

А.И. Данилов, Л.М. Иванов, А.В. Клепиков, Т.М. Марголина

Анализ крупномасштабной динамики поверхностных вод Южного океана с помощью лагранжевых дрейфтеров

Суммируются результаты реконструкции среднемесячной поверхностной циркуляции в Южном океане по траекториям автономных дрейфующих буйев, запущенных в ходе Первого Глобального Эксперимента (ПГЭП) ПИГАП в 1978–1980 гг. Расчеты демонстрируют значительную межгодовую и сезонную изменчивость в поведении интегральных характеристик Антарктического Циркумполярного течения, западного продолжения Агульсого течения, зоны слияния Фолклендского и Бразильского течений и циклонических круговоротов морей Росса и Уэдделла. Установлено, что динамика крупномасштабной поверхностной циркуляции в Южном океане может быть описана двумя-тремя эмпирическими ортогональными модами. В целом наблюдается сильная корреляция между положениями областей с высокими значениями кинетической энергии течений и зонами поднятия дна.

Введение

В настоящее время существует целый ряд публикаций, в которых описываются современные представления о структуре поверхностной циркуляции в Южном океане и, прежде всего, внутри Антарктического Циркумполярного течения (АЦТ) и прилегающих к этому району регионах Южного океана [1–4]. Доминирующей характеристикой поверхностной циркуляции Южного океана является наличие АЦТ с двумя (а по мнению некоторых исследователей, тремя) фронтальными зонами, простирающимися от поверхности до дна океана и представляющими собой довольно узкие области высоких градиентов плотности и сильных течений. Основным движущим механизмом АЦТ являются самые мощные на Земле западные ветры, обнаруживаемые примерно между 45 и 55° ю.ш. Из-за расположения материков АЦТ является уникальным глобальным звеном, связывающим все главные океаны и, следовательно, ответственным за осуществление обмена массой, теплом, солью и другими свойствами между Атлантическим, Индийским и Тихим океанами. Поэтому является очень важным установление пространственного расположения Антарктического Циркумполярного течения и как можно более полное описание его структуры, пространственной и временной изменчивости.

Другой, не менее важной особенностью циркуляции Южного океана является существование в прибрежных морях, таких, как моря Уэдделла, Росса, Амундсена и Беллинсгаузена, системы специфических течений, обуславливающих перенос импульса, тепла и соли поперек антарктического шельфа. Наибольший интерес для исследования представляет море Росса, в котором располагается один из трех главных круговоротов южной полярной зоны Тихого океана и второй по величине шельфовый ледник Антарктиды. Другой интересный район — море Уэдделла, где периодически наблюдается существование незамерзающей области (полюньи Уэдделла), что, по-видимому, является следствием особенностей динамики поверхностного слоя моря.

© А.И. Данилов, Л.М. Иванов, А.В. Клепиков, Т.М. Марголина, 2003

Хотя в последние годы были предприняты интенсивные экспериментальные и теоретические исследования Южного океана в прибрежной зоне Антарктиды [5–9], представления о структуре циркуляции в этих районах еще далеки от идеальных.

Цель настоящей работы — основываясь на данных, собранных с автономных дрейфующих буев в 1978–1980 гг., оценить количественные характеристики крупномасштабной межгодовой и сезонной изменчивости поверхностных течений в Южном океане с пространственным разрешением $2 \times 2^\circ$, выделить наиболее энерго-активные районы и структуры поверхностной циркуляции.

Автономные буи, запущенные в Южный океан в ходе Первого Глобального Эксперимента ПИГАП¹ (ПГЭП) (в английской аббревиатуре *FGGE*) [10], позволили собрать уникальную информацию о поверхностной циркуляции в Южном полушарии. Ранее попытки рассчитать ее количественные характеристики предпринимались в [11–15]. Однако по причине несовершенства используемых в этих работах математических методов представленные в них результаты в основном ограничиваются реконструкцией среднегодовых течений с грубым пространственным разрешением $5 \times 5^\circ$.

Процедура реконструкции

Поле поверхностной циркуляции было реконструировано на основе подхода, развитого в [16]. В соответствии с этой работой скорость поверхностной циркуляции $\vec{u} = \{u, v\}$ представлялась через два скалярных потенциала: функцию тока и потенциал скорости, которые вводились на основании теоремы Гельмгольца как

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \times (\vec{k}\Psi) + \vec{\nabla}\Phi, \quad (1)$$

где $\vec{k}$ — внешняя нормаль к поверхности океана.

Непосредственно процедура реконструкции, основанная на (1), состояла из нескольких последовательных шагов. Реальные траектории буев предварительно были отфильтрованы с помощью сглаживающих сплайнов [17] с тем, чтобы исключить особенности на траекториях, пространственное разрешение которых хуже, чем $2 \times 2^\circ$.

Затем для каждого месяца среднемесячная геострофическая функция тока была представлена в виде

$$\Psi = C_1 \Psi_{garm}^{(1)} + C_2 \Psi_{garm}^{(2)} + \sum_{k=0}^K A_k \Psi_k, \quad (2)$$

где $\Psi_{garm}^{(1)}$, $\Psi_{garm}^{(2)}$ — гармонические функции; Ψ_k — собственные функции сферического оператора Лапласа, определенного в области, ограниченной с севера береговыми контурами Южной Америки, Африки, Австралии, о-ва Мадагаскар и линией, проходящей по параллели 20° ю.ш., а с юга — береговой линией Антарктического материка. Также были учтены береговые очертания Новой Зеландии.

¹ ПИГАП — Программа исследования глобальных атмосферных процессов.

Согласно [16], гармонические функции удовлетворяли уравнению Лапласа со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \Psi_{garm}^{(1)} \Big|_{\Gamma} &= 0, \Psi_{garm}^{(1)} \Big|_{\Gamma_1} = 1, \Psi_{garm}^{(1)} \Big|_{\Gamma_2} = 0, \\ \Psi_{garm}^{(2)} \Big|_{\Gamma} &= 0, \Psi_{garm}^{(2)} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \Psi_{garm}^{(2)} \Big|_{\Gamma_2} = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Константы C_1 , C_2 и коэффициенты A_k в (2) для каждого месяца определялись из решения следующих минимизационных задач:

$$J_i = \sum_{p=1}^{P_i} \int_{T_i} \left[U_{\varphi}^p(t) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \right]^2 + \left[U_{\lambda}^p(t) - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right]^2 dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где θ , λ — сферические координаты (дополнение до широты и долгота); R — радиус Земли; $U_{\varphi}^p(t)$ и $U_{\lambda}^p(t)$ — компоненты вектора скорости вдоль траектории p -го буя; T_i — продолжительность i -го месяца в сутках, P_i — количество буюв, используемых для реконструкции циркуляции в i -й месяц, которое уменьшилось с 240 до 75 с декабря 1979 г., по июль 1980 г.

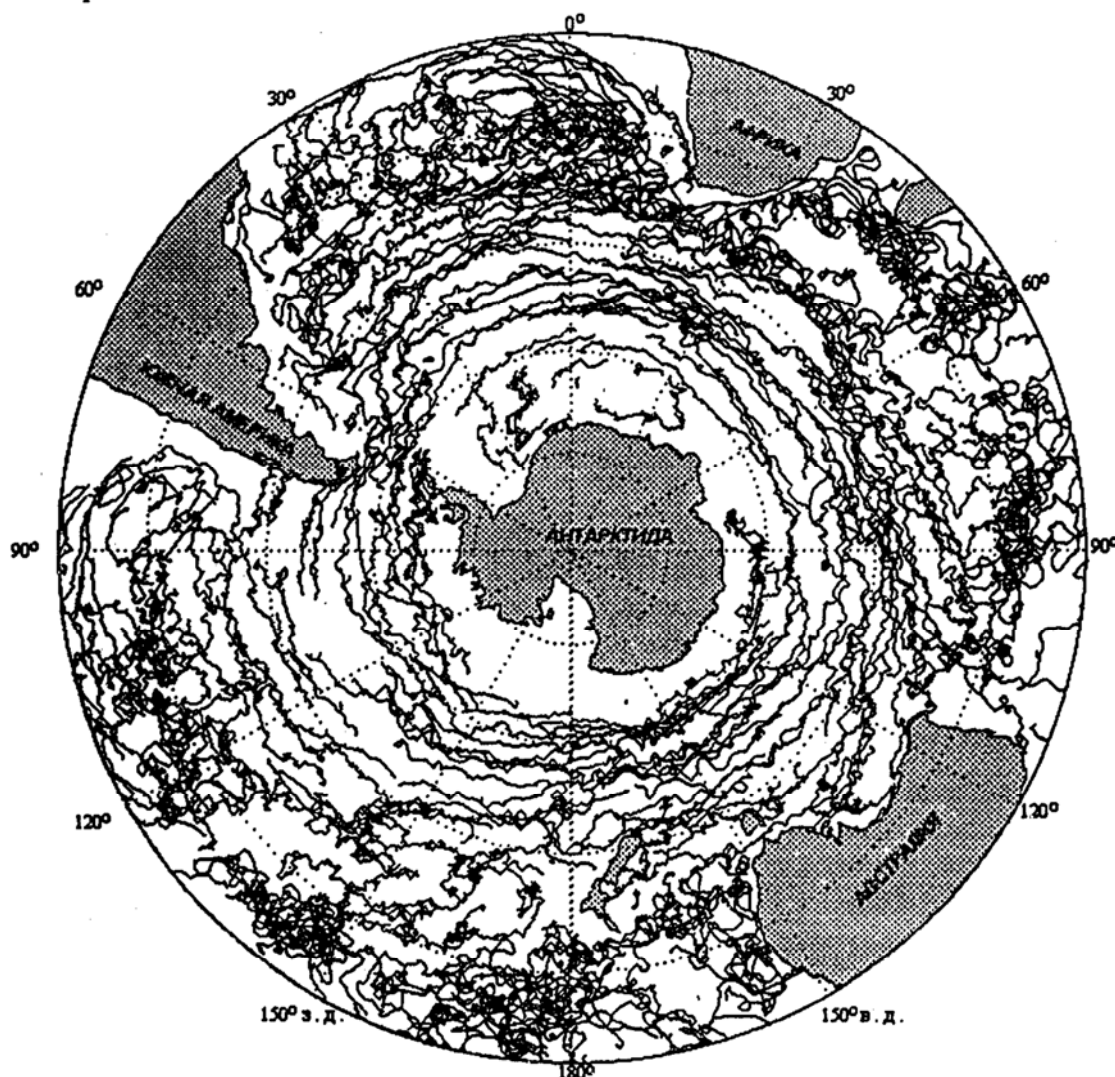
После расчета спектральных коэффициентов A_k , постоянных C_1 и C_2 и оценки числа мод K , которое является входным параметром модели (2) и (3), реконструировано поле поверхностной циркуляции на регулярной сетке $2 \times 2^\circ$ для каждого из 20 месяцев, начиная с декабря 1978 г. Нормальная система уравнений, соответствующая (4), была решена методом *singular value decomposition* (SVD). Регуляризация достигалась с помощью выбора оптимального количества мод K на основании критерия Червонкинса — Вапника [18]. Для компактного представления результаты реконструкции поверхностной циркуляции были осреднены по соответствующим сезонам. Выбор 90-дневного осреднения основан на теории ветровой циркуляции, спектральной структуре поля ветра Южного океана, кумулятивных средних скоростей и энергии движения буюв, а также на графиках реконструированной средней циркуляции [14].

Выбор математического подхода (1)–(4) для анализа дрефтерной информации объясняется следующими причинами. Во-первых, в отличие от методов, традиционно используемых в океанографии для реконструкции циркуляции по лагранжевым данным (оптимальная интерполяция, сплайны, вариационные методы и др.), этот подход позволяет восстановить циркуляцию в областях, где данные измерений вообще отсутствуют. Например, была реконструирована сезонная изменчивость поверхностной циркуляции в морях Росса и Уэдделла с использованием наблюдений, собранных севернее 70° ю.ш. Во-вторых, поскольку задача восстановления циркуляции по дрефтерным данным является некорректной, она допускает существование множества решений. В используемом алгоритме выбор оптимального решения осуществлялся на основании критерия Червонкинса — Вапника. Такое решение устойчиво для выборок ограниченного объема.

Данные наблюдений

При выполнении работы использовались собранные в Южном океане в период с декабря 1978 г. по июль 1980 г. данные со спутников *NOAA-6* и *TIROS-N* с телеметрической системой *ARGOS*. Эти данные были представлены Мировым Центром данных США (А, Океанография). Исходный массив содержал последовательные часовые отсчеты позиций 359 буюв – широты φ и долготы λ , округленных до ближайшей сотой доли градуса. Пространственная ошибка в определении координат буюв не превышала $\pm 0,3$ км. Абсолютное большинство отсчетов с буюв получали 6 – 30 раз в день через неравномерные промежутки времени.

На рис. 1 представлена сводная карта 289 отобранных для анализа траекторий дрейфующих буюв, время работы которых превышало 3 мес. К сожалению, мы не имели информации, как быстро дрейфующие буюв теряли свои паруса. В современной литературе имеются разноречивые мнения относительно того, насколько сильно отличаются в дрейфе буюв с парусом, выставленным на 15-метровой глубине, и без него [10, 11]. Предполагалось, что если буюв терял парус, то это вносило дополнительную ошибку в определение его координат.



Р и с. 1. Траектории дрейфующих буюв ПГЭП, использованные при реконструкции поверхностной циркуляции в Южном океане (декабрь 1978 г. – июль 1980 г.)

Поверхностная скорость дрейфующего буя определялась как

$$\vec{U}_{\text{буй}} = \vec{U}_{\text{геостр.}} + \vec{U}_{\text{экм.}} + \vec{U}_{\text{сток.}} + \vec{U}_{\text{парус.}} + \vec{U}_{\text{поз.}}, \quad (5)$$

где $\vec{U}_{\text{геостр.}}$, $\vec{U}_{\text{экм.}}$ и $\vec{U}_{\text{сток.}}$ — геострофическая, экмановская и стокова компоненты скорости, а $\vec{U}_{\text{парус.}}$ и $\vec{U}_{\text{поз.}}$ характеризовали действие ветра на выступающий корпус буя и позиционную ошибку в определении его координат.

В [11] показано, что для Южного океана геострофическая компонента в среднем дает вклад в поверхностную циркуляцию до 70%. В настоящей работе мы оценили только геострофическую компоненту циркуляции, отфильтровывая ее агеострофическую компоненту как ошибку наблюдений.

Структура крупномасштабной циркуляции

Мы оценили качество реконструкции в свете существующих представлений о системе течений в Южном полушарии. Среднегодовая циркуляция в Южном океане, взятая из [1, 4, 19–21], и среднегодовая циркуляция, рассчитанная по результатам реконструкции, изображены на рис. 2 и 3 соответственно. Чтобы получить адекватное сравнение этих рисунков, мы совместили на рис. 3 карты геострофической функции тока и донной топографии, на которых АЦТ определяется непрерывными линиями тока, проходящими через пролив Дрейка. Границы АЦТ изображены жирными линиями.

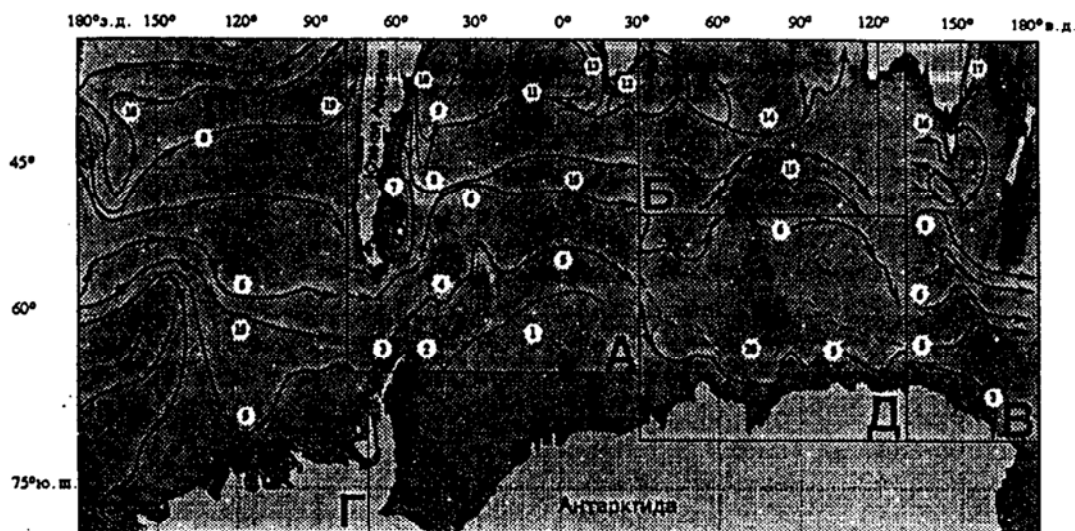
Визуальный анализ рис. 3 показывает, что на нем достаточно хорошо воспроизведены АЦТ, мощные антициклонические субтропические круговороты севернее АЦТ; течения, образующие западные (Агульясово, Бразильское и Восточно-Австралийское) и восточные (Западно-Австралийское, Бенгальское и Перуанское) ветви этих круговоротов. Также отчетливо наблюдается узкое Антарктическое прибрежное течение, направленное на запад вдоль континентального склона Антарктиды. Это течение, не являясь полностью циркумполярным, участвует в формировании южных ветвей циклонических круговоротов Уэдделла и Росса.

Сезонные особенности в эволюции крупномасштабной циркуляции

Результаты расчетов позволили установить некоторые, не отмечавшиеся ранее, особенности сезонной изменчивости поверхностной циркуляции в Южном океане (рис. 4).

Во-первых, в 1978–1980 гг. зона слияния Фолклендского и Бразильского течений мигрировала только между 40 и 45° ю.ш. В соответствии с расчетами Бразильское течение не проникало в АЦТ, достигая 48° ю.ш., как это предполагалось в [2].

Во-вторых, отчетливо наблюдается сезонная изменчивость системы течений в районе южной оконечности Африки, что выражается в сложном изменении положения точки поворота Агульясова течения. Зона поворота Агульясова течения (или его западное продолжение) смещалась от южной оконечности о. Мадагаскар, где она находилась летом и осенью 1979 г., на юго-запад, достигая 20–25° в.д. зимой и весной этого же года. Затем первоначальное положение зоны расширения восстанавливалось к осени 1980 г.



А [4]

- 1 - круговорот моря Уэдделла
- 2 - фронт моря Уэдделла
- 3 - граница континентальных вод
- 4 - фронт моря Скотта
- 5 - южная граница АЦТ
- 6 - полярный фронт
- 7 - Фолклендское течение
- 8 - субантарктический фронт
- 9 - фронт Бразильского течения
- 10 - Бразильское течение
- 11 - Южно-Атлантическое течение
- 12 - Агульасово течение
- 13 - Бенгальское течение

Б [19]

- 14 - Южно-Индийское течение
- 15 - АЦТ

В [20]

- 16 - Тасманское течение
- 17 - расширение Восточно-Австралийского течения

Г [1]

- 18 - Южно-Тихоокеанское течение
- 19 - Перуанское течение

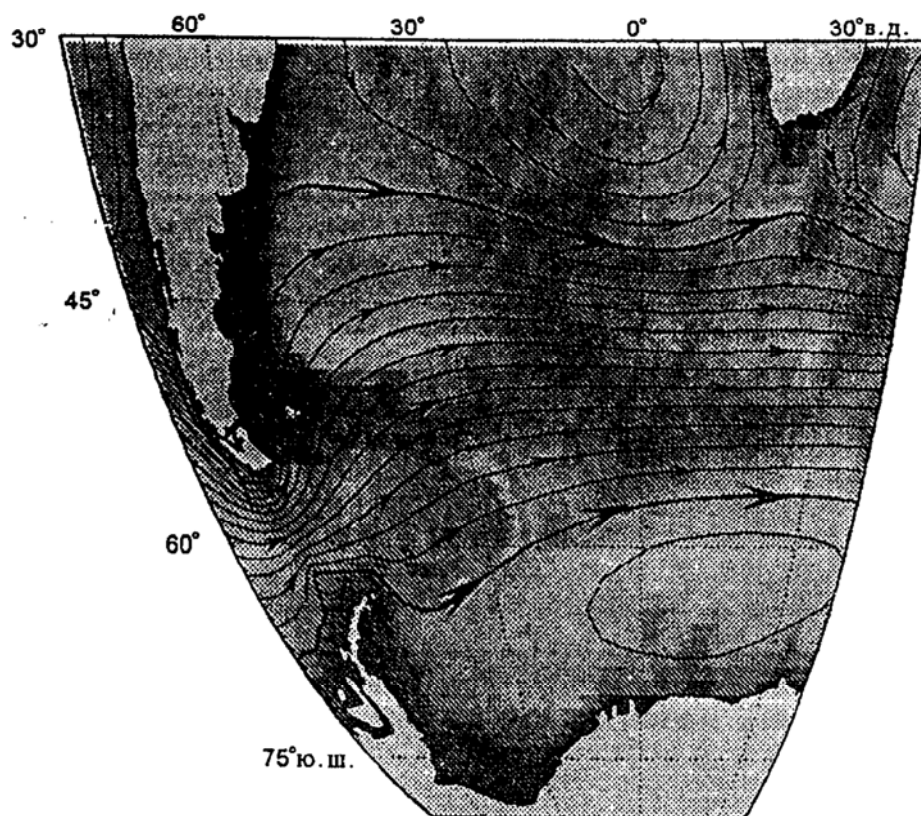
Д [21]

- 20 - южный фронт АЦТ

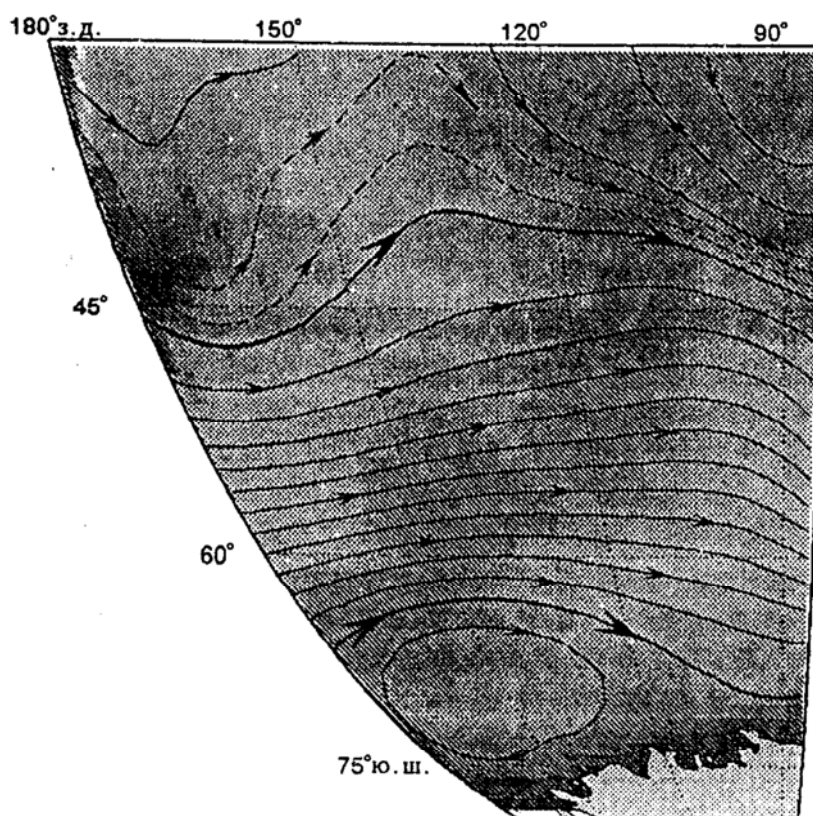
Р и с. 2. Структура крупномасштабной поверхностной циркуляции в Южном океане (воспроизведена по данным различных авторов)

В сезоны, когда точка поворота находилась в крайнем западном положении, наблюдалось узкое прибрежное течение между Индийским и Атлантическим океанами. В Атлантическом океане оно смыкалось с Бенгальским течением. Подобное поведение Агульасова течения также фиксируется на спутниковых снимках в ИК- и ТВ-диапазонах [4, 22].

В-третьих, было обнаружено интенсивное проникновение АЦТ в Тихий океан в осенне-зимний период. В этом случае квазизональное течение рас пространялось до 30° ю.ш. при значительном увеличении поперечных размеров АЦТ. Особенно сильно подобное расширение наблюдалось зимой 1980 г.

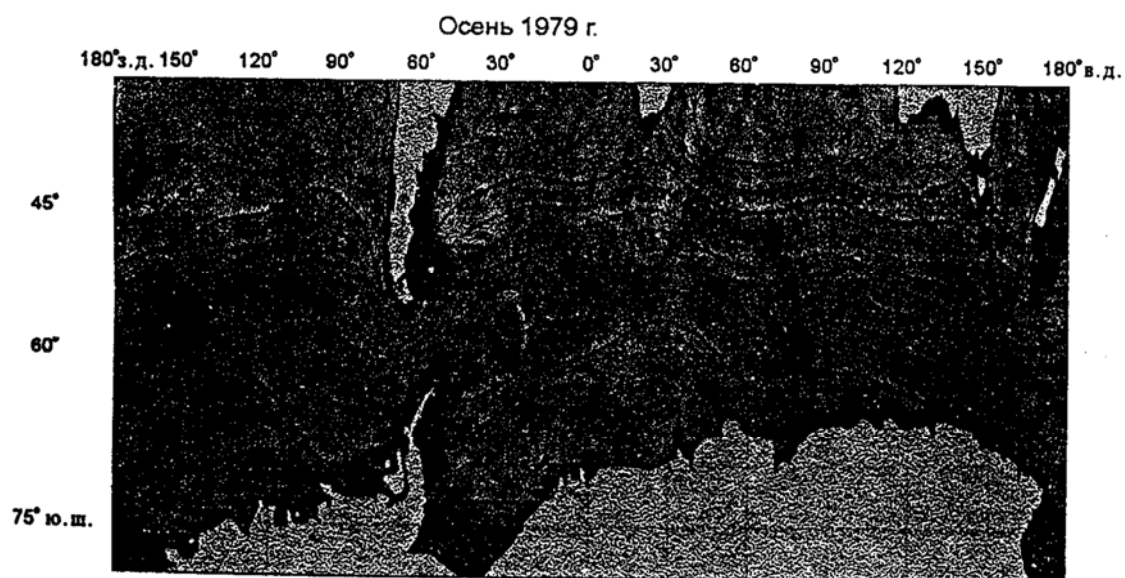
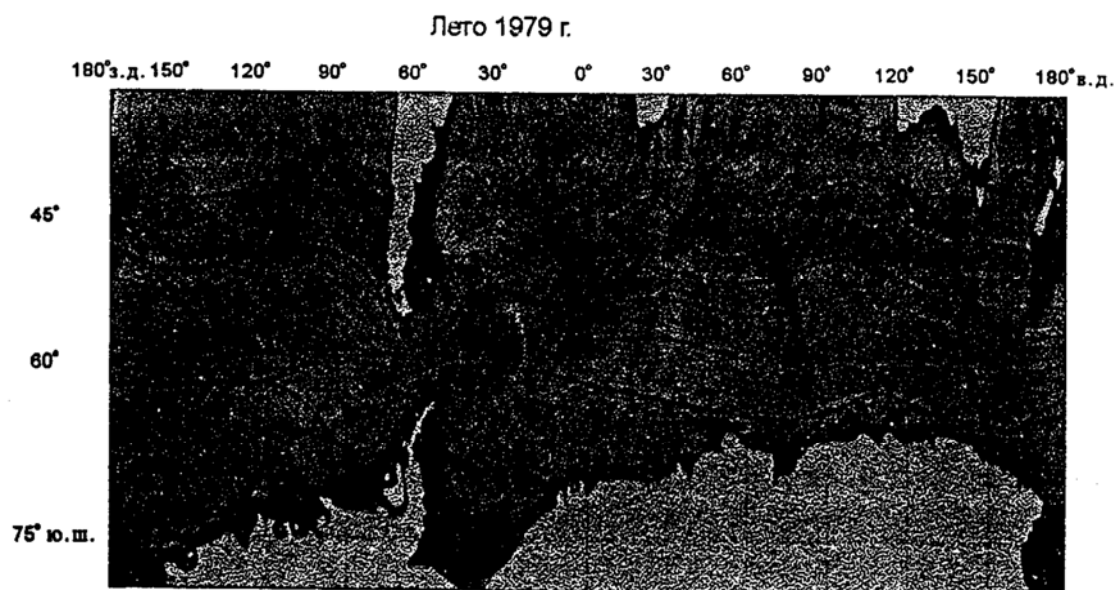


а

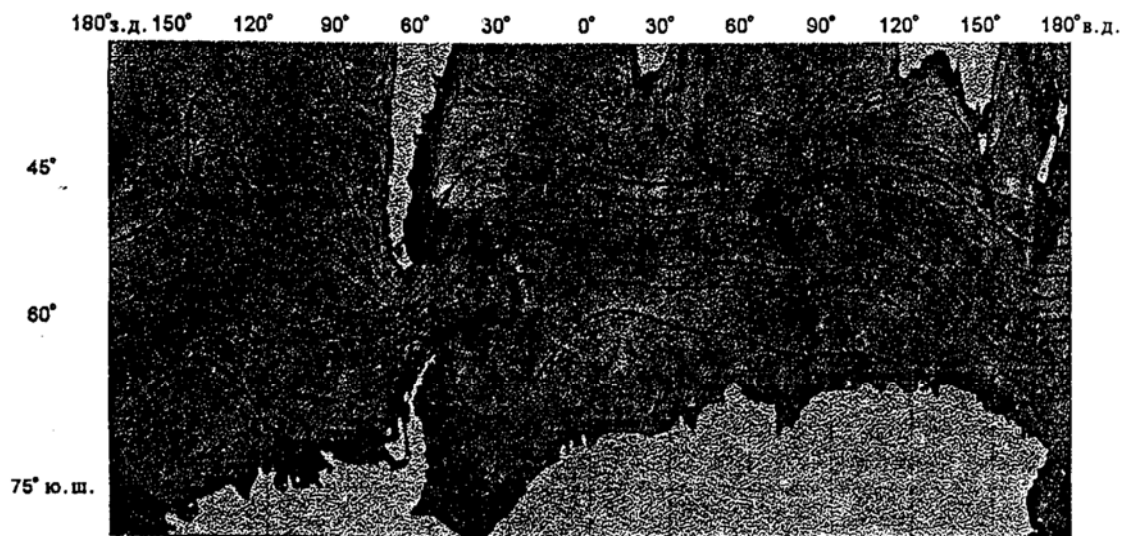


б

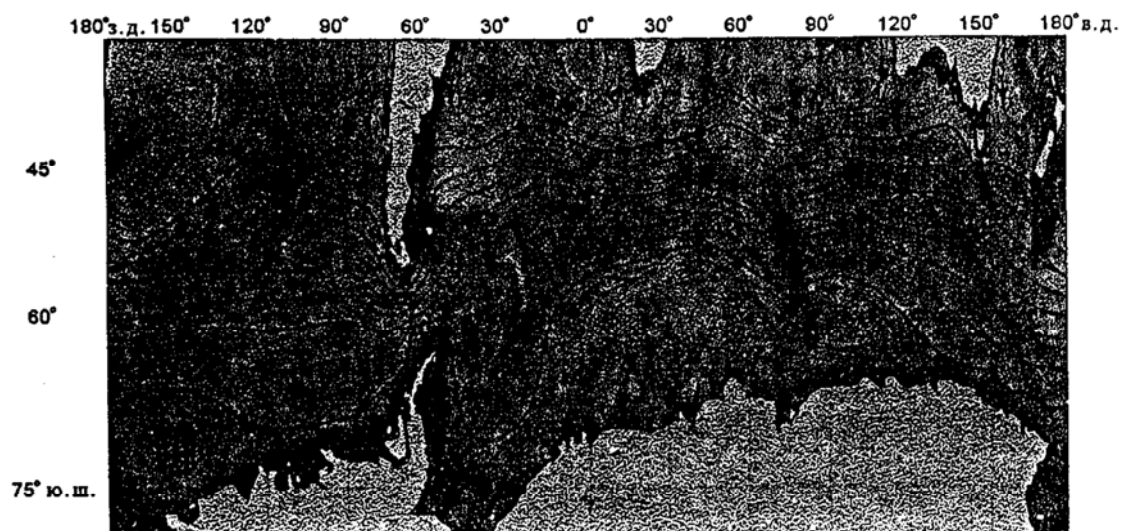
Р и с. 3. Среднегодовая циркуляция, воспроизведенная по данным с автономных дрейфующих буев, в атлантическом (а) и тихоокеанском (б) секторах Южного океана



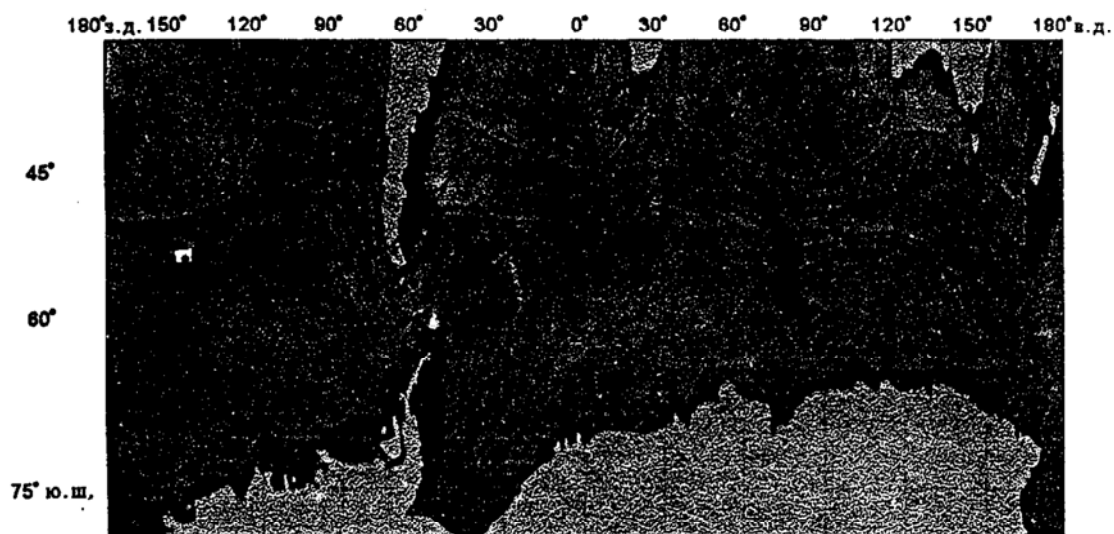
Зима 1979 г.



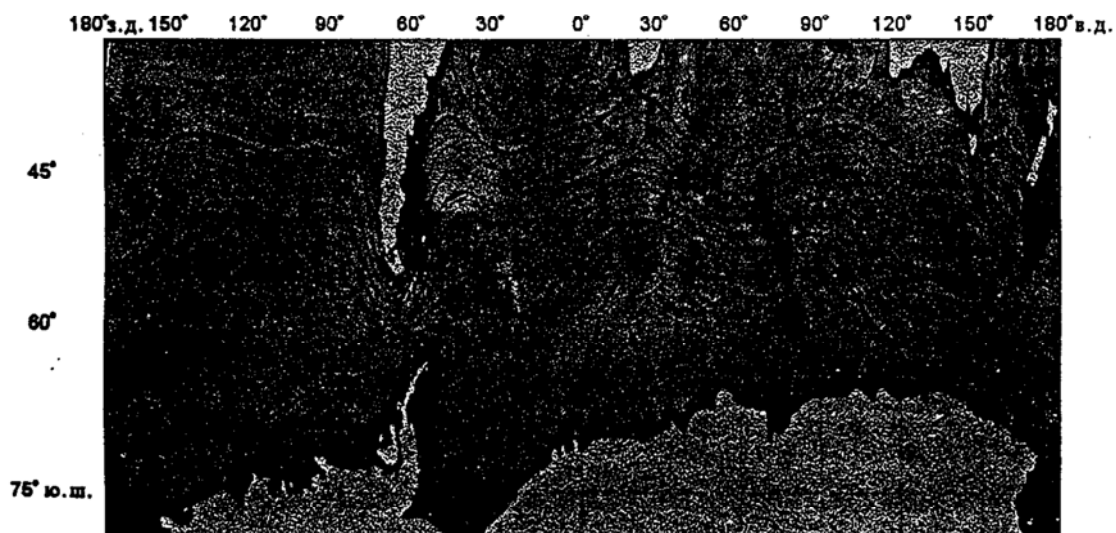
Весна 1979 г.

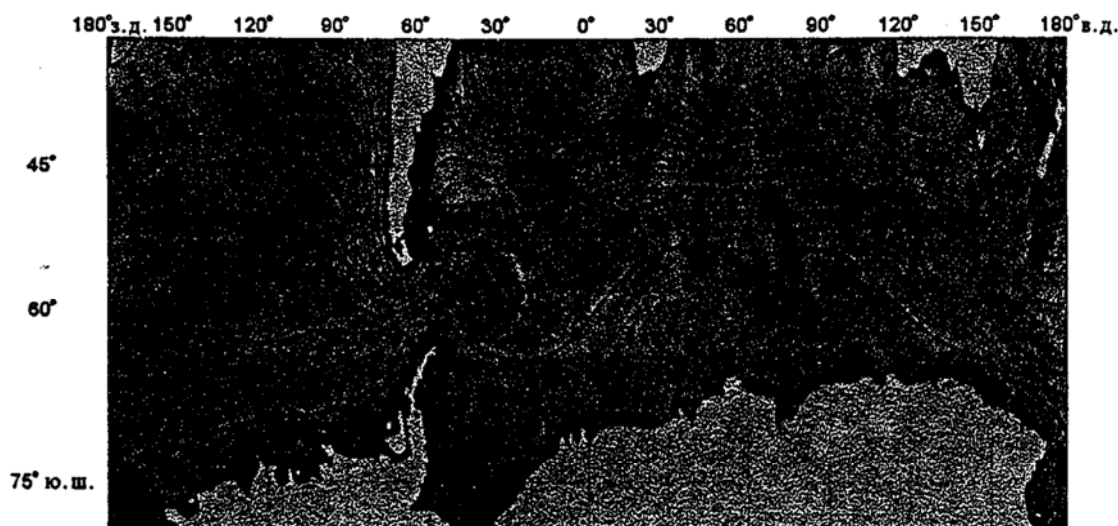


Лето 1980 г.



Осень 1980 г.





Р и с. 4. Межгодовая и сезонная изменчивость поверхностной циркуляции в Южном океане (границы АЦТ изображены жирными линиями; здесь и далее использованы времена года Южного полушария)

В-четвертых, новый метод реконструкции течений по данным дрейфующих буюв позволил получить представление о поверхностной циркуляции (непосредственно отражающей ветровое воздействие на море) и ее сезонной изменчивости в круговороте Уэдделла. Ранее представления о поверхностной циркуляции в этом районе основывались на редких данных по дрейфу льдов и айсбергов. Расчеты показали, что в поверхностном слое циклоническая циркуляция круговорота Уэдделла очень изменчива и круговорот, смещаясь на восток, может охватывать весь индийский сектор Южного океана, так что восточная граница круговорота достигает $100\text{--}120^\circ$ в.д.

Круговорот, восстановленный в море Росса, также отчетливо виден с лета 1979 г. по лето 1980 г. Его отсутствие в поле циркуляции осенью-зимой 1980 г. объясняется слишком незначительным количеством буюв, используемых в реконструкционном процессе.

В соответствии с нашими расчетами оба круговорота интенсивно взаимодействуют со струей АЦТ: летом, когда энергия АЦТ минимальна, круговороты увеличиваются в размерах; зимой — уменьшаются, что сопровождается их интенсификацией.

Заметим, что в настоящих расчетах учитывалась только геострофическая компонента циркуляции. Кроме того, дрифтеры отсутствовали в областях, занятых льдами в морях Уэдделла и Росса. Однако использованная математическая техника достаточно хорошо воспроизвела структуру обоих круговоротов и их сезонное поведение.

Необходимо отметить, что анализ циркуляции зимой и весной 1979 г. в море Уэдделла выявил фиктивный меандр АЦТ, смещающийся к югу. Оценки, проведенные в [5], показали, что в этой части моря Уэдделла агеострофическая компонента течения может содержать до 50 – 60% полной кинетической энергии циркуляции. Настоящие расчеты не учитывали агеострофическую компоненту течения. Этим можно объяснить странность в поведении меандра АЦТ.

Соотношение между геострофической и агеострофической компонентами

Как было отмечено выше, геострофическая компонента в среднем по Южному океану составляет $\sim 70\%$ от полной поверхностной циркуляции. Предполагалось, что агеострофическая циркуляция является «шумом» в настоящих расчетах и должна быть отфильтрована математической процедурой. Поэтому после реконструкции представляет значительный интерес оценить соотношение между геострофической и агеострофической компонентами течения. Это можно сделать, проанализировав поведение во времени среднеквадратичной ошибки аппроксимации поля скорости вдоль траекторий буев с помощью геострофической функции тока χ_1 . Поведение $\chi_1^{1/2}$ изображено на рис 5, а. Из этого рисунка следует, что в среднем величина ошибки аппроксимации действительно составляла $\sim 30\%$, что хорошо согласуется с оценками из [11]. Поэтому можно утверждать, что наш математический подход действительно позволил эффективно отфильтровать агеострофическую компоненту из данных наблюдений.

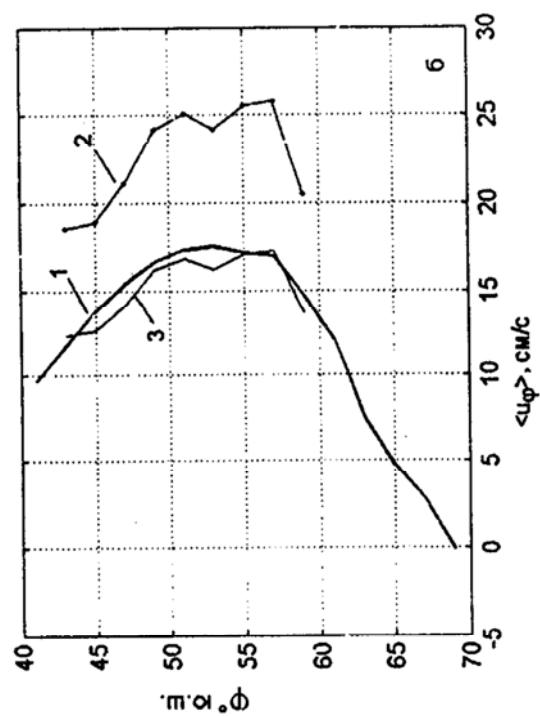
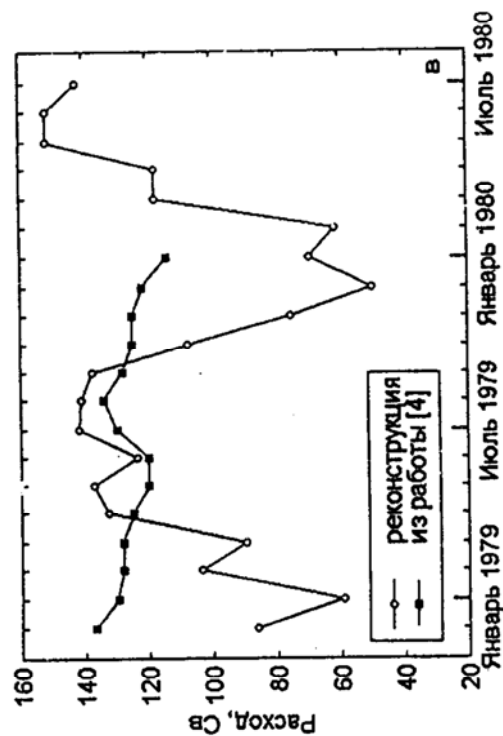
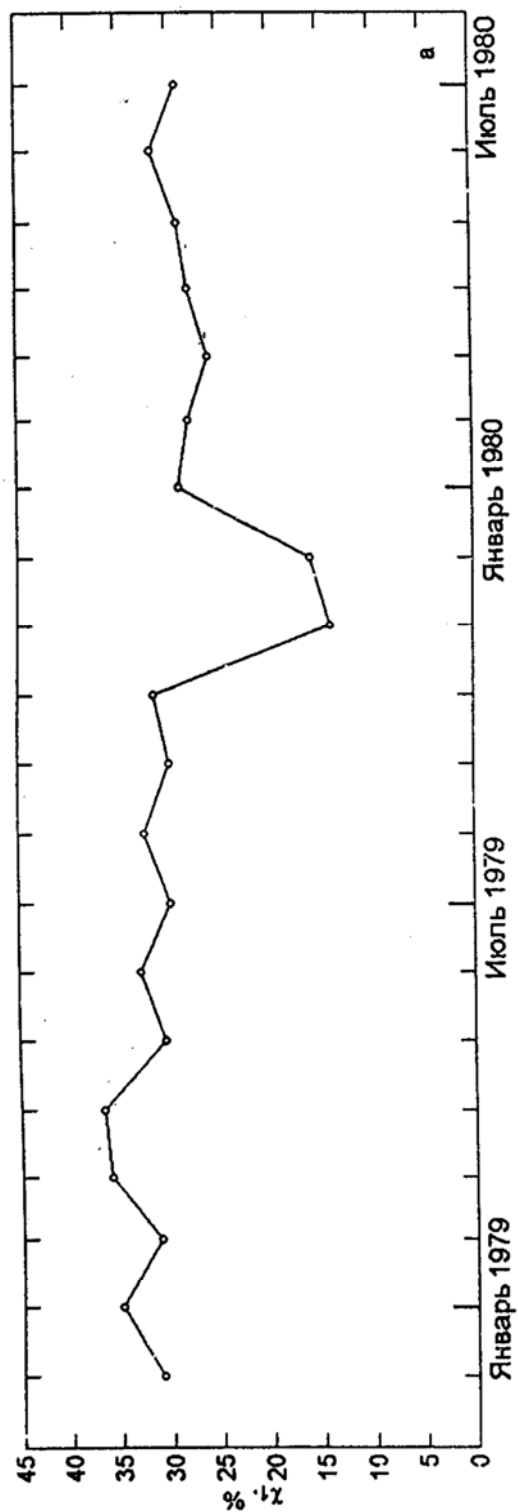
Энергетика поверхностных течений

Средняя по всей расчетной области кинетическая энергия (СКЕ) составила $123 \text{ см}^2/\text{с}^2$. В работе [24] приведено значение $140 \text{ см}^2/\text{с}^2$, рассчитанное по тем же данным, но с помощью другого метода. Такое различие в оценках объясняется тем, что мы учитывали только геострофическую компоненту течений.

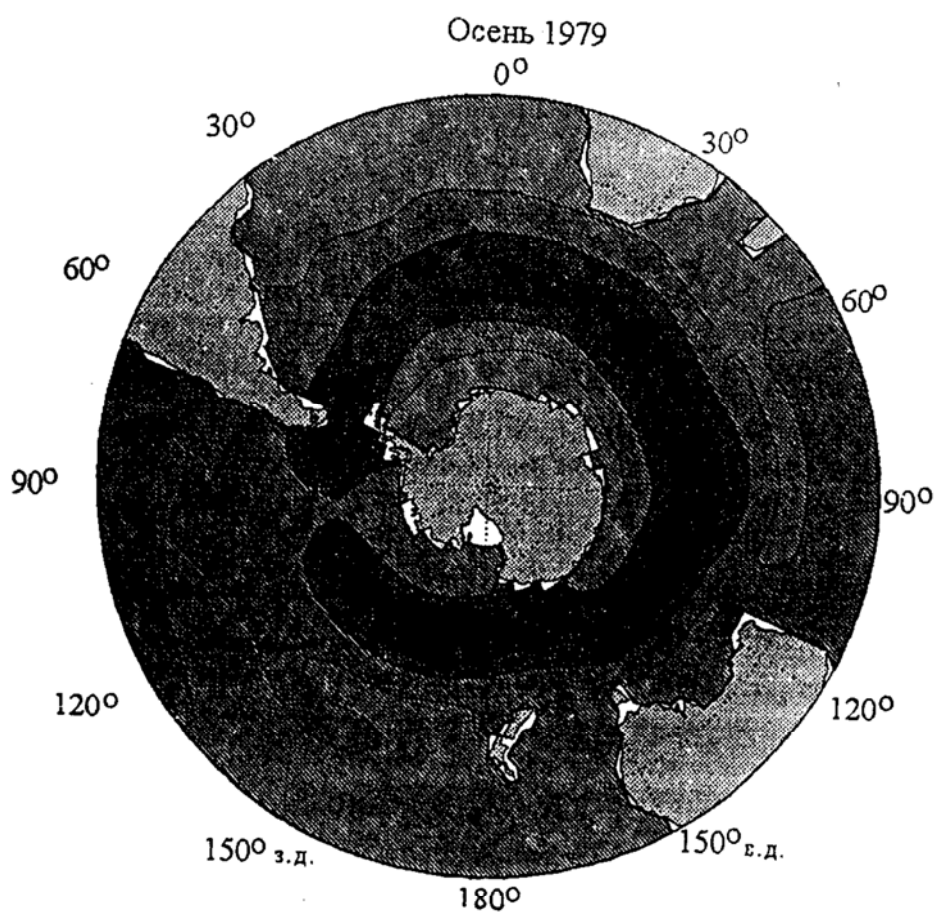
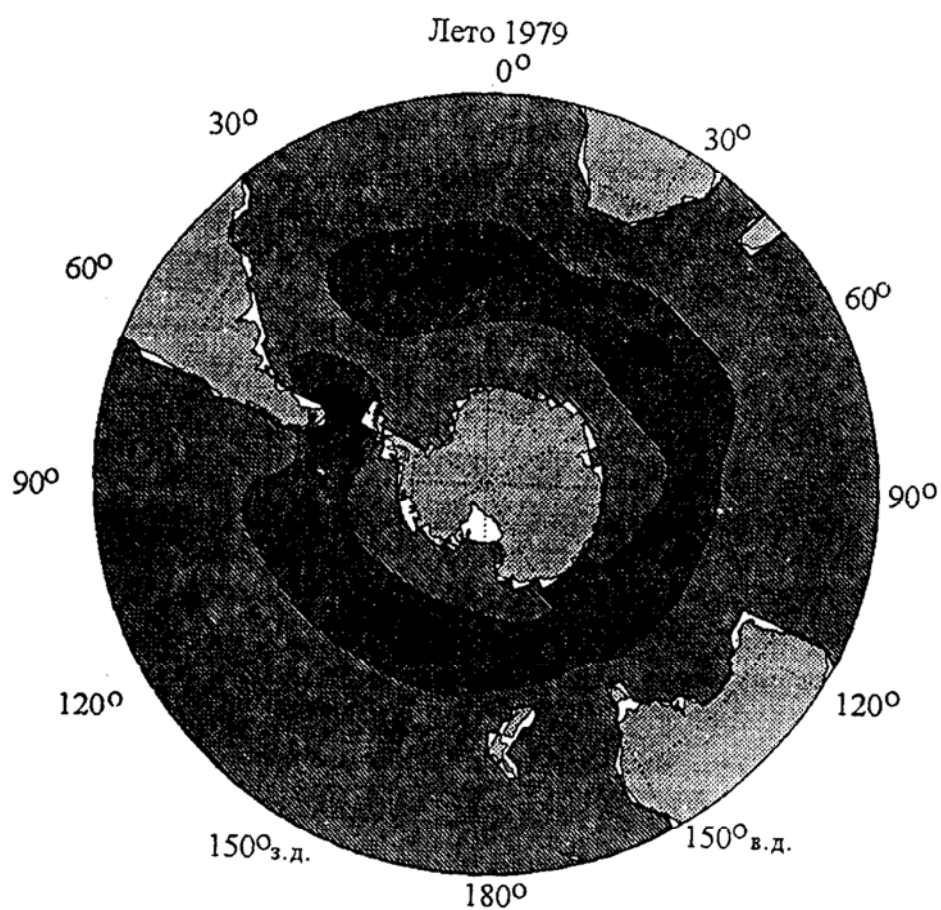
Отметим основные особенности в распределении СКЕ в Южном океане (рис. 6). В основном, в индийском секторе Южного океана зоны максимальных значений СКЕ соответствуют трем поднятиям океанического дна – плато Крозе и Кергелен и Центральному Индийскому хребту, что проявляется в существовании областей со значениями СКЕ $\sim 400 \text{ см}^2/\text{с}^2$.

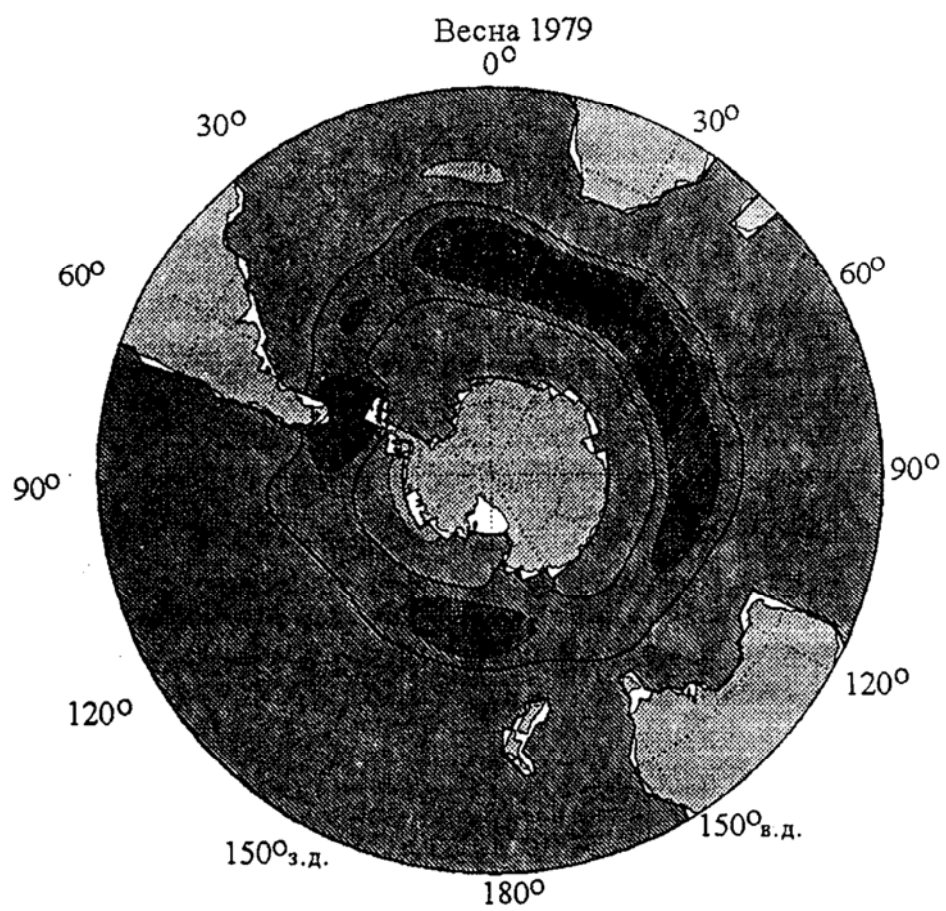
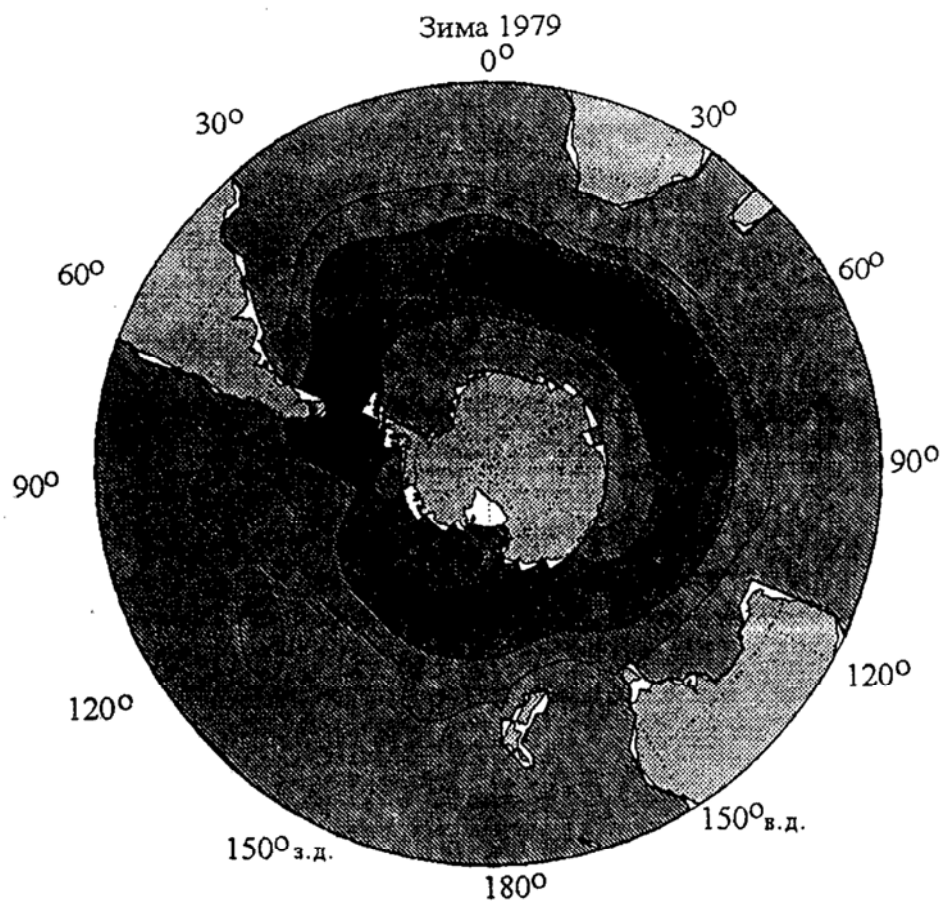
Большую часть дна тихоокеанского сектора Южного океана занимают глубокие Южная котловина и котловина Беллинсгаузена, отличающиеся достаточно ровным рельефом. Судя по пространственному распределению СКЕ, основные зоны интенсификации АЦТ в этом секторе связаны с Восточно-Тихоокеанским поднятием в районе восточнее 120° з.д. на широтах $55 - 60^\circ$ ю.ш. Кинетическая энергия здесь достигала $270 \text{ см}^2/\text{с}^2$. Особенно четко эти зоны прослеживались с октября по декабрь, когда СКЕ в них превышала $350 \text{ см}^2/\text{с}^2$. Наиболее высокие значения СКЕ наблюдаются в районе пролива Дрейка в течение всего года.

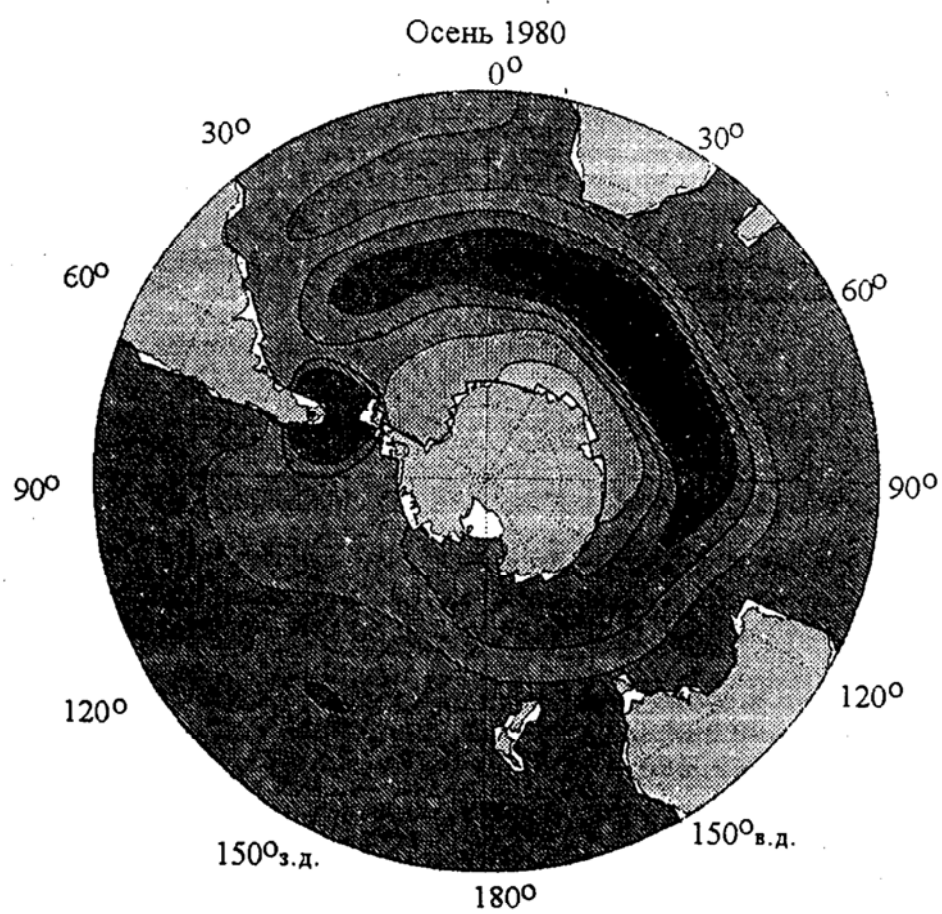
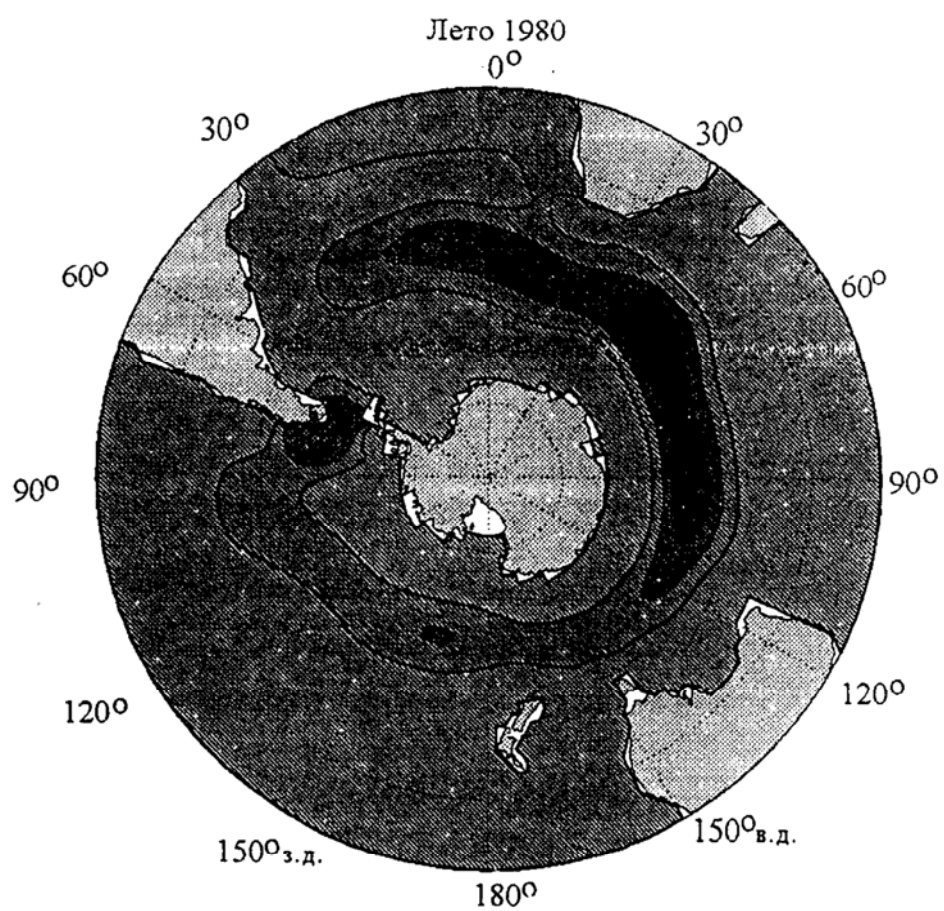
В атлантическом секторе Южного океана можно выделить зоны повышенных кинетических энергий, расположенные восточнее Срединно-Атлантического хребта в районе $\sim 10^\circ$ в.д. В этих зонах наблюдалась интенсификация АЦТ, которая слабо зависела от сезона. Другой максимум в пространственном распределении СКЕ отмечается южнее возвышенности Риу-Гранди (около 30° в.д.), в зоне Фолклендско-Бразильской конвергенции.

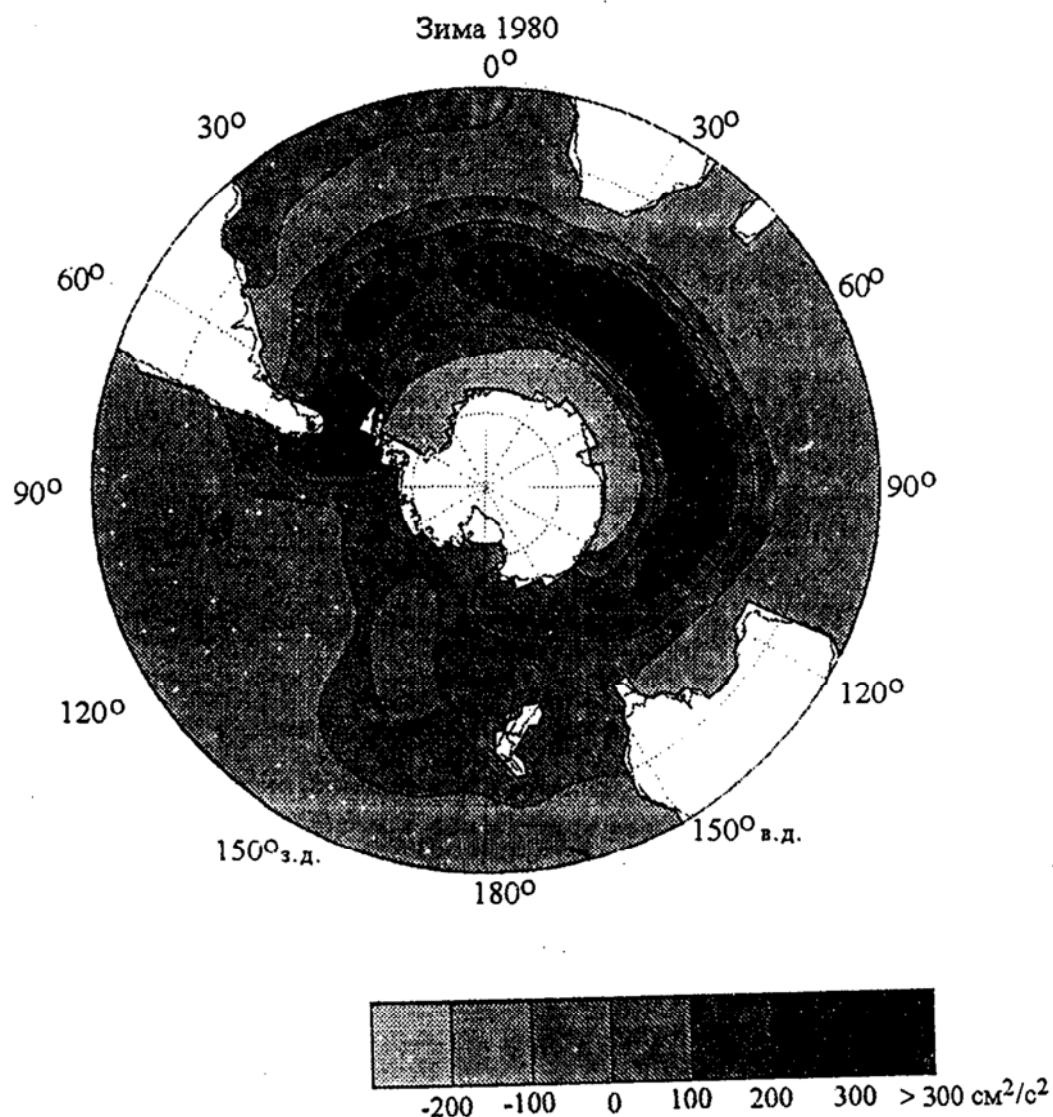


Р и с. 5. Критерии оценки точности реконструкции поверхностной циркуляции в Южном океане: а – $\langle u_z \rangle$; б – меридиональное распределение зонально осредненной зональной компоненты циркуляции $\langle u_z \rangle$: 1 – по настоящим результатам, 2 – рассчитанное в соответствии с [23], 3 – то же, что и 2, но без учета агеострофической компоненты; в – сравнение расходов через пролив Дрейка, рассчитанных по настоящим результатам и взятых из [4]





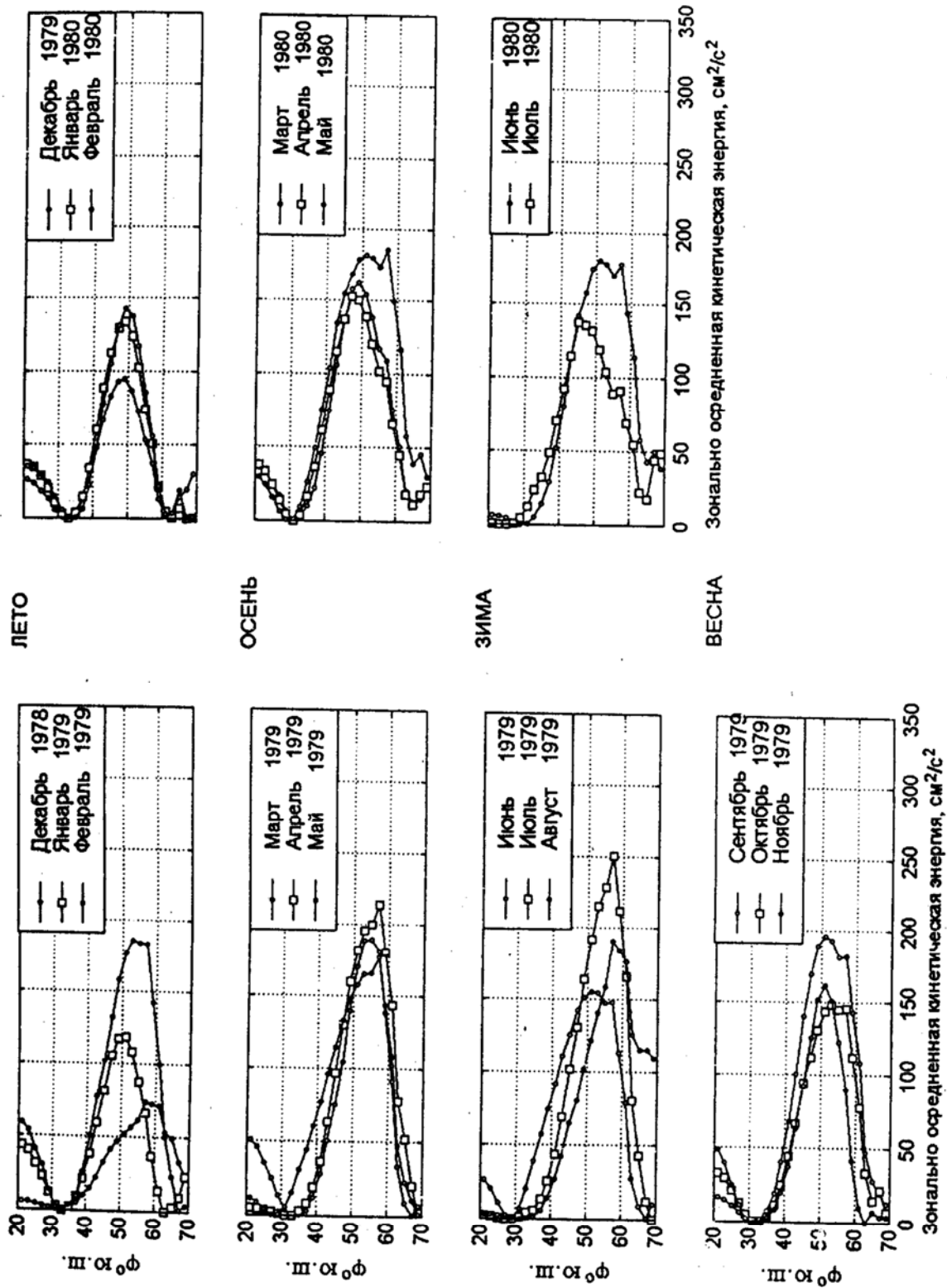




Р и с. 6. Межгодовая и сезонная изменчивость средней кинетической энергии в Южном океане, рассчитанной по реконструированным течениям

В целом основная кинетическая энергия сосредоточена в узком кольце, вытянутом вдоль стрежня АЦТ. Сезонный и межгодовой ход зонально осредненной энергии этого течения представлен на рис. 7. Здесь отчетливо наблюдается резкая интенсификация АЦТ в зимний период, до $250 \text{ см}^2/\text{с}^2$. Заметим также, что в осредненном зональном профиле кинетической энергии слабо выражена многоструйность этого течения, что говорит о его значительной перемежаемости.

Данные расчеты позволили подтвердить гипотезу С.Л. Паттерсона о корреляции между положениями максимумов вихревой кинетической энергии (ВКЕ, и поднятиями дна в Южном океане [12]. Здесь ВКЕ определялась как разница между зонально осредненной кинетической энергией и СКЕ. Например, подобная корреляция отчетливо видна на рис. 8. Максимальные значения ВКЕ наблюдались в проливе Дрейка, в районе Австрало-Антарктического поднятия, Антильского и Южно-Атлантического хребтов.



Р и с. 7. Межгодовая и внутрigoдовая изменчивость меридионально осредненной полной кинетической энергии циркуляции в Южном океане

Выделение энергодоминирующих структур в поверхностной циркуляции

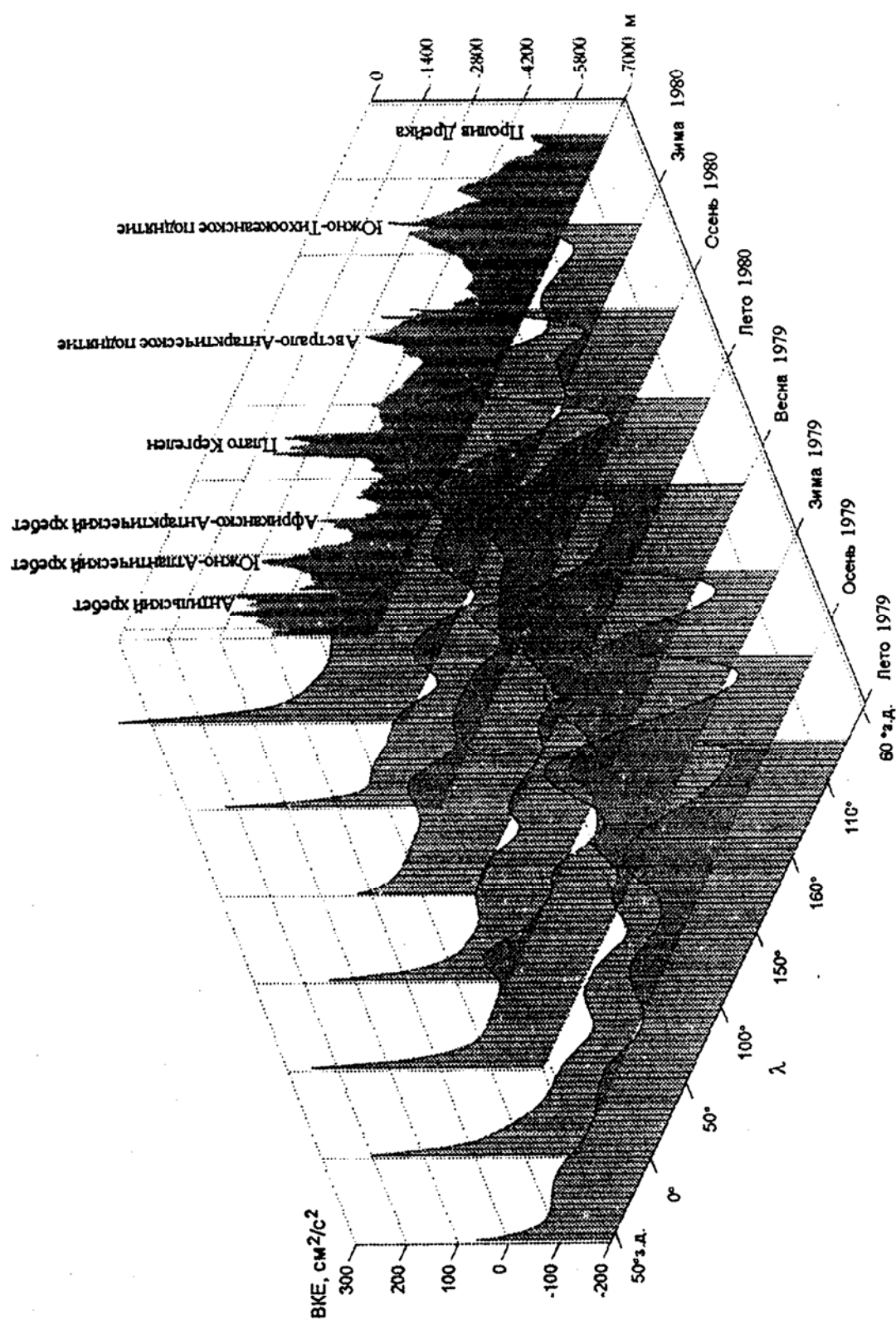
Анализ пространственно-временной структуры поверхностной циркуляции Южного океана был проведен с помощью эмпирических ортогональных мод, рассчитанных в соответствии с методикой из [25]. Обнаружено, что динамика циркуляции должна неплохо описываться первыми двумя, максимум тремя эмпирическими ортогональными модами. Пространственная структура первой моды изображена на рис. 9, а. Она имеет собственное значение $\lambda_1 = 8,4 \cdot 10^5$ и доминирует на протяжении всех 20 месяцев, для которых проводились расчеты. Среднеквадратичная ошибка аппроксимации циркуляции $\chi_2^{1/2}$ только с помощью первой моды составляла 2 – 15% в зависимости от сезона (рис. 10, а). АперIODичность в поведении амплитуды этой моды отчетливо видна на рис. 10, б.

Учет второй эмпирической моды, имеющей собственное значение $\lambda_2 = 8,0 \cdot 10^3$, позволяет существенно уменьшить среднеквадратичную ошибку $\chi_2^{1/2}$ для летнего периода (рис. 10, а). Пространственная структура этой моды изображена на рис. 9, б.

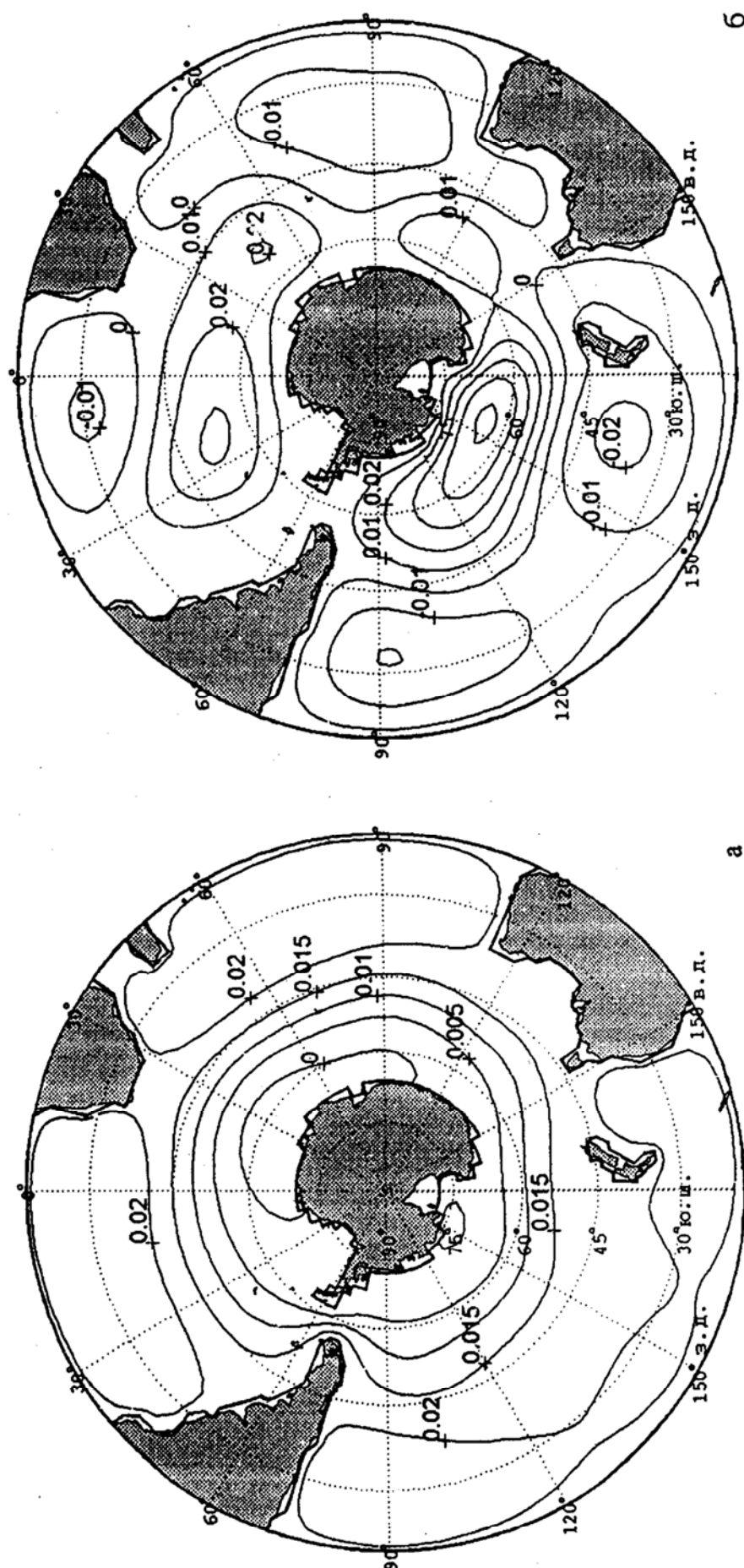
Вклад остальных эмпирических мод значительно меньше, т. к. $\lambda_1, \lambda_2 \gg \lambda_i, i = 3, \dots, 20$. Большая дисперсия первой эмпирической ортогональной моды характеризует степень ее «отделимости» от других мод и должна свидетельствовать об ее высокой устойчивости к возмущениям сил, генерирующих циркуляцию в Южном океане [26].

Верификация расчетов

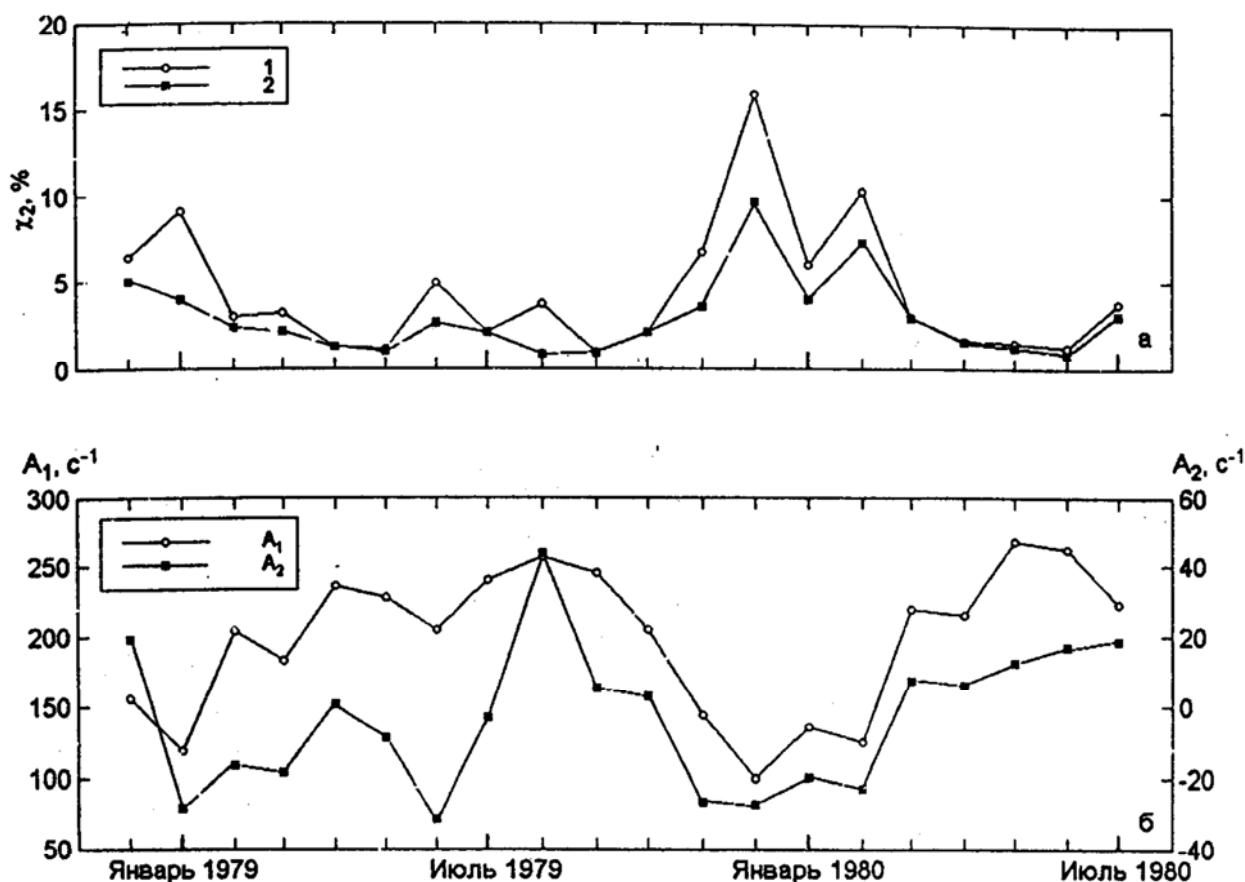
Естественно, что наиболее актуальный вопрос, возникающий после построения карт поверхностной циркуляции — оценка их достоверности. С этой целью использовались следующие критерии. Во-первых, результаты проанализированы в свете существующих современных представлений о системе циркуляции в Южном океане (рис. 2 и 3). В дополнение мы приводим зонально осредненные профили зональных скоростей, рассчитанные в настоящей работе, а также взятые из [23] (рис. 5, б). Видно, что при условии учета только геострофической компоненты скорости совпадение между этими результатами очень хорошее. Напомним, что в [23] было построено только среднегодовое поле поверхностной циркуляции в Южном океане.



Р и с. 8. Корреляции между максимальными значениями ВКЕ и глубинами дна в Южном океане. Разрез выполнен вдоль 57° ю.ш.



Р и с 9. Пространственная структура первой (а) и второй (б) эмпирических ортогональных мод



Р и с. 10. Характеристики представления реконструированного поля по эмпирическим ортогональным рядам: а – $\chi^2_{i/2}$, рассчитанные с учетом только первой и первых двух эмпирических ортогональных мод (обозначены как 1 и 2 соответственно); б – временная изменчивость первой (A_1) и второй (A_2) эмпирических ортогональных мод

Используя реконструированные поля, мы оценили сезонные изменения в среднем расходе через пролив Дрейка. При этом предполагалось, что поле циркуляции в проливе является баротропным до глубины 500 м. Результат сравнения наших оценок и данных прямых измерений расхода из [4] представлен на рис. 5, в. Видно, что диапазон изменчивости расхода АЦТ в проливе Дрейка с января 1979 г. по июль 1980 г. по нашим расчетам (50 – 150 Св) заметно шире, чем по наблюдениям (120 – 140 Св). При этом абсолютные величины расходов для периода апрель – октябрь 1979 г. (зима Южного полушария) совпадают достаточно хорошо. Выполненные расчеты демонстрируют существенно заниженную величину расхода летом Южного полушария. Это может быть связано с тем, что скорости ветра над акваторией Южного океана зимой Южного полушария выше, чем летом. Для уточнения оценок расхода в проливе Дрейка и его изменчивости необходим более аккуратный учет бароклинной компоненты течения.

Закключение

Расчеты, представленные в настоящей статье, дают убедительный пример того, что применение современных, более совершенных математических методов к анализу «старых» массивов данных часто позволяет получить новые количественные и качественные результаты.

Хотелось бы подчеркнуть, что нам удалось восстановить правдоподобную структуру циркуляции в морях Уэдделла и Росса, где практически не было дрейфующих буев из-за наличия льда в течение почти всего года. Для анализа системы течений в этом регионе необходимо проведение дополнительных исследований с учетом агеострофической компоненты циркуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reid J.L. On the total geostrophic circulation of the South Pacific Ocean: Flow patterns, tracers and transports // *Progr. Oceanogr.*—1986.— № 16.— P. 1–16
2. Reid J.L. On the total geostrophic circulation of the South Atlantic Ocean: Flow patterns, tracers, and transports // *Ibid.*— 1989.— № 23.— P. 149–244.
3. Macdonald A.M. The global ocean circulation: A hydrographic estimate and regional analysis // *Ibid.*—1998.— № 41.— P. 281–382.
4. Petersen R.G., Stramma L. Upper-level circulation in South Atlantic // *Ibid.*—1991.— №26.— P. 1–73
5. Kottmeier C., Askley S., Andreas E. et al. Wind, temperature and ice motion statistics in the Weddell Sea // *World climate research programme.*— Switzerland: WMO/TD, 1997.— № 797.— 49 p.
6. Грозов А.С., Нечаев Д.А., Пантелеев Г.Г. и др. Крупно масштабная циркуляция моря Росса, восстановленная вариационным методом // *Океанология.*—1998.— 38, № 5.— С. 654–664.
7. Нечаев Д.А., Пантелеев Г.Г., Яремчук М.И. Циркуляция в морях Амундсена и Беллинсгаузена по климатическим данным об атмосфере и океане // Там же.—1997.— 37, № 5.— С. 654–663.
8. Venegis S.A., Drinkwater M.R. Sea ice, atmosphere and upper ocean variability in the Weddell Sea, Antarctica // *J. Geophys. Res.*—2001.— 106, № C8.— P. 16,747–16,765.
9. Häkkinen S. Seasonal simulation of the Southern Ocean coupled ice-ocean system // *Ibid.*—1995.— 100, № C11.— P. 22, 733–22, 748.
10. Garrett J.F. The availability of the FGGE drifting buoy system data set // *Deep-Sea Res.*—1980.— 27, № 12A.— P. 1083–1086.
11. Danialt N., Menard Y. Eddy kinetic energy distribution in the Southern ocean from altimetry and FGGE drifting buoys // *J. Geophys. Res.*—1985.— 90, № 6.— P. 11877–11889.
12. Patterson S.L. Surface circulation and kinetic energy distributions in the southern hemisphere oceans from FGGE drifting buoys // *J. Phys. Oceanogr.*—1985.— 15, №7.— P. 865–884.
13. Hofmann E.E. The large-scale horizontal structure of Antarctic Circumpolar Current from FGGE drifters // *J. Geophys. Res.*—1985.— 90, № 4.— P. 7087–7097.
14. Johnson M.A. Southern ocean surface characteristics from FGGE buoys // *J. Phys. Ocean.*—1989.— 19, №5.— P. 696–705.
15. Саруханян Э.И., Амонский Е.Л., Смирнов Н.П. Поверхностная циркуляция Южного океана по наблюдениям над дрейфующими буями в период проведения III ЭП // *Общая циркуляция атмосферы и численные эксперименты по данным ПГЭП. Сер. Первый глобальный эксперимент ПИГАП.* —Л.: Гидрометеиздат, 1985.— 8.— С. 157–163.
16. Chu P.C., Ivanov L.M., Margolina T.M. et al. Analysis of sparse and noisy ocean current data using flow decomposition. Part 1. Theory. Part 2. Applications to Eulerian and Lagrangian data // *J. Atmos. Ocean. Tech.*—2002.— № 12.—P. 1–28.
17. De Boor C. Spline Toolbox User's Guide.— Natick: The MathWorks Inc., 1998.— 112 p.
18. Ivanov L.M., Kirwan A.D. Jr., Margolina T.M. Filtering noise from oceanographic data with some applications for the Kara and Black Seas // *J. Mar. Sys.*—2001.— № 28.— P. 113–139.
19. Stramma L. The South Indian Ocean Current // *J. Phys. Oceanogr.*—1992.— 22, № 3.— P. 421–430.
20. Rintoul S.R., Sokolov S. Baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia (WOCE repeat section SR3) // *J. Geophys. Res.*—2001.— 106, № C2.— P. 2815–2832.
21. Orsi A.H., Whitworth T. III, Nowlin W.D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Res. I.*—1995.— 42, № 5.— P. 641–673.

22. *Hughes C.W., Ash A.R.* Eddy forcing of the mean flow in the Southern ocean // *J. Geophys. Res.*—2001.— 106, № C2.— P. 2713–2722.
23. *Piola A.R., Figueroa H.A., Bianchi A.A.* Some aspects of the surface circulation south of 20° S revealed by First GARP Global Experiment drifters // *Ibid.*—1987.— 92, № C5.— P. 5101–5114.
24. *Park Y.H., Charriaud E., Craneguy P.* Fronts, transport and Weddell Gyre at 30°E between Africa and Antarctica // *Ibid.*—2001.— 106, № C2.— P. 2857–2879.
25. *Пененко В.В., Протасов Л.В.* Построение естественных ортогональных базисов для представления полей метеозадающих элементов // *Изв. АН СССР. ФАО.*—1978.— 14, № 12.— С. 1249–1257.
26. *Дымников В.П.* О предсказуемости изменений климата // *Там же.*—1992.— 34, № 6.— С. 741–751.

Арктический и Антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург
Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 10.07.02
После доработки 17.07.02

ABSTRACT Results of reconstruction of monthly surface circulation in the Southern ocean performed using trajectories of autonomous drifting buoys deployed in 1978–1980 during the First Geophysical GARP (Global atmosphere research Program) Experiment FGGE are presented. Calculations demonstrate strong inter-annual and seasonal variability in behavior of integral characteristics of the Antarctic Circumpolar Current, the western extension of Agulhas current, Folkland-Brasil convergence zone and the cyclonic gyres of the Weddell and the Ross seas. It is shown that dynamics of a large-scale surface circulation in the Southern ocean can be described by 2–3 empirical orthogonal modes. In general strong correlation between the locations of high kinetic energy domains and the zones of bottom rises is observed.