

## Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований

М. Н. Кошляков<sup>1,✉</sup>, В. Н. Белокопытов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ [mnkoshl@ocean.ru](mailto:mnkoshl@ocean.ru)

Поступила в редакцию 07.07.2020 г., после доработки – 28.08.2020 г.

Работа содержит краткий обзор экспериментальных исследований синоптических вихрей, выполненных советскими и зарубежными научными организациями на полигонах в океане.

Вихревые образования были известны с 1930-х гг., но именно полигонные эксперименты: «Полигон-67» в Аравийском море, «Полигон-70», *MODE*, *ПОЛИМОДЕ*, *Tourbillon*, «Мезополигон» в Тропической Атлантике, «Мегаполигон» в северо-западной части Тихого океана – помогли более глубоко понять физическую природу океанских вихрей. Длительные комплексные измерения с помощью систем заякоренных буйковых станций, сопровождаемые сериями гидрологических съемок, послужили необходимым экспериментальным материалом для развития теории синоптических вихрей. Теория позволила объяснить возникновение и развитие вихревых образований в океане как результат взаимодействия различных физических процессов: бароклинной неустойчивости основного потока, трансформации геострофической турбулентности в поле волн Россби, баротропизации вихрей.

С течением времени ведущая роль в экспериментальных исследованиях синоптической изменчивости в океане перешла от океанографических съемок и полигонных экспериментов к методам спутниковой альтиметрии и дрейфтерным технологиям. Современные глобальные оценки характеристик вихревых образований в целом не противоречат более ранним работам обобщающего характера. Подтверждая основные черты пространственного распределения вихревой энергии в Мировом океане, они уточняют различные характеристики вихрей: размеры, скорость перемещения, знак вращения, нелинейность, направление движения, отклонение траектории и др.

Несмотря на значительные успехи методов дистанционного зондирования Земли и дрейфтерных технологий, получить всеобъемлющую картину вихревых движений во всем объеме океана до сих пор очень сложно. Представляется перспективным возобновить проведение целенаправленных полигонных экспериментов в специально выбранных районах океана на новой технологической основе.

**Ключевые слова:** обзор, синоптические вихри, волны Россби, бароклинная неустойчивость, баротропизация вихрей, дрейфтеры, спутниковая альтиметрия.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН по теме № 0149-2019-0004, ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0827-2018-0001.

**Для цитирования:** Кошляков М. Н., Белокопытов В. Н. Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 6. С. 613–627. doi:10.22449/0233-7584-2020-6-613-627

# Mesoscale Eddies in the Open Ocean: Review of Experimental Investigations

M. N. Koshlyakov<sup>1,✉</sup>, V. N. Belokopytov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
✉ [mnkoshl@ocean.ru](mailto:mnkoshl@ocean.ru)

The paper is aimed at reviewing the studies of mesoscale eddies in the open ocean carried out by the Soviet and foreign institutions during the experiments in the specified geographical regions.

The eddy-current effects are known since the 1930ies, and just the experiments “Polygon-67” in the Arabian Sea, “Polygon-70”, *MODE*, *POLYMODE*, *Tourbillon*, “Mesopolygon” in the tropical Atlantic, “Megapolygon” in the northwestern Pacific Ocean have advanced our knowledge about physical nature of the ocean eddy dynamics. Long-term complex measurements including current meters at the moored buoy arrays accompanied by a series of hydrographic surveys have provided the required experimental data for developing the theory of mesoscale variability. It explained arising and evolution of the eddies in the ocean as a result of interaction between various physical processes: baroclinic instability of a large-scale current, transformation of geostrophic turbulence in the Rossby wave field, barotropization of eddies and others.

Later on, the studies of the ocean mesoscale variability evolved from the oceanographic surveys and special-purpose experiments at the polygons performed due to the research vessel cruises to the satellite altimetry methods and the drifter technologies. All the modern global estimates of eddy formations published in the last decade confirm the previous summaries, particularly those describing spatial distribution of the eddy kinetic energy in the World Ocean. They also represent new or the improved assessments of the eddies’ various characteristics: their size, drift velocity and direction, sign of rotation, nonlinearity, trajectory shear and others.

Despite of the progress in remote sensing and regular launching of great amount of drifters and profiling floats, it is still difficult to obtain a comprehensive pattern of eddy dynamics within the whole World Ocean. It seems perspective to resume in future special-purpose experiments in the key regions of the World Ocean based on modern technologies.

**Keywords:** review, mesoscale eddies, Rossby waves, baroclinic instability, eddy barotropization, drifters, satellite altimetry.

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task of IO RAS on theme No. 0149-2019-0004, MHI RAS on theme No. 0827-2018-0001.

**For citation:** Koshlyakov, M.N. and Belokopytov, V.N., 2020. Mesoscale Eddies in the Open Ocean: Review of Experimental Investigations. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(6), pp. 559-572. doi:10.22449/1573-160X-2020-6-559-572

## Введение

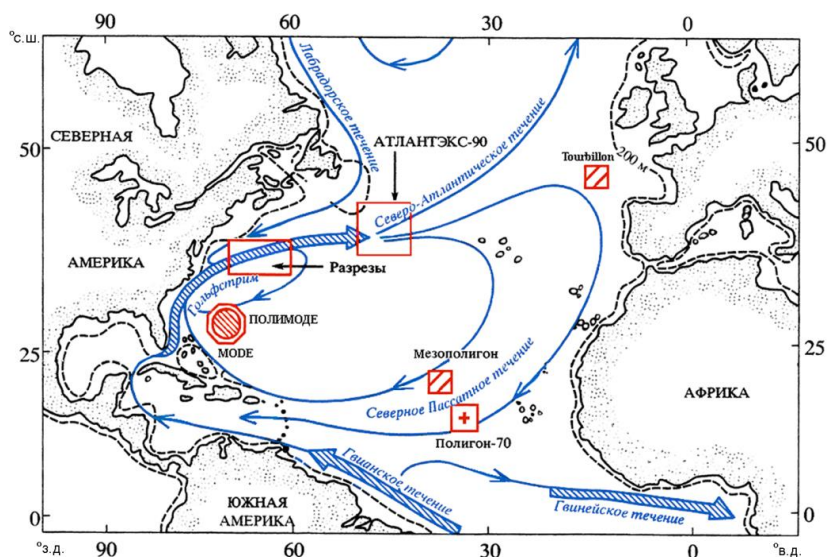
Первые свидетельства существования в океане вихрей и меандрирования струйных течений Гольфстрим и Куроисио появились в 1930-х гг. [1–3]. Уже в то время выделяли как крупные вихревые образования с размерами до 200 км в диаметре, хорошо различимые по температуре воды, так и небольшие вихри (до 20 км), слабо выраженные в термохалинной структуре вод. В 1950–1960-х гг. начали проводиться синоптические гидрологические съемки с помощью нескольких судов («Операция Кабот» [4]), стали внедряться в океанографическую практику радионавигационные системы, батитермографы, электромагнитные измерители течений, поплавки нейтральной плавучести, что в результате способствовало повсеместному обнаружению вихрей. Вихревые структуры стали находить не только в районах Гольфстрима и Куроисио [4–7], но и в Мексиканском заливе [8], зоне Восточно-Австралийского течения [9, 10], а также в других частях Мирового океана. Тем не менее вихри

в то время еще не воспринимались как универсальное явление, присущее всему Мировому океану, их не относили к отдельному классу океанских движений. В отличие от наук об атмосфере теоретические основы динамических процессов в синоптическом диапазоне для океанологии еще не были разработаны.

### Эксперименты 1960–1980-х гг. на полигонах в океане

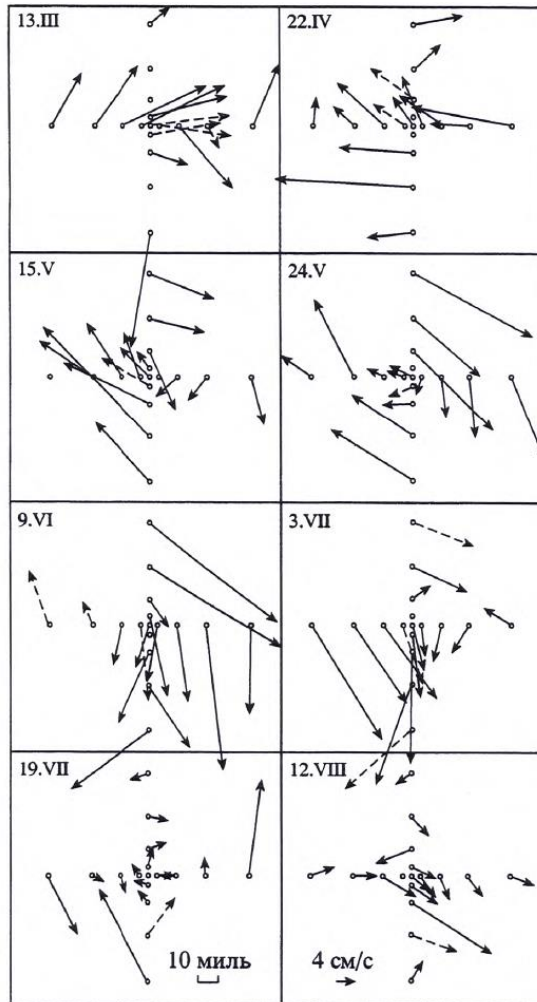
Целенаправленные экспериментальные исследования синоптических вихрей в океане начались в 1967 г. по инициативе В. Б. Штокмана в экспедиции Института океанологии АН СССР «Полигон-67» в Аравийском море [11]. На основе двух последовательных гидрологических съемок удалось выявить в поле геострофических течений нестационарные волнообразные движения с характерным масштабом около 100 км [12].

Так как интервал времени в два месяца между съемками в экспедиции «Полигон-67» не позволил проследить эволюцию вихревых образований на основе их взаимной идентификации, то возник вопрос о разработке новой, более сложной, расширенной программы наблюдений. Необходимы были достаточно длительные прямые измерения течений, которые позволили бы оценить структуру и динамику вихревых возмущений крупномасштабной циркуляции в районах открытого океана, расположенных вдали от мощных струйных течений. В 1970 г. под научным руководством Л. М. Бреховских советскими океанологами в Тропической Атлантике, в районе периферии Северного Пассатного течения (рис. 1), на протяжении 6 мес проводился эксперимент «Полигон-70» [13]. Основная часть натурных измерений была выполнена с помощью системы из 17 автономных буйковых станций (АБС), установленных по схеме «крест» (рис. 2), с самописцами течений до глубины 1500 м на 10 горизонтах.



**Рис. 1.** Схема расположения экспериментов «Полигон-70», МОДЕ, ПОЛИМОДЕ, *Tourbillon*, «Разрезы», «Мезополигон», «Атлантэкс-90»

**Fig. 1.** Location of the experiments “Polygon-70”, МОДЕ, POLYMODE, *Tourbillon*, “Razrezy”, “Mesopolygon”, “ATLANTEKS-90”



**Р и с. 2.** Векторы течений на горизонте 400 м по данным эксперимента «Полигон-70»  
**Fig. 2.** Current vectors at the depth 400 m based on the data of the “Polygon-70” experiment

В ходе проведения эксперимента удалось детально проследить прохождение через акваторию полигона в период апрель–июнь 1970 г. хорошо выраженного антициклонического вихря [14], который имел эллипсовидную форму с малой полуосью около 100 км и большой полуосью 200 км (рис. 2). Вертикальное распределение скорости течения в вихре имело два максимума: первый – в поверхностном слое, второй – в слое 400–500 м. Течения в этих слоях достигали скорости 45 см/с, что на порядок превышало скорости, характерные для фонового Северного Пассатного течения. Кроме основного вихря были идентифицированы периферийные части соседних вихрей, которые вместе составляли «плотную вихревую упаковку». Наличие такой динамической структуры послужило в дальнейшем одним из обоснований волновой интерпретации результатов эксперимента. Несмотря на факт значительного преобладания орбитальной скорости вихрей над скоростью их поступательного движения [15–17], теория линейных бароклинных волн Россби позволила

вполне убедительно объяснить наблюдавшееся соотношение пространственно- и временного масштабов течений и интерпретировать генеральное направление перемещения вихрей как результат совместного действия  $\beta$ -эффекта и крупномасштабной адвекции Северным Пассатным течением.

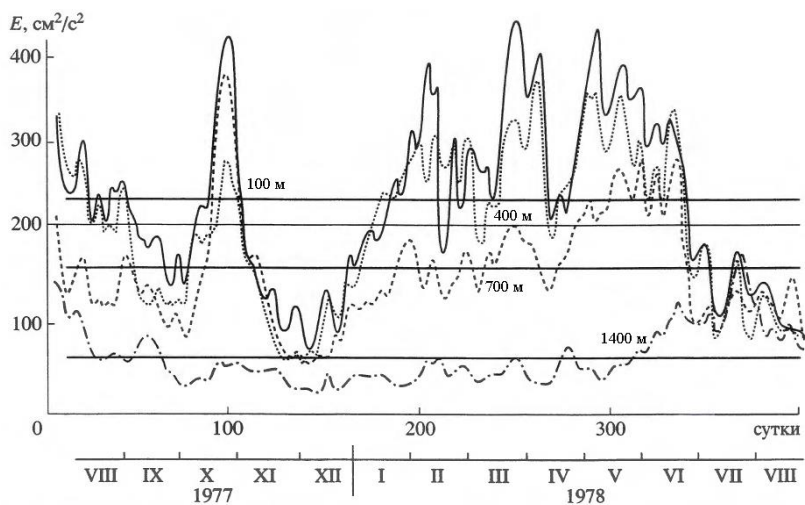
«Полигон-70» имел огромное значение для океанологии, он стимулировал быстрый рост исследований вихревых движений во всех океанах и морях. Вихри такого типа, которые были обнаружены в этом эксперименте, в отечественной литературе получили название «синоптические вихри открытого океана».

В 1973 г. американские океанологи осуществили в Саргассовом море, к юго-западу от Бермудских о-вов (рис. 1), проект *Mid-Ocean Dynamics Experiment (MODE)*. Несмотря на то, что в нем использовался более широкий набор измерительных средств, чем в «Полигоне-70», основные результаты этих экспериментов оказались близкими [18]. Характерный временной период вихревых движений в океане составил около 100 дней, пространственный масштаб – около 70 км. Поле течений было большей частью изотропным, его интенсивность возрастала при приближении к зонам действия крупномасштабных течений – Гольфстрима и Северного Пассатного течения – и на участках с повышенной расчлененностью дна.

В 1977–1979 гг. в районе выполнения *MODE* (рис. 1) был осуществлен крупнейший в области океанологии совместный советско-американский эксперимент ПОЛИМОДЕ (Полигон + *MODE*) [19, 20]. Его составной частью был «Синоптико-динамический эксперимент» (СДЭ), проводившийся под научным руководством А. С. Моница в районе рециркуляционной ячейки Гольфстрима. По сравнению с «Полигоном-70» система из 19 АБС в эксперименте СДЭ имела меньшее количество горизонтов измерений (100, 400, 700, 1400 м), но гораздо больший пространственный охват (около 300 км) и вдвое большую продолжительность работы (13 мес).

На всем протяжении ПОЛИМОДЕ постоянно проводились гидрологические съемки с различным шагом в пространстве: от микрополигонов до съемок крупномасштабной структуры (17 съемок). В них принимали участие суда Морского гидрофизического института АН УССР (МГИ), Гидрографической службы ВМФ, Института океанологии АН СССР, Гидрометслужбы, Акустического института АН СССР. Самый большой объем наблюдений выполнил МГИ, в котором была разработана Программа гидрологических съемок, принятая в качестве единой для всех судов межведомственной экспедиции. Научно-исследовательскими судами МГИ «Академик Вернадский» и «Михаил Ломоносов» было выполнено 9 крупномасштабных съемок, 16 микрополигонных съемок и 32 постановки АБС [21–23].

Всего было выявлено 22 вихря с почти равной повторяемостью циклонического и антициклонического вращения, которые перемещались через полигон в западном направлении со скоростью 2–10 см/с [24]. Уровень временной изменчивости энергии синоптических вихрей (рис. 3) был очень значительным [25]. Особо выделялся период январь – май 1978 г., когда прохождение нескольких мощных антициклонов, разделенных областями слабой циклонической завихренности, привело к резкому возрастанию общей кинетической энергии течений.



**Р и с. 3.** Временной ход удельной кинетической энергии синоптических вихрей, осредненной по всем измерениям на АБС ПОЛИМОДЕ. Прямые линии отображают средние значения энергии по горизонтам

**Fig. 3.** Time-series of specific kinetic energy of mesoscale eddies averaged over all the measurements of the POLYMODE current meters moorings. Straight lines show the energy mean values at the depth levels

В дальнейшем во время многочисленных экспедиционных исследований неоднократно фиксировались не только упомянутые выше системы взаимосвязанных вихрей разного знака, но и отдельные хорошо выраженные вихри. Так, в рамках крупной отечественной программы «Разрезы» при проведении программы океанографических съемок Гольфстрима в 1984–1990 гг. удалось проследить различные этапы взаимодействия западного пограничного течения с порожденными им рингами: отрывы меандров, обратное поглощение их основным потоком, вторичные отрывы, превращение меандров в отдельные вихри и т. д.

Согласно теоретическим представлениям [20], основной причиной генерации синоптических вихрей является бароклинная неустойчивость крупномасштабных течений. Формирование интенсивных антициклонических вихрей ПОЛИМОДЕ в период январь – май 1978 г. интерпретировалось как следствие бароклинной неустойчивости рециркуляционной ветви Гольфстрима (противотечения). В пользу такой трактовки свидетельствует целый ряд особенностей поля течений: пространственный масштаб антициклонов соответствует бароклинному масштабу Россби; вертикальный сдвиг течений подчеркивает бароклинную структуру вихрей; антициклоническая завихренность вихрей хорошо соотносится с антициклоническими меандрами южной периферии противотечения Гольфстрима; кинетическая энергия увеличивается в направлении стрежня противотечения Гольфстрима; относительное смещение центров возмущений полей давления и плотности располагается именно в том направлении, которое обеспечивает максимальное высвобождение доступной потенциальной энергии противотечения Гольфстрима [26].

Эволюция гидрофизических полей на полигоне подтвердила теоретические представления [20] о том, что при уменьшении накачки энергии (как это

было в июне 1978 г.) происходит баротропизация вихрей и рост их горизонтальных размеров до масштаба Райнса. Как следствие, возникает циклический процесс, при котором периоды интенсивного образования вихрей, связанные с бароклинной неустойчивостью основного потока, чередуются с периодами трансформации геострофической турбулентности в поле волн Россби. В такие периоды трансформации происходит сильное взаимодействие между отдельными вихрями и струями, как это наблюдалось зимой – весной 1978 г. Тогда почти все вихри, прошедшие через полигон, существенным образом изменили свою форму, размер и интенсивность.

Результаты ПОЛИМОДЕ, крупнейшего из экспериментов данного направления, значительно расширили наше понимание физических процессов формирования и эволюции вихрей открытого океана и в целом оказали сильное влияние на дальнейшие исследования синоптических движений в Мировом океане.

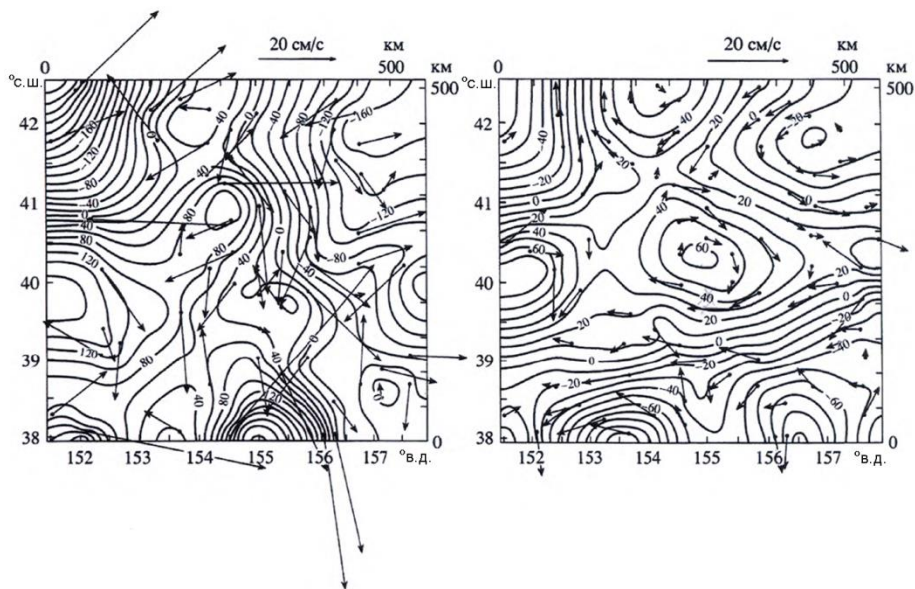
В конце 1979 г., в период завершения ПОЛИМОДЕ, в северо-восточной Атлантике вблизи Бискайского залива стартовал франко-британский эксперимент *Tourbillon* [27], сопоставимый по объему экспедиционных работ (10 АБС в течение 8 мес) и полученным результатам с проектами «Полигон-70» и *MODE*. В начале работ был зафиксирован антициклонический вихрь радиусом 50–70 км, который прослеживался до глубин 4000 м и перемещался на запад со средней скоростью 1,8 см/с. В конце эксперимента к полигону приблизился второй, менее интенсивный циклонический вихрь.

Во второй половине 1987 г. по инициативе А. С. Моница в северо-западной части Тихого океана в районе Субарктического фронта в течение 2,5 мес проходил эксперимент «Мегаполигон». Само название эксперимента подчеркивает его широкий пространственный охват: было развернуто 177 АБС в узлах треугольной сетки с шагом 42,5 км на горизонтах 120 и 1200 м (на некоторых АБС – дополнительно на горизонтах 400 и 4500 м). Существенным вкладом в общий объем экспериментального материала стало выполнение в течение относительно короткого времени эксперимента 6 гидрологических съемок полигона.

Несмотря на почти половину потерянной информации вследствие прохождения тайфунов, было зафиксировано более 20 синоптических вихрей [28–30]. Одним из важных результатов эксперимента стало обнаружение существенных различий структуры течений в главном термоклине (горизонты 120 и 400 м) и в более глубоких слоях (1200 и 4500 м) (рис. 4). Поля течений на 120 и 4500 м почти не коррелировали друг с другом, в то время как динамические структуры на 1200 и 4500 м были, как правило, подобны. В главном термоклине горизонтальный масштаб синоптических вихрей (35 км) был близок к бароклинному масштабу Россби, в глубинах океана он соответствовал масштабу Райнса (80 км), причем именно в глубинных слоях наблюдалось устойчивое западное движение вихрей.

Как и для экспериментов «Полигон-70» и ПОЛИМОДЕ, в качестве причин, обуславливающих пространственно-временную изменчивость наблюдаемых полей «Мегаполигона», рассматривалось несколько физических процессов: совместное действие  $\beta$ -эффекта и захвата крупномасштабным течением как причина западного переноса вихрей; чередование периодов генера-

ции вихрей бароклинной неустойчивостью основного потока и последующей баротропизации вихрей с увеличением их масштаба; возникновение и эволюция волн Россби.



**Р и с. 4.** Векторы течений и аномалии функции тока ( $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) на глубине 120 м (слева) и 1200 м (справа) 2 октября 1987 г. в районе эксперимента «Мегасполигон»

**Fig. 4.** Current vectors and stream function anomalies ( $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) at the depths 120 m (to the left) and 1200 m (to the right) in the region of the “Megapolygon” experiment on October 2, 1987

В 1985 г. во время выполнения эксперимента «Мезополлигон» в Тропической Атлантике Институт океанологии АН СССР провел детальное исследование линзы средиземноморской воды, представляющей собой отдельный класс океанских вихрей, – глубинный антициклонический вихрь [31]. С помощью измерительной системы из 15 АБС и серии гидрологических съемок были определены характеристики линзы, которая залегала в слое 780–1400 м и имела эллипсоидальную форму с осями 70 и 55 км. Максимальная скорость в вихре на расстоянии 15 км от центра достигала 30 см/с на глубине 1000 м. Большие аномалии относительно фоновых значений температуры и солёности ( $4,5^\circ\text{C}$  и  $0,87\text{‰}$ ) и значительная удаленность (2500 км) от места формирования линзы вблизи Пиренейского п-ова экспериментально доказали устойчивость и длительность существования такого рода вихревых образований, вносящих свой вклад в формирование промежуточных водных масс океана.

### Развитие исследований вихрей в океане

Наиболее известные из специализированных экспериментов по изучению синоптических вихрей в океане на полигонах были выполнены в 1970–1980-х гг. Достигнутые в них результаты обобщены во многих работах, в частности в [20, 32, 33]. Общие оценки вихревой активности в Мировом океане, сделанные в разные годы, основывались на различных типах измерений и расчетов, которые включали: данные о сносе судов [34, 35], расчеты геострофических течений [32], инструментальные измерения течений [36, 37], данные о дрейфе



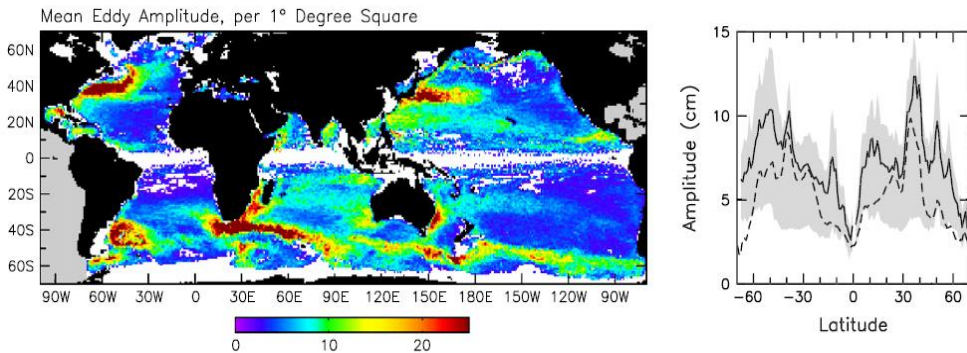
поверхностных и глубинных дрейфтеров [38–42], анализ термохалинной структуры вод [20, 43–47], данные спутниковой альтиметрии [48–54].

По мере развития технических средств и в условиях постоянного сокращения экспедиционной деятельности в океанах и морях роль спутниковых и дрейфтерных технологий в области экспериментальных исследований океана постепенно стала преобладающей. Резко увеличившийся объем информации из этих источников стимулировал большое количество работ, посвященных методам выявления вихревых образований, географическому распределению и пространственно-временной изменчивости вихрей. С точки зрения получения надежных оценок синоптической изменчивости в океане каждый из типов данных имеет свои достоинства и недостатки. Например, наиболее используемые в настоящее время данные спутниковых альтиметров имеют глобальное покрытие и не зависят от погоды, что позволяет охватить всю акваторию океана, в том числе малоисследованные районы (за исключением покрытых льдом). Однако спутниковая информация непосредственно относится лишь к поверхностному слою океана, а степень ее репрезентативности для более глубоких слоев требует специального изучения. Также следует учитывать, что, несмотря на прогресс в области гравиметрических измерений, проблемы определения точной формы геоида и, соответственно, абсолютной динамической топографии, до конца не решены. Существуют свои ограничения для оценок скорости течений в экваториальной зоне океана ввиду неопределенности там геострофических соотношений. Алгоритмы автоматического выделения вихрей (*Okubo-Weiss*, *winding-angle* и др.) основаны на различных математических подходах, и результаты поиска могут сильно различаться. Не будут явным образом проявляться в уровенной поверхности океана и вихри, формируемые неустойчивостью сдвига крупномасштабных течений.

Тем не менее общие оценки вихревой активности в Мировом океане, основанные на различных источниках информации, дают в целом согласованную картину, по существу не противоречащую обобщениям 30–50-летней давности. Начиная с первых [34, 35] и заканчивая последними [52–54] обобщениями глобального распределения энергии синоптических движений, отмечается ее прямая зависимость от интенсивности крупномасштабных течений. С самого начала возникло представление, сформулированное в свое время К. Вюншем [55, с. 373; 56, с. 65], согласно которому основная часть энергии в синоптическом диапазоне сосредоточена вблизи западных пограничных течений, которые служат генераторами вихревой энергии для остальной части океана. Результаты более чем 20-летних альтиметрических измерений и анализ огромного количества дрейфтерных траекторий также подтверждают, что вихревая энергия (до  $4500 \text{ см}^2/\text{с}^2$ ) на порядок превышает среднюю кинетическую энергию средних течений и максимальна в области интенсивных струйных течений (рис. 5).

Если ранее считалось, что наиболее мощными источниками энергии для синоптических движений являются Гольфстрим и Куро시오, то сейчас список географических районов с наибольшей интенсивностью вихревой энергии выглядит следующим образом (по убыванию): район рециркуляции течения Агульяс, система Куро시오, система Гольфстрима, район слияния Бразильско-

го и Фольклендского течений, Антарктическое Циркумполярное течение (АЦТ), Восточно-Австралийское течение. Достаточно высоким уровнем вихревой энергии отличается система экваториальных течений. Подтверждается, что в АЦТ значительный рост энергии вихревых движений происходит не вследствие увеличения скорости крупномасштабного потока, а в результате резких изменений рельефа дна, как, например, в проливе Дрейка или над подводными хребтами к югу от Новой Зеландии. Как отмечалось и в более ранних работах, влияние рельефа дна в гораздо меньшей степени проявляется в системе Куроиси – Северо-Тихоокеанское течение (вблизи подводных Императорских гор) и совсем слабо заметно в системе Гольфстрим – Северо-Атлантическое течение (при пересечении Срединно-Атлантического хребта).



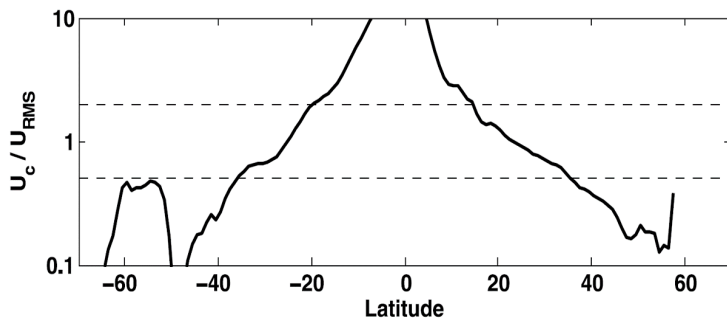
**Р и с. 5.** Пространственное (слева) и меридиональное (справа) распределение осредненных на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  значений амплитуды вихрей с продолжительностью жизни  $\geq 16$  недель [53, рис. 10, с. 182]

**Fig. 5.** Spatial (to the left) and meridional (to the right) distribution of the amplitude values (averaged at the  $1^\circ \times 1^\circ$  grid) of the eddies whose lifetimes are  $\geq 16$  weeks [53, Fig.10, p. 182]

Оценки горизонтальных размеров вихрей открытого океана на основе измерений первого поколения альтиметров и гидрологических данных имели достаточно широкий разброс, в среднем группируясь вокруг значений локального бароклинного масштаба Россби [20, 33, 35, 57, 58]. По данным современного поколения спутниковых альтиметров [50, 52, 53], величины радиусов вихрей в более чем 90% случаев находятся в диапазоне 50–150 км, причем существенных различий между размерами циклонов и антициклонов не выявлено. Размер вихрей монотонно уменьшается от примерно 200 км в приэкваториальных районах до 75 км на  $60^\circ$  географической широты, т. е. уменьшение размера вихрей происходит гораздо медленнее, чем следует из уменьшения бароклинного радиуса Россби с широтой. Такое несоответствие объясняется в [59] эффектом нелинейного каскада передачи кинетической энергии по спектру.

Традиционно в литературе обсуждается вопрос о направлении перемещения вихрей [20, 32, 60–62]. В работах последнего десятилетия [52–54, 63] констатируется, что вихри движутся преимущественно в западном направлении (75% всех случаев), кроме районов преобладающего восточного переноса: Гольфстрим, Куроиси, АЦТ. Учитывая имевшую место дискуссию в лите-

ратуре о значительном превышении скорости движения аномалий поверхности океана по сравнению с теоретической скоростью линейных волн Россби, следует выделить работу [53]. Отмечая, что оценки перемещения возмущений уровневой поверхности океана в значительной степени зависят от пространственного разрешения данных и методов их сглаживания, авторы утверждают, что скорости вихрей все же близки к фазовой скорости длинных бароклинных волн Россби. В работе [54] на основе соотношения между зональной фазовой скоростью волн Россби  $C_R$  и масштабом скорости вихревых движений  $u_t$  объясняется различная физическая природа западного переноса синоптических возмущений в тропиках и в умеренных широтах. В тропиках, где  $u_t < |C_R|$ , нелинейные взаимодействия приводят к переносу энергии от вихрей, формируемых бароклинной неустойчивостью, к волнам Россби, дополнительно усиливая их. В более высоких широтах, где  $u_t > |C_R|$ , этот процесс уже не является доминирующим ввиду уменьшения масштабов волн. Географическая граница между двумя динамическими режимами ( $u_t \sim |C_R|$ ) проходит по  $\pm 30^\circ$  широты (рис. 6), что в целом соответствует оценке границы перехода от волн Россби к нелинейным вихрям, полученной в работе [52].



**Р и с. 6.** Соотношение между зональной фазовой скоростью волн Россби  $C_R$  и масштабом скорости вихревых движений  $u_t$  первой бароклинной моды [54, рис. 10, с. 9]. Штриховыми линиями показаны уровни  $C_R/u_t$ , равные 1/2 и 2

**F i g. 6.** Ratio of the Rossby waves zonal phase velocity  $C_R$  to the eddy velocity scale  $u_t$  of the first baroclinic mode [54, Fig. 10, p. 9]. Dashed lines show the levels of  $C_R/u_t$  equal to 1/2 and 2

Применяемые с 1990-х гг. методы комбинации нескольких массивов спутниковых данных предоставляют дополнительные возможности для исследований вихревой динамики океана. Целый ряд интересных результатов был получен в работах [52, 53]: преобладание вне тропической зоны вихрей с сильной нелинейностью (максимальная линейная скорость вращения более чем в 5 раз превышает скорость перемещения); небольшое преобладание антициклонов над циклонами в Северном полушарии; повышенная повторяемость циклонов среди наиболее интенсивных вихрей Южного полушария; медленный сдвиг траекторий вихрей к полюсам для циклонов и к экватору – для антициклонов.

### Перспективы исследований

Несмотря на значительные успехи методов дистанционного зондирования Земли, получить по экспериментальным данным полное, всеобъемлющее

представление о синоптических вихрях для всей толщи океана все еще не представляется возможным. Запуск большого числа дрейфтеров и зондирующих буев *Argo* не может полностью компенсировать сокращение целенаправленно проводимых океанографических съемок и полигонных измерений. Это связано как со стохастичностью и непредсказуемостью траекторий дрейфующих объектов, так и с существующими для них ограничениями по глубине зондирования. Перспективными методами и средствами экспериментальных исследований вихревой динамики в океане можно считать: новые панорамные альтиметры с повышенным пространственным разрешением; новые модели геоида высокого разрешения; новые автономные длительно действующие по заданным программам зондирующие комплексы; новые средства дистанционного измерения солености повышенной точности; новое поколение АБС для возобновления в ключевых районах Мирового океана полигонных экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Iselin C. O'D.* A study of the circulation of the western North Atlantic // *Papers in Physical Oceanography and Meteorology*. 1936. Vol. 4, iss. 4. P. 1–101.
2. *Church P. E.* Temperatures of the western North Atlantic from thermograph records // *Association d'Océanographie Physique. Publication Scientifique*. 1937. No. 4. P. 1–32.
3. *Uda M.* On the distribution, formation and movement of the dicho-thermal water to the north-east of Japan // *Uni to Sora*. 1935. Vol. 15. P. 445–452 (in Japanese).
4. *Iselin C. O'D, Fuglister F. C.* Some recent developments in the study of the Gulf Stream // *Journal of Marine Research*. 1948. Vol. 7, iss. 3. P. 317–329.
5. *Fuglister F. C., Worthington L. V.* Some results of a multiple ship survey of the Gulf Stream // *Tellus*. 1951. Vol. 3, iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v3i1.8614>
6. *Kitano K.* Some Properties of the Warm Eddies Generated in the Confluence Zone of the Kuroshio and Oyashio Currents // *Journal of Physical Oceanography*. 1975. Vol. 5, iss. 2. P. 245–252. doi:10.1175/1520-0485(1975)005<0245:SPOTWE>2.0.CO;2
7. *Swallow J. C.* A discussion on ocean currents and their dynamics – The *Aries* current measurements in the western North Atlantic // *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A*. 1971. Vol. 270, iss. 1206. P. 451–460. <https://doi.org/10.1098/rsta.1971.0084>
8. *Leipper D. F.* A sequence of current patterns in the Gulf of Mexico // *Journal of Geophysical Research: Oceans and Atmospheres*. 1970. Vol. 75, iss. 3. P. 637–657. doi:10.1029/JC075i003p00637
9. *Hamon B. V.* The East Australian current, 1960–1964 // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1965. Vol. 12, iss. 6. P. 899–921. doi:10.1016/0011-7471(65)90813-2
10. *Boland F. M., Hamon B. V.* The East Australian current, 1965–1968 // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1970. Vol. 17, iss. 4. P. 777–794. doi:10.1016/0011-7471(70)90041-0
11. Длительные измерения изменчивости физических полей на океанических полигонах, как новый этап в исследовании океана / В. Б. Штокман [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1969. Т. 186, № 5. С. 1070–1073.
12. *Кошляков М. Н., Галеркин Л. И., Чыонг Динь Хиен.* О мезоструктуре геострофических течений открытого океана // *Океанология*. 1970. Т. X, вып. 5. С. 805–814.
13. Large-scale multi-buoy experiment in the Tropical Atlantic / L. M. Brekhovskikh [et al.] // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1971. Vol. 18, iss. 12. P. 1189–1206. doi:10.1016/0011-7471(71)90026-X
14. *Кошляков М. Н., Грачев Ю. М.* Среднемасштабные течения на гидрофизическом полигоне в Тропической Атлантике // *Атлантический гидрофизический Полигон-70* / Под ред. В. Г. Корты, В. С. Самойленко. М. : Наука, 1974. С. 163–180.

15. Кошляков М. Н. Результаты наблюдений на атлантическом полигоне 1970 г. в свете некоторых моделей свободных волн Россби // *Океанология*. 1973. Т. XIII, вып. 5. С. 760–767.
16. McWilliams J. C., Robinson A. R. A wave analysis of the Polygon array in the tropical Atlantic // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1974. Vol. 21, iss. 5. P. 359–368. doi:10.1016/0011-7471(74)90040-0
17. Коняев К. В., Сабинин К. Д. Спектральное описание синоптической изменчивости течений в океане по данным «Полигона 70» и «Полимоде» // *Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана*. 1981. Т. 17, № 11. С. 1191–1200.
18. The Mid-Ocean Dynamics Experiment / The Mode Group // *Deep-Sea Research*. 1978. Vol. 25, iss. 10. P. 859–910. doi:10.1016/0146-6291(78)90632-X
19. Robinson A. R. Dynamics of ocean currents and circulation: results of POLYMODE and Related Investigations // *Topics in Ocean Physics* / Eds. A. Osborne and P. M. Rizzoli. Bologna: Società Italiana di Fisica, 1982. P. 3–29.
20. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. 2-е издание. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 510 с.
21. Синоптические вихри в океане / Б. А. Нелепо [и др.]. Киев : Наукова думка, 1980. 288 с.
22. Экспериментальные исследования по международной программе «ПОЛИМОДЕ» (результаты 16-го рейса НИС «Академик Вернадский»). Севастополь : МГИ, 1978. 149 с.
23. Экспериментальные исследования по международной программе «ПОЛИМОДЕ» (результаты 17-го рейса НИС «Академик Вернадский» и 33-го рейса НИС «Михаил Ломоносов»). Севастополь : МГИ, 1978. 178 с.
24. Корт В. Г., Павлова Ю. В., Фомин Л. М. Рельеф изотермической поверхности 15°C // *Известия ПОЛИМОДЕ*. М. : Институт океанологии АН СССР, 1980. Вып. 2. С. 5–13.
25. Генерация синоптических океанских вихрей в районе ПОЛИМОДЕ / М. Н. Кошляков [и др.] // *Океанология*. 1984. Т. XXIV, вып. 1. С. 5–14.
26. Грачев Ю. М., Кошляков М. Н., Михайличенко Ю. Г. Синоптические вихри в Саргассовом море. М. : Наука, 1988. 220 с.
27. Tourbillon L. G. The Tourbillon experiment: a study of a mesoscale eddy in the eastern North Atlantic // *Deep-Sea Research. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1983. Vol. 30, iss. 5. P. 475–511. doi:10.1016/0198-0149(83)90086-9
28. Об океанских вихрях на мегаполигоне / В. А. Бубнов [и др.] // *Доклады АН СССР*. 1988. Т. 301, № 6. С. 1468–1471.
29. Структура и изменчивость поля течений в термоклине по данным «Мегаполигона-87» / М. Н. Кошляков [и др.] // *Эксперимент «Мегаполигон»*. М. : Наука, 1992. С. 251–259.
30. Hydrophysical experiment “Megapolygon-87” in the northwestern Pacific subarctic frontal zone / N. A. Maximenko [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C7. P. 14143–14163. doi:10.1029/2000JC000436
31. О мезомасштабных неоднородностях океана / Ю. А. Иванов [и др.] // *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 289, № 3. С. 706–709.
32. Eddies in Marine Science / Ed. A. R. Robison. Berlin, Heidelberg : Springer, 1983. 609 p. doi:10.1007/978-3-642-69003-7
33. Блатов А. С., Тужилкин В. С. Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане // *Итоги науки и техники. Сер. Океанология*. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 8. 248 с.
34. Wyrki K., Magaard L., Hager J. Eddy energy in the oceans // *Journal of Geophysical Research: Oceans and Atmospheres*. 1976. Vol. 81, iss. 15. С. 2641–2646. doi:10.1029/JC081i015p02641
35. Dantzer H. L. Jr. Geographic variations in intensity of the North Atlantic and North Pacific oceanic eddy fields // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1976. Vol. 23, iss. 9. P. 783–794. doi:10.1016/0011-7471(76)90846-9

36. *Dickson R. R.* Global Summaries and Intercomparisons: Flow Statistics from Long-Term Current Meter Moorings // *Eddies in Marine Science. Topics in Atmospheric and Oceanographic Sciences* / Ed. A. R. Robinson. Berlin, Heidelberg : Springer, 1983. P. 278–353. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-69003-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69003-7_15)
37. *Schmitz Jr., William J., Luyten J. R.* Spectral time scales for mid-latitude eddies // *Journal of Marine Research*. 1991. Vol. 49, iss. 1. P. 75–107. doi:10.1357/002224091784968585
38. *Richardson P. L.* Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1983. Vol. 88, iss. C7. P. 4355–4367. doi:10.1029/JC088iC07p04355
39. *Krauss W., Käse R. H.* Mean circulation and eddy kinetic energy in the eastern North Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1984. Vol. 89, iss. C3. P. 3407–3415. doi:10.1029/JC089iC03p03407
40. *Rosby H. T., Riser S. C., Mariano A. J.* The Western North Atlantic – A Lagrangian Viewpoint // *Eddies in Marine Science. Topics in Atmospheric and Oceanographic Sciences* / Ed. A. R. Robinson. Berlin, Heidelberg : Springer, 1983. P. 66–91. doi:10.1007/978-3-642-69003-7\_4
41. Mean Dynamic Topography of the Ocean Derived from Satellite and Drifting Buoy Data Using Three Different Techniques / N. Maximenko [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 9. P. 1910–1919. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO672.1>
42. *Lumpkin R., Johnson G. C.* Global ocean surface velocities from drifters: Mean, variance, El Niño – Southern Oscillation response, and seasonal cycle // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 6. P. 2992–3006. doi:10.1002/jgrc.20210
43. *Dantzer H. L. Jr.* Potential Energy Maxima in the Tropical and Subtropical North Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7, iss. 4. P. 512–519. doi:10.1175/1520-0485(1977)007<0512:PEMITT>2.0.CO;2
44. *Levitus S.* Climatological atlas of the world ocean. Rockville, Md. : US Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1982. 173 p.
45. *Emery W. J.* Global Summary: Review of Eddy Phenomena as Expressed in Temperature Measurements // *Eddies in Marine Science* / Ed. A. R. Robinson. Berlin, Heidelberg : Springer, 1983. P. 354–375. doi:10.1007/978-3-642-69003-7\_16
46. *Emery W. J., Lee W. G., Møgaard L.* Geographic and Seasonal Distributions of Brunt-Väisälä Frequency and Rossby Radii in the North Pacific and North Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. 1984. Vol. 14, iss. 2. P. 294–317. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<0294:GASDOB>2.0.CO;2
47. Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation / D. B. Chelton [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1998. Vol. 28, iss. 3. P. 433–460. doi:10.1175/1520-0485(1998)028<0433:GVOTFB>2.0.CO;2
48. *Cheney R. E., Marsh J. G., Beckley B. D.* Global mesoscale variability from collinear tracks of SEASAT altimeter data // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1983. Vol. 88, iss. C7. P. 4343–4354. <https://doi.org/10.1029/JC088iC07p04343>
49. Variations of global mesoscale eddy energy observed from Geosat / C. K. Shum [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990. Vol. 95, iss. C10. P. 17865–17876. doi:10.1029/JC095iC10p17865
50. *Stammer D.* Global Characteristics of Ocean Variability Estimated from Regional TOPEX/POSEIDON Altimeter Measurements // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. Vol. 27, iss. 8. P. 1743–1769. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<1743:GCOOVE>2.0.CO;2
51. *Ducet N., Le Traon P. Y., Reverdin G.* Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2000. Vol. 105, iss. C8. P. 19477–19498. doi:10.1029/2000JC900063
52. Global observations of large oceanic eddies / D. B. Chelton [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34, iss. 15. L15606. doi:10.1029/2007GL030812
53. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, iss. 2. P. 167–216. doi:10.1016/j.pocan.2011.01.002

54. *Tulloch R., Marshall J., Smith K. S.* Interpretation of the propagation of surface altimetric observations in terms of planetary waves and geostrophic turbulence // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. Vol. 114, iss. C2. C02005. doi:10.1029/2008JC005055
55. *Wunsch C.* Low frequency variability of the sea // *Evolution of Physical Oceanography: Scientific Surveys in Honor of Henry Stommel* / Eds. B. A. Warren, C. Wunsch. Cambridge : The MIT Press, 1981. P. 342–374.
56. *Wunsch C.* Western North Atlantic Interior // *Eddies in Marine Science* / Ed. A. R. Robinson. Berlin, Heidelberg : Springer, 1983. P. 46–65. doi:10.1007/978-3-642-69003-7\_3
57. *Bernstein R. L., White W. B.* Time and Length Scales of Baroclinic Eddies in the Central North Pacific Ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1974. Vol. 4, iss. 4. P. 613–624. doi:10.1175/1520-0485(1974)004<0613:TALSOB>2.0.CO;2
58. *Fu L.-L.* On the wave number spectrum of oceanic mesoscale variability observed by the SEASAT altimeter // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1983. Vol. 88, iss. C7. P. 4331–4341. doi:10.1029/JC088iC07p04331
59. *Scott R. B., Wang F.* Direct evidence of an oceanic inverse kinetic energy cascade from satellite altimetry // *Journal of Physical Oceanography*. 2005. Vol. 35, iss. 9. P.1650–1666. doi:10.1175/JPO2771.1
60. *Cushman-Roisin B., Tang B., Chassignet E. P.* Westward Motion of Mesoscale Eddies // *Journal of Physical Oceanography*. 1990. Vol. 20, iss. 5. P. 758–768. doi:10.1175/1520-0485(1990)020<0758:WMOME>2.0.CO;2
61. *Chelton D. B., Schlax M. G.* Global Observations of Oceanic Rossby Waves // *Science*. 1996. Vol. 272, iss. 5259. P. 234–238. doi:10.1126/science.272.5259.234
62. *Killworth P. D., Chelton D. B., De Szoeke R. A.* The Speed of Observed and Theoretical Long Extratropical Planetary Waves // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. Vol. 27, iss. 9. P. 1946–1966. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<1946:TSSOAT>2.0.CO;2
63. *Fu L.-L.* Patterns and Velocity of Propagation of the Global Ocean Eddy Variability // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. Vol. 114, iss. C11. C11017. doi:10.1029/2009JC005349

*Об авторах :*

**Кошляков Михаил Николаевич**, главный научный сотрудник, лаборатория морских течений, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), доктор физико-математических наук, профессор, mnkoshl@ocean.ru

**Белокопытов Владимир Николаевич**, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4699-9588**, **Scopus Author ID: 6602381894**, v.belokopytov@gmail.com