© Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю., Савченко Д.С., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 3, С. 39–57

УДК 551.465 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).4

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ И ВИХРЕЙ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА

Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю., Савченко Д.С.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e–mail: mnkoshl@ocean.ru, rtarakanov@gmail.com
Статья поступила в редакцию 27.02.2019, одобрена к печати 26.08.2019

Кинетическая энергия шести струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и порождаемых ими синоптических вихрей исследуется в приложении к приповерхностному слою антарктического кольца по данным спутниковой альтиметрии за 1993–2015 гг. Выявлены преобладание энергии средней струи Субантарктического течения над энергиями каждой из остальных струй АЦТ во всем антарктическом кольце, пятикратное превышение суммарной по струям средней энергии собственно струй над средней энергией вихрей, двукратное преобладание средней энергии циклонических вихрей над антициклонами.

Ключевые слова: струи Антарктического циркумполярного течения, циклонические и антициклонические синоптические вихри, кинетическая энергия, секторы антарктического кольца, спутниковая альтиметрия

Введение

Согласно современным представлениям, касательное ветровое напряжение на поверхности океана создает в верхнем примерно 50-метровом слое поток чисто дрейфового течения, направленного перпендикулярно вектору этого напряжения (влево – в Южном полушарии, вправо – в Северном). Неравномерность поля ветра по поверхности океана обуславливает эффект сгона–нагона, создаваемого указанным течением. Так образуются зоны опускания и подъема уровенной поверхности океана относительно равновесной формы геоида. Горизонтальный градиент давления, формируемый возмущением этой поверхности, уменьшается с глубиной за счет приспособления поля плотности и компенсируется силой Кориолиса, то есть находится в геострофическом балансе. Таким образом, создаваемое ветровым возмущением геострофическое течение распространяется до глубины примерно 1500–2000 м, определяющей толщину верхнего, бароклинного, слоя океана. Полное поле течений бароклинного слоя (градиентных течений) океана представляет собой сумму геострофического и чисто дрейфового течений.

Линии тока геострофического течения на большей части поверхности Мирового океана соответствуют изолиниям отклонения уровня этой поверхности

(изогипсам) от равновесной формы геоида. Такое отклонение называют абсолютной динамической топографией поверхности океана (АДТПО). В Южном полушарии течение направлено так, что более высокие значения АДТПО остаются слева от направления течения. Сгущения изогипс на картах АДТПО соответствуют зонам повышенных скоростей течения (струям). При этом скорости течения пропорциональны плоскому градиенту АДТПО. Картина линий тока геострофического течения в глубине на горизонтах в пределах бароклинного слоя океана в основном подобна картине линий тока этого течения на поверхности океана. Это обстоятельство позволяет исследовать качественно и количественно некоторые аспекты структуры и циркуляции бароклинного слоя океана, используя только карты АДТПО.

В настоящей статье излагаются результаты выполненного на основе карт АДТПО исследования кинетической энергии струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) и порождаемых ими синоптических вихрей в приповерхностном слое океана. Отметим в этой связи, что энергия, сообщаемая океану через его поверхность ветром, передается затем из бароклинного слоя в абиссаль за счет формирования синоптических вихрей, обусловленного бароклинной неустойчивостью струйных течений указанного слоя и последующей баротропизации (выравнивания скорости по глубине) этих вихрей (Кошляков и др., 1984; Мирабель, Монин, 1980). В абиссали океана трение о дно приводит к диссипации этой энергии. Отметим также, что АЦТ наряду с наиболее интенсивными Западными пограничными течениями (Гольфстримом, Куросио, Бразильским, Агульяс, Восточно-Австралийским) является зоной наиболее активного вихреобразования в Мировом океане.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положены ежесуточные цифровые карты (карты AVISO – Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) абсолютной динамической топографии поверхности океана (АДТПО) за 1993–2015 гг., рассчитанные во французском спутниковом агентстве по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и находящиеся в открытом доступе в Интернете (DT Global-MADT-Upd product http://aviso. altimetry.fr). Горизонтальное разрешение карт AVISO составляет 1/4° по широте и долготе. Выделение вихрей на ежесуточных картах AVISO основывалось на идее, что вихрям соответствуют такие участки этих карт, которые оконтурены замкнутыми изогипсами, наиболее удаленными от ядра (локального максимума или минимума АДТПО) вихря. Использованная нами процедура выделения вихрей детально описана в работе (Тараканов, 2019). Процедура заключается в расширении вихрей по площади от ядер до достижения соответствующих этим ядрам седловин АДТПО и осуществляется в несколько итераций до полного исчерпания всех точек сетки, принадлежащих вихрям. Наличие нескольких итераций обеспечивает выделение

многоядерных вихрей. Таким образом, на всех ежесуточных картах АДТПО выделены циклонические (локальные минимумы АДТПО, вращение воды по часовой стрелке) и антициклонические (противоположные по знаку возмущения АДТПО и направлению вращения воды) вихри.

На рис. 1 дан пример построенной описанным выше образом синоптической карты АДТПО для пролива Дрейка и западной части моря Скотия. Карта убедительно показывает многоструйный характер АЦТ. В работе (Sokolov, Rintoul, 2009),

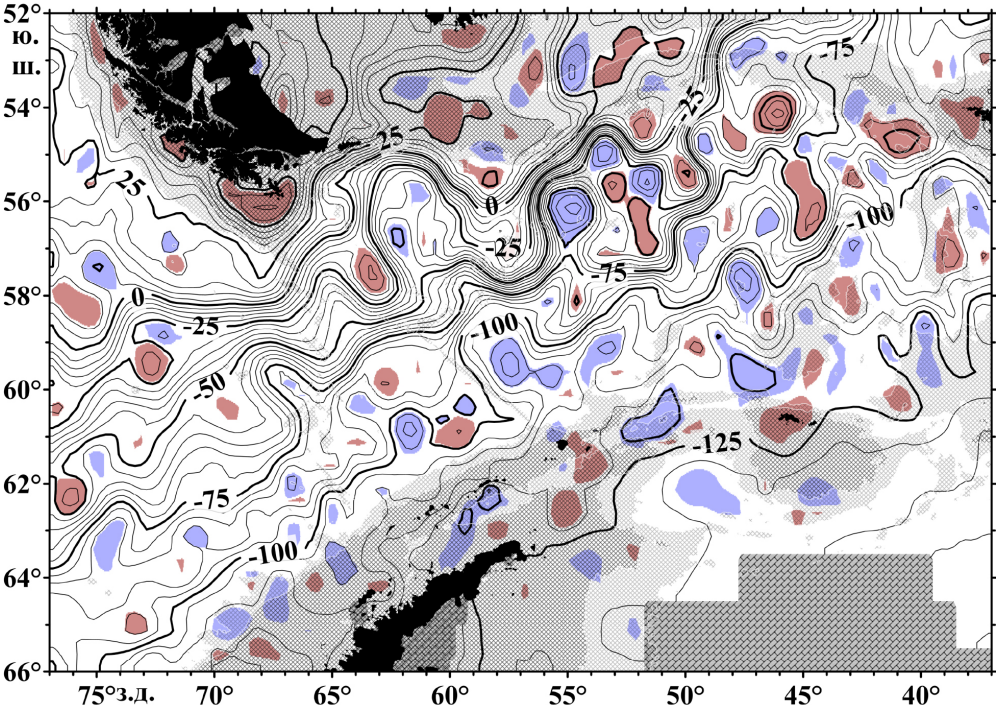

Рис. 1. Карта АДТПО (см) для пролива Дрейка и моря Скотия на 09.05.2013. Циклонические и антициклонические вихри показаны соответственно синим и красным цветами. Крупная клетка показывает участки дна с глубиной менее 1000 м, мелкая – от 1000 до 3000 м.

в результате анализа данных спутниковой альтиметрии и других наблюдений на разных участках антарктического кольца и с использованием величины поперечного к АЦТ градиента АДТПО в качестве основного критерия выделения струй этого течения, было, во-первых, выделено восемь струй АЦТ и, во-вторых, показана достаточно устойчивая привязка этих струй к определенным диапазонам значений АДТПО. Выполненный авторами настоящей статьи анализ многих карт АДТПО за разные годы в различных секторах антарктического кольца позволил несколько скорректировать эти диапазоны, в результате чего были определены постоянные значения АДТПО на границах струй АЦТ, приведенные на рис. 2 вместе с названиями этих струй и их средним по времени положением в проливе Дрейка и море Скотия. На некоторых участках АЦТ несколько струй могут сливаться в единую «суперструю» – эффект, хорошо просматривающийся, например, на рис. 1 в районе 56°ю.ш., 55°з.д.

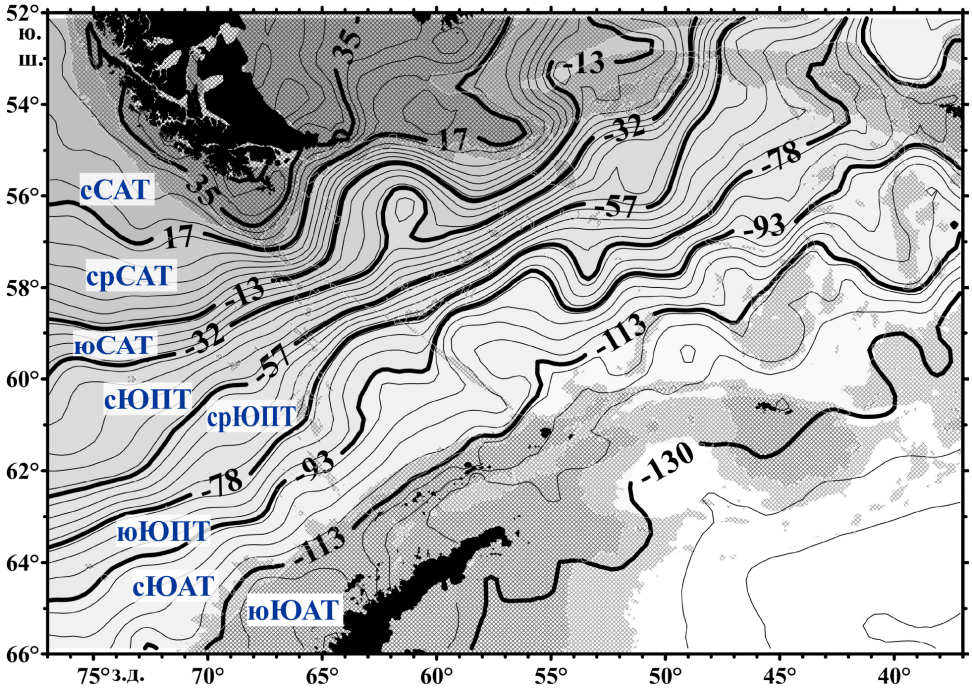

Рис. 2. Средняя за 1993–2015 гг. АДТПО (см) в проливе Дрейка и море Скотия. Жирные изогипсы – границы между струями АЦТ. Расшифровка названий струй (слева на рисунке): северные, средние и южные струи Субантарктического и Южного полярного течений, северная и южная струи Южного антарктического течения. Остальное как на 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 последующем ослаблении вихрей, сопровождающимся их обратной трансформацией в меандры и, таким образом, их слиянием с породившими их струями (Кошляков и др., 2018). Соответствующий жизненный цикл крупного циклонического вихря, сформированного преимущественно северной струей Южного полярного течения (следует сравнить значения изогипс на рис. 2 и 3), представлен на рис. 3, показывающем, что процессы усиления и ослабления вихрей связаны в основном с перезамыканием изогипс (линий тока геострофического течения) в основаниях меандров. Именно между 22.09 и 20.10.2013 произошло замыкание изогипс –40, –35 и –30 см в поле рассматриваемого циклона (рис. 3), а в период между 20.10 и 05.11.2013 – размыкание этих изогипс и изогипс –45 и –50 см. В результате подобной перестройки и реализуется передача воды и энергии вначале от струи к вихрю, а затем в обратном направлении.

Рис. 3 иллюстрирует то обстоятельство, что в отдельных случаях в процессе эволюции вихря может наблюдаться изменение значений АДТПО не только в периферийной части вихря, но и в его центре. Это может быть как признаком проявления какого-то вертикального движения внутри вихря, которое не является геострофическим, так и быть следствием локальной систематической

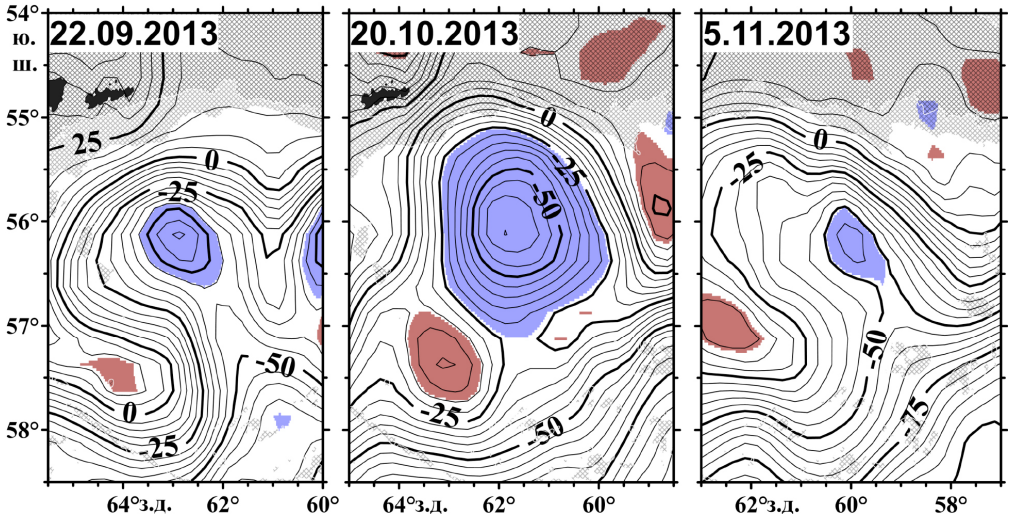

Рис. 3. АДТПО (в см) в северной части пролива Дрейка 22.09, 20.10 и 05.11.2013. Остальное как на рис. 1.

ошибки средней АДТПО, использованной агентством AVISO при построении альтиметрических карт. Разделение физического процесса и ошибок данных представляет собой отдельную, большую и нетривиальную задачу, которая не может быть решена в рамках настоящей статьи. Однако даже из рис. 3 в статье видно, что рост амплитуды циклона за счет перезамыкания изогипс составляет 20 см, а за счет роста амплитуды в центре – только 5 см. То есть так или иначе именно процесс перезамыкания изогипс является главным в усилении и ослаблении вихрей.

С целью количественного исследования энергии струй и вихрей АЦТ, для каждых суток периода с 1993 по 2015 год и для каждой точки описанного выше массива значений АДТПО в пределах всего антарктического кольца были рассчитаны зональная u и меридиональная v составляющие скорости геострофического течения на поверхности океана:

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

где ζ – значение АДТПО, – 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 (рис. 2, 4) и каждого вихря в приповерхностном слое океана толщиной h в 1 м:

$$E(t) = \frac{\rho_0 h}{2} \int_{S(t)} \left(u^2(t) + v^2(t)\right) dS, \tag{2}$$

где t – время, E – кинетическая энергия, S – площадь интегрирования, ρ_0 = 1035 кг/м^3 – средняя плотность океанской воды. При расчете энергии струи интегрирование велось по всей ее площади в пределах всего антарктического кольца или одного из его секторов (рис. 4) за вычетом участков, занятых вихрями. Ограничение

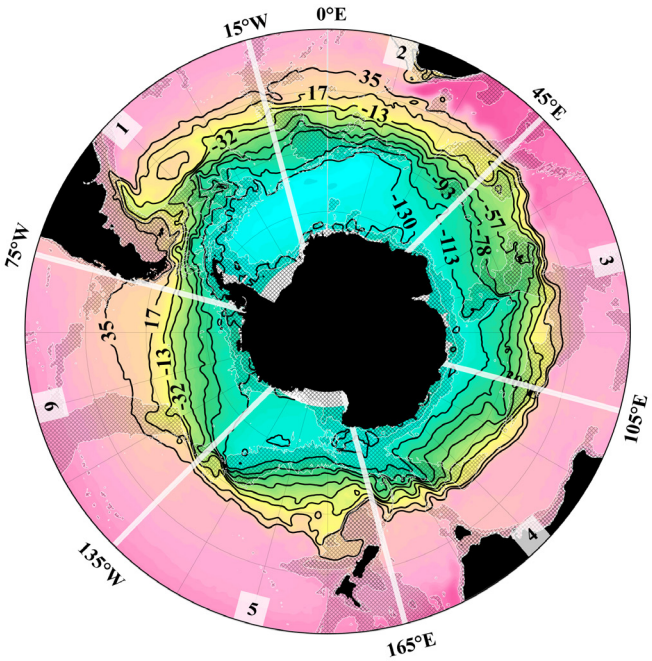

Рис. 4. Среднее за период 1993–2015 гг. распределение АДТПО (в см) в зоне АЦТ во всем антарктическом кольце. Показаны изогипсы, являющиеся границами между струями АЦТ (см. рис. 2). Секторы антарктического кольца: 1 – западно-атлантический; 2 – восточно-атлантический; 3 – индийский; 4 – австралийский; 5 – западно-тихоокеанский; 6 – восточно-тихоокеанский. Остальное как на рис. 1.

расчетов энергии струй и порождаемых ими вихрей шестью струями АЦТ вместо восьми обусловлено тем, что самая северная (сСАТ) и самая южная (юЮАТ) струи на некоторых участках антарктического кольца примыкают к побережьям Южной Америки и Антарктиды, что делает указанные расчеты ненадежными. Расчет энергии вихрей велся раздельно для циклонов и антициклонов. При этом интегрирование выполнялось отдельно для кольцевых участков данного вихря, заполненных водой из различных струй АЦТ (от срСАТ до сЮАТ) согласно с приведенными на рис. 2 значениями АДТПО на границах между струями. 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 исследуемой области. Заметим при этом, что в секторе 2 (рис. 4) циклонические вихри в диапазоне АДТПО, характерном для АЦТ, формируются также вследствие отрыва циклонических меандров Агульясского и его продолжения Бенгельского течений, идущих на юго-запад, запад и северо-запад вдоль материкового склона южной Африки и являющихся звеньями субтропических круговоротов Индийского и Атлантического океанов (Arhan et al., 2011). В связи с этим, во избежание ошибок при расчете энергии циклонических вихрей струй АЦТ, упомянутое выше суммирование энергии циклонов этих струй в секторе 2 проводилось в пределах области, имеющей своей северной границей не параллель 30°ю.ш., как для всех остальных секторов, а изогипсу 35 см, являющуюся северной границей АЦТ (рис. 4).

В заключение описанного выше этапа анализа цифровых карт АДТПО, для каждой из шести струй АЦТ, каждого из шести секторов и каждого из двадцати трех лет периода 1993–2015 гг. строились четыре кривые эволюции $E(t)$: кривая эволюции энергии собственно струи; суммарная по всем циклонам кривая эволюции энергии частей этой струи, вовлеченных в циклонические вихри; аналогич-

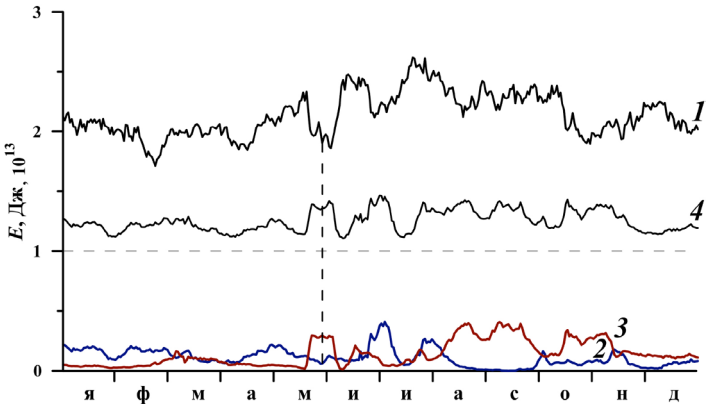

Рис. 5. Годовой ход кинетической энергии южной струи Субантарктического течения (кривая 1) и ее частей, вовлеченных в циклонические (кривая 2) и антициклонические (кривая 3) вихри в приповерхностном слое сектора 4 (см. рис. 4) в 2012 г. Кривая 4, представляющая собой сумму кривых 2 и 3, для наглядности сдвинута вверх вдоль оси *E* на величину 10^{13} Дж. Вертикальная штриховая прямая отмечает совпадение по времени локальных минимума кривой 1 и максимума кривой 3.

ная кривая для антициклонов; суммарная кривая для циклонов и антициклонов. На рис. 5 представлен пример таких кривых для юСАТ, сектора 4 и 2012 г., а на рис. 6 – карты АДТПО, показывающие, что ход этих кривых в мае–июне 2012 г. был обусловлен жизненным циклом крупного антициклонического вихря, сформированного струей юСАТ и частично струями срСАТ и сЮПТ и просуществовавшего несколько меньше одного месяца. Особенно большое впечатление производят зеркальное отображение кривой 3 в кривой 1 (рис. 5) для рассматриваемого интервала времени и очень хорошо выраженное подобие в ходе изогипс между первой и третьей картами на рис. 6, иллюстрирующими процесс формирования вихря и его обратного поглощения материнской струей.

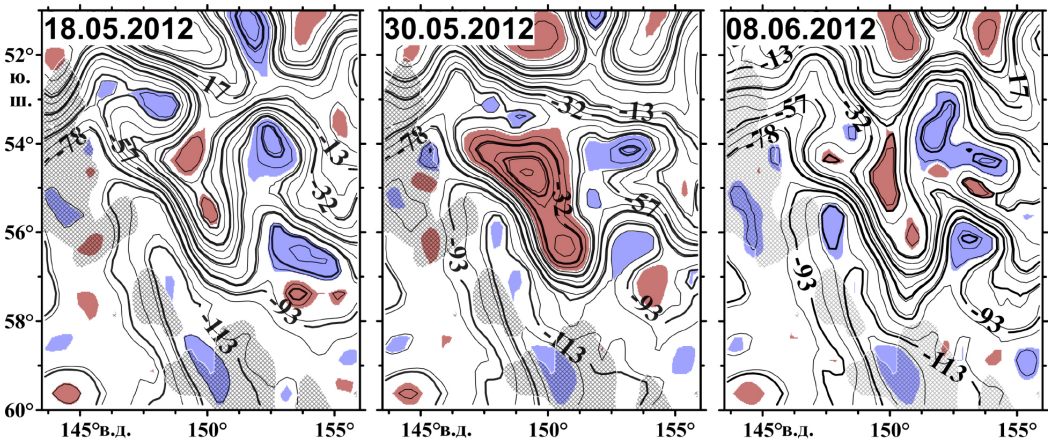

Рис. 6. АДТПО (в см) в восточной части сектора 4 в мае–июне 2012 г. (сравн. с рис. 5). Остальное как на рис. 1 и 3.

Результаты исследования

На картах геострофических течений, представленных на рис. 7–12, вихри окрашены в те же цвета, что и породившие их струи АЦТ. Если при этом вихрь оказывается окрашенным в более холодный цвет, чем окружающая его струя (например, зеленый вихрь на желтом фоне), то это циклон, если в более теплый цвет, то антициклон. Следует также заметить, что хотя упомянутые карты и относятся к одной конкретной дате (01.01.2013), они дают правильное представление о таких средних по времени особенностях полей струй и вихрей в различных секторах антарктического кольца или их частях, как, например, степень развития стационарных крупномасштабных изгибов (меандров) этих струй или их ширина, интенсивность формирования циклонических и антициклонических вихрей. Указанное обстоятельство позволяет содержательно сопоставлять синоптические карты на рис. 7–12 с приведенными на этих же рисунках диаграммами средней энергии струй и вихрей. Такое сопоставление приводит к излагаемым ниже выводам.

1. Диаграммы слева на рис. 2–7 показывают, во-первых, хорошо выраженное преобладание по энергии струи срСАТ над остальными струями АЦТ во всех секторах антарктического кольца и, во-вторых, относительно малые значения энергии струй юЮПТ и сЮАТ. Чтобы лучше разобраться в этом, рассмотрим вначале чисто зональную приповерхностную струю длиной l, шириной m и толщиной h = 1 м. Полагая для простоты скорость струи постоянной по ширине струи, из первой формулы (1) и формулы (2) получаем следующее приближенное выражение для кинетической энергии этой струи:

$$E = \frac{g^2\rho_0}{2f_0^2}\frac{(\zeta_2-\zeta_1)^2}{m^2}l\cdot m\cdot h = \frac{g^2\rho_0}{2f_0^2}\frac{(\zeta_2-\zeta_1)^2}{m}l\cdot h, \qquad (3)$$

где ζ_2 и ζ_1 – значения АДТПО на южной и северной границах струи, f_0 – среднее по широте струи значение f. Прилагая полученную формулу к различным струям АЦТ и различным секторам антарктического кольца, убеждаемся, что отмеченные выше преобладание по энергии струи срСАТ и относительно малые значения энергии струй юЮПТ и сЮАТ преимущественно объясняются присущими им значениями $(\zeta_2–\zeta_1)^2$ (см. рис. 2 и 4) и в меньшей степени – значениями f_0^2 и l (зональной протяженностью сектора антарктического кольца на данной широте).

2. Карты на рис. 7–12 показывают отчетливо выраженную тенденцию следования струй АЦТ вдоль материковых склонов и склонов подводных возвышенностей. Особенно ярко эта тенденция проявляется в секторе 1 (карта на рис. 7), где все три струи Субантарктического течения, составляя в своей совокупности единую суперструю, прижаты к материковому склону Аргентины в зоне от 48° до 38°ю.ш., формируя западную, направленную на север, ветвь Фолклендского течения. После достижения 38°ю.ш. указанные струи поворачивают на юг, образуя уникальный по

крутизне стационарный циклонический меандр этого течения. Большая длина этого меандра и малая ширина струй САТ в его западной ветви (карта на рис. 7) приводят в дополнение к факторам, описанным в пункте 1, к дальнейшему увеличению энергии этих струй и особенно струи срСАТ (диаграмма слева на рис. 7) в секторе 1.

Ярко выраженная циклоническая кривизна Фолклендского течения приводит к интенсивному порождению им циклонических вихрей синоптического масштаба (карта на рис. 7), что и определяет очень большое значение средней энергии этих вихрей в секторе 1 (диаграмма справа на рис. 7). Вместе с антициклоническими вихрями Бразильского течения, сходящегося с Фолклендским течением в районе 38°с.ш., циклоны Фолклендского течения создают обширную область рекордной по интенсивности океанской макротурбулентности к востоку от Фолклендского меандра (карта на рис. 7). Другой областью, динамически аналогичной описанной выше, можно считать располагающуюся к югу и юго-западу от Африки область сосуществования и взаимодействия циклонов северных струй АЦТ и антициклонов Агульясского течения – Агульясского противотечения (карта на рис. 8).

3. Карта на рис. 9 демонстрирует две яркие особенности структуры течений в западной половине сектора 3: а) наличие сильной суперструи, сформированной слиянием всех трех струй Субантарктического течения и следующей вдоль квазизонально ориентирванных северных склонов возвышенностей Крозе и Кергелен; б) полное отсутствие (!) сколько-нибудь значительных синоптических вихрей АЦТ в этой части сектора 3 (хорошо выраженные на рис. 9 циклонические вихри в зоне 55–65°в.д. к северу от АЦТ являются вихрями восточной части Агульясского противотечения). Указанные особенности могут быть поняты в свете закона сохранения потенциальной завихренности Q частицы воды, переносимой океанским течением (Педлоски, 1984):

$$\frac{dQ}{dt} \equiv \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_\theta}{\partial z}\left(f + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right)\right) = 0, \qquad (4)$$

где ρ_θ – потенциальная плотность морской воды. Первый и второй члены в квадратных скобках представляют собой планетарную и относительную (связанную с синоптическими вихрями) завихренности частицы, а их сумма дает абсолютную завихренность; $\partial \rho_\theta / \partial z$ есть мера растяжения вихревых трубок по вертикали. Квазизональность и квазиизобатичность главных струй АЦТ в западной части сектора 3 (рис. 9) обеспечивают приблизительное постоянство величин f и $\partial \rho_\theta / \partial z$ в формуле (4), способствуя тем самым сохранению потенциальной завихренности частицы без участия синоптических вихрей в этом процессе. Отмеченное выше отсутствие синоптических вихрей в западной половине сектора 3 согласуется с приведенным рассуждением. Следует отметить также узость струи срСАТ в западной

половине сектора 3 (карта на рис. 9), что, согласно формуле (3), объясняет высокое значение средней энергии этой струи в указанном секторе (диаграмма слева на рис. 9). Связь интенсивности вихреобразования с рельефом дна океана в системе фронтальных течений южной части Индийского океана и, в частности, резкое уменьшение этой интенсивности в районах зональной ориентации подводных возвышений были зафиксированы по спутниковым альтиметрическим данным в работе (Костяной и др., 2003).

В отличие от западной половины сектора 3, в его восточной половине, где Австрало-антарктическое поднятие ориентировано с северо-запада на юго-восток и имеет пологие склоны, изолинии АДТПО веерообразно расходятся в юго-восточном направлении и количество вихрей существенно возрастает (карта на рис. 9). В секторе 4 (карта на рис. 10) характеры рельефа дна и океанской циркуляции близки к таковым в секторе 3.

4. Самым поразительным динамическим образованием во всем антарктическом кольце является суперструя, сформированная слиянием пяти (!) струй АЦТ (юСАТ, сЮПТ, срЮПТ, юЮПТ и сЮАТ) над разломом Удинцева в восточной части Южно-тихоокеанского поднятия (рис. 4, карта на рис. 11, 55–57°ю.ш., 140–145°з.д.). Глубина океана на верхних краях разлома составляет около 2.5 км, на оси разлома – 4 км, ширина разлома в его верхней части и, соответственно, суперструи – 75 км, средняя по ширине суперструи скорость течения на поверхности океана – 1.1 м/с! В смягченном виде эта ситуация повторяется над разломом Элтанин, разделяющим Южно-тихоокеанское и Восточно-тихоокеанское поднятия (карта на рис. 12, 53°ю.ш., 130–135°з.д.), где наблюдается суперструя, состоящая из трех струй АЦТ (сСАТ, срСАТ и юСАТ) со средней скоростью около 70 см/с на поверхности океана.

Переходя к рассмотрению энергии струй и вихрей АЦТ в антарктическом кольце в целом (рис. 13), вспомним, что основным источником энергии вихрей является доступная потенциальная энергия (ДПЭ) струй, пропорциональная квадрату перепада плотности воды поперек струи (Каменкович, 1987). Вследствие геострофичности и бароклинности океанских струй, включая струи АЦТ, рост их ДПЭ должен сопровождаться ростом их кинетической энергии (КЭ), в том числе и в верхнем слое океана; в то же время при росте ДПЭ струй должен усиливаться процесс генерации вихрей, а значит должна расти КЭ вихрей. Таким образом, следует ожидать роста КЭ вихрей при росте КЭ струй, что полностью подтверждается сравнением левой и правой диаграмм на рис. 13, примечательным образом показывающим пятикратное превышение энергии собственно струй над суммарной (Ц+А) энергией вихрей не только в сумме по всем шести рассматриваемым струям АЦТ (6.80×10^{14} Дж и 1.32×10^{14} Дж), но и для каждой струи в отдельности.

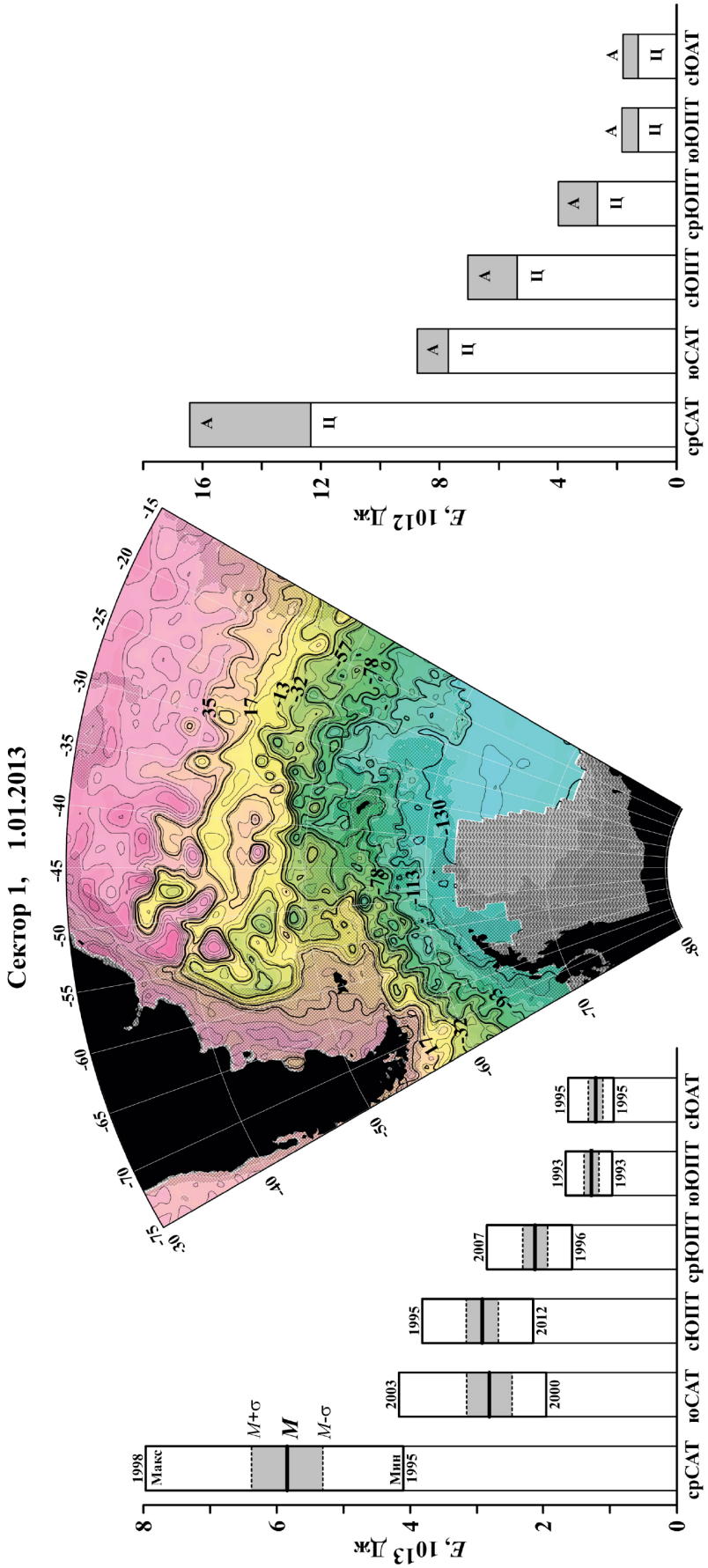

Рис. 7. Карта АДТПО (см) для сектора 1 на 01.01.2013. Выделены и оцифрованы изогипсы, являющиеся границами между струями АЦТ (сравн. с рис. 2). Окраска вихрей соответствует окраске струй, генерировавших эти вихри. Остальное как на рис. 1.

Слева: средние (M) за 1993–2015 гг., а также минимальные и максимальные среднесуточные значения кинетической энергии шести струй АЦТ (и годы их достижения) в приповерхностном слое сектора 1. Штриховыми линиями (M ±σ) показаны средние квадратические отклонения для разных струй. Справа: средние за 1993–2015 гг. значения кинетической энергии частей струй АЦТ, вовлеченных в циклонические (Ц) и антициклонические (А) вихри в приповерхностном слое сектора 1.

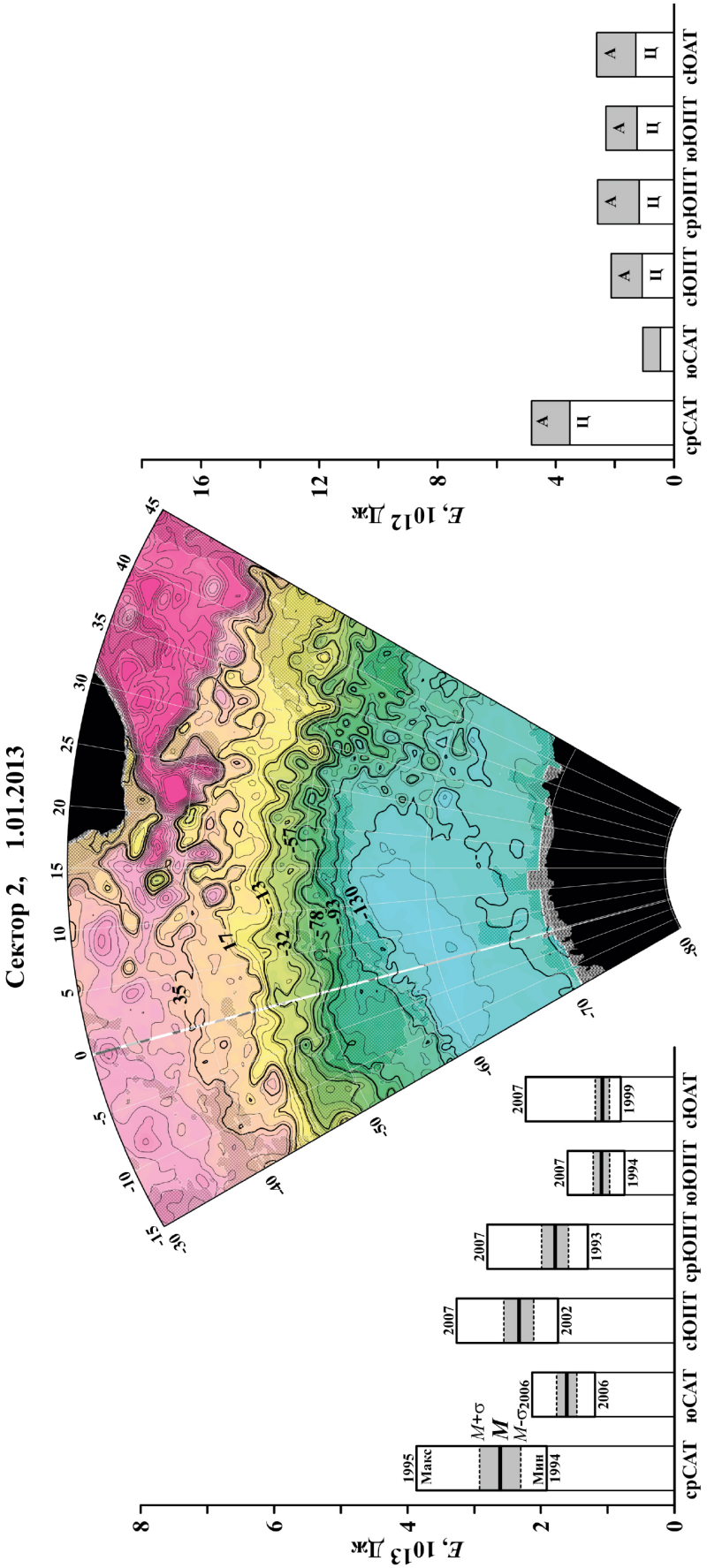

Рис. 8. То же, что на рис. 7, но для сектора 2 на 01.01.2013.

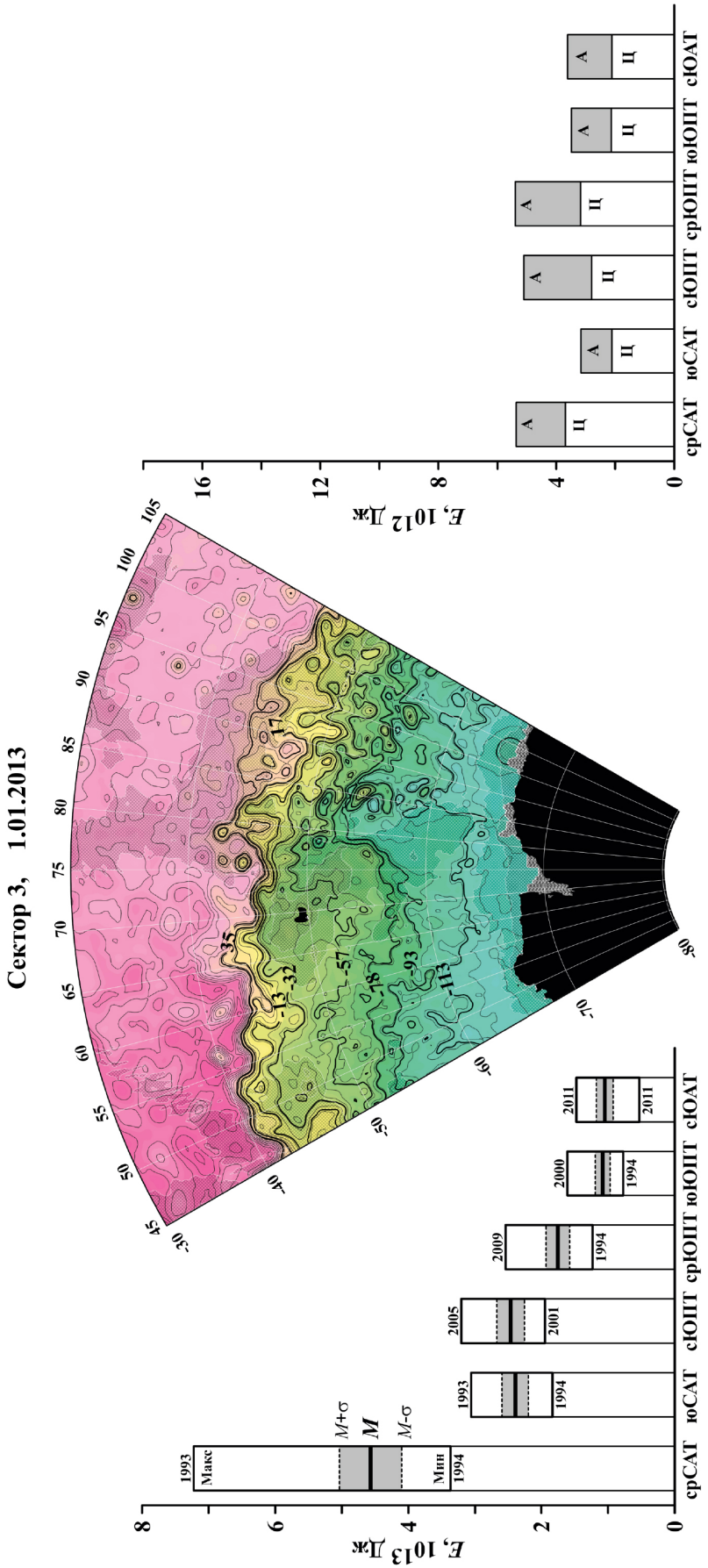

Рис. 9. То же, что на рис. 7, но для сектора 3 на 01.01.2013.

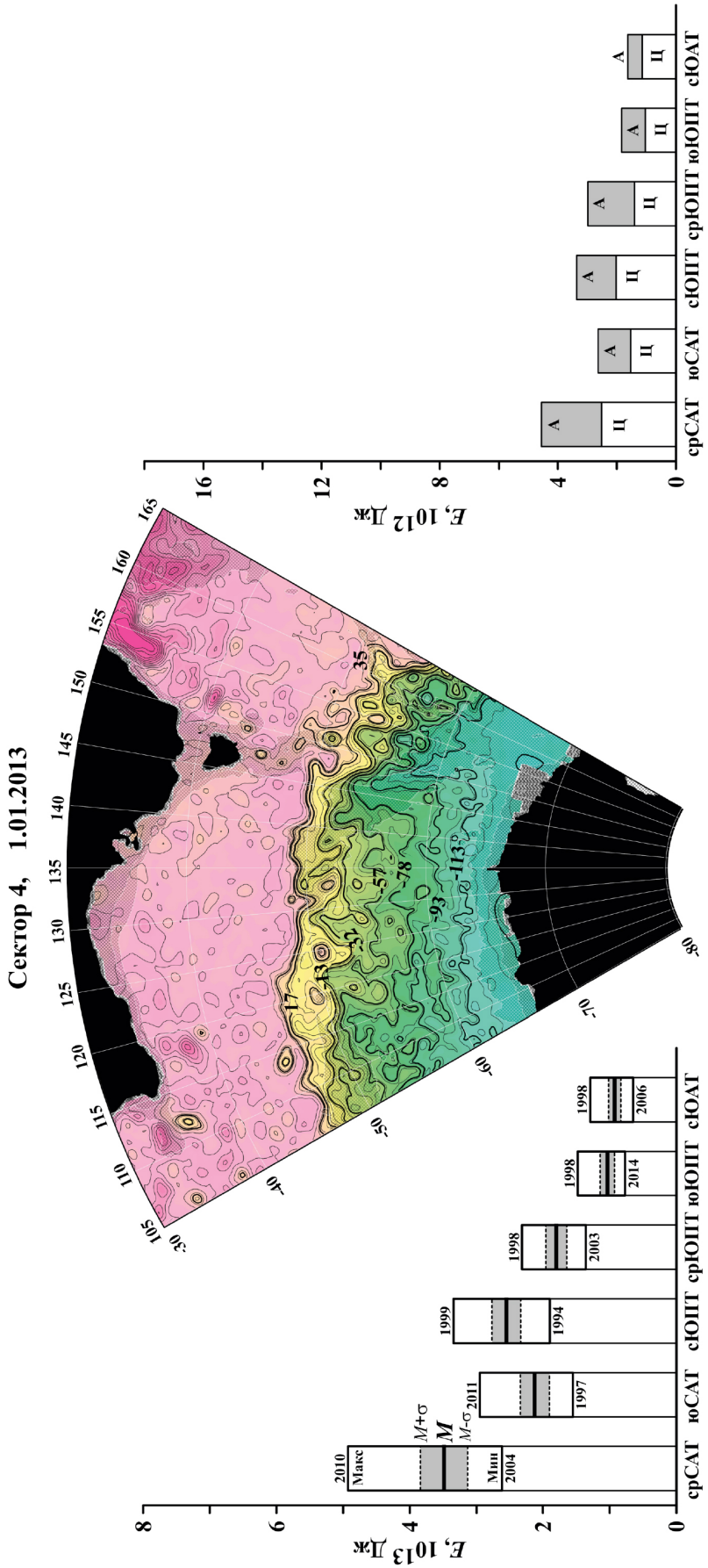

Рис. 10. То же, что на рис. 7, но для сектора 4 на 01.01.2013.

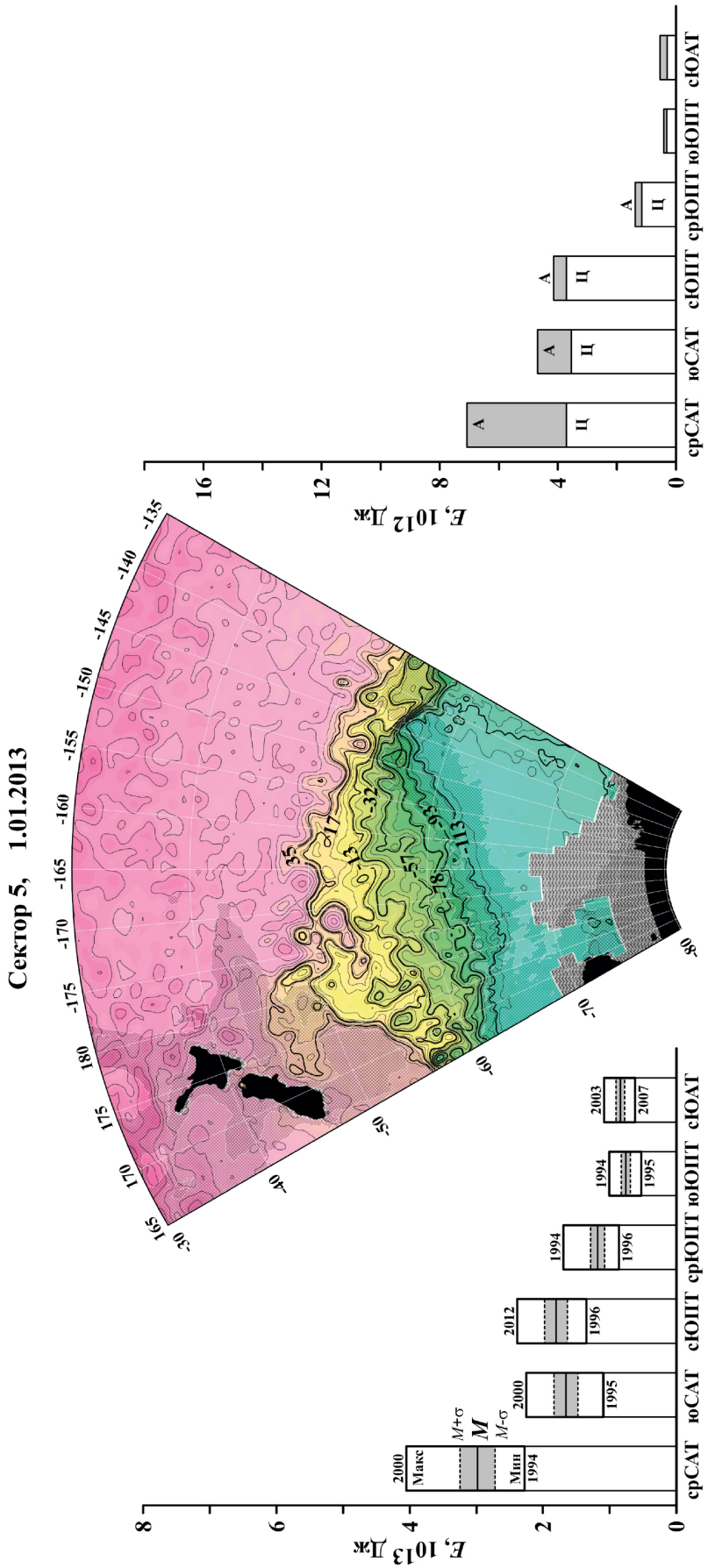

Рис. 11. То же, что на рис. 7, но для сектора 5 на 01.01.2013.

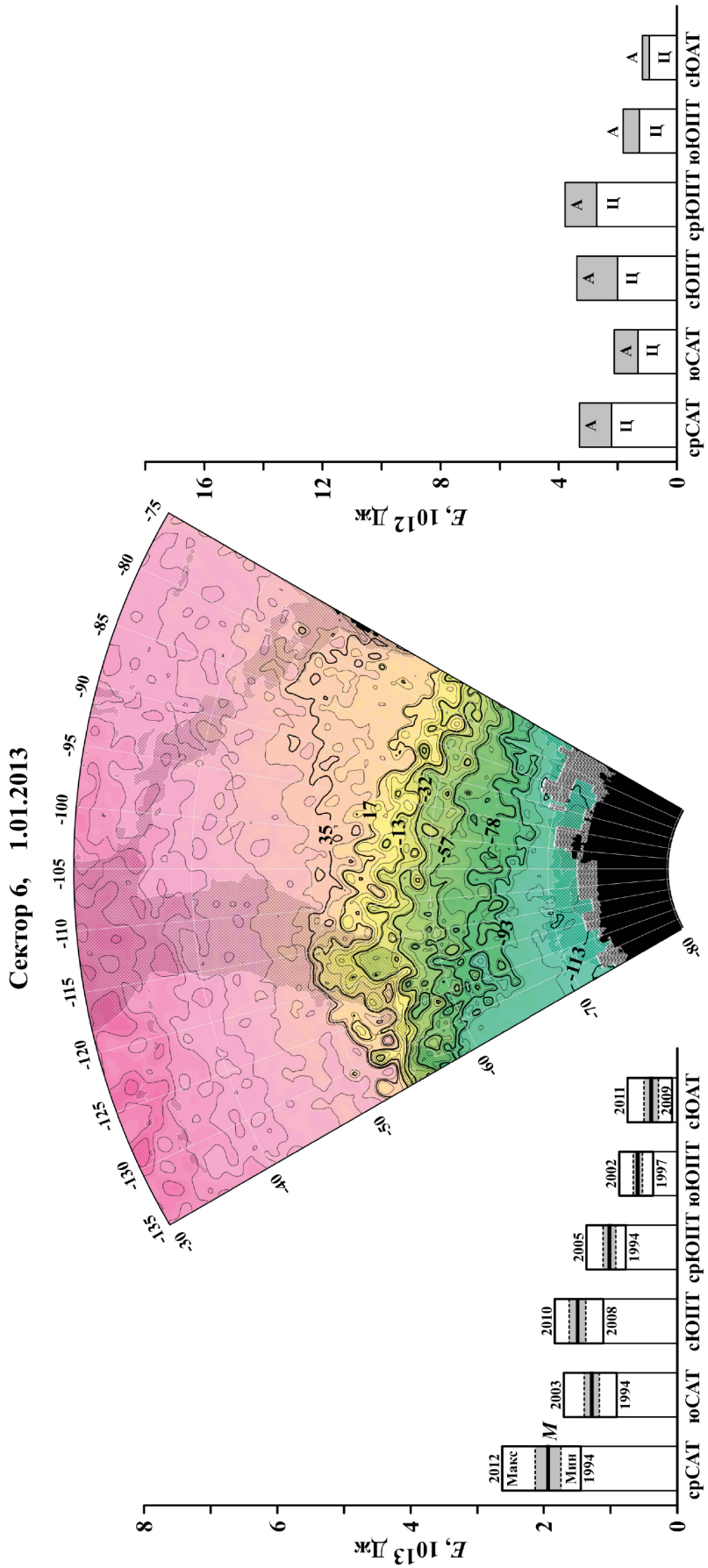

Рис. 12. То же, что на рис. 7, но для сектора 6 на 01.01.2013.

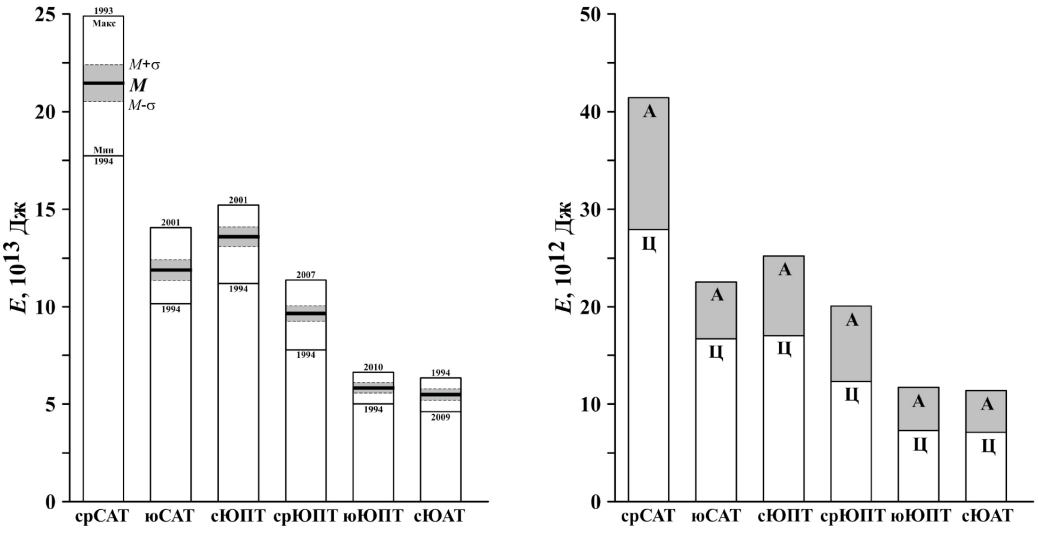

Рис. 13. Слева – средние (М) за 1993–2015 гг., а также минимальные и максимальные среднесуточные значения энергии шести струй АЦТ в приповерхностном слое океана для антарктического кольца в целом. Даны годы достижения экстремальных значений; штриховые линии (М ±σ) показывают средние квадратические отклонения для разных струй. Справа – средние за 1993–2015 гг. значения энергии циклонических (Ц) и антициклонических (А) вихрей, порождаемых различными струями АЦТ, в приповерхностном слое антарктического кольца в целом.

Что касается соотношения средних значений энергии циклонов и антициклонов, то для антарктического кольца в целом суммарная по струям средняя энергия циклонов составила 0.88×10^{14} Дж, а энергия антициклонов – 0.44×10^{14} Дж (рис. 13), причем такое преимущество циклонов над антициклонами в верхнем слое океана сохраняется, за малым исключением, для всех струй АЦТ и всех секторов по отдельности (рис. 7–12, 13). Можно предположить, что указанное преимущество обусловлено подъемом изопикнических поверхностей в циклонах, что приводит к сжатию слоя высоких скоростей вихревого движения к поверхности океана, в отличие от антициклонов, где изопикнические поверхности, наоборот, прогнуты вниз и, таким образом, энергия вихрей распределяется по глубине более равномерно, чем в циклонах. Другой причиной преобладания энергии циклонов над антициклонами может быть планетарная циклоническая завихренность направленного с запада на восток АЦТ и отмечавшаяся выше циклоническая кривизна крупных стационарных меандров наиболее сильных северных струй АЦТ (западные части карт на рис. 7 и 11).

Работа над статьей в части анализа взаимодействия струй и вихрей осуществлена в рамках выполнения госзадания по теме № 0149-2018-0003, в части разработки алгоритма выделения вихрей на картах АДТ и создания базы данных по вихрям поддержана грантом РФФИ № 18-05-00283.

Литература

Каменкович В.М. Бароклинная неустойчивость крупномасштабных течений // В кн. В.М. Каменкович, М.Н. Кошляков, А.С. Монин Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. С. 138–160.

Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Франкиньюль М., Делиль Б. Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // Океанология. 2003. Т. 43. № 5. С. 671–682.

Кошляков М.Н., Грачев Ю.М., Михайличенко Ю.Г., Сажина Т.Г., Яремчук М.И. Генерация синоптических океанских вихрей в районе ПОЛИМОДЕ // Океанология. 1984. Т. 24. № 1. С. 5–14.

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.

Мирабель А.П., Монин А.С. Геострофическая турбулентность // Изв. АН СССР. 1980. Т. 16. № 10. С. 1011–1023.

Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. В 2-х т. Т. 1. Москва: Мир, 1984. 398 с.

Тараканов Р.Ю. О выделении замкнутых циркуляций на спутниковых картах динамической топографии поверхности океана // Изв. РАН. Физ. Атмос. Океана. 2019. Т. 55. № 5. (В печати).

Arhan M., Speich S., Messager Ch., Dencausse G., Fine R., Boye M. Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. C. 11004. DOI: 10.1029/ 2OMJC 007140.

Sokolov S., Rintoul S.R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part 1: Mean circumpolar parts // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. C. 11018. DOI: 10.1029/2008J005108.

ENERGY INTERACTION OF THE JETS AND EDDIES OF ANTARCTIC CIRCUMPOLAR CURRENT IN THE NEAR-SURFACE LAYER OF THE SOUTHERN OCEAN

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

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: mnkoshl@ocean.ru,
rtarakanov@gmail.com
Submitted 27.02.2019, accepted 26.08.2019

Kinetic energy six jets of the Antarctic Circumpolar Current (ACC), and of synoptic eddies generated by these jets is studied in application to the near-surface layer of the Antarctic Circle on the base of the satellite altimeter data during 1993–2015. The main results of the study were as follows: a) prevalence of the energy of middle jet of the Subantarctic Current over energy of the rest ACC jets in the whole of the Antarctic Circle; b) five times excess of the mean energy of jets proper over the mean summary (cyclones plus anticyclones) energy of eddies; c) two times excess of mean energy of cyclonic eddies over energy of anticyclones.

Keywords: jets of the Antarctic Circumpolar Current, cyclonic and anticyclonic synoptic eddies, kinetic energy, sectors of the Antarctic Circle, Satellite altimetry

References

Arhan M., Speich S., Messager Ch., Dencausse G., Fine R., and Boye M. Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa. *J. Geophys. Res*., 2011, Vol. 116, pp. 11004, doi: 10.1029/ 2OMJC 007140.

Kamenkovich V.M. Baroclinic instability of large scale currents. In: Synoptic eddies in the ocean, Eds. V.M. Kamenkovich, M.N. Koshlyakov, A.S. Monin., Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987, pp. 138–160.

Koshlyakov M.N., Grachev Yu.M., Mikhailichenko Yu.G., Sazhina T.G., and Yaremchuk M.I. Generation of synoptic oceanic eddies in the POLIMODE region. *Okeanologiya,* 1984, Vol. 24, No. 1, pp. 5–14.

Koshlyakov M.N., Tarakanov R.Y., and Savchenko D.S. Energy exchange between jets of the Antarctic Circumpolar Current and synoptic eddies in the Drake Passage and Scotia Sea. *Okeanology*, 2018, Vol. 58, No. 3, pp. 347–357.

Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A., Frankingnoulle M., and Delille B. Fronts and Mesoscale Variability in the Southern Indian Ocean as Inferred from Altimetric Data of Topex/Poseidon and ERS-2. *Oceanology*, 2003, Vol. 58, No. 3, pp. 347–357.

Mirabel' A.P. and Monin A.S. Geostrophic turbulence. *Izv. Akad. Nauk SSSR,* 1980, Vol. 16, No. 10, pp. 1011–1023.

Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1982.

Sokolov S. and Rintoul S.R. The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part 1: Mean circumpolar parts. *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, pp. 11018, doi: 10.1029/2008J005108.

Tarakanov R.Y. On the revealing closed circulations on satellite maps of dynamic topography of the ocean surface. *Physics of Atmosphere and Ocean,* 2019, Vol. 55, No. 5, (in the press).