

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ СРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫХ ВИХРЕЙ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ

Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36,
e-mail: borisfil@yandex.ru; natali45@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 16.07.2020, одобрена к печати 25.08.2020.

Промежуточные глубины (500–1500 м) северо-восточной части Атлантического океана заняты Средиземноморскими водами (СМВ). Эти воды поступают из Средиземного моря с нижним течением через Гибралтарский пролив. Соленость этих вод превышает 37.0 епс, а температура выше, чем 13°C. Кроме квазинепрерывной «струйной» компоненты в переносе СМВ имеется и дискретная – «линзовая» – составляющая. Это внутритермоклинные вихри (ВТВ) или долгоживущие линзы СМВ («Медди»), которые формируются к югу и к западу от Пиренейского полуострова, распространяются на значительные расстояния и, разрушаясь, поддерживают язык соленых СМВ далеко от Гибралтарского пролива. Цель этой работы дать краткий обзор натуральных исследований этого феномена и на базе специально отобранных экспериментальных наблюдений определить критерий для выделения вихрей СМВ – линз. С помощью *T, S*-анализа характеристик ядер этих линз показаны особенности их пространственной и временной эволюции.

Ключевые слова: средиземноморские внутритермоклинные вихри, распространение и эволюция линз СМВ, обзор натуральных исследований вихрей в Атлантике

Введение

На континентальных склонах Пиренейского полуострова формируются антициклонические и циклонические внутритермоклинные, средиземноморские вихри (ВТВ) или линзы. Именно здесь, к югу от мыса Сент-Винсент, в 1968 г. Сваллоу впервые обнаружил ВТВ на глубинах 750–1250 м с помощью изобретенных им же поплавков нейтральной плавучести (Swallow, 1969). Эти вихри образуются в результате динамической неустойчивости придонного гравитационного течения средиземноморских вод (СМВ), поступающих через Гибралтарский пролив. Величина расхода течения около 0.7 Св (Bryden et al., 1994). Далее эти воды с аномальными величинами температуры и солености, прижимаясь под действием силы Кориолиса к континентальному склону Пиренейского полуострова, двигаются вдоль его южных и западных границ (Madelain, 1970; Johnson et al., 2002; Serra, Ambar, 2002). При пересечении струями СМВ каньонов континентального склона возникает неустойчивость потока вод и происходит как слив этих вод по каньонам (Алейник

и др., 1998; Ambar et al., 2008), так и отрыв струй в сторону открытого моря (Филюшкин, Плахин, 1995). При этом формируются дипольные системы ВТВ. Они выделяются аномально высокими значениями температуры (до 3°C) и солёности (до 0.6) по отношению к окружающим их водам и образуют особый класс вихрей СМВ (mediterranean eddy или meddy). Это дает возможность относительно легко определять их положение в океане, геометрические размеры и содержание тепла и соли, а кроме того, исследовать их эволюцию на всех стадиях жизни вплоть до разрушения (Armi et al., 1989; Richardson et al., 1989).

Основными районами формирования вихрей СМВ по данным многолетних наблюдений можно считать каньоны Кадисского залива, район мыса Сент-Винсент (Ambar et al., 1983; Armi, Zenk, 1984; Bower et al., 1997; Алейник и др., 1998; Serra, Ambar, 2002) и каньоны вдоль западного побережья Португалии (Kase et al., 1989; Zenk et al., 1992; Paillet et al., 2002). В начальный момент отрыва объема вод от струи СМВ в устье каньона вода опускается на глубины соответствующей плотности и формирует дипольные системы из двух разновращающихся вихрей – циклонических и антициклонических. Эта ситуация совпадает с результатами лабораторных экспериментов, когда при впрыскивании струи плотных вод в толщу жидкости формируются когерентные грибовидные структуры из двух вихрей (Fedorov et al., 1989; Heijst, Flor, 1989). В то же время циклонические вихри, сформированные одновременно как части диполя, разрушаются быстрее. Время их жизни составляет 0.5–1 год, тогда как антициклонические вихри или линзы (именно они называются meddies) живут в среднем 4–5 лет и редко больше (Егорихин и др., 1987). В дальнейшем будут анализироваться только эти образования и в качестве синонимов будет использоваться обозначение ВТВ или линзы. При этом циклонические вихри существенно меньше по объему воды и их характеристики в ядре выражены слабее, чем в антициклонических (Филюшкин, Плахин, 1995; Carton et al., 2002; Carton et al., 2010). Как правило, они разрушаются в районе формирования и определяют гидрологический режим в области Атлантического океана, прилегающей к Пиренейскому полуострову. Тогда как антициклонические ВТВ осуществляют основной перенос тепла и соли СМВ на промежуточных глубинах 500–1500 м Атлантического океана на большие расстояния от района их формирования (до 6000 км).

Антициклонические вихри представляют собой замкнутые эллипсовидные образования с горизонтальными осями от 40 до 100 км и с вертикальными – от 0.4 до 0.9 км (т.е. похожие на огромные двояковыпуклые линзы) и объемом СМВ до 3500 км³ (средний объем для 178 линз равен 1723 км³) (Filyushkin, Sokolovskiy, 2011). Они наблюдаются, главным образом, в северо-восточной части Атлантического океана и обнаруживаются до срединного Атлантического хребта на западе и от 40°с.ш. на севере и до 20°с.ш. на юге (Richardson et al., 2000; Белкин и др., 1986; Филюшкин и др., 2009; Filyushkin, Sokolovskiy, 2011; Kostianoy, Belkin, 1989; Bashmachnikov et al., 2015).

Тем не менее, эта ограниченная область формирования ВТВ является основным источником тепла и соли и определяет гидрологический режим значительной

части Атлантического океана на промежуточных глубинах. Например, из 174 гидрологических разрезов по 36° с.ш., выполненных в период 1971–1985 гг. кораблями погоды Роскомгидромета, на 43-х разрезах были отмечены следы вихревых образований по значениям температуры и солености (Филюшкин и др., 2003). В работе (Armi et al., 1989) было подсчитано, что ежегодный перенос тремя линзами СМВ (типа линзы Shagon) тепла и соли на промежуточных глубинах на большие расстояния в течение многих лет может быть достаточен для поддержания постоянно существующего языка СМВ на промежуточных глубинах (Filyushkin, Sokolovskiy, 2011; de Marez et al., 2020).

Полученные результаты натуральных экспериментов породили значительный интерес к дальнейшему исследованию формирования ВТВ, их распространению, взаимодействию с особенностями подводного рельефа, с сильными течениями и фронтальными зонами, а также к механизму разрушения линз, при котором возникают зоны повышенной турбулентности на промежуточных глубинах океана.

В этом кратком обзоре рассмотрим в хронологическом порядке основные направления исследования ВТВ: общие закономерности распределения линз в океане, их эволюцию и влияние на гидрологические процессы. Для более четкого выделения ВТВ средиземноморского происхождения будет применен метод *T, S*-анализа. В итоге отметим два направления дальнейшего развития данной тематики: метод математического моделирования взаимодействия между вихрями в рамках трехслойной квазигеострофической модели океана с применением методов контурной динамики (Sokolovskiy, Verron, 2013; Sokolovskiy et al., 2013) и метод лабораторного эксперимента по исследованию формирования периодических вихревых структур от локального источника массы (Fedorov et al., 1989; Зацепин et al., 1998).

Основные натурные эксперименты по исследованиям внутритермоклинных вихрей

Вторая половина XX века охарактеризовалась активным изучением океанских вихрей. Появились новые возможности инструментальных измерений скорости течения на больших глубинах океана. К полигонным измерениям течений с помощью глубоководных вертушек, устанавливаемых на буйковых станциях (заякоренных и притопленных), добавились автономные, свободно дрейфующие поплавки нейтральной плавучести. Они могут располагаться на глубине до 4 км, и их траектории движения определяются с помощью акустических сигналов. Английский океанолог, создатель первого образца этих поплавков – Дж. Сваллоу, выполнил наблюдения в 1959–1960 гг. в Саргассовом море на глубинах 2 и 4 км. Им были обнаружены сильные нестационарные течения с характерными временными и пространственными масштабами 20 суток и 100 км (Swallow, 1971). В 1968 г. на континентальном склоне Пиренейского полуострова к югу от мыса Сент-Винсент он же впервые с помощью этих поплавков обнаружил изолированный ВТВ – линзу СМВ на глубинах 850–1250 м (Swallow, 1969).

Одновременно с обнаружением вихрей открытого океана (Каменкович et al., 1982) были открыты подповерхностные мезомасштабные вихри, в основном, антициклонического вращения, «именуемые как внутритермоклинные вихри» (Dugan et al., 1982; Федоров, 1986), или линзы (Armi, Zenk, 1984), или «субмезомасштабные когерентные вихри» (McWilliams, 1985; Kostianoy, Belkin, 1989). Основная концентрация этих ВТВ наблюдается в районе их формирования и области, прилегающей к Пиренейскому полуострову. Именно этот класс внутритермоклинных вихрей СМВ (Meddies) к настоящему времени изучен наиболее полно (Белкин и др., 1986; Kostianoy, Belkin 1989; Richardson et al., 1991; Richardson et al., 2000; Shapiro, Meshanov, 1996; Филлюшкин и др., 2009; Bashmachnikov et al., 2015). Анализ уже имеющихся наблюдений показал, что ВТВ встречаются в различных районах Мирового океана, при этом они отличаются от вихрей средиземноморского происхождения размерами, глубинами залегания и механизмами образования (Kostianoy, Belkin, 1989; Белкин, Костяной, 1992).

В 1976 г. был обнаружен и исследован внутритермоклинный вихрь на глубинах 900–1000 м около Багамских островов (20°с.ш. и 70°з.д.), по своим размерам и гидрологическим характеристикам близкий к Средиземноморским ВТВ (McDowell, Rossby, 1978). Кроме того, при анализе наблюдений в районе ПОЛИМОДЕ было обнаружено значительное число вихревых образований на глубинах 700–1500 м со значениями T , S -характеристик, близких к значениям T , S -характеристик средиземноморских линз (Rossby et al., 1983; Виноградов, Павельсон, 1980; McDowell, 1986).

Обнаружение линз СМВ в различных районах Атлантики инициировало проведение специальных исследований для определения механизмов формирования, эволюции и распространения их в океане. Здесь перечислены, в основном, наиболее важные эксперименты в хронологическом порядке. Основные результаты этих наблюдений можно найти в цитируемых здесь статьях, а некоторые из них будут кратко обсуждены при дальнейшем анализе наблюдений.

В течение 20 лет (1980–2000 гг.) в рамках эксперимента «KIEL 276» (33°с.ш., 22°з.д.) было зафиксировано всего десять линз СМВ: 6 в первые четыре года и только 4 в течение последних 16 лет (Siedler et al., 2005). Все эти линзы двигались в юго-западном направлении со скоростью 2–3 см/с.

В 1984–1986 гг. американскими исследователями был проведен уникальный эксперимент SHARON, в котором были проведены наблюдения за дрейфом трех линз с помощью поплавков нейтральной плавучести в течение двух лет. Для одной из линз эти наблюдения сопровождалось четырьмя детальными гидрологическими съемками с начала дрейфа до практически полного ее разрушения (Armi et al., 1989; Richardson et al., 1989). Именно эти наблюдения впервые показали особенности пространственно-временной изменчивости линз СМВ.

В апреле–июне 1985 г. Институтом океанологии РАН в Атлантическом океане был проведен эксперимент МЕЗОПОЛИГОН (20°с.ш., 37°з.д.). В течение 3 месяцев были выполнены регулярные гидрологические съемки линзы, а ско-

рости течений измерялись с помощью вертушек, установленных на буйковых станциях, которые дважды переставлялись, отслеживая ее перемещения (Егорихин и др., 1987).

В 1988 г. Институт океанологии РАН провел специализированный рейс на научно-исследовательском судне «Витязь» (Филюшкин, 1989). Были выполнены уникальные наблюдения двух случаев формирования ВТВ. Во-первых, в устье каньона Портимао по данным гидрологической съемки и измерений течений с 9-ти буйковых станций за период времени с 12 по 22 августа наблюдалось формирование дипольной системы вихрей антициклонического и циклонического вращения на глубинах 800–1200 м (Алейник и др., 1998). Дипольный вихрь сместился на 50 км к западу. Он наблюдался и был исследован в сентябре 1988 г. экспедицией на исследовательском судне “Oceanus” как одинокий антициклонический вихрь, поскольку циклонический вихрь к этому времени уже разрушился (Prater, Sanford, 1994). Во-вторых, по данным трех гидрологических съемок в период 6–28 июля был исследован случай формирования дипольной системы внутритермоклинных вихрей в слое 700–1300 м в открытом океане на удалении 270 км от побережья Португалии на больших глубинах (>4000 м) (Филюшкин, Плахин, 1995).

В 1993–1995 гг. был выполнен важный французский эксперимент SEMAPHOR на полигоне в районе Азорской фронтальной зоны по исследованию динамики четырех линз, дрейф которых отслеживался с помощью поплавков нейтральной плавучести и проведением гидрологических съемок (Richardson, Tychensky, 1998; Tychensky, Carton, 1998). В этом эксперименте приняло участие научно-исследовательское судно Института океанологии РАН «Профессор Штокман». Была выполнена гидрологическая съемка части полигона, в результате которой обнаружена одна из четырех линз. Также была установлена буйковая станция с измерителями течений и температуры на больших глубинах (Иванов, Филюшкин, 1995).

Основные работы по исследованию динамики распространения вихрей СМВ, частоты формирования дипольных вихревых структур, путей их дрейфа и взаимодействия между собой и с особенностями рельефа дна были выполнены в последние десятилетия в рамках крупных европейских проектов: AMUSE – 05.1993–02.1994 (A Mediterranean Undercurrent Seeding Experiment); CANIGO – 09.1997–09.1998 (Canary Islands Azores Gibraltar Observations) и AMPOR (Physical, Chemical, Geological and Biological Aspects Associated to the Presence of the MW off the Portuguese Coast) (Serra, Ambar, 2002); SEMANE 1999, 2000/1, 2000/3, 2001 (Alves et al., 2014; Carton et al., 2002; Carton et al., 2010); проекта MEDTOP (Ambar et al., 2008; Serra et al., 2005; Serra et al., 2010; L’Hegaret et al., 2014). Эти многолетние исследования охватили обширную область Атлантики, вплоть до Азорской фронтальной зоны на юге.

При проведении этих исследований были реализованы новые технические достижения. Появились новые модели поплавков нейтральной плавучести, позволяющие отслеживать длительный дрейф вихрей и их взаимодействия между со-

бой (Schultz Tokos et al., 1994; L'Hegaret et al., 2014) и с рельефом дна (Armi et al., 1989; Richardson et al., 1989; Richardson, Tychensky, 1998; Carton et al., 2002; Carton et al., 2010). Спутниковая альтиметрия позволила фиксировать положение линз на поверхности океана (Stammer et al., 1991; Carton et al., 2002; Bashmachnikov et al., 2014), как по локальному изменению высоты поверхности моря (sea surface height – SSH), так и по изменению температуры поверхности моря (sea surface temperature – SST) (Serra et al., 2010; Bashmachnikov, Carton, 2012; Ienna et al., 2014; Le Cann et al., 2005). Появление автономных поплавков проекта «Арго» (Argo, 2000) позволило охватить огромное пространство Мирового океана измерениями профилей температуры и солености в слое 0–2000 м. По этим наблюдениям также стало возможным обнаруживать и отслеживать траектории движения линз (Демидов и др., 2012; Bashmachnikov et al., 2015; Филлюшкин и др., 2017). Кроме того были разработаны методы обнаружения линз при сейсмическом зондировании океана (Menesguen et al., 2009; Menesguen et al., 2012), акустической локации и томографии (Berezutskii et al., 1994; Гончаров и др., 2003; Гончаров и др., 1990; Мальцев и др., 1990). Были сделаны попытки их обнаружения с помощью штатного судового эхолота (частота излучения 33 кГц). Звукорассеивающий слой, располагающийся в нижней части ядра линзы на глубине 1200 м, был хорошо отмечен на ленте эхолота (Дыхно и др., 1991). Этот факт не исключает существования в линзе терригенной смеси, захваченной при формировании линзы в устье каньона (Thorpe, 1972).

Распространение линз СМВ в Атлантическом океане

Чтобы оценить роль линз в переносе тепла и соли на большие расстояния от источника их формирования, надо знать их количество, возникающее в течение года, и время их жизни. Время жизни линзы meddy1 (M1) в эксперименте SHARON оценивается в 4.3 года (Armi et al., 1989), а линза Мезополигон, на момент ее обнаружения, прожила более 5-ти лет и была еще далека от своего окончательного разрушения. Таким образом, общий возраст линзы можно оценивать величиной порядка 6 лет.

Труднее оценить число линз, возникающих в течение одного года. Теоретическая оценка водообмена между трансформируемой средиземноморской и атлантической водой с использованием метода резервуара дала величину числа линз за год порядка 100 (Кошляков, Пантелеев, 1989), хотя авторы посчитали это число завышенным. По данным эксперимента AMUSE была получена следующая оценка – 17 линз за 7 месяцев (Richardson et al., 1999), отсюда за год возможно появление 20–30 линз, и это только в районе каньона Портимао. Таким образом, в районе всех каньонов континентального склона Пиренейского полуострова можно ожидать формирования порядка 50 линз в течение года (Филлюшкин и др., 2009).

Анализ измерений всех профилей температуры и солености, полученных профилографами Арго за период с 2001 по 2010 гг., позволил обнаружить 2043 профиля, указывающих на наличие линз СМВ в открытой северо-восточной части океана.

Здесь надо заметить, что Арго встречается с линзами случайно. Однако при попадании поплавка в ядро линзы, он может после неоднократных всплытий–погружений оставаться там. В этом случае можно утверждать, что Арго отслеживает отдельные линзы и адекватно отражает их траекторию. Так что число обнаруженных линз можно узнать только после обработки всех материалов наблюдений (Демидов и др., 2012). На основании всех опубликованных работ и архивных данных гидрологических наблюдений за температурой и соленостью в восточной части северной Атлантики за период 1968–2008 гг., был составлен каталог этих линз в Институте океанологии РАН, который насчитывал 220 линз (Филюшкин и др., 2000; Филюшкин и др., 2009).

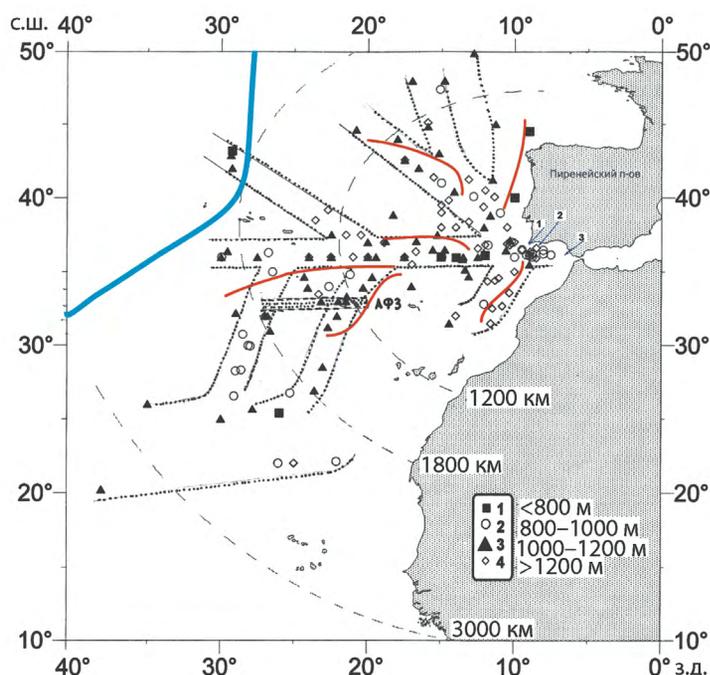


Рис. 1. Распространение линз СМВ в восточной части северной Атлантики. На врезке значками 1–4 показана глубина их ядер. Точечными линиями выделены основные направления их распространения. Красные линии указывают на скопления линз по данным наблюдений поплавками Арго. Толстой синей линией обозначено положение Срединно-Атлантического хребта. Пунктирные дуги проведены с радиусами, равными расстояниям от района происхождения вихрей (1200, 1800 и 3000 км). АФЗ-Азорская фронтальная зона, 1 – мыс Сент-Винсент, 2 – каньон Португао, 3 – Кадисский залив. (Рисунок взят из статьи (Филюшкин и др., 2009) и дополнен).

На рис. 1 показано распространение линз СМВ в восточной части северной Атлантики. Оконтурив их основные скопления в пространстве, мы практически получили схему основных течений на промежуточных глубинах в виде разветвленного дерева (Шапиро и др., 1992; Филюшкин и др., 2008). Этот рисунок распространения линз совпадает, в основном, с картой Башмачникова, построенной по каталогу с числом линз 242 (Bashmachnikov et al., 2015). В действительности все линзы движутся как поплавки нейтральной плавучести по изопикническим поверхностям, со-

ответствующим их средней плотности, что и определяет их положение по глубине. Поэтому положение всех линз определялось для четырех диапазонов глубин: меньше 800 м, 800–1000 м, 1000–1200 м и больше 1200 м (рис. 1). Число обнаруженных линз в каждом интервале глубин оказалось равным, соответственно, 7%, 20%, 43% и 30% от их общего числа, что говорит о преобладании в Атлантическом океане ВТВ более глубокого залегания – от 1000 до 1400 м (Филлюшкин и др., 2009).

Распространение линз по акватории Атлантического океана крайне неравномерно (рис. 1). На рисунке пунктиром показаны окружности, проведенные из точки каньона Портумао с радиусами 1200, 1800, и 3000 км. Они соответствуют удалению линз по времени на 2, 3 и 5 лет от района их формирования при средней скорости дрейфа, равной 1.48 км/сутки и, соответственно, в этих зонах находится 64%, 20%, 13% и около 3% долгоживущих линз (больше 5 лет). Исходя из этой оценки, можно считать, что на большом удалении от источника их происхождения число линз резко уменьшается.

По имеющимся данным выделяется несколько основных направлений распространения линз, хорошо совпадающих со схемами течений, рассчитанных по модели циркуляции Мирового океана Института вычислительной математики (Филлюшкин и др., 2008). Основная концентрация линз наблюдается в районе Кадисского залива. Далее линзы распространяются с течением на запад до 30°з.д. в узкой широтной зоне 35–36°с.ш. На север от этого течения отделяется струя вдоль материкового склона Пиренейского полуострова и струя на северо-запад, которая, в свою очередь, разделяется на две струи, и затем они практически достигают южной периферии Североатлантического течения (до 50°с.ш.). В районе Азорского поднятия от Западного течения отделяется северо-западная струя, огибающая это поднятие с севера. К югу от Западного течения отделяются три струи юго-западного направления: первая струя отходит практически от долготы м. Сент-Винсент и движется вдоль Марокканского побережья до 30°с.ш., с ней дрейфуют линзы с глубиной залегания ядер более 1200 м. В открытой части океана на долготе 20–27°з.д. от западного течения отделяются две струи в юго-западном направлении. На широте 25°с.ш. они практически соединяются и образуют общий поток на запад. Характер распространения линз подтверждает, что 70% антициклонических линз после их формирования дрейфуют в западном и южном направлениях, и только 30% линз – на север и северо-запад.

Пространственно-временная эволюция внутритермоклинных линз

Рассмотрим кратко результаты основных экспериментов, выполненных по наблюдениям ВТВ в Атлантическом океане за последние 50 лет. Для этой цели были отобраны ключевые наблюдения по исследованию различных свойств вихрей, охватывающих всю область их распространения в Атлантическом океане (рис. 2 и 3). Из этих наблюдений были взяты основные характеристики линз (из 14 экспериментов): время и место их наблюдения, начальное положение и последующий дрейф, диаметр линз,

глубина залегания ядра линзы и ее T , S -характеристики (таблица 1). Часть этой информации представлена на T , S -диаграмме (рис. 2). В таблице 1 в первой колонке числами обозначены номера линз СМВ. В дальнейшем на рисунках 2, 3 и в тексте будем обозначать линзы теми же номерами в кружочках или в скобках в тексте (напр. (3)).

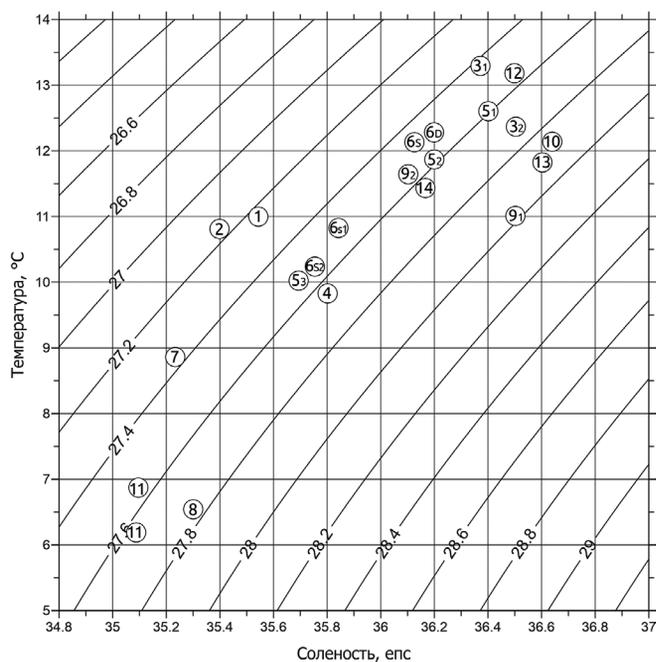


Рис. 2. T , S -диаграммы анализируемых линз. Их нумерация обозначена цифрами в кружках в соответствии с номерами в таблице 1.

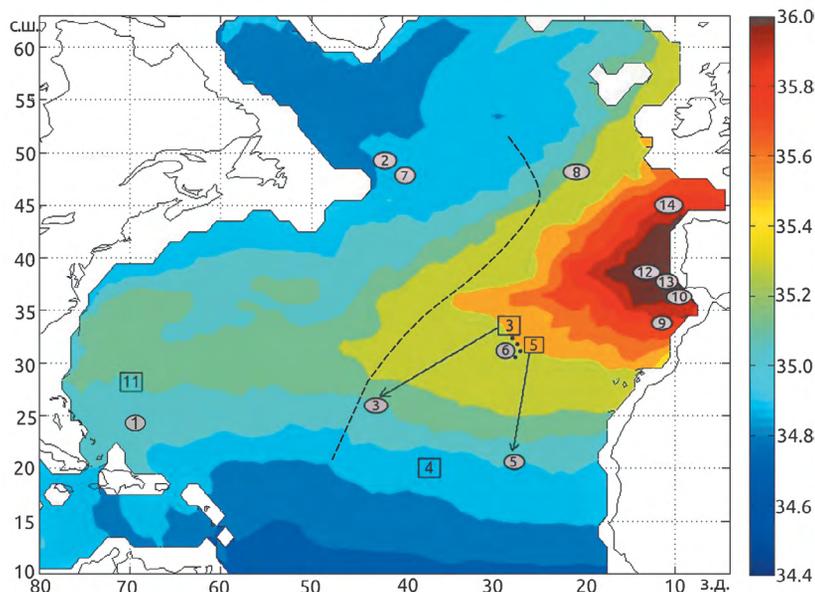


Рис. 3. Положение анализируемых линз в восточной части северной Атлантики. Здесь в квадратах указаны номера упоминаемых полигонов, а в кружках обозначены номера линз. Все эти цифры соответствуют нумерации перечня в таблице 1. Пунктирной линией показано положение оси Срединно-Атлантического хребта. Стрелками показаны основные направления дрейфа линз.

Таблица 1. Основные характеристики анализируемых внутритермоклинных линз

№	Название линзы, год обнаружения	ϕ° , сев. ш	λ° , зап. д.	T , $^\circ\text{C}$	S ,	R , км	H , М	Упоминание в литературе
1	Линза Bahamas, 1976 г.	24°	69°	11	35.6	20	900–1200	McDowell, Rossby, 1978
2	Линза N–W Corner	49.30°	42°	10.8	35.4	20	400–600	Prater, Rossby, 1999
3	Линза Hyperion (M1) 2 ядра – (3–1), (3–2) – Semaphore, 1993–1995	34° (3–1), (3–2)	28°	13.2 12.3	36.37 36.50	60 60	600–1500	Richardson, Techensky, 1998
4	Линза Мезополигон, 1985	20°	37°	9.8	35.8	46	800–1300	Егорихин и др., 1987
5	Линза Sharon: Окт., 1984 (5–1) Окт., 1985 (5–2) Окт., 1986 (5–3)	32.1° 27.1° 22.1°	22.3° 22.5° 22.3°	12.5 11.8 10.0	36.4 36.2 35.7	45 30 10	650–1400 700–1250 800–900	Armi et al., 1989 Richardson et al., 1989
6	Линза Эрвинг 1–(6D), 1989	32°	27.0°	12.18	36.2	50	800–1300	Дыхно и др., 1991
	Линза Эрвинг 2– (6S), 1990 Фрагменты (6S1) линзы (6S2)	32.12° 31.90° 32.20°	28.59° 29.10° 29.07°	12.16 10.85 9.97	36.18 35.82 35.71	45 15 10	750–1295 725–1215 870–1035	Shapiro et al., 1995
7	Линза Атлантэкс-90, 1990	48°	40.45°	8.7	35.26	27	400–1000	Бубнов и др., 1991
8	Разрушение линзы, 1989	48.5°	21.5°	6.5	35.3	20	3 фраг- мента 800–1200	Филюшкин и др., 2002
9	Формирование дипольной линзы в океане, 1988	34.15° (9–2) 34.0° (9–1)	11.40° 11.25°	11.0 11.6	36.5 36.1		700–900 900–1300	Филюшкин, Плахин, 1995
10	Формирование линзы у каньона Портимао, 1988	36.2°	8.30°	12.1	36.65	25	900–1500	Алейник и др., 1998
11	Фрагменты линз в районе ПОЛИМОДЕ, 1980	29° Ст. 2413 Ст. 2494	70.0°	6.2 6.8	35.08 35.12	10–20	1000– 1100	Виноградов и др., 1980
12	Слияние линз западнее Иберии, 1991	38.8°	13.0°	13.2 12.7	36.5 >36.4	60 50	500–1500 1000	Schultz Tokoc et al., 1994
13	Линза Swallow, 1968	35.45°	8.50°	11.8	36.6	30	600–1300	Swallow, 1969
14	Линза Ulla, 2002	45°	11.30°	11.5	36.17	30	600–1600	Paillet et al., 1999

На рис. 2 отчетливо видно, что все линзы, заполненные СМВ, практически находятся в диапазоне значений плотностей от 27.4 до 28.0 кг/м³. Отметим интересный факт: обнаруженная в августе 1989 г. далеко на севере (48.6°с.ш. и 21.6°з.д.)

частично разрушенная линза, состоящая из нескольких четко выраженных фрагментов, расположенных на одной вертикали в слое 500–1200 м, сохранила в центральном фрагменте характерную плотность материнской линзы 27.7 кг/м^3 . (Филюшкин и др., 2002). На рис. 2, 3 и в таблице 1 эта линза обозначена номером (8). В период работы на полигоне ПОЛИМОДЕ, в марте 1995 г., было также обнаружено несколько изолированных линз разного масштаба на глубинах 800–1200 м с такой же характерной для всех линз высокой плотностью около 27.6 кг/м^3 ((11) на рис. 2, 3 и в таблице 1) (Виноградов, Павельсон, 1980). И это несмотря на очень низкие значения температуры и солености, далекие от характерных значений СМВ.

На рис. 2 также хорошо видно, что линзы, сформированные в области континентального склона Пиренейского полуострова и прилегающих к нему районов, по своим T , S -характеристикам обнаруживаются в квадрате (рис. 2), ограниченном по температуре диапазоном $11\text{--}14^\circ\text{C}$ и соленостью – $36.0\text{--}36.8$.

На рис. 3 в качестве примера приведены 2 линзы, обнаруженные на западе Пиренейского полуострова (Schultz Tokos et al., 1994; Paillet et al., 2002). А в Кадисском заливе представлены только наблюдения Института океанологии РАН 1988 г. (Алейник, 1998; Филюшкин, Плахин, 1995), поскольку здесь было выполнено огромное количество наблюдений по изучению линз многими исследователями разных стран. Только в рамках проекта AMUSE за период с мая 1993 по февраль 1994 гг. было обнаружено и отслежено 17 линз (Richardson et al., 1999; Sokolovskiy et al., 2013), и все они были близки по значениям своих характеристик.

В рамках уникального эксперимента SHARON (Armi et al., 1989; Richardson et al., 1989) были выполнены 4 гидрологические съемки линзы, позволившие изучить ее эволюцию в течение 2-х лет от момента ее обнаружения на широте 32°с.ш. вплоть до ее полного разрушения на широте 22°с.ш. (таблица 1, (5)). Дрейф линзы проходил в южном направлении по довольно сложной траектории, но в узкой полосе между 22° и 23°з.д. Было установлено, что в течение всей жизни линзы сохраняется глубина ее ядра и значение плотности в нем, хотя соленость при этом уменьшилась от 36.4 до 35.7 (рис. 2, индексы 5.1, 5.2, 5.3). В это же время диаметр линзы уменьшился с 90 км до 6 км, а толщина соответственно – с 500 м до 90 м (Hebert et al., 1990). Мониторинг линзы в эксперименте SHARON подтвердил, что ее разрушение происходит на внешних границах термохалинными интрузиями и конвекцией, формирующей «солевые пальцы» на нижней границе (Zhurbas, Kuzmina, 1986). При этом тепло- и солеобмен происходят неравномерно по времени: в течение одного года (порядка 300 дней) линза потеряла $2/3$ тепла и соли, а в оставшийся год – только $1/3$ (Richardson et al., 1989).

В ноябре 1989 г. в Канарской котловине, около подводной горы Эрвинг, экспедицией Института океанологии РАН на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе» была обнаружена линза диаметром 100 км и толщиной 0.9 км. За две проведенные гидрологические съемки с интервалом 9 дней линза уже потеряла $1/30$ своего объема при столкновении с подводной горой (Дыхно и др., 1991). В январе 1990 г. эта линза была обнаружена, но уже в 50-ти милях к западу от горы

Эрвинг (Шапиро и др., 1992). Основные параметры этой линзы (температура и соленость в ядре) совпали с параметрами линзы, обнаруженной за один месяц до этого, что отлично видно на рис. 2 (6D – точка, полученная по данным работы (Дыхно и др., 1991) и 6S – по данным работы (Shapiro et al., 1995)). За это время линза прошла через узкий пролив (45 км), деформировалась, уменьшилась в объеме с 36 до 22×10^3 км³, не разрушилась, но при этом образовала два фрагмента объемом 350 км³ каждый. Температура и соленость в этих фрагментах уменьшилась, но плотность практически сохранилась (рис. 2, 6S1, 6S2 (по данным работы Shapiro, et al., 1995)).

Кроме этого в таблице 1 указан ряд отдельных работ, в которых наиболее полно изучены линзы в зоне их формирования, с высокой температурой и соленостью. В качестве примера отметим впервые обнаруженную линзу Сваллоу ((13) в таблице 1) к югу от мыса Сент-Винсент (Swallow, 1969).

В устье каньона Портимао в августе 1988 г. было прослежено формирование дипольной системы линз ((10) в табл. 1 и на рис. 2, 3) (Алейник и др., 1998). В том же году в открытой части океана, на глубинах 700–1300 м, из струи СМВ была образована дипольная система линз (рис. 2, табл. 1.; 9–2 и 9–1). Эти результаты упоминались в предыдущем разделе, здесь мы их просто показываем в системе *T*, *S*-координат. Антициклоническая линза выделялась более высокой соленостью – 36.5 (9–2), а циклоническая – менее высокой – 36.1 (9–1) (Филлюшкин, Плахин, 1995). Здесь можно отметить уникальность наблюдений, когда в открытом океане, над ровным дном, на глубинах больше 4000 м и на удалении больше 270 км от материкового склона Португалии по данным трех последовательных съемок прослежено поступление СМВ (соленость > 36.5, температура > 12°C), которое привело к формированию ассиметричной дипольной системы линз.

В 1991 г. к западу от Португалии (38°с.ш. и 24°з.д.) с помощью поплавков нейтральной плавучести была исследована миграция двух линз и их слияние в один внутритермоклинный вихрь (рис. 2, табл. 1, (13)) (Schultz Tokos et al., 1994). В рамках эксперимента SEMAPHORE на глубинах 600–1500 м была обнаружена очень крупная линза (Huregion) диаметром 120 км с двумя четко выраженными ядрами по температуре и солености на глубинах 850 и 1250 м (рис. 2, таблица 1, (3–1), (3–2) см. (Richardson, Tychensky, 1998)). При этом аномалии по отношению к окружающим водам по температуре достигали 3.1°C и 4.0°C, а по солености 0.8 и 1.1. Это одна из крупнейших линз, обнаруженная на удалении 1700 км от мыса Сент-Винсент, которая, сохраняя высокие значения характеристик ядра, продолжила свой дрейф по сложной траектории еще на 1700 км в юго-западном направлении со скоростью 3.9 см/с, и остановилась в районе подводных гор Срединно-Атлантического хребта на 27°с.ш. в январе 1995 г. Эта линза была обнаружена перед Азорской фронтальной зоной (АФЗ). Однако линзы встречаются по обе стороны АФЗ. Это значит, что часть из них (такие, как Huregion) пересекают Азорское течение, и, тем не менее, перед фронтальной зоной создаются условия роста числа некоторых линз, что приводит к возможности их сближения и взаимодействия между собой, в том числе и к возможности слияния нескольких линз, формируя при этом очень большие линзы

(как, например, Huregion). Механизм слияния антициклонических вихрей отмечался в ряде натурных наблюдений (Richardson et al., 2000; L'Hegaret et al., 2014).

В этой же части рисунка расположена и линза Ulla (табл. 1 и рис. 2, 3, (14) (Paillet et al., 1999)). Эта линза эллиптической формы была обнаружена в апреле 1997 г. над банкой Шарко (45°с.ш., 11.30°з.д.) на глубине 600–1600 м и выделялась максимальными аномалиями температуры и солености – 2.5°С и 0.5 на глубине 1200 м. Линза Ulla вращалась по часовой стрелке по сложной орбите в течение 11-ти месяцев над возвышенностью Шарко, сохраняя постоянство гидрологических характеристик, а, покинув банку, в последующие полгода дрейфовала около северо-западной части Пиренейского полуострова.

Линза Мезополигон находилась на самой удаленной периферии языка СМВ (20°с.ш., 37°з.д.) (рис. 2 и 3, и табл.1 (4)). Линза диаметром 80 км была обнаружена на глубине 900–1300 м. Значения отклонений ее характеристик от окружающих вод по температуре составляли примерно 3°С, а по солености – 0.1. При этом линза дрейфовала в западном направлении со скоростью, которая менялась от 0.25 до 1.65 мили/сут. На этой широте Срединно-Атлантический хребет не препятствует дрейфу линзы на запад, и при средней скорости 1 миля/сут она могла бы через 2 года попасть в район линзы Bahamas ((1) на рис. 2), (McDowell, Rossby, 1978). Но судя по скорости разрушения линзы в эксперименте SHARON, приведенной выше, здесь этот вариант не проходит.

Чтобы завершить анализ характеристик рассмотренных линз, приведенных на рис. 2, 3, следует рассмотреть условия появления и развития линзы Bahamas ((1) в таблице 1) (McDowell, Rossby, 1978). Эта линза находилась практически на той же широте, что и линза Мезополигон (11), но их разделяет время наблюдений и разница по долготе (32° долготы). Как видно на *T, S*-графике (рис. 2, (1)), она заметно отличается по величине плотности от всех линз СМВ. Средиземноморское происхождение этой линзы трудно объяснить из-за очень большого расстояния до источника ее происхождения в районе мыса Сент-Винсент. Была предложена новая гипотеза возможного места формирования линзы (Prater, Rossby, 1999). Был выбран район в высоких широтах (49°30'с.ш. и 41°30'з.д.) (см. (2), таблица 1), где в момент весеннего прогрева формируются линзы с характеристиками, близкими к линзе (1), но глубинами залегания ядра всего 400–600 м. Ричардсон отметил несерьезность этой гипотезы (Richardson et al., 2000). На рис. 2 отчетливо видно, что линза (2) не сможет сформировать линзу (1). На этом же рисунке приведена линза Атлантика-90 (табл.1, (7)) (Бубнов и др., 1991). Она была обнаружена в июне 1990 г. на глубине 500–1000 м в точке с координатами 48°с.ш., 40°45'з.д. Плотность воды в линзе высокая (27.29 кг/м³), но ее происхождение связано с внутритермоклинным интрузионным процессом во фронтальной зоне, и она относительно быстро разрушается, поскольку соленость отличается от фоновых вод всего на 0.1. В итоге можно констатировать, что достаточно простой анализ гидрологических характеристик в ядрах линз в системе *T, S*-координат дает возможность определить их принадлежность к классу средиземноморских вихрей (Медди).

Заключение

В рамках обзора многолетних исследований крайне важного природного явления – формирования и распространения ВТВ (в основном антициклонического вращения – линзы СМВ) основное внимание было обращено на натурные экспедиционные работы. Поэтому после краткого описания механизма возникновения ВТВ и их роли в гидрологическом режиме Атлантического океана на промежуточных глубинах был дан краткий обзор экспериментальных работ в океане и изложены основные научные результаты. Здесь практически подведены результаты 50-летнего периода исследования линз СМВ. Первая половина этого периода характеризовалась организацией и проведением крупных международных и национальных длительных экспериментов с привлечением большого числа судов (эксперименты – KIEL 276 (1980–2000); SHARON (1984–1986), SEMAPHOR (1993–1995), МЕЗОПОЛИГОН 1985)). Это были очень дорогостоящие работы. В настоящем и ближайшем будущем такие работы уже организовать практически нереально. В начале этого века в Пригибралтарском регионе было реализовано пять проектов, приведенных ранее, по изучению механизмов формирования, разрушения и взаимодействия дипольных вихрей (L’Hegaret et al., 2014). Сейчас начинается новый период: можно будет наблюдать уже в Мировом океане за появлением ВТЛ и их траекториями, а также получать значения температуры и солености в ядре линзы по измерениям с помощью поплавков Арго (Демидов и др., 2012; Филюшкин и др., 2017) и по спутниковым наблюдениям за поверхностью океана (Carton et al., 2010; Bashmachnikov et al., 2014).

Однако в реальном океане взаимодействие между всеми элементами вихревой дипольной системы должно осуществляться в продолжение всей жизни циклонического вихря. Исследования взаимодействия мелкомасштабных и крупномасштабных вихрей представляют собой дорогостоящую и трудно решаемую задачу ввиду проведения трехмерных съемок на полигонах, охватывающих обширные области океана. Даже в случае проведения наиболее подробных экспериментальных измерений получаем качественную картину случайно выбранного временного отрезка взаимодействия отдельных вихрей между собой. При этом поплавки, помещенные в ядро одного вихря, могут перемещаться в другой более активный вихрь (Carton et al., 2010). В случае исследования взаимодействий двух дипольных систем трудности идентификации положений отдельных вихрей по спутниковым наблюдениям и данным глубоководных поплавков возрастают (L’Hegaret et al., 2014). В этих натурных экспериментах получены уникальные наблюдения, но, тем не менее, они не позволяют адекватно определить реальный источник наблюдающихся особенностей поведения вихревых систем. В этих условиях проведение численных экспериментов в рамках трехслойной квазигеострофической модели океана с однородной плотностью в слоях, где исследуемые вихри находятся в среднем слое (500–1500 м), и при использовании методов контурной динамики, позволяет проводить исследования механизмов вихревого взаимодействия. При этом появляется возможность

рассмотрения большого числа ситуаций взаимодействия различных вихрей, как по геометрическим размерам, так и по величине завихренности на промежуточных глубинах. Это позволит лучше понять физику процессов и их роль в перемешивании вод и переносе свойств их примесей (Sokolovskiy, Verron, 2013; Sokolovskiy, et al., 2013).

Кроме того, лабораторное моделирование открывает широкие возможности для изучения механизмов и закономерностей формирования подобных вихрей и течений на основе имитации разнообразных внешних воздействий на твердвращающуюся или покоящуюся жидкость (Федоров и др., 1992). Также исследован автоколебательный механизм формирования периодической вихревой структуры от локального источника массы и потенциальной завихренности на наклонном дне во вращающейся жидкости. Результаты этих экспериментов использовались для оценки возможностей формирования вихревых линз СМВ (Зацепин и др., 1998). Была развита теория плотностных течений на наклонном дне и взаимодействие его с поверхностным течением (Зацепин, Дидковский, 1996; Lane-Serff, Baines, 2000).

Совершенно ясно, что новые знания по этой проблеме можно получить только при проведении натуральных экспериментов в характерных районах океана, поэтому развитие решения вопросов формирования и взаимодействия вихревых структур лежит в объединении результатов всех этих направлений. Это, в свою очередь, позволит составить оптимальную программу эксперимента и рекомендовать использование новых методов наблюдений.

Благодарности. Авторы благодарят Н.Л. Галеркину за помощь в оформлении рисунков и также рецензентов за их конструктивные и полезные замечания.

Работы по обобщению исследований эволюции Средиземноморских внутритермоклинных вихрей были выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России. Тема госзадания: № 0149-2020-000.

Литература

- Алейник Д.Л.* Структура и динамика средиземноморской линзы и Азорской фронтальной зоны осенью 1993 г. // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 3. С. 349–360.
- Алейник Д.А., Плахин Е.А., Филюшкин Б.Н.* К механизму формирования внутритермоклинных линз в районе каньонов континентального склона Кадисского залива // *Океанология*. 1998. Т. 38. № 5. С. 645–653.
- Белкин И.М., Емельянов М.В., Костяной А.Г., Федоров К.Н.* Термохалинная структура промежуточных вод океана и внутритермоклинные вихри // *Внутритермоклинные вихри в океане*. Сб. ИО РАН. 1986. С. 8–34.
- Белкин И.М., Костяной А.Г.* Внутритермоклинные вихри в Мировом океане и их региональные особенности // *Когерентные структуры и самоорганизация океанических движений*. М.: Наука, 1992. С. 112–127.
- Берестов А.Л., Егорихин В.Д., Иванов Ю.А., Корт В.Г. и др.* Термохалинные, гидрохимические и динамические характеристики интрузионной линзы средиземноморских вод по данным экспедиции «Мезополигон–85» в тропической Атлантике // *Внутритермоклинные вихри в океане*. Под. ред. К.Н. Федорова. М.: Институт Океанологии АН СССР, 1986. С. 35–49.

- Бубнов В.А., Бышев В.И., Волостных Б.В., Голенко Н.Н., Егорихин В.Д., Зубин А.Б., Пака В.Т.* Фронтальная внутритермоклинная линза // ДАН. 1991. Т. 317. № 2. С. 453–458.
- Виноградов А.С., Павельсон Ю.Х.* Тонкая стратификация вод Саргассова моря под главным термоклином // Океанологические исследования. 1980. Т. 31. С. 56–63.
- Гончаров В.В., Дремучев С.А., Куртенов В.М., Селиванов В.Г., Чепурин Ю.А., Шаповалов С.М.* Акустические эксперименты в Атлантическом океане на «линзе» средиземноморской воды // ДАН СССР, Океанология. 1990. Т. 315. № 2. С. 481–483.
- Гончаров В.В., Чепурин Ю.А., Алейник Д.Л.* Экспериментальное исследование внутритермоклинной линзы Средиземного моря и возможности ее дистанционного обнаружения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 688–698.
- Демидов А.Н., Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г.* Обнаружение средиземноморских линз в Атлантическом океане по измерениям профилографов проекта «АРГО» // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 190–199.
- Дыхно Л.А., Морозов Е.Г., Никитин С.В., Филюшкин Б.Н., Шилов И.А.* Об одном механизме разрушения линз Средиземноморских вод в океане // Океанология. 1991. Т. 31. № 1. С. 55–61.
- Егорихин В.Д., Иванов Ю.А., Корт В.Г., Кошляков М.Н., Лукашев Ю.Ф., Морозов Е.В., Овчинников И.М., Пака В.Т., Цыбанева Т.Б., Шадрин И.Ф., Шаповалов С.М.* Внутритермоклинная линза средиземноморской воды в тропической части Северной Атлантики // Океанология. 1987. Т. 37. № 2. С. 165–175.
- Журбас В.М., Кузьмина Н.П.* О возможности диапикнического перемещения внутритермоклинных вихрей // Внутритермоклинные вихри в океане. Ред. Федоров К.Н. М.: ИО РАН, 1986. С. 111–114.
- Зацепин А.Г., Дидковский В.Л.* Об одном механизме формирования мезомасштабных вихревых структур в склоновой зоне океана // ДАН РАН. 1996. Т. 347. № 1. С. 109–112.
- Зацепин А.Г., Дидковский В.Л., Семенов А.В.* Автоколебательный механизм формирования периодической вихревой структуры от стационарного локального источника на наклонном дне во вращающейся жидкости // Океанология. 1998. Т. 38. № 1. С. 47–55.
- Иванов А.Ю., Филюшкин Ю.Б.* Натуральные исследования фронтальной зоны Азорского течения // Океанология. 1995. Т. 35. № 2. С. 186–191.
- Кошляков М.Н., Пантелеев Г.Г.* Термохалинные характеристики линзы средиземноморской воды в тропической зоне Северной Атлантики // В кн.: Гидрофизические исследования по программе «Мезополигон». М., 1989. С. 46–57.
- Мальцев Н.Е., Сабинин К.Д., Фурдуев А.В.* Акустико-океанологический эксперимент на линзе средиземноморских вод в Атлантическом океане // Акустический журнал. 1990. Т. 36. Вып. 1. С. 86–89.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И., Костяной А.Г.* Генерация и эволюция вихревых диполей в лабораторных условиях // Когерентные структуры и самоорганизация океанических движений. М.: Наука, 1992. С. 21–26.
- Федоров К.Н.* Введение. Внутритермоклинные вихри – специфический тип океанских вихрей с ядром // Внутритермоклинные вихри в океане. Под. ред. К.Н. Федорова. М.: Институт Океанологии АН СССР, 1986. С. 5–7.
- Филюшкин Б.Н.* Исследование внутритермоклинных линз средиземноморского происхождения (16 рейс НИС «Витязь». 3 июня–16 сентября 1988 г.) // Океанология. 1989. Т. 29. Вып. 4. С. 296–298.

- Филлюшкин Б.Н., Плахин Е.А. Экспериментальные исследования начальной стадии формирования линзы средиземноморской воды // *Океанология*. 1995. Т. 35. № 6. С. 875–882.
- Филлюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Грузинов В.И., Кожелупова Н.Г. Особенности термохалинной структуры промежуточных вод Атлантического океана в зонах формирования и разрушения средиземноморских линз // *Труды ГОИН. Исследования океанов и морей*. Москва: Росгидромет, 2000. Вып. 207. С. 3–18.
- Филлюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Грузинов В.И., Кожелупова Н.Г. Динамическое разрушение средиземноморских линз в Атлантическом океане // *ДАН*. 2002. Т. 387. № 4. С. 545–548.
- Филлюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Терещенков В.П. Пространственно-временная изменчивость термохалинных характеристик средиземноморских вод на разрезе по 36° с.ш. в Атлантическом океане // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 3. С. 339–346.
- Филлюшкин Б.Н., Мошонкин С.Н., Кожелупова Н.Г. Сезонная эволюция распространения вод Средиземного моря в северную Атлантику // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 6. С. 834–842.
- Филлюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Кожелупова Н.Г., Мошонкин С.Н. Особенности горизонтального переноса средиземноморских вод в Атлантическом океане // *Исследование океанов и морей*. Тр. ГОИН. 2009. Вып. 212. С. 76–88.
- Филлюшкин Б.Н., Мошонкин С.Н., Кожелупова Н.Г. Многолетняя эволюция поступления вод Средиземного моря в Северную Атлантику // «Прикосновение к океану». 100 лет В.Г. Корту. Отв. ред. Морозов Е.Г., Нейман В.Г. Москва–Ижевск. 2013. С. 77–91.
- Филлюшкин Б.Н., Лебедев К.В., Кожелупова Н.Г. Обнаружение промежуточных средиземноморских вод в Атлантическом океане по наблюдениям поплавков АРГО // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 847–857.
- Шапиро Г.И., Мещанов С.Л., Емельянов М.В. Линза средиземноморских вод после столкновения с подводными горами // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 3. С. 420–427.
- Alves J.M.R., Carton X., Ambar I. Hydrological structure, circulation and water mass transport in the Gulf of Cadiz // *International J. Geosciences*. 2011. Vol. 2. P. 432–456.
- Ambar I. A shallow core of Mediterranean water off western Portugal // *Deep Sea Res. Part A*. 1983. Vol. 30. P. 677–680.
- Ambar I., Serra N., Neves F., Ferreira T. Observations of the Mediterranean Undercurrent and eddies in the Gulf of Cadiz during 2001 // *J. Marine Systems*. 2008. Vol. 71. P. 195–230.
- Armi L., Stommel H. Four views of a portion of the North Atlantic subtropical gyre // *J. Phys. Oceanogr.* 1983. Vol. 13. No. 5. P. 828–857.
- Armi L., Zenk W. Large Lenses of Highly Saline Mediterranean water // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. Vol. 14. No. 10. P. 1560–1576. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1560:LL0HSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1560:LL0HSM>2.0.CO;2).
- Armi L., Hebert D., Oakey N., Price J.F., Richardson P.L., Rossby H.T., Ruddick B. Two Years in the Life of a Mediterranean Salt Lens // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. Vol. 19. No. 3. P. 354–370.
- Argo (2000). Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC). SEANOE. <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Bashmachnikov I., Carton X. Surface signature of Mediterranean water eddies in the Northeastern Atlantic: effect of the upper ocean stratification // *Ocean Science*. 2012. Vol. 8. P. 931–943.
- Bashmachnikov I., Carton X., Belonenko T. Characteristics of surface signatures of Mediterranean water eddies // *J. Geophys. Res.* 2014. No. C119. P. 1–22. <https://doi.org/10.1002/2014JC010244>.
- Bashmachnikov I., Neves F., Calheiros T., Carton X. Properties and pathways of Mediterranean water eddies in the Atlantic // *Progr. Oceanogr.* 2015. Vol. 137. P. 149–172.

- Berezutskii A.V., Maximov S.E., Rodionov V.B., Sklyarov V.E.* Mediterranean water structure in the Central Atlantic: Results of remote acoustic and conductivity-temperature-depth measurements // *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. No. C10. P. 20,375–20,379.
- Bower A., Armi L., Ambar I.* Lagrangian observations of meddy formation during a Mediterranean undercurrent seeding experiment // *Journal of Physical Oceanography*. 1997. Vol. 27. P. 2545–2575.
- Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H.* Exchange through the Strait of Gibraltar // *Progr. Oceanogr.* 1994. Vol. 33. P. 201–248.
- Carton X., Cherubin L., Paillet J., Morel Y., Serpette A., Le Cann.* Meddy coupling with a deep cyclone in the Culf of Cadiz // *Journal of Marine Systems*. 2002. Vol. 32. (1–3). P. 13–42.
- Carton X., Deniault N., Alves J., Cherubin L., Ambar I.* Meddy dynamics and interaction with neighboring eddies southwest of Portugal: observations and modeling // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. No. C06017. DOI: 10.1029/2009JC005646.
- Dugun J.P., Mied R.P., Mignerey P.C., Schuetz A.F.* Compact, Intrathermocline Eddies in the Sargasso Sea // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. No. C1. P. 385–393.
- Fedorov K.N., Ginsburg A.I., Kostianoy A.G.* Modelling of “mushroom-like” currents (vortex dipoles) in a laboratory tank with rotating homogeneous and stratified fluids. In *Mesoscale // Synoptic Coherent structures in Geophysical Turbulence, Elsevier Oceanography Series*, edited by J.C.J. Nihoul, B.M. Jamaat. 1989. P. 1–14 (Elsevier: Amsterdam/Oxford/New York/Tokyo).
- Filyushkin B.N., Sokolovskiy M.A.* Modeling the evolution of intrathermocline lenses in the Atlantic Ocean // *J. Mar. Res.* 2011. Vol. 69. P. 191–220.
- Hebert D., Oakey N., Ruddick B.* Evolution of a Mediterranean salt lens: scalar properties // *Journal of Physical Oceanography*. 1990. No. 20(9). P. 1468–1483.
- L'Hegaret P., Carton X., Ambar I., Menesguen C., Hua B.L., Cherubin L., Aguiar A., Le Cann, Daniault N., Serra N.* Evidence of Mediterranean water dipole collision in the Gulf of Cadiz // *J. Geophys. Res.* 2014. No. 119(8). P. 5337–5359. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JC009972>.
- Heijst G.J.F., Flor J.B.* Dipole Formation and collisions in a stratified fluid // *Nature*. 1989. Vol. 340. P. 212–215.
- Ienna F., Young-Heon Jo, Xiao-Hai Yan.* A New Method for Tracking Meddies by Satellite Altimetry // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2014. Vol. 31. P. 1434–1445. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00080.1.
- Johnson, J., Ambar L., Serra N., Stevens I.* Comparative studies of the spreading of Mediterranean water through the Gulf of Cadiz // *DSR II*, 2002. Vol. 49. P. 4179–4193.
- Kase R.H., Beckman A.L., Hinrichsen H-H.* Observational evidence of salt lens formation in the Iberian basin // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. No. C4. P. 4905–4912.
- Kostianoy A.G., Belkin G.M.* A survey of observations on intrathermocline eddies in the world ocean // In: *Mesoscale/synoptic coherent structure in geophysical turbulence. Prog. Of the 20-th Int. Liege Colloq. On ocean hydrodynamic*. Ed. J.C.J. Nihoul, B.M. Jamaat. Elsevier, 1989. P. 821–841.
- Le Cann B., Assenbaum M., Gascard J.-C., Reverdin G.* Observed mean and mesoscale upper ocean circulation in the midlatitude northeast Atlantic // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. No. C07S05. DOI: 10.1029/2004JC002768.
- Lane-Serff G.F., Baines P.G.* Eddy formation by overflows in stratified water // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. No. 2. P. 327–337.
- Madelain F.* Influence de la topographie du fond sur l'écoulement Méditerranéen entre le Détroit de Gibraltar et le Cap Saint-Vincent // *Cahiers Oceanogr.* 1970. No. 22. P. 43–61.

- McDowell S.E., Rossby H.T.* Mediterranean water: An Intense Mesoscale Eddy of the Bahamas // *Science*. 1978. Vol. 202. No. 43728. P. 1085–1086.
- McDowell S.E.* On the origin of eddies discovered during the POLYMODE local dynamics experiment // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. Vol. 16. No. 3. P. 632–652.
- McWilliams J.C.* Submesoscale, coherent vortices in the ocean // *Reviews of Geophys.* 1985. No. 23(2). P. 165–182.
- Marez de C., Carton X., L'Hegaret P., Meunier T., Stegner A., Le Vu B., Morvan M.* Oceanic vortex mergers are not isolated but influenced by the β -effect and surrounding eddies // *Nature. Scientific Reports*. 2020. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59800-y>.
- Menesguen B.L., Hua B.L., Papenberg C., Klaeschen D., Géli L., Hobbs R.* Effect of bandwidth on seismic imaging of rotating stratified turbulence surrounding an anticyclonic eddy from field data and numerical simulations // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36(L00D05). P. 1–15.
- Menesguen C., Hua B.L., Carton X., Klingelhoefer F., Schnurle P., Reichert C.* Arms winding around a meddy seen in seismic reflection data close to the Morocco coastline // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39(L05604). <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL050798>.
- Paillet J., Le Cann B., Serpette A., Morel Y., Carton X.* Real-time tracking of a northern meddy in 1998-98 // *Geophys. Res. Letters*. 1999. Vol. 26. P. 1877–1880.
- Paillet J., Le Cann B., Carton X., Morel Y., Serpette A.* Dynamics and evolution of a Northern Meddy // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32. No. 1. P. 55–79.
- Prater M.D., Rossby T.* An alternative hypothesis for the origin of the “Mediterranean” salt lens observed off the Bahamas in the fall of 1976 // *J. Phys. Oceanogr.* 1999. Vol. 29. P. 2103–2109.
- Prater M.D., Sanford T.B.* A meddy off Cape St. Vincent. Part I: Description // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. Vol. 24. P. 1572–1586.
- Richardson P.L., Walsh D., Armi L., Schroder M., Price J.F.* Tracking three Meddies with SOFAR Floats // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. Vol. 19. No. 3. P. 371–383.
- Richardson P.L., McCartney M.S., Maillard C.* A search for meddies in historical data // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 1991. No. 15. P. 241–265.
- Richardson P.L., Tychensky A.* Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment, 1993-1995 // *J. Geoph. Res.* 1998. Vol. 103. No. C11. P. 25029–25045.
- Richardson P.L., Bower A.S., Zenk W.* A census of meddies tracked by floats // *Progress in Oceanography*. 2000. No. 45(2). P. 209–250.
- Rossby T., Riser S.C., Mariano A.J.* The Western North Atlantic – A Lagrangian Viewpoint // In: *Eddies in Marine Science* (ed. by A. Robinson). Verlag Berlin: Springer, 1983. P. 66–91.
- Schultz Tokos K., Hinrichsen H.H., Zenk W.* Merging and migration of two meddies // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. Vol. 24. P. 2129–2141.
- Serra N., Ambar I.* Eddy generation in the Mediterranean undercurrent // *Deep-Sea Research I*. 2002. Vol. 49. P. 4225–4243.
- Serra N., Ambar I., Kase R.H.* Observations and numerical modelling of the Mediterranean outflow splitting and eddy generation // *Deep-Sea Research II*. 2005. Vol. 52. P. 363–408. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.05.025>.
- Serra N., Ambar I., Boutov D.* Surface expression of Mediterranean Water dipoles and their contribution to the shelf/slope – open ocean exchange // *Ocean Science*. 2010. No. 6. P. 191–209. www.ocean-sci.net/6/191/2010/.

- Siedler G., Armi L., Muller T.J.* Meddies and decadal changes at the Azores Front from 1980 to 2000 // *Deep-Sea Research II*. 2005. No. 52(2005). P. 583–604. DOI: 10.1016/j.dsr2.2004.12.010.
- Shapiro G.I., Meschanov S.L., Emelyanov M.V.* Mediterranean lens “Irving” after its collision with seamounts // *Oceanol. Acta*. 1995. Vol. 18. P. 309–318.
- Shapiro G.I., Meschanov S.L.* Spreading pattern and mesoscale structure of Mediterranean outflow in the Iberian Basin estimated from historical data // *J. Mar. Sys.* 1996. Vol. 7. P. 337–348. [http://dx.doi.org/10.1016/09247963\(95\)00011-9](http://dx.doi.org/10.1016/09247963(95)00011-9).
- Sokolovskiy M.A., Filyushkin B.N., Carton X.* Dynamics of intrathermocline vortices in a gyre flow over a seamount chain // *OD*. 2013. Vol. 63. No. 7. P. 741–760.
- Sokolovskiy M.A., Verron J.* Dynamics of vortex structures in a stratified rotating fluid. Moscow-Grenoble. Springer. 2013. 382 p.
- Stammer D., Hinrichsen H-H., Kase R.H.* Can meddies be detected by satellite altimetry? // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 239. No. C4. P. 7005–7014.
- Swallow J.C.* A deep eddy off Cape St. Vincent // *Deep Sea Res.* 1969. Vol. 16. P. 285–296.
- Swallow J.C.* The “Aries” current measurements in the western North Atlantic // *Phil. Trans. R. London*. 1971. A 270. No. 1206. P. 451–460.
- Thorpe S.A.* A sediment cloud below the Mediterranean outflow // *Nature*. 1972. Vol. 239. No. 5371. P. 326–327.
- Tychensky A., Carton X.* Hydrological and dynamical characterization of meddies in the Azores region: a paradigm for baroclinic vortex dynamics // *J. Geophys. Res.* 1998. No. 103(C11). P. 25061–25079. <http://dx.doi.org/10.1029/97jC03418>.
- Zenk W., Schultz Tokos K.L., Boebei O.* New observations of meddy movement south of the Tejo Plateau // *Geophysical Research Letters*. 1992. Vol. 19. P. 2389–2392.

REVIEW OF THE INVESTIGATIONS OF THE MEDITERRANEAN INTRATHERMOCLINE EDDIES IN THE ATLANTIC OCEAN

Filyushkin B.N., Kozhelupova N.G.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: borisfil@yandex.ru; natali45@ocean.ru
Submitted 16.07.2020, accepted 25.08.2020.*

The Mediterranean waters (MW) occupy intermediate depths (500–1500 m) of the Northeast Atlantic. These waters are transported by the bottom current to the Atlantic through the Strait of Gibraltar. Salinity of these waters exceeds 37.0 and the temperature is warmer than 13°C. In addition to the MW transport by the quasi-continuous “stream” component there is an irregular “lens” component. This component consists of intra-thermocline eddies or long-living MW lenses, the “Meddies”, which are formed to south and west of the Iberian Peninsula and then spread over long distances. These lenses desintegrated in time and support the salt MW “tongue” far from the Strait of Gibraltar. The goal of this work is to give a brief review of the main research of this phenomenon and to determine the criteria to distinguish MW lenses based on selected field data. Peculiarities of the space and time evolution of the MW lenses are shown based on the *T,S*-analysis of the lens cores.

Keywords: Mediterranean intrathermocline eddies, lens spreading and evolution, eddies investigations review in the Atlantic

Acknowledgement: The authors thank N.L. Galerkin for the help in the design of drawings and also to the reviewers for their constructive and useful comments. The work on generalization of studies of the evolution of Mediterranean interthermocline vortices was carried out within the framework of the state task of the Ministry of education and science of Russia. Tema No. 0149-2020-000.

References

- Aleinik D.L.* The structure and dynamics of the Mediterranean lens and the Azores frontal zone in autumn 1993. *Oceanology*, 1998, Vol. 38, No. 3, pp. 349–360.
- Aleinik D.L., Plakhin E.A., and Filyushkin B.N.* On the Mechanism of Formation of Intrathermocline Lenses in the Canyon Area of the Gulf of Cadiz Continental Slope. *Oceanology*, 1998, Vol. 38, No. 5, pp. 583–591.
- Ambar I.* A shallow core of Mediterranean water off western Portugal. *Deep Sea Res., Part A*, 1983, Vol. 30, pp. 677–680.
- Ambar I., Serra N., Neves F., and Ferreira T.* Observations of the Mediterranean Undercurrent and eddies in the Gulf of Cadiz during 2001. *J. Marine Systems*, 2008, Vol. 71, pp. 195–230.
- Armi L. and Stommel H.* Four views of a portion of the North Atlantic subtropical gyre. *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, Vol. 13, No. 5, pp. 828–857.
- Armi L. and Zenk W.* Large Lenses of Highly Saline Mediterranean water. *J. Phys. Oceanogr.*, 1984, Vol. 14, No. 10, pp. 1560–1576, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1560:LL0HSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1560:LL0HSM>2.0.CO;2).
- Armi L., Hebert D., Oakey N., Price J.F., Richardson P.L., Rossby H.T., and Ruddick B.* Two Years in the Life of a Mediterranean Salt Lens. *J. Phys. Oceanogr.*, 1989, Vol. 19, No. 3, pp. 354–370.
- Argo (2000). Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC). SEANOE, <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Alves J.M.R., Carton X., and Ambar I.* Hydrological structure, circulation and water mass transport in the Gulf of Cadiz. *International J. Geosciences*, 2011, Vol. 2, pp. 432–456.
- Bashmachnikov I. and Carton X.* Surface signature of Mediterranean water eddies in the Northeastern Atlantic: effect of the upper ocean stratification. *Ocean Science*, 2012, Vol. 8, pp. 931–943.
- Bashmachnikov I., Carton X., and Belonenko T.* Characteristics of surface signatures of Mediterranean water eddies. *J. Geophys. Res.*, 2014, No. C119, pp. 1–22, <https://doi.org/10.1002/2014JC010244>.
- Bashmachnikov I., Neves F., Calheiros T., and Carton X.* Properties and pathways of Mediterranean water eddies in the Atlantic. *Progr. Oceanogr.*, 2015, Vol. 137, pp. 149–172.
- Belkin I.M. and Kostianoy A.G.* Intrathermocline eddies in the World ocean and their regional peculiarities. *Coherent structures and organization of oceanic currents in the laboratory*, Moscow: Nauka, 1992, pp. 112–126, (in Russian).
- Belkin I.M., Emelyanov M.V., Kostianoy A.G., and Fedorov K.H.* Thermohaline structure of intermediate seawaters and intra thermocline eddies. *Intrathermocline eddies in the ocean*, Ed. Fedorov K.N., Moscow: IO RAS, 1986, pp. 8–34, (in Russian).
- Berestov A.L., Yegorikhin V.D., Ivanov Yu.A., Kort V.G., Koshlyakov M.N., Lukashov Yu.F., Monin A.S., Morozov E.G., Moroshkin K.V., Ovchinnikov I.M., Paka V.T., Tsybaneva T.B., Shadrin I.F., Shapovalov S.M., Shcherbinin A.D., and Yaremchuk M.I.* Thermohaline, hydrochemical and dynamic characteristics of the intrusion lens of Mediterranean water according to the

- Mesopolygon-85 expedition in the tropical Atlantic. *Intrathermocline eddies in the ocean*. Ed. Fedorov K.N., Moscow: IO RAS, 1986, pp. 35–49, (in Russian).
- Berezutskii A.V., Maximov S.E., Rodionov V.B., and Sklyarov V.E. Mediterranean water structure in the Central Atlantic: Results of remote acoustic and conductivity-temperature-depth measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. C10, pp. 20,375–20,379.
- Bower A., Armi L., and Ambar I. Lagrangian observations of meddy formation during a Mediterranean undercurrent seeding experiment. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, Vol. 27, pp. 2545–2575.
- Bryden H.L., Candela J., and Kinder T.H. Exchange through the Strait of Gibraltar. *Progr. Oceanogr*, 1994, Vol. 33, pp. 201–248.
- Bubnov V.A., Byshev V.I., Volostnykh B.V., Golenko N.N., Yegorikhin V.D., Zubin A.B., and Paka V.T. Frontal intrathermocline lens. *DAN*, 1991, Vol. 317, No. 2, pp. 453–458.
- Carton X., Cherubin L., Paillet J., Morel Y., Serpette A., and Le Cann. Meddy coupling with a deep cyclone in the Culf of Cadiz. *Journal of Marine Systems*, 2002, Vol. 32. (1–3), pp. 13–42.
- Carton X., Deniault N., Alves J., Cherubin L., and Ambar I. Meddy dynamics and interaction with neighboring eddies southwest of Portugal: observations and modeling. *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, No. C06017, doi: 10.1029/2009JC005646.
- Demidov A.N., Filyushkin B.N., and Kozhelupova N.G. Detection of Mediterranean lenses in the Atlantic Ocean by profilers of the Argo Project. *Oceanology*, 2012, Vol. 52(2), pp. 171–180, <https://doi.org/10.1134/S0001437012020038.JC010244>.
- Dugun J.P., Mied R.P., Mignerey P.C., and Schuetz A.F. Compact, Intrathermocline Eddies in the Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.*, 1982, Vol. 87, No. C1, pp. 385–393.
- Dykhno L.A., Morozov E.G., Nikitin S.V., Filyushkin B.N., and Shilov I.A. Breakup of lenses of Mediterranean water on interaction with bottom relief. *Oceanology*, 1991, Vol. 31, No. 1, pp. 38–41.
- Fedorov K.N. Introduction. Intra-thermocline eddies – a specific type of ocean eddies with a core. *Intrathermocline eddies in the ocean*, Ed. Fedorov K.N. M.: IO RAS, 1986, pp. 5–7, (in Russian).
- Fedorov K.N., Ginsburg A.I., and Kostianoy A.G. Modelling of “mushroom-like” currents (vortex dipoles) in a laboratory tank with rotating homogeneous and stratified fluids. In *Mesoscale. Synoptic Coherent structures in Geophysical Turbulence*, Elsevier Oceanography Series, edited by J.C.J. Nihoul, B.M. Jamaat, 1989, pp. 1–14, (Elsevier: Amsterdam/Oxford/New York/Tokyo).
- Fedorov K.N., Ginsburg A.I., and Kostianoy A.G. Generation and evolution of vortex dipoles in a laboratory experiments. *Coherent structures and self-organisation of currents in the ocean*, Moscow: Nauka, 1992, (in Russian).
- Filyushkin B.N. Investigation of intrathermocline lenses of Mediterranean origin. (Cruise 16 of R/V “Vityaz”. June 3 – September 16). *Oceanology*, 1989, Vol. 29, No. 4, pp. 535–536.
- Filyushkin B.N. and Plakhin E.A. Experimental study of the first stage of Mediterranean water lens formation. *Oceanology*, 1995, Vol. 35, No. 6, pp. 797–804.
- Filyushkin B.N., Aleinik D.L., Gruzinov B.M., and Kozhelupova N.G. Features of the thermohaline structure of the intermediate waters of the Atlantic ocean in the zones of formation and destruction of Mediterranean lenses. *Issledovaniya okeanov i morei. Tr. Gos. Okeanogr. Instituta*, St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000, Vol. 207, pp. 3–18, (in Russian).
- Filyushkin B.N., Aleinik D.L., Gruzinov B.M., and Kozhelupova N.G. Dynamic degradation of the Mediterranean lenses in the Atlantic Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2002, Vol. 387a, No. 9, pp. 1079–1082.

- Filyushkin B.N., Aleinik D.L., and Tereshchenkov V.P.* Spatiotemporal variability of the thermohaline characteristic of the Mediterranean waters over a section along 36°N. *Oceanology*, 2003, Vol. 43, No. 3, pp. 318–324.
- Filyushkin B.N., Moshonkin S.N., and Kozhelupova N.G.* Seasonal evolution of the Mediterranean water propagation in the North Atlantic. *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 6, pp. 771–779.
- Filyushkin B.N., Aleinik D.L., Kozhelupova N.G., and Moshonkin S.N.* Horizontal transport peculiarities of the Mediterranean water in the Atlantic. *Proceedings of the State Oceanographic Institute "Ocean and sea research", Moscow*. Moscow, 2009, No. 212, pp. 76–88, (in Russian).
- Filyushkin B.N. and Sokolovskiy M.A.* Modeling the evolution of intrathermocline lenses in the Atlantic Ocean. *J. Mar. Res.*, 2011, Vol. 69, pp. 191–220.
- Filyushkin B.N., Moshonkin S.N., and Kozhelupova N.G.* Interannual evolution Mediterranean inflow to the North Atlantic. In *Memory to 100 years V.G. Kort*, Moscow. Ed. by Morozov E.G., Neiman V.G., 2013, pp. 77–91, (in Russian).
- Filyushkin B.N., Lebedev K.V., and Kozhelupova N.G.* Detection of intermediate Mediterranean waters in the Atlantic ocean by ARGO floats Data. *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 6, pp. 763–771.
- Goncharov V.V., Dremuchev S.A., Kurtepov V.M., Selivanov V.G., Chepurin Yu.A., and Shapovalov S.M.* Acoustic experiments in the Atlantic ocean on a Mediterranean "lens". *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1990, Vol. 315, No. 2, pp. 481–483.
- Goncharov V.V., Chepurin Yu.A., and Aleinik D.L.* Experimental study of an intrathermocline Mediterranean water lens and possibilities of its remote detection. *Izv. RAS. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2003, Vol. 39, No. 5, pp. 614–623.
- Hebert D., Oakey N., and Ruddick B.* Evolution of a Mediterranean salt lens: scalar properties. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, Vol. 20(9), pp. 1468–1483.
- Heijst G.J.F. and Flor J.B.* Dipole Formation and collisions in a stratified fluid. *Nature*, 1989, Vol. 340, pp. 212–215.
- Ienna F., Young-Heon Jo, and Xiao-Hai Yan.* A New Method for Tracking Meddies by Satellite Altimetry. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, Vol. 31, pp. 1434–1445, doi: 10.1175/JTECH-D-13-00080.1.
- Ivanov Yu.A. and Filyushkin Yu.B.* Experimental investigation in the Azores current frontal zone. *Oceanology*, 1995, Vol. 35, pp. 169–175.
- Johnson, J., Ambar L., Serra N., and Stevens I.* Comparative studies of the spreading of Mediterranean water through the Gulf of Cadiz, *DSR II*, 2002, Vol. 49, pp. 4179–4193.
- Kase R.H., Beckman A.L., and Hinrichsen H-H.* Observational evidence of salt lens formation in the Iberian basin. *J. Geophys. Res.*, 1989, Vol. 94, No. C4, pp. 4905–4912.
- Kostianoy A.G and Belkin G.M.* A survey of observations on intrathermocline eddies in the world ocean. In: *Mesoscale/synoptic coherent structure in geophysical turbulence. Prog. Of the 20-th Int. Liege Colloq. On ocean hydrodynamic*. Ed. J.C.J. Nihoul, B.M. Jamaat, Elsevier, 1989, pp. 821–841.
- Koshlyakov M.N. and Panteleev G.G.* Thermohaline characteristics of the Mediterranean lens in the tropical zone of the North Atlantic. *Hydrophysical studies under the Mesopolygon program*, Moscow, 1989, pp. 46–57, (in Russian).
- Le Cann B., Assenbaum M., Gascard J.-C., and Reverdin G.* Observed mean and mesoscale upper ocean circulation in the midlatitude northeast Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, No. C07S05, doi: 10.1029/2004JC002768.
- L'Hegaret P., Carton X., Ambar I., Menesguen C., Hua B.L., Cherubin L., Aguiar A., Le Cann, Danialt N., and Serra N.* Evidence of Mediterranean water dipole collision

- in the Gulf of Cadiz. *J. Geophys. Res.*, 2014, Vol. 119(8), pp. 5337–5359. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JC009972>.
- Lane-Serff G.F. and Baines P.G. Eddy formation by overflows in stratified water. *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, Vol. 30, No. 2, pp. 327–337.
- Maltsev N.E., Sabinin A.V., and Furduev A.V. Acoustic-oceanological experiment on a Mediterranean lens in the Atlantic ocean. *Acoustic J.*, 1990, Vol. 36(1), pp. 86–92.
- Madelain F. Influence de la topographie du fond sur l'écoulement Méditerranéen entre le Détroit de Gibraltar et le Cap Saint-Vincent. *Cahiers Oceanographiques*, 1970, Vol. 22, pp. 43–61.
- McDowell S.E. and Rossby H.T. Mediterranean water: An Intense Mesoscale Eddy of the Bahamas. *Science*, 1978, Vol. 202, No. 43728, pp. 1085–1086.
- McDowell S.E. On the origin of eddies discovered during the POLYMODE local dynamics experiment. *J. Phys. Oceanogr.*, 1986, Vol. 16, No. 3, pp. 632–652.
- McWilliams J.C. Submesoscale, coherent vortices in the ocean. *Reviews of Geophys.*, 1985, Vol. 23(2), pp. 165–182.
- Marez de C., Carton X., L'Hegaret P., Meunier T., Stegner A., Le Vu B., and Morvan M. Oceanic vortex mergers are not isolated but influenced by the β -effect and surrounding eddies. *Nature. Scientific Reports*, 2020, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59800-y>.
- Menesguen B.L., Hua B.L., Papenberg C., Klaeschen D., Géli L., and Hobbs R. Effect of bandwidth on seismic imaging of rotating stratified turbulence surrounding an anticyclonic eddy from field data and numerical simulations. *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36(L00D05), pp. 1–15.
- Menesguen C., Hua B.L., Carton X., Klingelhoefer F., Schnurle P., and Reichert C. Arms winding around a meddy seen in seismic reflection data close to the Morocco coastline. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39(L05604), <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL050798>.
- Paillet J., LeCann B., Serpette A., Morel Y., and Carton X. Real-time tracking of a northern meddy in 1998–98. *Geophys. Res. Letters*, 1999, Vol. 26, pp. 1877–1880.
- Paillet J., Le Cann B., Carton X., Morel Y., and Serpette A. Dynamics and evolution of a Northern Meddy. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, Vol. 32, No. 1, pp. 55–79.
- Prater M.D. and Rossby T. An alternative hypothesis for the origin of the “Mediterranean” salt lens observed off the Bahamas in the fall of 1976. *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, Vol. 29, pp. 2103–2109.
- Prater M.D. and Sanford T.B. A meddy off Cape St. Vincent. Part I: Description. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, Vol. 24, pp. 1572–1586.
- Richardson P.L., Walsh D., Armi L., Schroder M., and Price J.F. Tracking three Meddies with SOFAR Floats. *J. Phys. Oceanogr.*, 1989, Vol. 19, No. 3, pp. 371–383.
- Richardson P.L., McCartney M.S., and Maillard C. A search for meddies in historical data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1991, Vol. 15, pp. 241–265.
- Richardson P.L. and Tychensky A. Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment, 1993–1995. *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103, No. C11, pp. 25029–25045.
- Richardson P.L., Bower A.S., and Zenk W. A census of meddies tracked by floats. *Progress in Oceanography*, 2000, Vol. 45(2), pp. 209–250.
- Rossby T., Riser S.C., and Mariano A.J. The Western North Atlantic – A Lagrangian Viewpoint. In: *Eddies in Marine Science* (ed. by A. Robinson), Verlag Berlin: Springer, 1983, pp. 66–91.
- Schultz Tokos K., Hinrichsen H.H., and Zenk W. Merging and migration of two meddies. *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, Vol. 24, pp. 2129–2141.

- Serra N. and Ambar I. Eddy generation in the Mediterranean undercurrent. *Deep-Sea Research I*, 2002, Vol. 49, pp. 4225–4243.
- Serra N., Ambar I., and Kase R.H. Observations and numerical modelling of the Mediterranean outflow splitting and eddy generation. *Deep-Sea Research II*, 2005, Vol. 52, pp. 363–408, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.05.025>.
- Serra N., Ambar I., and Boutov D. Surface expression of Mediterranean Water dipoles and their contribution to the shelf/slope – open ocean exchange. *Ocean Science*, 2010, Vol. 6, pp. 191–209, www.ocean-sci.net/6/191/2010/.
- Siedler G., Armi L., and Muller T.J. Meddies and decadal changes at the Azores Front from 1980 to 2000. *Deep-Sea Research II*, Vol. 52(2005), pp. 583–604, doi: 10.1016/j.dsr2.2004.12.010.
- Shapiro G.I., Meschanov S.L., and Emelyanov M.V. The Mediterranean Lens after collision with seamounts. *Oceanology*, 1992, Vol. 32, No. 3, pp. 420–427.
- Shapiro G.I., Meschanov S.L., and Emelyanov M.V. Mediterranean lens “Irving” after its collision with seamounts. *Oceanol. Acta*, 1995, Vol. 18, pp. 309–318.
- Shapiro G.I. and Meschanov S.L. Spreading pattern and mesoscale structure of Mediterranean outflow in the Iberian Basin estimated from historical data. *J. Mar. Sys.*, 1996, Vol. 7, pp. 337–348, [http://dx.doi.org/10.1016/09247963\(95\)00011-9](http://dx.doi.org/10.1016/09247963(95)00011-9).
- Sokolovskiy M.A., Filyushkin B.N., and Carton X. Dynamics of intrathermocline vortices in a gyre flow over a seamount chain. *OD.*, 2013, Vol. 63, No. 7, pp. 741–760.
- Sokolovskiy M.A. and Verron J. Dynamics of vortex structures in a stratified rotating fluid. Moscow–Grenoble: Springer, 2013, 382 p.
- Stammer D., Hinrichsen H-H., and Kase R.H. Can meddies be detected by satellite altimetry? *J. Geophys. Res.*, 1991, Vol. 239, No. C4, pp. 7005–7014.
- Swallow J.C. A deep eddy off Cape St. Vincent. *Deep Sea Res.*, 1969, Vol. 16, pp. 285–296.
- Swallow J.C. The “Aries” current measurements in the western North Atlantic. *Phil. Trans. R.*, London, 1971, A 270, No. 1206, pp. 451–460.
- Thorpe S.A. A sediment cloud below the Mediterranean outflow. *Nature*, 1972, Vol. 239, No. 5371, pp. 326–327.
- Tychensky A. and Carton X. Hydrological and dynamical characterization of meddies in the Azores region: a paradigm for baroclinic vortex dynamics. *J. Geophys. Res.*, 1998, Vol. 103(C11), pp. 25061–25079, <http://dx.doi.org/10.1029/97jC03418>.
- Vinogradov A.S. and Pavel'son Yu.H. Thin water stratification on the Sargasso sea under main thermocline. *Oceanol. Res.*, 1980, Vol. 31, pp. 59–617, (in Russian).
- Yegorikhin V.D., Ivanov Y.A., Kort V.G., Koshlyakov M.N., Lukashev Y.F., Morozov E.G., Ovchinnikov I.M., Paka V.T., Tsybaneva T.B., Shadrin I.F. and Shapovalov S.M. An intrathermocline lens of Mediterranean water in the tropical North Atlantic. *Oceanology*, 1987, Vol. 27, pp. 121–127.
- Zatsepin A.G. and Didkovskii V.L. On one mechanism of formation of mesoscale vortex structures in the oceanic slope zone. *Dokl. Earth Sci.*, 1996, Vol. 347, No. 1, pp. 109–112.
- Zatsepin A.G., Didkovskii V.L., and Semenov A.V. Self-oscillatory mechanism of periodical eddy structure formation from a stationary local source on the sloping bottom in a rotating fluid. *Oceanology*, 1998, Vol. 38, No. 1, pp. 56–61.
- Zenk W., Schultz Tokos K.L., and Boebei O. New observations of meddy movement south of the Tejo Plateau. *Geophysical Research Letters*, 1992, Vol. 19, pp. 2389–2392.
- Zhurbas V.M. and Kuzmina N.P. On the possibility of diapycnal displacement of intrathermocline eddies. *Intrathermocline eddies in the ocean*. Ed. Fedorov K.N., Moscow: IO RAS, 1986, (in Russian).