

Среда обитания  
водных биологических ресурсов

Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК 551.465.53

Временная изменчивость распределения мезомасштабных вихрей  
и их параметров в районе Южной Полярной фронтальной зоныП.С. Петкилёв<sup>1</sup>, П.П. Чернышков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ФГБУН «ИО РАН»), г. Москва<sup>2</sup>Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «АтлантНИРО»), г. Калининград

E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

В работе анализируется временная изменчивость количества наблюдений мезомасштабных вихрей, а также их параметров в районе Южной Полярной фронтальной зоны на основе данных массива, содержащего информацию о мезомасштабных вихрях Мирового океана за период с 1992–2012 гг. На основе методов одномерного статистического анализа временных рядов установлены основные закономерности и структура изменчивости вихревой активности в изучаемом районе. Выявлена тесная согласованность изменчивости количества наблюдений антициклонов и циклонов при количественном доминировании последних. Были также получены данные об особенностях их синоптической, межгодовой и сезонной изменчивости. Показано наличие тенденций к уменьшению количества наблюдаемых вихрей, увеличению доли циклонов при одновременном росте значений кинематических параметров вихрей (скоростей и др.) и усилению меридиональной компоненты их смещения. Полученные результаты указывают на усиление меридионального водообмена, осуществляемого мезомасштабными вихрями.

**Ключевые слова:** мезомасштабные вихри, Южная Полярная фронтальная зона (ЮПФЗ), Южный океан, анализ временных рядов, меридиональный водообмен.

## ВВЕДЕНИЕ

Мезомасштабные (в отечественной терминологии синоптические) вихри представляют собой замкнутые круговороты вод с горизонтальными размерами порядка 100 км и временем существования от нескольких недель и более, скорость перемещения которых в пространстве меньше скорости вращения [Chelton et al., 2011]. Известно, что мезомасштабные вихри являются важным фактором горизонтального и вертикального водообмена. Они определяют распределение океанологических параметров, оказывая в результате значительное влия-

ние на климат и на биопродуктивность обширных акваторий Мирового океана [Жмур, 2011; Кошляков, Тараканов, 2011; Zhang et al., 2014].

Особенно важную роль мезомасштабные вихри играют в динамике вод района ЮПФЗ, которая является важнейшей фронтальной зоной Мирового океана, отделяющей Антарктику от зоны умеренных широт [Грузинов, 1986], и которая заключена между Полярным фронтом (ПФ) на юге и Субантарктическим фронтом (САФ) на севере. В этой циркумполярной зоне происходит интенсивный меридиональный водообмен между водными массами различно-

го широтного происхождения. В ЮПФЗ обеспечивается формирование богатой биогенами Антарктической промежуточной водной массы (АПРВ), распространяющейся вплоть до тропических широт северного полушария и во многом определяющей биопродуктивность соответствующих акваторий [Emeru, 2001].

Известно, что меридиональный водообмен через ЮПФЗ и генерация АПРВ в этой зоне в значительной степени осуществляются океанскими вихрями [Кошляков, Тараканов, 2011]. Однако вопросам временной изменчивости их пространственного распределения и параметров ранее практически не уделялось внимания. В известных авторам работах [Chelton et al., 2007; Fu, 2009; Chelton et al., 2011] распределение мезомасштабных вихрей рассматривается в статике.

Таким образом, вопрос о временной изменчивости пространственного распределения мезомасштабных вихрей и их параметров в районе ЮПФЗ представляется ключевым для уточнения существующих оценок меридионального водообмена и расчёта объёмов генерации АПРВ, и целью настоящей работы стала оценка временной изменчивости количественно-качественных характеристик полей мезомасштабных вихрей и значений их параметров на различных масштабах пространства (изучаемый район в целом и отдельные его секторы) и времени (синоптический, межгодовой и сезонный).

**Используемые методы статистического анализа.** Для анализа временных рядов количества наблюдений мезомасштабных вихрей и их параметров использовались одномерные статистические методы.

Корреляционный анализ проводился на основе непараметрического коэффициента корреляции Спирмена, который является безразмерной характеристикой линейной взаимосвязи двух случайных величин  $X$  и  $Y$ . Выбор коэффициента корреляции Спирмена обусловлен тем, что он является непараметрическим и позволяет эффективно работать как с короткими рядами и малыми выборками (при числе наблюдений  $n < 100$ ), так и с данными, не распределёнными нормально. Эти две особенности позволяют использовать коэффициент корреляции Спирмена как эффективный инструмент для анализа временных рядов различной длины.

Подробное описание методики расчёта данного коэффициента приводится в работе [Press et al., 1992] (ввиду громоздкости, расчётные формулы не приводятся).

Для оценки статистической значимости полученных корреляций проверялась нулевая гипотеза (о равенстве коэффициента корреляции нулю) методом  $t$ -теста Стьюдента по формуле:

$$t = r_s \sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}},$$

где:  $r_s$  — коэффициент корреляции Спирмена,  $n$  — количество наблюдений.

Таким образом, в работе приводятся только статистически значимые (если не указано иное) коэффициенты корреляции.

Анализ периодограмм методом Lomb-Scargle является аналогом быстрого преобразования Фурье (БПФ) и используется в работе с временными рядами на предмет анализа их временной изменчивости и поиска скрытых периодичностей. Подробное описание метода Lomb-Scargle и схема расчёта описываются в [Press et al., 1992].

Дополнительным видом анализа, использованного в ходе работы, стал автокорреляционный анализ. Это анализ статистической взаимосвязи между последовательностями величин одного ряда, взятыми со сдвигом по времени. Назначением данного вида анализа является выявление цикличности исходного ряда.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе в качестве исходных использованы данные о пространственно-временной изменчивости мезомасштабных вихрей и их параметров, содержащиеся в массиве Mesoscale eddies in Altimeter Observations of SSH за период 14.10.1992–04.04.2012, созданном под руководством Д. Челтона (массив Челтона) [Chelton et al., 2011]. В основе массива — сглаженные альтиметрические данные по аномалиям уровня океана на регулярной сетке с шагом  $1/4^\circ$  с недельной временной дискретностью.

Разработанный Челтоном и соавторами алгоритм автоматического обнаружения выделяет вихри в поле аномалий уровня как скопления пикселей (квадратов со стороной  $1/4^\circ$ ), удовлетворяющих определённому набору критериев,

среди которых компактность, наличие экстремума аномалии уровня внутри этого скопления, согласованность значений аномалий внутри контура этого скопления со знаком его экстремума и др. Каждый вихрь в массиве характеризуется не менее чем четырьмя наблюдениями — фиксациями в полях аномалий уровня за соседние даты (вихри с временем существования менее четырёх недель в массиве не содержатся).

В массиве Челтона содержатся данные по следующему ряду параметров вихрей, детальное описание и особенности расчёта которых приводятся в работе [Chelton et al., 2011]: дата наблюдения, координаты центра вихря (широта и долгота); тип вращения (циклонический или антициклонический); амплитуда (см) — значение экстремума аномалии уровня внутри контура вихря; радиус (км) — величина, равная радиусу окружности, площадь которой совпадает с площадью вихря в его границах; скорость вращения (см/с) — значение средней геострофической скорости, приуроченное к наиболее удалённому контуру от центра вихря; время существования вихря (количество недель, в течение которых данный вихрь фиксировался в поле аномалий уровня); маркер вихря («—» — наблюдение не является конечным, «+» — наблюдение является конечным).

В рамках настоящей работы из этого массива были извлечены циркумполярные данные, ограниченные  $41^\circ$  ю.ш. с севера и  $63^\circ$  ю.ш. с юга. Выбор границ обеспечивает покрытие ЮПФЗ на всем её циркумполярном протяжении (рис. 1).

В дальнейшем на основе этих данных были рассчитаны дополнительные параметры мезомасштабных вихрей: *зональное смещение* (градусы) — отражает величину смещения вихря по параллели относительно предыдущей точки

его фиксации (по оси «запад—восток»); *меридиональное смещение* (градусы) — отражает величину смещения вихря по меридиану относительно предыдущей точки его фиксации (по оси «север—юг»); *результатирующее зональное смещение* (градусы) — перемещение вихря по параллели относительно первой точки его фиксации с накоплением (сумма зональных смещений вихря за всё время его наблюдения); *результатирующее меридиональное смещение* (градусы) — перемещение вихря по меридиану относительно первой точки его фиксации с накоплением (сумма меридиональных смещений вихря за все время его наблюдения); *пройденная дистанция* (км) — расстояние между двумя последовательными во времени наблюдениями одного вихря; *результатирующая пройденная дистанция* (км) — сумма пройденных вихрем дистанций за каждый шаг наблюдения с момента его первой фиксации; *скорость перемещения* (см/с) — отношение пройденной вихрем дистанции к промежутку времени между наблюдениями, в предположении о равномерном движении вихря; *нелинейность* (безразмерная) — отношение скорости вращения к скорости перемещения вихря.

Распределение мезомасштабных вихрей и их параметров в изучаемом районе подробно описано в работах [Петкилёв, Чернышков, 2016; Петкилёв, 2017 а].

Зональное и меридиональное смещения вихрей (в т.ч. результирующие) являются параметрами, характеризующими их перемещение в пространстве. Положительные значения параметров зонального и меридионального смещения означают смещение к востоку и северу, отрицательные — к западу и югу, соответственно. Расчёт результирующих зонального и меридионального смещения на каждом шаге призван отсеять «случайные» эффекты и сни-

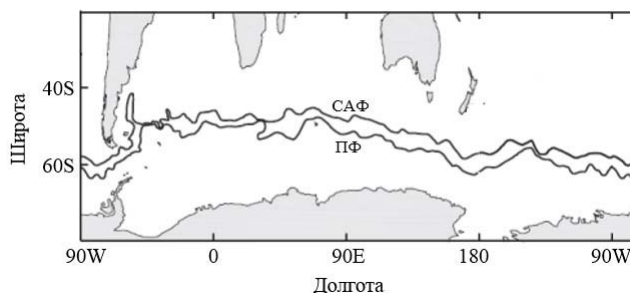


Рис. 1. Пространственное положение Субантарктического и Полярного (фронтов по данным [Orsi et al., 1995])

зять «зашумленность» исходных данных движениями мелкого временного масштаба, тем самым проявить генеральные закономерности перемещения вихрей.

Пройденная дистанция и результирующая дистанция с точки зрения своей концепции представляют собой аналоги параметров, отражающих смещение вихрей, но выраженные в более «удобных» для восприятия единицах измерения.

Из расстояния между точками фиксации и временем между этими фиксациями рассчитывалась линейная скорость вихря. На основе линейной скорости и скорости вращения рассчитывалась безразмерная нелинейность каждого вихря. Нелинейность является характеристикой преобладающих процессов движения вихря и отвечает на вопрос: вращательная или линейная компонента движения вихря доминирует? При значениях нелинейности больше единицы скорость вращения превышает линейное перемещение вихря, что свидетельствует о способности вихря захватывать и перемещать объёмы вод с определёнными свойствами.

Таким образом, для исходного массива был рассчитан целый ряд дополнительных параметров. Полученная в результате этого «обновленная версия» массива использовалась в дальнейшей работе.

Понятие «количество вихрей» понимается в работе как количество наблюдений вихрей (фиксаций спутником с интервалом в 7 дней) в пределах заданного квадрата и временного интервала.

Подготовка данных к анализу выполнялась следующим образом. Для анализа синоптической изменчивости из оригинального массива данных недельной дискретности формировались временные ряды месячной дискретности по суммарному количеству наблюдений мезомасштабных вихрей, суммарному соотношению между количеством наблюдений антициклонов и циклонов, а также средним значениям параметров мезомасштабных вихрей. Аналогичным образом были сформированы и временные ряды для исследования межгодовой и сезонной изменчивости (на основе суммарного количества наблюдений вихрей, соотношения между наблюдениями антициклонов и циклонов, а также средних значений параметров вихрей за год и за месяц, соответственно).

Стоит отметить, что при формировании временных рядов месячной дискретности из анализа исключались данные о вихрях, обнаруженных в октябре 1992 г. и апреле 2012 г., поскольку данные месяцы являлись граничными в массиве Челтона и не были полными (14.10.1992 — 04.04.2012). Таким образом, длина временных рядов месячной дискретности составила 233 значения. При анализе межгодовой изменчивости наблюдения вихрей за 1992 и 2012 гг. исключались из формируемых временных рядов также по причине их неполноты (длина временных рядов — 19 значений).

Следующим этапом стал анализ временной изменчивости параметров мезомасштабных вихрей в масштабах изучаемого района. Анализировались среднемесячные значения параметров мезомасштабных вихрей: времени существования, амплитуды, радиуса, скорости вращения, скорости перемещения, пройденной дистанции, результирующей пройденной дистанции, меридионального и зонального смещений, результирующих меридионального и зонального смещений, нелинейности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Временная изменчивость количества наблюдений мезомасштабных вихрей в масштабах района исследования.** Согласно рис. 2а в изучаемом районе имеет место пульсационный характер изменчивости количества мезомасштабных вихрей на синоптическом масштабе, который ведёт к большому размаху колебаний и «полярности» значений на соседних точках временного ряда.

При этом для изучаемого района характерна тесная согласованность изменчивости количества наблюдений циклонов и антициклонов (рис. 2а, б), что позволяет предполагать единство факторов, определяющих их изменчивость.

Также для изучаемого района характерна тенденция к уменьшению количества наблюдений вихрей, проявляющаяся как на синоптическом, так и на межгодовом масштабе (рис. 3). Резкие колебания количества наблюдений вихрей проявляются и в межгодовой изменчивости, за исключением периода 2003—2007 гг., для которого характерен малый размах колебаний рассматриваемого параметра.



**Рис. 2.** Динамика суммарного количества наблюдений (единиц) антициклонов (а), циклонов (б) и вихрей обоих знаков (в) за период с ноября 1992 г. по март 2012 г. в масштабах всего изучаемого района (для каждого графика представлена линия тренда)



**Рис. 3.** Динамика суммарного количества наблюдений антициклонов (а), циклонов (б) и вихрей обоих знаков (в) за период с 1993 г. по 2011 г. в масштабах всего изучаемого района (для каждого графика представлена линия тренда)

Имеет место чётко выраженная сезонность в изменчивости количества наблюдений вихрей (рис. 4). Наиболее интенсивная изменчивость и максимальные значения параметра приходятся на летний период Южного полушария (октябрь—март). На зиму Южного полушария (апрель—сентябрь) приходится фаза стабилизации с более низкими значениями.

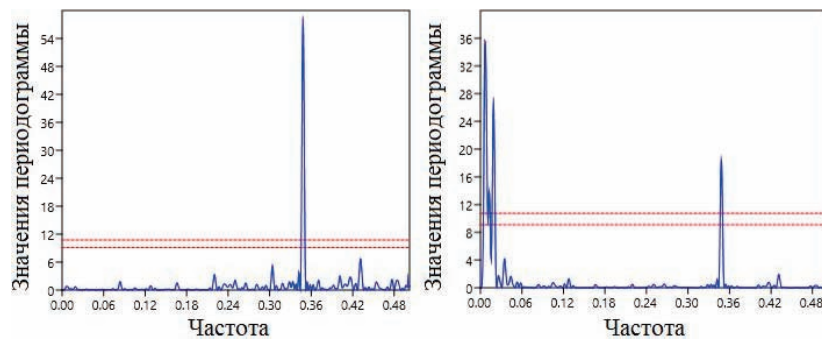
Таким образом, в изучаемом районе наблюдается тесная синхронизация изменчивости количества наблюдений мезомасштабных вихрей обоих знаков вращения, проявляющаяся на синоптическом и межгодовом масштабах, а также в сезонном ходе. Следствием подобия изменчивости количества наблюдений циклонов и антициклонов является возможность экстраполировать выводы, получаемые на основе ана-

лиза динамики количества наблюдений вихрей обоих знаков, на динамику количества наблюдений циклонов и антициклонов по отдельности.

Анализ скрытых периодичностей по методу Lomb-Scargle показал доминирование короткопериодной изменчивости в динамике количества мезомасштабных вихрей — максимум значения периодограммы соответствует периоду в 3 месяца (рис. 5а). По результатам применения Lomb-Scargle к аналогичным данным, сглаженным по 13 точкам методом скользящей средней (рис. 5б), имеются признаки долгопериодных колебаний (период  $\approx 5, 13$  лет), которые, предположительно, могут быть ассоциированы с крупномасштабными процессами в системе океан—атмосфера. Так, пятилетние колебания, вероятно, могут быть ассоциированы с Ан-



**Рис. 4.** Динамика суммарного количества наблюдений антициклонов (а), циклонов (б) и вихрей обоих знаков (в) с января по декабрь в масштабах всего изучаемого района (для каждого графика представлена линия тренда)



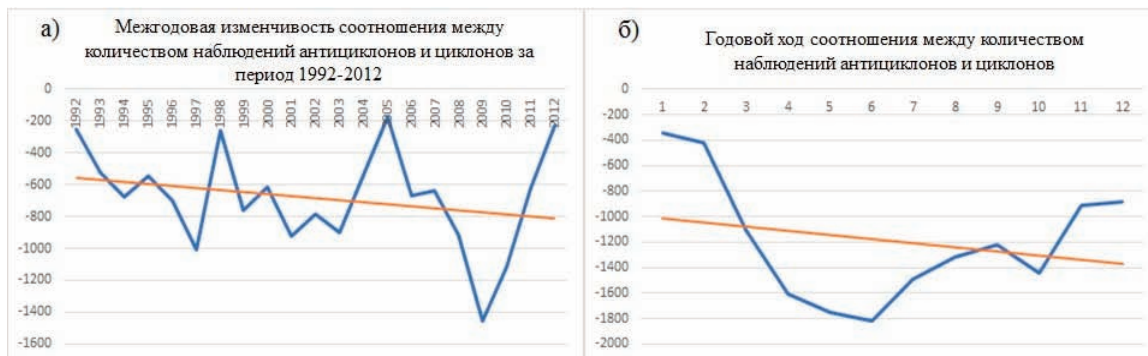
**Рис. 5.** Слева: периодограмма по временному ряду количества наблюдений мезомасштабных вихрей обоих типов вращения за период с ноября 1992 г. по март 2012 г. в масштабах всего изучаемого района. Справа: периодограмма по сглаженному по 13 точкам временному ряду количества наблюдений мезомасштабных вихрей обоих типов вращения за период с ноября 1992 г. по март 2012 г. в масштабах всего изучаемого района. Красными параллельными линиями указаны уровни значимости  $\alpha = 0,05$  (нижняя) и  $\alpha = 0,01$  (верхняя)

тарктической циркумполярной волной — квазичетырёхлетним климатическим сигналом, проявляющимся в системе океан—атмосфера и состоящим из двух чередующихся максимумов и минимумов аномалий температуры поверхности океана и ряда других параметров с расположением экстремумов на расстоянии  $\approx 180^\circ$  друг от друга [White et al., 1998]. Обнаруженные признаки детерминированности динамики количества наблюдений мезомасштабных вихрей свидетельствуют о потенциальной возможности прогнозирования данного параметра как индикатора широкого ряда процессов в изучаемом районе.

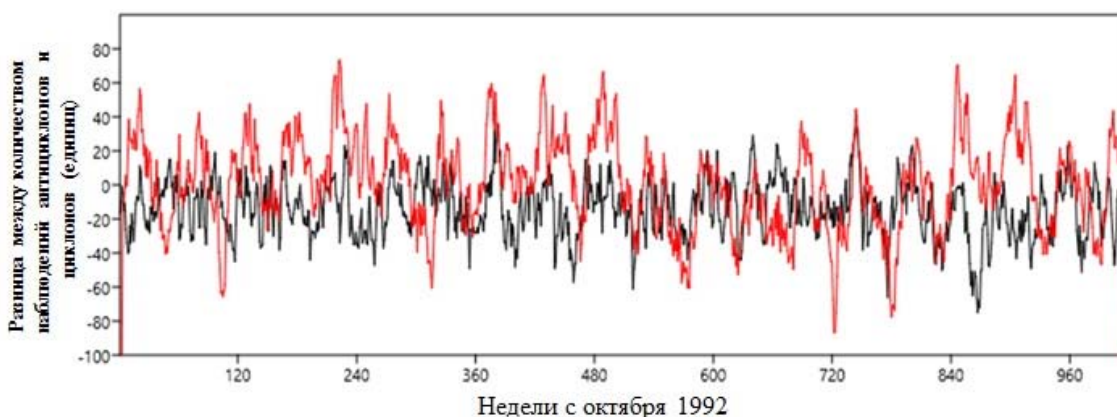
Отдельного анализа заслуживает временная изменчивость соотношения между вихрями разного типа вращения (значение разности между количеством наблюдений антициклонов и циклонов за определённый период времени). В более чем 75% временных наблюдений (на синоптическом масштабе времени) имело место

количественное преобладание циклонических вихрей над антициклоническими, при этом смена господствующего типа вихрей происходит регулярно и скачкообразно без какой-либо стабилизации значений. В межгодовом масштабе наблюдается постоянное количественное доминирование циклонов (рис. 6а). Годовой ход при этом характеризуется наиболее ярко выраженным доминированием циклонов в период с апреля по октябрь, в то время как январь и февраль характеризуются наиболее близким к равенству соотношением между вихрями обоих знаков вращения (рис. 6б).

Изменчивость соотношения между антициклонами и циклонами фактически не согласована с изменчивостью количества наблюдений вихрей (рис. 7). Соотношение между антициклонами и циклонами имеет ярко выраженные признаки белого шума в то время как количество наблюдений вихрей характеризуется наличием цикличности с почти постоянным периодом.



**Рис. 6.** Временные ряды межгодовой (а) и сезонной (б) изменчивости разницы между количеством наблюдений антициклонов и циклонов в масштабах изучаемого района



**Рис. 7.** Временные ряды еженедельной дискретности по параметрам: разница между количеством наблюдений антициклонов и циклонов (чёрная линия) и количество наблюдений мезомасштабных вихрей (за вычетом среднего значения) (красная линия). По оси X — время в неделях с октября 1992 г.

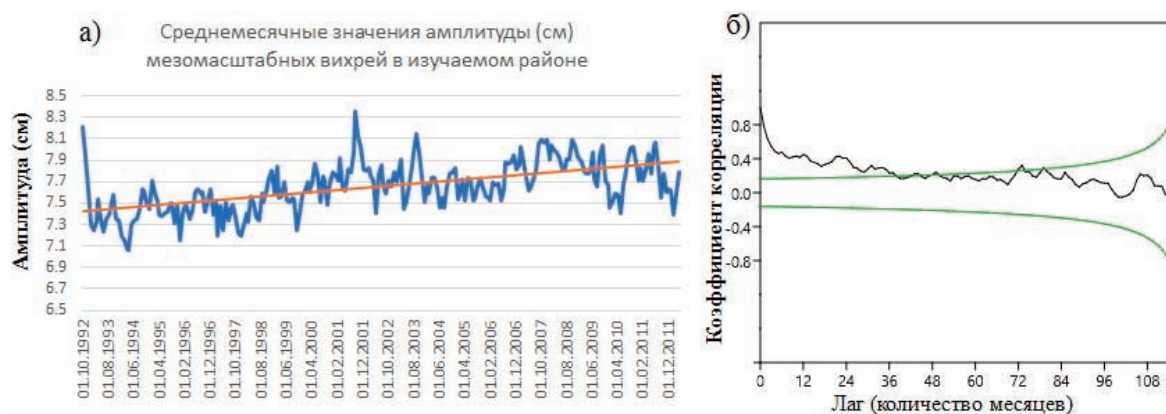
Следующим этапом стал анализ временных рядов непосредственно среднемесячных значений каждого из параметров по изучаемому району в целом. На основе анализа автокорреляционных функций и трендов во временной динамике была проведена классификация анализируемых параметров, результаты которой представлены в таблице.

Автокорреляционные функции большинства анализируемых параметров могут быть охарактеризованы как сочетание белого шума и трендовой компоненты. Проверка данного вывода проводилась путём построения автокорреляционной функции для соответствующих вре-

менных рядов за вычетом тренда (получаемая функция полностью соответствовала теоретической для белого шума). К данному классу относятся как кинематические параметры (амплитуда, радиус и др.), так и параметры, характеризующие перемещение вихрей (результатирующие смещения). Важно отметить высокую согласованность направления тренда для параметров из данного класса. Типичная автокорреляционная функция такого вида и соответствующая ей реализация временного ряда для параметра «амплитуда» представлена на рис. 8. Представленная автокорреляционная функция имеет значительный радиус корреляции (равный

**Таблица.** Классификация параметров мезомасштабных вихрей на основе анализа временных рядов их среднемесячных значений

Параметр	Направление тренда («+» — положительный, «-» — отрицательный, «0» — отсутствие тренда)	Вид автокорреляционной функции
Время существования вихрей	+	Трендовая компонента + белый шум
Амплитуда	+	Трендовая компонента + белый шум
Радиус	+	Трендовая компонента + белый шум
Скорость вращения	+	Трендовая компонента + белый шум
Результирующее меридиональное смещение	+	Трендовая компонента + белый шум
Результирующая пройденная дистанция	+	Трендовая компонента + белый шум
Результирующее зональное смещение	-	Трендовая компонента + белый шум
Нелинейность	+	Трендовая компонента + белый шум
Зональное смещение	0	Красный шум
Пройденная дистанция	-	Красный шум
Скорость перемещения	-	Красный шум
Меридиональное смещение	0	Белый шум



**Рис. 8.** Временной ряд среднемесячных значений по параметру «амплитуда» (а) (линия тренда обозначена оранжевой прямой) и полученная на основе этого временного ряда автокорреляционная функция (б) (зелёными кривыми ограничен 95%-ный доверительный интервал)

примерно 36 месяцам), который указывает на высокую инерционность исходного процесса. Соответствующий такому радиусу корреляции тренд отчётливо проявляется на графической реализации временного ряда среднемесячных значений амплитуды (рис. 8а).

В итоге представленные в таблице результаты отчётливо указывают на выраженный рост кинематических параметров вихрей (их интенсификацию и укрупнение), а также на увеличение меридиональной компоненты их смещения при уменьшении зональной компоненты. Таким образом, вихри изучаемого района становятся крупнее и интенсивнее, а также более активно смещаются в меридиональном направлении.

Принимая во внимание обнаруженные тенденции к росту среднемесячных значений кинематических параметров — в частности, меридионального смещения и нелинейности (рост значений которой характеризует увеличение способности вихрей к захвату и переносу вод в другие акватории), — можно утверждать, что в изучаемом районе наблюдается ярко выраженная тенденция к интенсификации меридионального водообмена, индуцируемого мезомасштабными вихрями.

Таким образом, установлено наличие чёткой тенденции к усилению меридионального вихревого водообмена в северном направлении как за счёт изменения особенностей перемещения вихрей (уменьшения зональной компоненты и роста меридиональной в направлении на север), так и за счёт укрупнения и интенсификации самих вихрей.

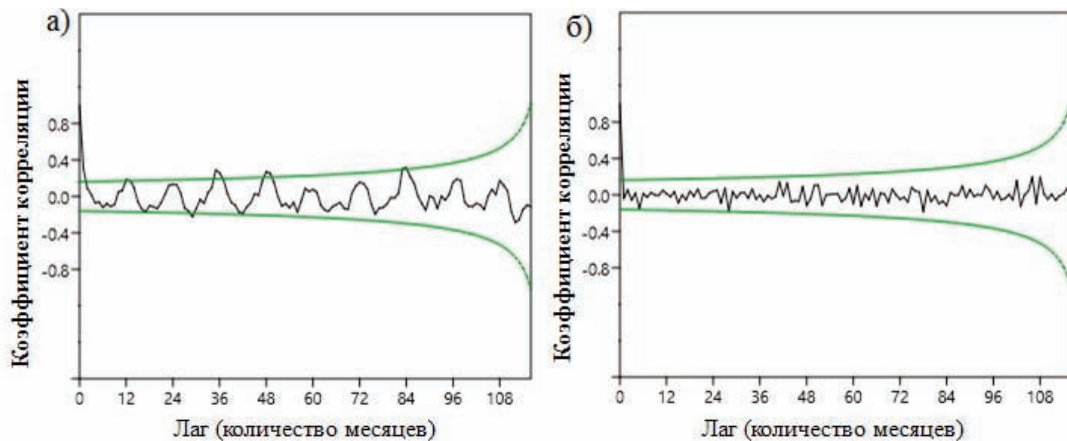
Полученные результаты подтверждают важность отслеживания параметров вихрей и их способность в совокупности характеризовать тенденции протекающих в океане процессов и роли мезомасштабных вихрей в них. Показано, что даже при невыразительной направленности динамики количества наблюдений вихрей (рис. 2) могут иметь место значительные изменения самих вихрей на качественном уровне.

При этом установлено, что параметры вихрей не являются одинаково детерминированными и среди них также присутствуют абсолютно стохастические параметры (меридиональное и зональное смещение между соседними наблюдениями и др.), автокорреляционные функции которых соответствуют моделям красного и белого шумов (таблица). Пример автокорреляционных функций для таких параметров представлен на рис. 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы установлена тесная согласованность изменчивости количества наблюдений антициклонических и циклонических вихрей. Анализ структуры временной изменчивости количества наблюдений мезомасштабных вихрей показал наличие признаков долгопериодных колебаний, что указывает на зависимость вихреобразования в изучаемом районе от крупномасштабных процессов в океане и атмосфере. В изучаемом районе количественно преобладают циклоны и имеется тенденция к увеличению их доли относительно антициклонов.





**Рис. 9.** Автокорреляционные функции, построенные по временным рядам среднемесячных значений зонального смещения (а) — красный шум, и меридионального смещения (б) — белый шум. Зелёными линиями ограничен 95%-ный доверительный интервал

Обнаружена выраженная тенденция к интенсификации меридионального водообмена в северном направлении, индуцируемого мезомасштабными вихрями. Данная тенденция обусловлена усилением северной компоненты перемещения вихрей при снижении зональной компоненты, а также ростом их нелинейности и других кинематических параметров (амплитуды, скорости вращения и др.). Продемонстрирована неодинаковая степень детерминированности различных параметров вихрей.

Полученные результаты подтверждают важность отслеживания параметров вихрей и их способность в совокупности характеризовать тенденции протекающих в океане процессов и роли мезомасштабных вихрей в них. Показано, что даже при невыразительной направленности динамики количества наблюдений вихрей могут иметь место значительные изменения самих вихрей на качественном уровне.

При этом установлено, что параметры вихрей не являются одинаково детерминированными и среди них также присутствуют абсолютно стохастические параметры (меридиональное и зональное смещение между соседними наблюдениями и др.), автокорреляционные функции которых соответствуют моделям красного и белого шумов.

Таким образом, основной результат настоящей работы заключается в установлении одновременного сосуществования двух тенденций в масштабах изучаемого района: снижения количества наблюдений вихрей и усиления осу-

ществляемого ими водообмена в северном направлении за счёт изменения их параметров (таблица).

Полученные результаты могут быть использованы для корректировки оценок меридионального водообмена через ЮПФЗ и расчёта объёмов генерации АПРВ с целью последующего прогноза биопродуктивности обширных акваторий её распространения.

Работа выполнялась при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект 17-77-20112.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Грузинов В.М. 1986. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 272 с.
- Жмур В.В. 2011. Мезомасштабные вихри океана. М.: ГЕОС. 190 с.
- Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю. 2011. Перенос воды через Субантарктический фронт и Глобальный океанский конвейер // *Океанология*. Т. 51. Вып. 5. С. 773–787.
- Петкилёв П.С., Чернышков П.П. 2016. Пространственное распределение параметров мезомасштабных вихрей в Южном океане как индикатор изменения климата и биологической продуктивности вод океана // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. Вып. 3. С. 82–91.
- Петкилёв П.С. 2017 а. Пространственное распределение параметров мезомасштабных вихрей в Южном океане // *Исследование Земли из космоса*. Вып. 4. С. 25–36.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., de Szoeke R.A. 2007. Global observations of large oceanic ed-

- dies // *Geophysical Research Letters*. Vol. 34. № 15. doi:10.1029/2007GL030812.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson, R.M. 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* Vol. 91. P. 167–216.
- Emery W.J. 2001. Water Types and Water Masses // *Encyclopedia of Ocean Science*. San Diego: Academic Press. P. 3179–3187.
- Fu L-L. 2009. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // *J. Geophys. Res.* Vol. 114. C11017. doi:10.1029/2009JC005349.
- Orsi A.H., Whitworth III T., Nowlin Jr. W.D. 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Research I*. Vol. 42. P. 641–673.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. 1992 *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Second Edition. New York: Cambridge University Press. 1097 p.
- White W.B., Chen S.-C., Peterson R.G. 1998. The Antarctic Circumpolar Wave: A Beta Effect in Ocean – Atmosphere Coupling over the Southern Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 28. P. 2345–2361.
- Zhang Z., Wang W., Qiu B. 2014. Oceanic mass transport by mesoscale eddies // *Science*. Vol. 345. P. 322–324.
- REFERENCES**
- Gruzinov V.M. 1986. *Gidrologiya frontal'nykh zon Mirovogo okeana* [Hydrology of frontal zones of the World Ocean]. L.: Gidrometeoizdat. 272 s.
- Zhmur V.V. 2011. *Mezomasshtabnye vikhri okeana* [Mesoscale eddies of the ocean]. M.: GEOS. 190 s.
- Koshlyakov M.N., Tarakanov R.Yu. 2011. Perenos vody cherez Subantarkticheskij front i Global'nyj okeanskij konvejer [Water transport across Subantarctic front and Global Ocean Conveyor Belt] // *Okeanologiya*. T. 51. Vyp. 5. S. 773–787.
- Petkilev P.S., Chernyshkov P.P. 2016. Prostranstvennoe raspredelenie parametrov mezomasshtabnykh vikhrej v Yuzhnom okeane kak indikator izmeneniya klimata i biologicheskoy produktivnosti vod okeana [Spatial distribution of the mesoscale eddies parameters in the Southern Ocean as the indicator of climate change and biological productivity of the ocean] // *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*. Seriya: Estestvennye i meditsinskie nauki. Vyp. 3. S. 82–91.
- Petkilev P.S. 2017 a. Prostranstvennoe raspredelenie parametrov mezomasshtabnykh vikhrej v Yuzhnom okeane [Spatial distribution of mesoscale eddies parameters in the Southern Ocean based on satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Vyp. 4. S. 25–36.

Поступила в редакцию 16.08.2017 г.  
Принята после рецензии 04.10.2017 г.

## Time variability of the distribution of mesoscale eddies and their parameters in the region of the Southern Polar frontal zone

P.S. Petkilev<sup>1</sup>, P.P. Chernyshkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (FSBSI «SIO RAS»), Moscow

<sup>2</sup> Atlantic Fisheries Research Institute (FSBSI «AtlantNIRO»), Kaliningrad

The temporal variability of mesoscale eddies observations number, as well as their parameters in the region of the Southern Polar frontal zone, is analyzed based on the dataset containing information on the mesoscale eddies of the World Ocean for the period from 1992 to 2012. Using univariate statistical analysis of time series, the main features and the structure of the variability of the eddy activity in the studied region are established. The close coordination of the variability in the number of observations of anticyclones and cyclones was revealed with the quantitative dominance of the latter were obtained also the features of their synoptic, interannual and seasonal variability. It has been shown that there are tendencies to a decrease in the number of observations of eddies and an increase in the fraction of cyclones with a simultaneous increase in the values of the kinematic parameters of the eddies (velocities, etc.) and the enhancement of the meridional component of their displacement. The results obtained indicate an intensification of the meridional water exchange carried out by the mesoscale eddies.

**Keywords:** mesoscale eddies, Southern Polar frontal zone, Southern Ocean, time series analysis, meridional water exchange.