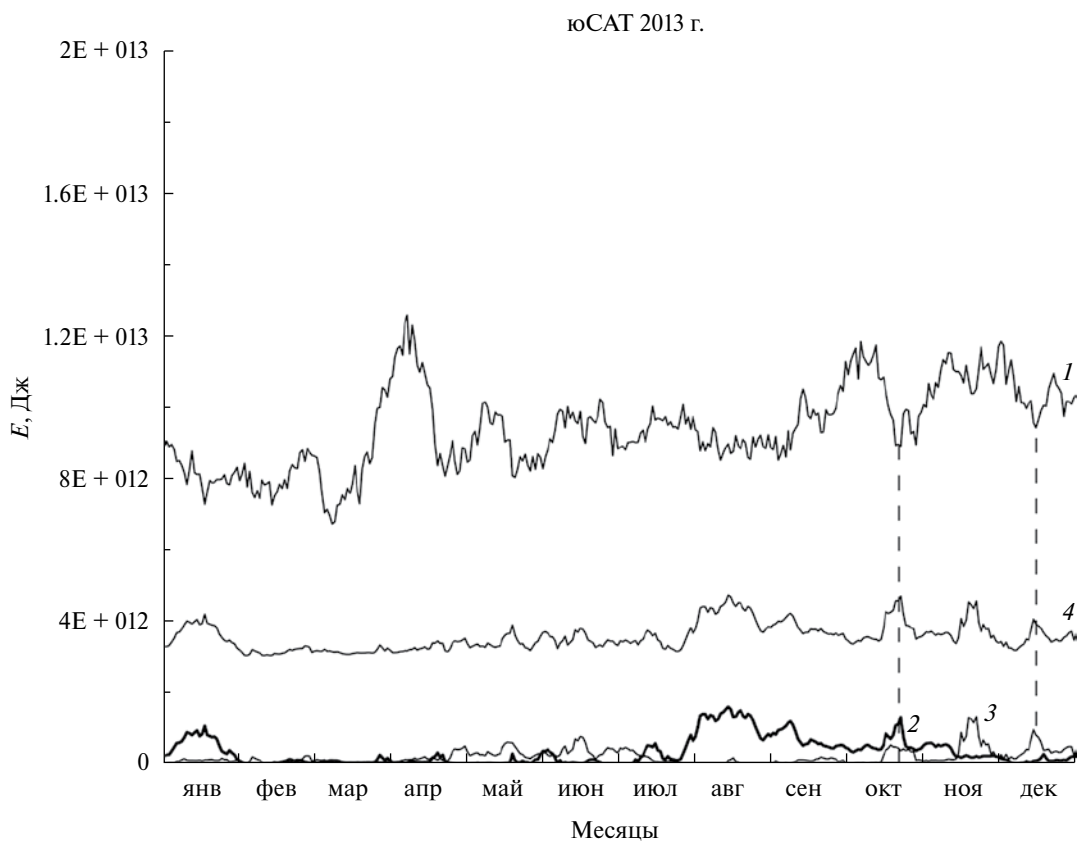


Рис. 8. То же, что на рис. 6, но для южной струи Субантарктического течения и 2013 г.

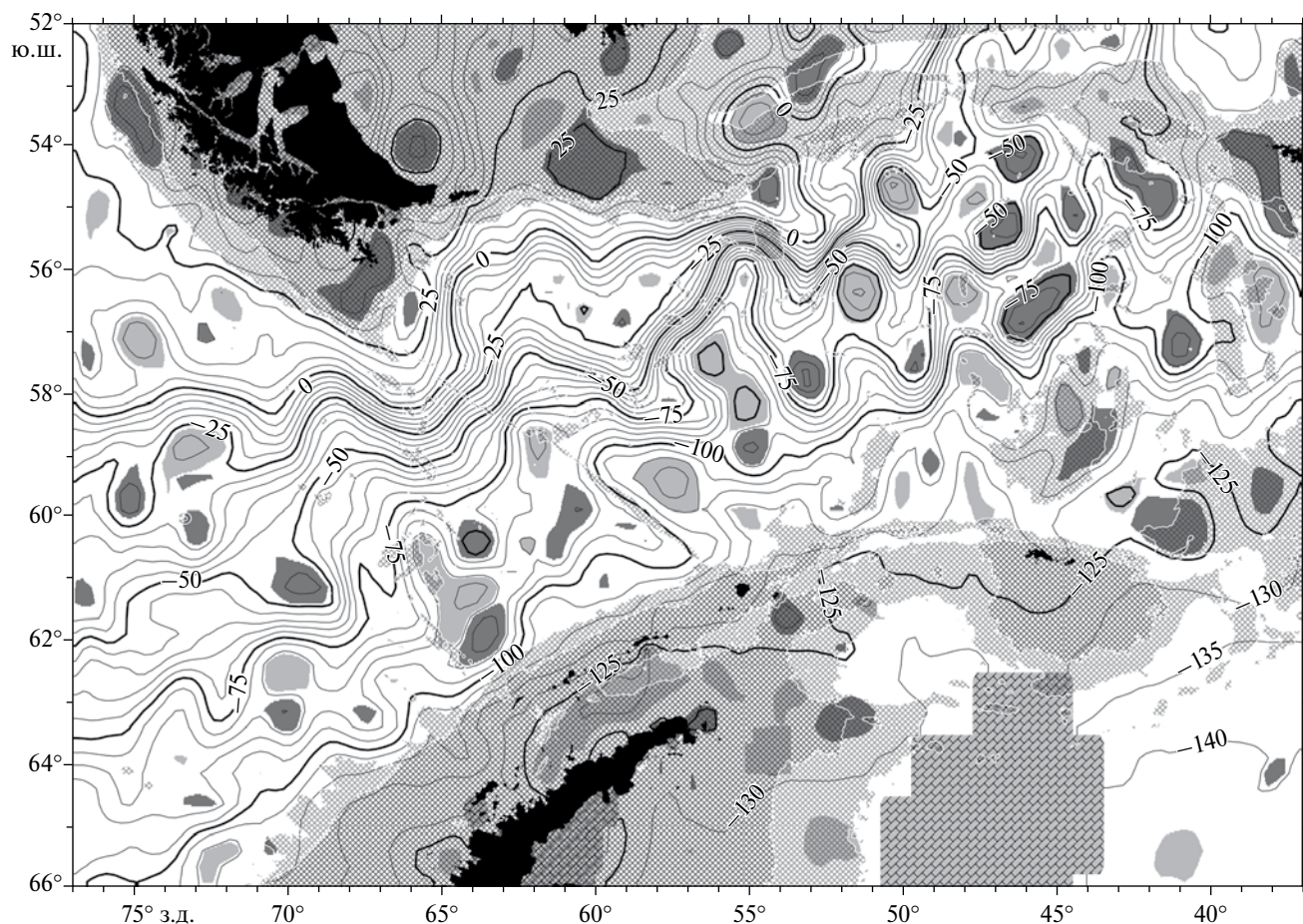


Рис. 9. То же, что на рис. 1, но для 14.03.2013 г.

Рисунки 11, 12 и 13, на которых представлены результаты расчетов ряда интегральных энергетических характеристик струй АЦТ и синоптических вихрей в приповерхностном слое пролива Дрейка и моря Скотия, требуют комментариев, которые следуют ниже.

1. В согласии с [5] и [3], наиболее сильными струями являются сЮПТ и срСАТ, наименее сильными – юЮПТ и сЮАТ (рис. 11).

2. Максимальные среднесуточные значения кинетической энергии струй превосходят их минимальные значения приблизительно в два раза (рис. 11), что, по-видимому, является результатом интенсивного меандрирования струй.

3. Для всех струй, кроме срСАТ, характерно равенство по порядку величины суммы средних энергий порождаемых струями циклонов и антициклонов и среднего квадратического отклонения энергии струи (рис. 12) – обстоятельство, еще раз свидетельствующее о важной роли процессов формирования вихрей и их обратного слияния со струями в изменчивости энергии струй.

4. сЮПТ и срЮПТ лидируют в отношении интенсивности вихреобразования (рис. 12).

5. Интенсивности генерации струями юСАТ, сЮПТ и срЮПТ циклонов и антициклонов по отдельности примерно равны (рис. 12 и 13). Струя срСАТ генерирует преимущественно антициклоны, а юЮПТ и сЮАТ – преимущественно циклоны, что объясняется относительной близостью срСАТ к материковому склону Южной Америки, а юЮПТ и сЮАТ – к материковому склону Антарктиды.

6. В соответствии с теорией статистических оценок, погрешности в расчете средних значений энергии струй и вихрей (рис. 11 и 12) вычислялись по формуле  $\delta = \sigma/\sqrt{n}$ , где  $\delta$  – средняя квадратическая погрешность расчета средней энергии,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение энергии,  $n$  – число ее независимых оценок. Согласно выполненному спектральному анализу рядов  $\zeta(t)$  за 22 года в отдельных точках рассматриваемого района океана, достаточно уверенно просматриваются максимумы полученных спектров на периоде



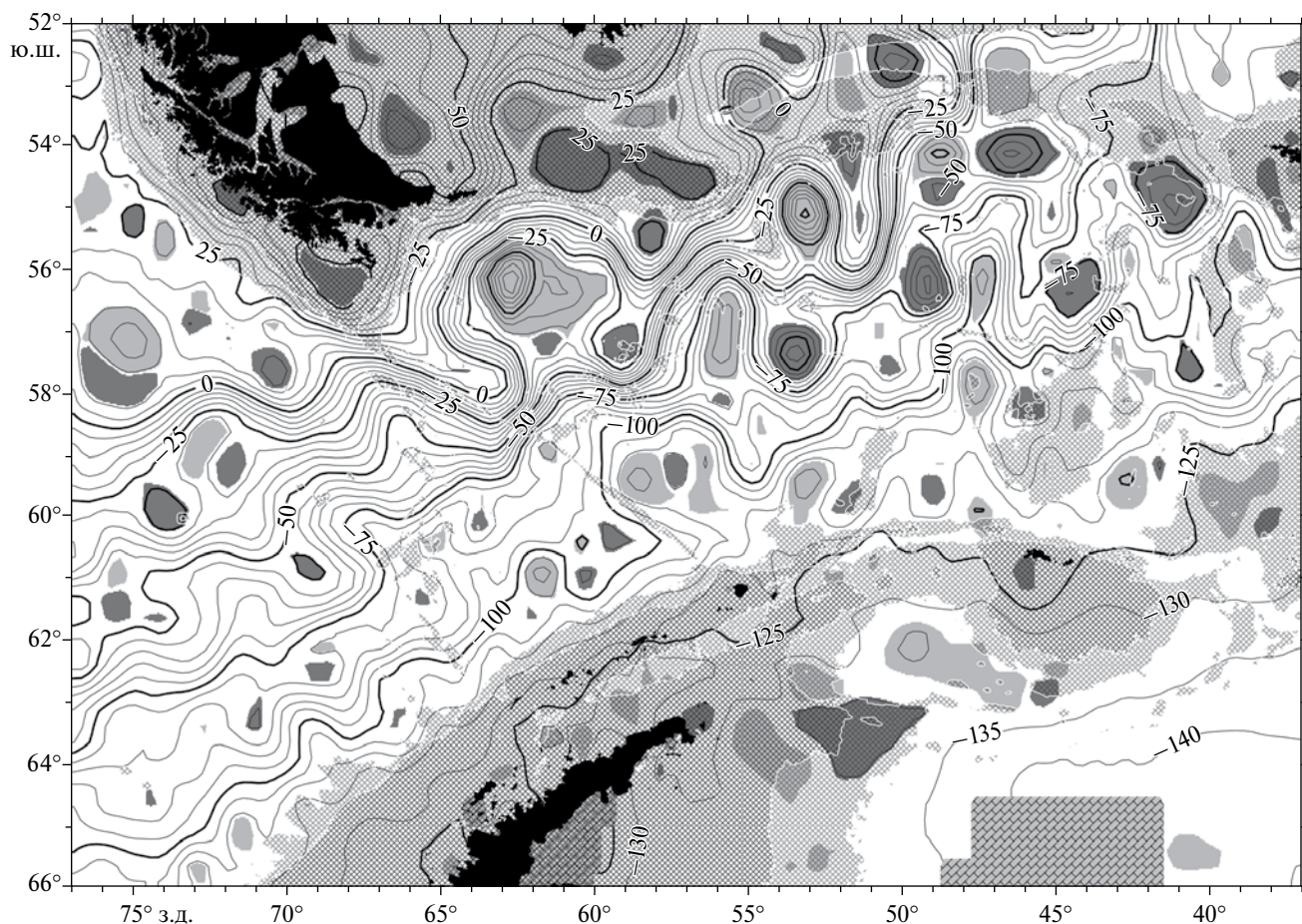


Рис. 10. То же, что на рис. 1, но для 11.04.2013 г.

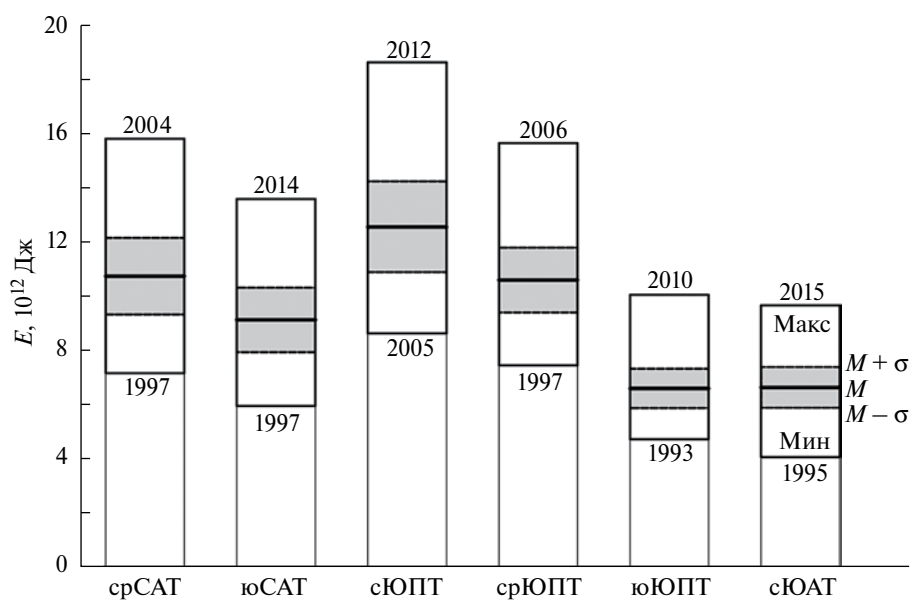
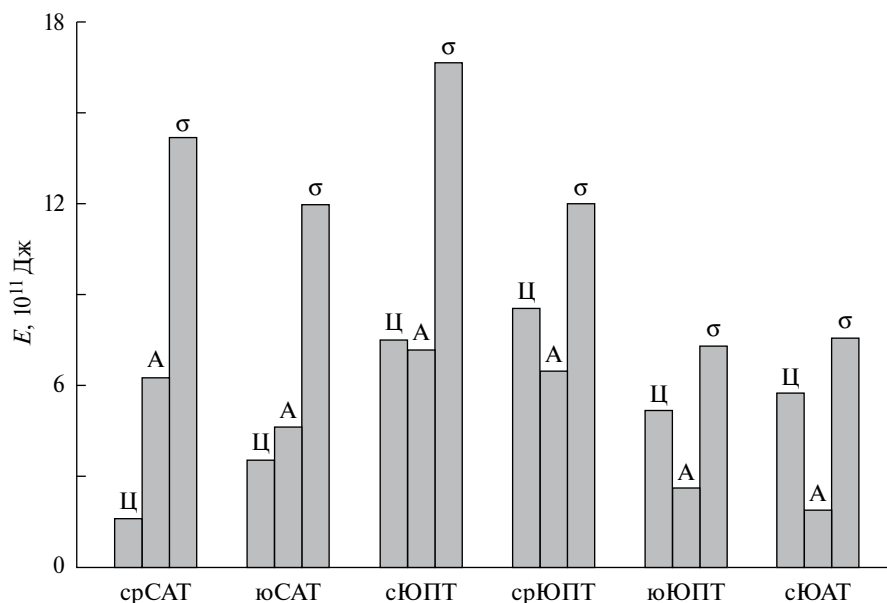
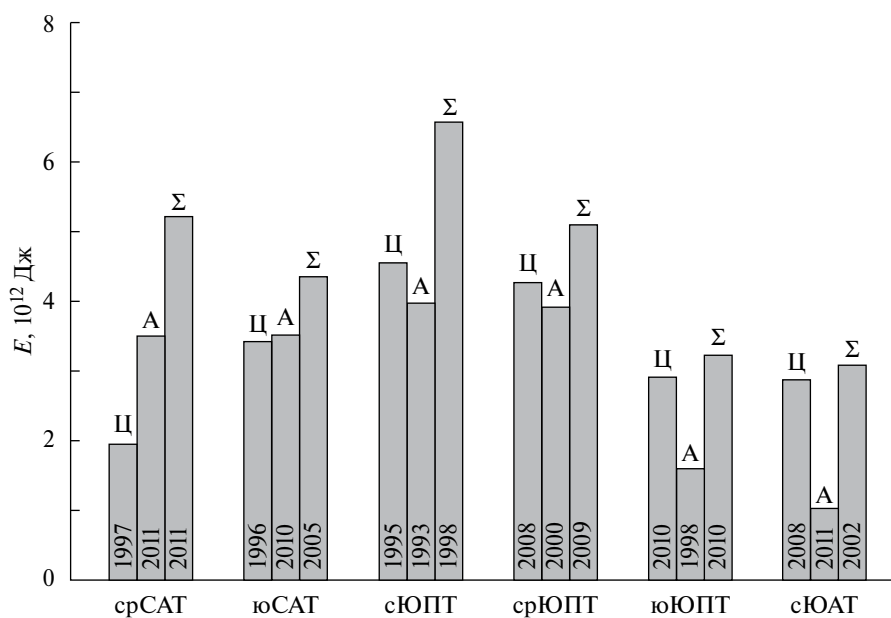


Рис. 11. Средние ( $M$ ) за 1993–2014 гг., а также минимальные и максимальные среднесуточные значения кинетической энергии шести струй АЦТ в приповерхностном слое пролива Дрейка и море Скотия. Даны годы достижения минимальных и максимальных среднесуточных значений; штриховыми линиями показаны диапазоны среднеквадратических отклонений ( $M \pm \sigma$ ) для всех струй.



**Рис. 12.** Средние за 1993–2014 гг. значения кинетической энергии частей струй АЦТ, вовлеченных в циклонические (левые столбцы, Ц) и антициклонические (средние столбцы, А) синоптические вихри в приповерхностном слое пролива Дрейка и моря Скотия. Правые столбцы – значения среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) кинетической энергии собственно струй (см. рис. 11).



**Рис. 13.** Максимальные за 1993–2014 гг. среднесуточные значения кинетической энергии частей струй АЦТ, вовлеченных в циклонические (левые столбцы), антициклонические (средние столбцы) и все вихри (правые столбцы,  $\Sigma$ ) для различных струй АЦТ. Даны годы достижения максимальных среднесуточных значений.

около 160 суток, что соответствует преобладающему временному масштабу колебаний  $\zeta(t)$ , равному  $(160/2\pi) = 25$  суток. Деля  $(365 \text{ сут.} \cdot 22)$  на 25 сут., получаем  $n = 320$  и  $\sqrt{n} = 18$ . Так как меандрирование струй и формирование вихрей являются проявлениями одного и того же физического процесса,

полученное значение  $n$  может быть использовано для оценки погрешностей в расчетах средней энергии как струй, так и вихрей. Так, величина  $\sigma$  для собственно струи сЮПТ и порожденных ею циклонов и антициклонов составила соответственно  $2.74 \cdot 10^{12}$  Дж (см. рис. 11 и 12),  $1.22 \cdot 10^{12}$  Дж

и  $1.10 \cdot 10^{12}$  Дж, что соответствует значениям  $\delta$ , равным  $0.15 \cdot 10^{12}$  Дж,  $0.07 \cdot 10^{12}$  Дж и  $0.06 \cdot 10^{12}$  Дж. Первое из этих трех значений  $\delta$  настолько мало по сравнению со средней энергией струи сЮПТ, что просто не может быть отображено на рис. 11. Второе и третье значения  $\delta$  равны разности между рассчитанными средними энергиями циклонов и антициклонов сЮПТ ( $0.06 \cdot 10^{12}$  Дж, рис. 12), и поэтому, в отличие от всех других струй АЦТ (рис. 12), полученное для сЮПТ преобладание средней энергии циклонов над антициклонами является не вполне достоверным.

В заключение необходимо подчеркнуть, что, несмотря на известные недостатки данных французского агентства CLS, связанные с систематическими ошибками в средней АДТ (такие ошибки указаны, например, в [3]), а также с пересглаженностью аномалии АДТ при ее интерполяции с треков спутников, результаты настоящей работы показывают, что эти данные удовлетворительным образом воспроизводят процесс энергообмена между струями АЦТ и порождаемыми ими вихрями, по крайней мере, в проливе Дрейка и море Скотия.

Настоящая работа поддержана: грантом Российского научного фонда № 16-17-10149 в части разработки алгоритма выделения вихрей на

альтиметрических картах АДТ и создания базы данных по вихрям, и темой Госзадания № 0149-2018-0003.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бышев В.И., Нейман В.Г.* Экспериментальные оценки синоптической изменчивости гидрофизических характеристик открытого океана // Прикосновение к океану. 2013. С. 67–75.
2. *Кошляков М.Н., Гладышев С.В., Тараканов Р.Ю., Федоров Д.А.* Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений в октябре–ноябре 2011 г. // Океанология. 2013. Т. 53. № 1. С. 5–16.
3. *Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М.* Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 725–736.
4. *Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. № 10. P. 167–216.
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.

## Energy Exchange Between jets of the Antarctic Circumpolar Current and Synoptic Eddies in the Drake Passage and Scotia Sea

M. N. Koshlyakov, D. S. Savchenko, R. Yu. Tarakanov

We study energy exchange between jets of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and synoptic eddies that they generate in the surface layer of the ocean in the Drake Passage and the Scotia Sea on the basis of satellite altimetry time series 22 years long of French CLS Agency (DT Global–MADT–Upd product, <http://www.aviso.altimetry.fr>) under the assumption based on observations that each of the jets is confined by two fixed contour lines of the absolute dynamic topography of the ocean. We calculate and analyze the evolution of kinetic energy of each ACC jets and cyclonic and anticyclonic eddies generated by this jet during a period of 22 years. We demonstrate principle dependence of the fluctuations in the energy of the jets on the phase of their meandering and eddy formation as well as their reverse absorption by the jets. We calculate the mean and extreme energetic characteristics of the jets and eddies and compare the jets in the sense of the generated eddy intensity.