

УДК 551.465.48

**П. С. Петкилёв, П. П. Чернышков**

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ  
КАК ИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И БИОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПРОДУКТИВНОСТИ ВОД ОКЕАНА**

82

*На основе спутниковых альтиметрических измерений высоты ур-  
венной поверхности океана исследованы кинематические параметры и  
пространственное распределение мезомасштабных вихрей в Южном  
океане в связи с рельефом дна и положением фронтальных зон в верхнем  
слое океана. Проведено разделение кинематических параметров вихрей  
на две группы в зависимости от географической детерминированности  
их распределения. Показана возможность использования результатов  
анализа пространственно-временной изменчивости этих параметров в  
качестве индикатора процессов крупного и среднего масштаба в Южном  
океане. Подтверждено важное значение и топографии дна и динамики  
вод в распределении вихрей и их параметров на всей акватории изучае-  
мого района.*

*Using satellite altimetry data, the author describes the spatial distribu-  
tion and kinematic parameters of mesoscale eddies in the Southern Ocean, its  
seafloor topography and the main fronts positions. The kinematic parameters  
of ocean eddies are divided into two groups based on the geographic determin-  
ism of their distribution. The described spatial and temporal variability of  
these parameters is indicative of large and medium-scale processes in the  
Southern Ocean. The research confirms the impact of both the seafloor topog-  
raphy and ocean dynamics on eddy distribution and other parameters.*

**Ключевые слова:** Южный океан, разномасштабная динамика вод, мезо-  
масштабные вихри, рельеф дна, фронтальные зоны, пространственный ГИС  
анализ.

**Key words:** Southern Ocean, different-scale water motions, mesoscale eddies,  
seafloor topography, frontal zones, GIS spatial analysis.

### **Введение**

Наблюдающиеся последние несколько десятилетий изменения климата Земли и природы Мирового океана являются главной проблемой современной океанологии и гидрометеорологии. Попытки объяснения этого только антропогенным воздействием на окружающую среду при более детальном рассмотрении механизмов происходящих изменений оказались несостоятельными. Это диктует необходимость более глубокого исследования процессов в океане и атмосфере.



Глобальная циркуляция вод Мирового океана стала главным климатообразующим фактором для всей планеты. Особую роль при этом играет циркуляция вод в южном полушарии к югу от 40° ю.ш., где происходит межконтинентальный горизонтальный водообмен. Открытие и описание «глобального океанского конвейера» позволило выявить в Мировом океане акватории, в которых происходит интенсивный тепло- и влагообмен между атмосферой и океаном (рис. 1).

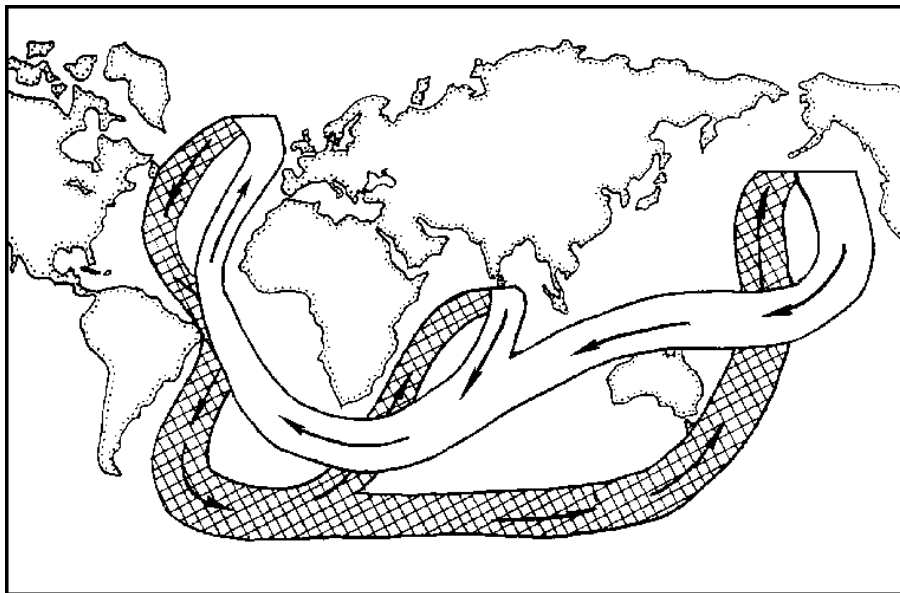


Рис. 1. Глобальный океанский конвейер. Придонные течения заштрихованы, стрелки указывают направление потока по [1]

Анализ ретроспективных данных показал наличие существенных межгодовых изменений этого обмена, что может рассматриваться как первопричина наблюдающихся климатических изменений. Прежде всего это может быть связано с межгодовыми изменениями интенсивности процессов водообмена через зону Антарктической конвергенции (АК) или Южной полярной фронтальной зоны, которая разделяет холодные и распресненные воды Антарктики и воды умеренных широт Атлантического, Индийского и Тихого океанов. Кроме того, через эту фронтальную зону в данные океаны поступают так называемые промежуточные воды антарктического происхождения с исключительно высоким содержанием биогенных элементов. Продвигаясь в северном направлении, эти воды уже в умеренных широтах северного и южного полушарий поднимаются в верхний фотический слой, формируя тем самым самую высокую биологическую продуктивность в этих районах. С учетом того что реально недоиспользуемые промысловые ресурсы существуют только в южном полушарии, а именно в антарктической части Атлантики (антарктический криль) и южной части Тихого океана (ставрида) [4, с. 16; 8, с. 30], вопрос исследования физических причин колебаний запасов этих гидробионтов приобретает особое значение.



Таким образом, изучение процессов водообмена через зону АК — важнейшая составная часть процесса выявления причин наблюдающихся изменений климата Земли, а также межгодовых изменений биологической продуктивности вод. Кроме того, это может объяснить отмеченные в последние десятилетия в южной части Тихого океана, в районе Канарского апвеллинга у берегов Северо-Западной Африки, а также в других промысловых районах существенные изменения биологической и промысловой продуктивности вод.

Во второй половине XX в. оценки интенсивности глобальной циркуляции вод выполнялись с использованием разрозненных наблюдений за температурой и соленостью вод. Только в 1992—2002 гг. был выполнен первый в истории международный проект по изучению глобальной циркуляции вод всего Мирового океана (WOCE).

По специально разработанной для этого эксперимента схеме меридионально ориентированных океанографических разрезов выполнялись измерения температуры и солености вод океана от поверхности до дна. Это позволило уточнить схему глобального океанского конвейера и сделать предварительные оценки межгодовых изменений глобальной циркуляции.

С 1993 г. в распоряжении исследователей появились результаты спутниковых альтиметрических измерений высоты урвонной поверхности океана, которые позволяют не только восстановить детали разномасштабной динамики вод в любом районе Мирового океана, но и оценивать их межгодовые изменения. Предыдущими исследователями [2] было установлено, что динамика мезомасштабных вихрей в зоне АК является определяющим фактором формирования промежуточных вод и процессов водообмена между Антарктикой и Субантарктикой.

Мезомасштабные вихри способны осуществлять перенос тепла, массы, трассеров (биогеов, планктона и др.), тем самым влияя на крупномасштабный тепло- и массообмен океана и его циркуляцию, вертикальное и горизонтальное распределение океанологических параметров, а также другие процессы в океане [3, с. 2—3; 7, с. 2—3; 9, с. 1]. В связи с этим мезомасштабные вихри, а именно динамика их численности, пространственное распределение и значения параметров могут служить индикатором протекающих процессов в системе океан-атмосфера и отражать климатические изменения в исследуемом регионе.

Целью данной работы стало уточнение и детализация пространственного распределения мезомасштабных вихрей и их кинематических параметров в Южном океане, а также выявление факторов, определяющих это распределение. Под кинематическими параметрами в настоящей работе понимаются амплитуда, размер, скорость вращения и перемещения вихрей. При этом траектории вихрей и пройденные ими расстояния в работе не рассматриваются.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующая задача: выявить характер пространственного распределения мезомасштабных вихрей и их кинематических параметров относительно рельефа дна и положения фронтов, установить региональные отличия этого распределения, а также проанализировать обуславливающие факторы.

## Материалы и методы

Исходным материалом для работы стали данные о пространственно-временной изменчивости мезомасштабных вихрей и их параметров, которые представлены в базе данных за период 14.10.1992 – 04.04.2013, созданной под руководством Д. Челтона [10]. Этот массив, составленный на основе альтиметрических спутниковых измерений высоты уровня поверхности океана, содержит данные по следующим параметрам вихрей: дата наблюдения, координаты центра, тип вихря (циклонический или антициклонический), амплитуда (см), радиус (км), скорость вращения (см/с), скорость перемещения (см/с) [11]. Дискретность данных – недельная.

Под амплитудой вихрей понимается разница между максимальным значением высоты морской поверхности внутри вихря и средним значением высоты морской поверхности на его периферии. Линейный размер вихря определяется как радиус круга, в который вписан контур вихря. Скорость вращения вихря представляет собой среднюю геострофическую скорость по контуру, являющемуся границей вихря, согласно определению линейного размера. Линейная скорость – отношение пройденного вихрем расстояния ко времени между двумя последними его фиксациями [10, с. 207 – 208; 11].

Данный массив создан в рамках программы по глобальному изучению мезомасштабных вихрей и находится в свободном доступе вместе с подробным описанием [11]. В рамках работы из этого массива были извлечены циркумполярные данные, ограниченные с севера  $41^\circ$  ю.ш. и  $63^\circ$  ю.ш. с юга.

В работе использовались также данные батиметрии проекта GEBCO, имеющие глобальное покрытие на регулярной сетке с интервалами на одну угловую минуту (размер ячейки  $\approx 1.86 \times 0.92$  км). Пространственные границы извлекаемых данных идентичны границам для предыдущего массива. Эти данные находятся в свободном доступе [13].

Положение основных фронтов Антарктического циркумполярного течения (АЦТ; САФ – Субантарктический фронт, ПФ – Южный Полярный фронт, ЮФАЦТ – Южный фронт АЦТ, ЮГАЦТ – Фронт южной границы АЦТ) было взято согласно работе [12].

В ходе работы данные (батиметрия и вихри) импортировались в среду ГИС (QGIS). По данным о местоположении мезомасштабных вихрей из массива Челтона (всех, имеющихся в данном массиве) было рассчитано количество вихрей на единицу площади – пространственная плотность концентрации вихрей. При этом использовался инструмент Теплокарта (Heatmap), который вычисляет плотность точечных объектов вокруг каждой ячейки выходного растра. Вокруг центра каждой ячейки растра определяется окрестность, после чего подсчитывается количество точек, попадающих в окрестность. В данной работе в качестве меры окрестности был установлен круг с радиусом  $0,733$  градуса (параметр по умолчанию для используемой системы координат). Подробный обзор используемого подхода приведен в документации к ГИС среде QGIS.

Результаты расчета пространственной плотности были классифицированы на 10 классов через равные интервалы. Критерием выбора количества классов стало удобство визуального восприятия на карте.



Затем карта пространственной плотности анализировалась совместно с рельефом дна изучаемого района путем наложения друг на друга. Полученная на этом этапе карта стала основой для пространственного анализа распределения мезомасштабных вихрей.

Для анализа пространственного распределения параметров вихрей проводилась классификация значений каждого анализируемого параметра. В рамках изучения пространственного распределения параметров вихрей изучались их скорость вращения, амплитуда, линейный размер, линейная скорость. Использовалась классификация значений каждого параметра по трем классам по методу естественных интервалов Дженкса в среде QGIS. Метод естественных интервалов Дженкса группирует данные таким образом, чтобы минимизировать внутриклассовую дисперсию и максимизировать межклассовую дисперсию. Выбор данного метода обусловлен стремлением унифицировать подход к анализу данных и избежать сложностей в интерпретации результатов применения разных методов классификации, так как анализируемые параметры распределены различным образом, а характер их взаимосвязи неизвестен.

Полученные для каждого параметра вихрей классы визуализировались цветом (путем окрашивания точек, обозначающих положение вихрей, в цвета соответствующего класса) и анализировались совместно с изобатами, фронтами и распределением плотности концентрации вихрей. Вихри обоих знаков (циклонические и антициклонические) анализировались совместно и их разделения не проводилось.

## Результаты

Результаты применения метода естественных интервалов Дженкса к значениям параметра «скорость вращения» мезомасштабных вихрей привели к классификации данного параметра на три класса следующим образом: «медленные» вихри (1-й класс) — значения от 1.12 до 14.65; вихри средних скоростей вращения (2-й класс) — от 14.65 до 29.65; «быстрые» вихри (3-й класс) — от 29.65 до 118.63.

Статистический анализ значений данного параметра мезомасштабных вихрей показал доминирование «медленных» вихрей (рис. 2). При этом вихри со скоростью вращения более 55 см/с фактически являются единичными.

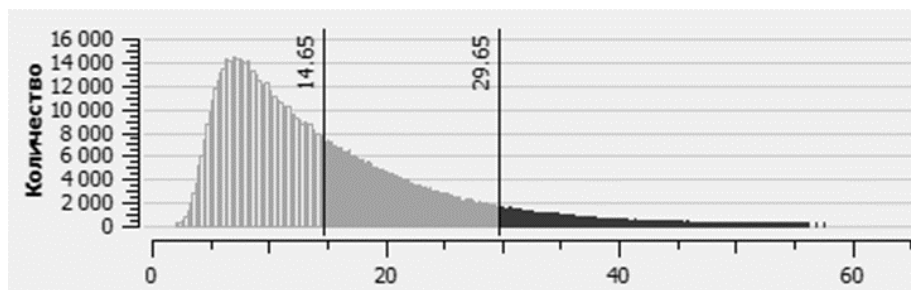


Рис. 2. Распределение значений скорости вращения вихрей. Границы классов отсечены вертикальными линиями



Распределение данного параметра по пространству достаточно равномерно, мозаичность минимальна. Численно доминирующие «медленные» вихри распределены равномерно по всей акватории и встречаются даже южнее ЮгАЦТ, то есть вне АЦТ.

Вихри второго класса распределены более сложным образом. Они, вероятно, приурочены к зонам более интенсивной динамической активности, поскольку практически не встречаются южнее ЮгАЦТ, а также над крупными поднятиями подводного рельефа. Несмотря на то что вихри этого класса занимают широкие участки акватории, они не распределены по ней равномерно. Наибольшие концентрации таких вихрей наблюдаются вблизи основных фронтов АЦТ – САФ, ПФ, а также СТФ, в то время как на южной периферии АЦТ их намного меньше. В отличие от «медленных» вихрей вихри второго класса избегают крупных поднятий рельефа, таким образом, их распределение более детерминировано, что свидетельствует об их сильной зависимости от характера динамики вод и топографии дна.

Интересным примером зависимости от динамики вод стало выклинивание зоны таких вихрей на южном подходе к плато Кергелен (рис. 3, а). Заметно, что отдаление от основных фронтов (САФ, ПФ, СТФ) и смещение к югу приводит к редукции этой зоны. При этом непосредственно за плато Кергелен зона этих вихрей занимает практически всю акваторию, что вероятно связано с возрастанием динамической активности за этим подводным препятствием. В районе Новой Зеландии поток разделяется на две ветви, одна из которых идет далее на восток вдоль плато Кэмпбелл, а другая – на север вдоль побережья Австралии (рис. 3, б). В Тихом океане эта зона сужается, тяготея к основным фронтам АЦТ.

Таким образом, вихри второго класса приурочены к северной периферии АЦТ (более интенсивная динамическая активность), распределены определенным образом относительно рельефа (не обнаруживаются над поднятиями дна) и практически не встречаются к югу от АЦТ. Приуроченность к северной периферии АЦТ может быть связана также с особенностями изолиний динамической топографии, которые имеют больший наклон в зоне конвергенции, что может обуславливать более высокую скорость вращения вихрей по сравнению с другими акваториями.

В отличие от двух предыдущих классов вихри «быстрого» вращения не образует сплошной зоны на изучаемой акватории (рис. 3, в). Они образуют кластеры, которые соединяются более или менее широкими перемычками. Вихри этого класса четко приурочены к северной периферии АЦТ и основным его фронтам, что также говорит о важной роли динамической активности вод и фронтов.

Анализ амплитуды вихрей с применением метода естественных интервалов Дженкса привел к классификации данного параметра на три класса следующим образом: вихри 1-го класса – значения от 1 до 8; вихри 2-го – от 8 до 20; вихри 3-го – от 20 до 103.

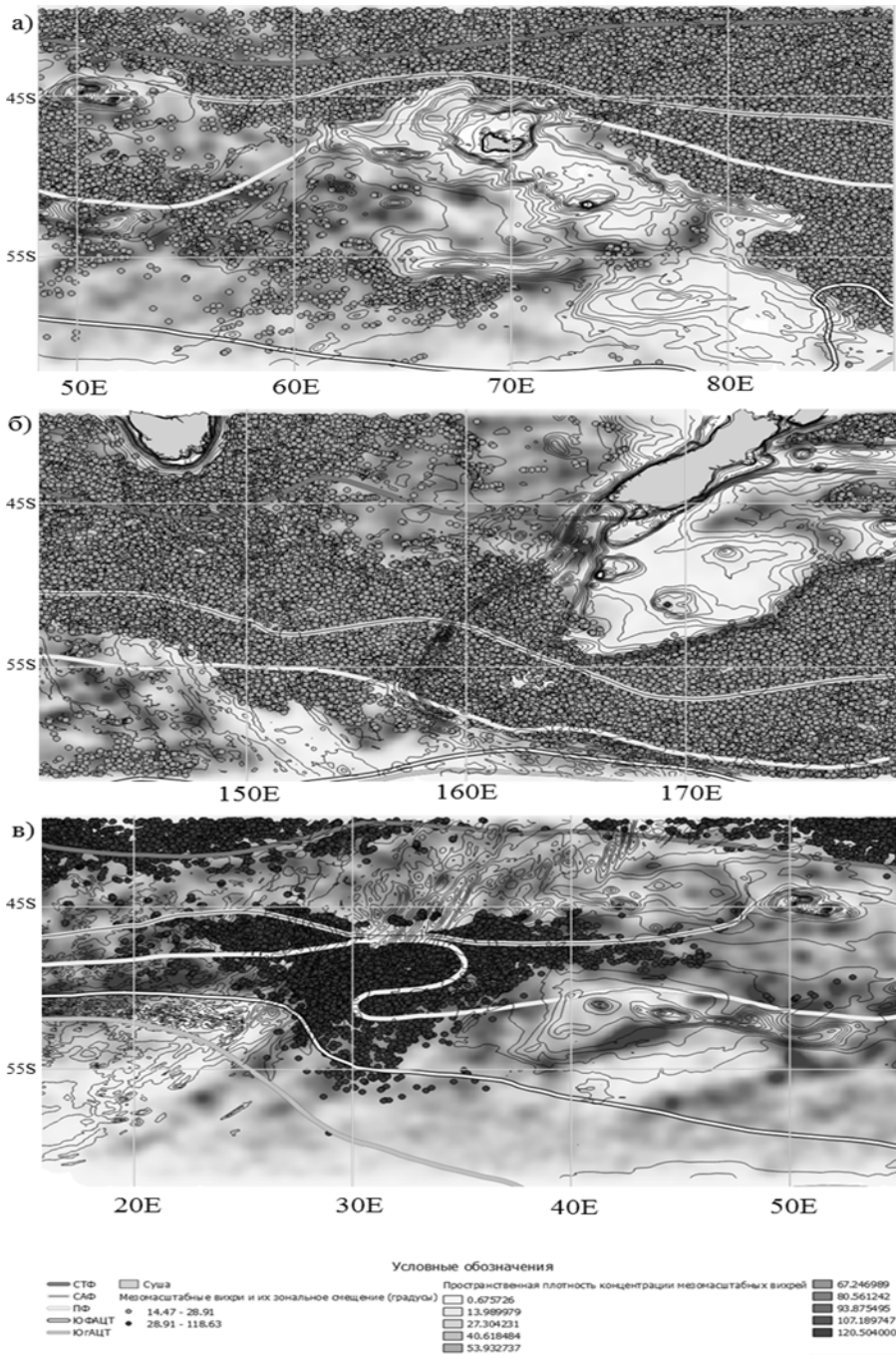


Рис. 3. Распределение значений скоростей вращения мезомасштабных вихрей в поле плотности их концентраций:  
а – вихри второго класса в районе плато Кергелен; б – вихри второго класса в районе Новой Зеландии; в – вихри третьего класса в районе 20–50 в.д.



Статистический анализ значений данного параметра мезомасштабных вихрей показал доминирование вихрей малых амплитуд. Особенностью данного параметра стало практически полное совпадение пространственного положения его классов с положением классов параметра «скорость вращения», что свидетельствует о прямой зависимости между скоростью вращения и амплитудой вихря.

Анализ показал, что вихри малых амплитуд распространены по всей акватории равномерно, в то время как вихри средних амплитуд — более компактно и образуют широкие сплошные полосы, непрерывные циркумполярно.

Вихри большой амплитуды не образуют непрерывной полосы, а образуют кластеры. Эти кластеры приурочены к морю Скотия и Аргентинской котловине, Агульясскому течению к югу от Африки, плато Кергелен, а также южной части Тихоокеанского сектора. Относительно положения фронтов вихри этого класса расположены в основном в районе САФ и к северу от него, что может быть связано с более интенсивным гидрологическим режимом этих акваторий, а именно большим горизонтальным сдвигом скорости, связанным с конвергентными процессами.

Исследование таких параметров вихрей, как линейный размер и скорость перемещения, классифицированных по трем классом методом естественных интервалов Дженкса, показал равномерное пространственное распределение этих классов. Таким образом, никаких признаков детерминированности распределения этих параметров не было обнаружено, что может свидетельствовать об отсутствии зависимости между этими параметрами и динамикой вод.

### Обсуждение результатов

В работе проанализировано пространственное распределение кинематических параметров мезомасштабных вихрей в Южном океане относительно положения фронтов и особенностей топографии дна.

Вихри медленного вращения распространены по всей акватории равномерно. Вихри второго класса приурочены к северной периферии АЦТ (более интенсивная динамическая активность), распределены определенным образом относительно рельефа (не обнаруживаются над поднятиями дна) и практически не встречаются к югу от АЦТ. При этом образуют сплошные полосы циркумполярного распространения. Вихри третьего класса — самые редкие, образуют разрозненные кластеры, что означает их большую зависимость от динамики вод и рельефа дна. Таким образом, данный параметр вихрей тесно связан с динамикой вод и его распределение подчинено географическим и океанологическим закономерностям, то есть географически детерминировано.

Распределение амплитуд мезомасштабных вихрей сильно напоминает распределение скоростей вращения. Положение классов этих параметров полностью совпадает. Поскольку данные параметры физически взаимосвязаны, можно предположить, что гипотеза о большем сдвиге скоростей в зонах концентрации «быстрых вихрей больших амплитуд», высказанная в работе [5, с. 195–196], логически оправдана.





Учитывая равномерное пространственное распределение линейного размера и скорости перемещения вихрей, мы можем на основе полученных результатов разделить анализируемые параметры на две группы. К первой — отнесем параметры, значения которых географически детерминированы и предположительно зависят от интенсивности динамики вод и особенностей топографии дна (скорость вращения, амплитуда). Ко второй — параметры, значения которых географически не детерминированы, то есть их пространственное распределение не обнаруживает географически или океанологически обусловленных закономерностей (линейный размер, скорость перемещения).

Наличие кинематических параметров вихрей, значения которых четко детерминированы географически, свидетельствует о явной и однозначной их зависимости от параметров внешней среды (топография дна и динамика вод) и дает возможность при наличии подробных баз данных проанализировать временную динамику этих параметров и выявить определенные тренды в их изменчивости. Фактически динамика изменчивости этих параметров может служить индикатором интенсивности процессов в зоне АЦТ и отражать особенности динамики вод в этой зоне. При этом, временная изменчивость пространственного положения границ классов этих параметров также может служить индикатором процессов, протекающих в этой части Мирового океана.

Таким образом, пространственно-временной и статистический анализ таких параметров вихрей, как скорость вращения и амплитуда, способен отражать динамическую активность в зоне АЦТ и в Южном океане в целом, и следовательно, может быть потенциально использован для анализа влияния климатических изменений на динамику вод и биопродуктивность этого района.

Так как скорость вращения и амплитуда вихрей географически детерминированы и их максимумы приурочены к зонам наибольшей динамической активности, можно сделать вывод о способности вихрей как мезомасштабных явлений отражать особенности крупномасштабных явлений. Данный вывод демонстрирует огромное преимущество мезомасштабных вихрей как индикатора процессов в Южном океане, а именно увязку крупно- и мезомасштабных процессов в одном явлении. Другими словами, географически детерминированные параметры тесно связаны с крупномасштабными процессами, в то время как географически недетерминированные параметры отражают мезомасштабные («случайные») процессы.

### Заключение

Основными результатам работы стали разделение кинематических параметров мезомасштабных вихрей на две группы в зависимости от их пространственного распределения и физическое обоснование этого разделения.

Показана возможность использования новых представлений о пространственно-временной изменчивости этих параметров в качестве индикатора процессов водообмена через зону Антарктической конвергенции и как индикатора интенсивности глобального океанского конвейера.



Полученные результаты дополняют работы [5; 6] и являются их логическим продолжением.

### Список литературы

1. Басов И. А. Океанская и климатическая эволюция в миоцене // Природа. 1999. №5. С. 18–28.
2. Голубец С. В., Кошляков М. Н. Вихреобразование на субантарктическом фронте по данным спутниковых наблюдений и формирование антарктической промежуточной воды // Океанология. 2004. Т. 44, №4. С. 485–494.
3. Жмур В. В. Мезомасштабные вихри океана. М., 2011.
4. Масленников В. В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М., 2003.
5. Петкилёв П. С., Чернышков П. П. Межгодовая изменчивость параметров мезомасштабных вихрей в зоне Антарктической конвергенции // Вопросы промысловой океанологии. 2014. №11. С. 182–197
6. Петкилёв П. С. Влияние рельефа дна на пространственное распределение и динамику мезомасштабных вихрей в проливе Дрейка и море Скотия // Ученые записки РГГМУ. 2016. №42. С. 81–93
7. М. А. Соколовский, Ж. Веррон. Динамика вихревых структур в стратифицированной жидкости. М. ; Ижевск, 2011.
8. Чернышков П. П., Дерябин Н. Н. 30 лет со времени открытия и освоения ресурсов пелагических рыб в южной части Тихого океана // Рыбное хозяйство. 2008. №5. С. 30–33.
9. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M., de Szoeke R. A. Global observations of large oceanic eddies // Geophys. Res. Lett. 2007. №34, L15606.
10. Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Prog. Oceanogr. 2011. №91. P. 167–216
11. Mesoscale eddies in Altimeter Observation of SSH. URL: <http://cioss.coas.oregonstate.edu/eddies/data.html> (дата обращения: 04.10.2013).
12. Orsi A., Whitworth T., Nowlin Jr. W. D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Res. Pt. I: Oceanogr. 1995. №42(5). P.641–673
13. The GEBCO One Minute Grid dataset. URL.: [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/gebco\\_one\\_minute\\_grid/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_one_minute_grid/) (дата обращения: 10.12.2015).

### Об авторах

Павел Сергеевич Петкилёв — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

Павел Петрович Чернышков — д-р геогр. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: pchernyshkov@kantiana.ru

### About the authors

Pavel Petkilev, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

Prof. Pavel Chernyshkov, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: pchernyshkov@kantiana.ru