

УДК 551.465

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ВОД В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПОПЛАВКОВ АРГО

© 2017 г. Б. Н. Филюшкин, К. В. Лебедев, Н. Г. Кожелупова

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: borisfil@yandex.ru; nk@ioran.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2016 г.

На основе базы данных измерителей поплавков АРГО исследовано распространение промежуточных средиземноморских вод, являющихся основным источником тепла и соли на глубинах 600–1500 м в Атлантическом океане. Для акватории Атлантического океана от 20° до 50° с.ш. было использовано около 75 000 профилей температуры и солёности, полученных с помощью 900 поплавков АРГО за период с 2005 г. по 2014 г. Для обработки была использована АРГО-Модель Исследования Глобального Океана. Такая методика позволила впервые получить полный набор океанографических характеристик до глубины 2000 м для различных временных интервалов осреднения (месяц, сезон, годы). Совместный анализ распределения температуры, солёности и скорости течений на горизонтах 700–1000 м позволил по-новому оценить характер распространения средиземноморских вод и их проникновения в западную часть океана через Срединно-Атлантический хребет. Показано, что на глубинах 700 и 1000 м Срединно-Атлантический хребет уже является препятствием для адвективного продвижения солёных вод (> 35.5 епс) на запад и прозрачен для фрагментов разрушенных внутритермоклинных линз с более низкой солёностью (< 35.4 епс). В зоне Атлантического океана от 20° до 35° с.ш. и от 30° до 70° з.д. был проведен поиск отдельных “линзовых” профилей по измерениям с АРГО с аномальным распределением солёности для обнаружения внутритермоклинных линз и их отдельных фрагментов. Проанализировано около 24 000 измерений с 370 измерителей АРГО, и только около 3% из них показали слабые аномалии солёности на глубинах 800–1200 м. Внутритермоклинные линзы по этим наблюдениям обнаружены не были. Анализ дрейфа отдельных измерителей, регистрирующих профили температуры и солёности с аномальными слоями в продолжение длительного времени, позволил исследовать характер перемещения средиземноморских вод через Срединно-Атлантический хребет.

DOI: 10.7868/S0030157417060016

ВВЕДЕНИЕ

Промежуточные глубины (600–1500 м) восточной части северной половины Атлантического океана (АО) заняты теплыми и солёными средиземноморскими водами средиземноморских вод (СМВ). Несмотря на то, что воды Средиземного моря поступают с придонным течением через узкий и неглубокий Гибралтарский пролив (глубина порога 350 м), эти воды занимают 21% площади и около 4% объема вод АО [2]. Вытекающие с придонным течением СМВ характеризуются значениями солёности более 37.0 епс и температурой более 13°C. На периферии области распространения СМВ солёность и температура уменьшаются, соответственно, до 35.2 епс и 5°C. Кроме квазинепрерывной “струйной” компоненты в переносе СМВ имеется и дискретная — “линзовая” составляющая. Внутри слоя промежуточных вод находятся изолированные внутритермоклинные линзы (ВТЛ), заполненные почти “чистыми” водами Средиземного моря. Они формируются, в основном, в каньонах

континентального склона Пиренейского полуострова и представляют собой циклонические и антициклонические вихри, отличающиеся от окружающих их СМВ по температуре на 2°–4°C и по солёности на 0.5–1.0 епс [1, 16]. Циклонические вихри живут менее одного года и разрушаются практически в районе их образования [11, 16]. Время жизни антициклонических вихрей около 3–5 лет и они могут перемещаться на расстояния до 4000 км. В литературе их называют Медди [Mediterranean eddy]. Именно эти вихри играют основную роль в процессах турбулентного обмена и переноса тепла, соли и примесей на промежуточных глубинах Северной Атлантики (СА), и определяют положение границы языка солёности на больших удалениях от источника их поступления [11, 16, 19].

Перенос средиземноморскими водами на промежуточных глубинах Медди на большие расстояния в течение многих лет может быть сравним с адвективным переносом тепла и соли [15, 28]. Оценки отдельных исследований показывают, что вклад

ВТЛ в общий перенос соли может быть весьма значительным: около 25% [26], более 50% [14] и близко к 100% [21]. В этом смысле можно говорить о климатической роли переноса тепла и соли ВТЛ в поддержании устойчивого положения языка соленых вод как характерной гидрологической особенности на промежуточных глубинах АО [2, 7].

Медди встречаются в АО в полосе от 20° до 50° с.ш., и по долготе от Гибралтарского пролива до Срединного Атлантического хребта (САХ), являющегося естественным препятствием для их дальнейшего движения на запад. В 1976 г. около Багамских островов (20° с.ш., 70° з.д.) была обнаружена линза, по своим размерам, глубине залегания и гидрологическим характеристикам близкая к средиземноморским ВТЛ [22]. В 1999 г. была предложена новая гипотеза происхождения этой ВТЛ в районе Ньюфаундленда [25]. Однако наблюдения показывают, что на промежуточных глубинах 700–1200 м к западу от САХ также встречаются прослойки СМВ [3, 18, 22, 23, 33]. Поскольку наблюдения поплавков АРГО охватывают всю северную часть АО, в данной работе оказалось возможным определить границы языка СМВ, и одновременно попытаться обнаружить положение отдельных ВТЛ, особенно, на больших удалениях от источника их происхождения. С этой целью в зоне Атлантического океана от 20° до 35° с.ш. и от 30° до 70° з.д. был проведен поиск отдельных “линзовых” профилей с измерителей АРГО с аномальным распределением солености для обнаружения ВТЛ и их отдельных фрагментов.

МАТЕРИАЛЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДИКА

В данной работе было принято для расчетов около 75000 профилей температуры и солености, полученных с помощью измерителей АРГО за период 2005–2014 гг. [<http://doi.org/10.17882/42182>]. Впервые были построены среднегодовые карты распределения температуры, солености и течений для СА от 20° до 50° с.ш. и для глубин от 600 до 1200 м.

В работе была использована АРГО-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО) [8, см. также <http://argo.ocean.ru/>], основанная на измерениях АРГО, а также данных спутниковой альтиметрии, которые используются для контроля решения при выборе параметров модели. При обработке профилей АРГО мы использовали метод вариационной интерполяции измерений на регулярную сетку с последующей модельной гидродинамической адаптацией полученных полей, что являлось отличительной особенностью представленной методики. Модель позволяет получать по данным профилирования АРГО полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений [8]. Выполненные расчеты охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представляются ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями. База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>. Пространственное разрешение данных в базе составляет один градус по долготе и широте, а по времени – 1 месяц.

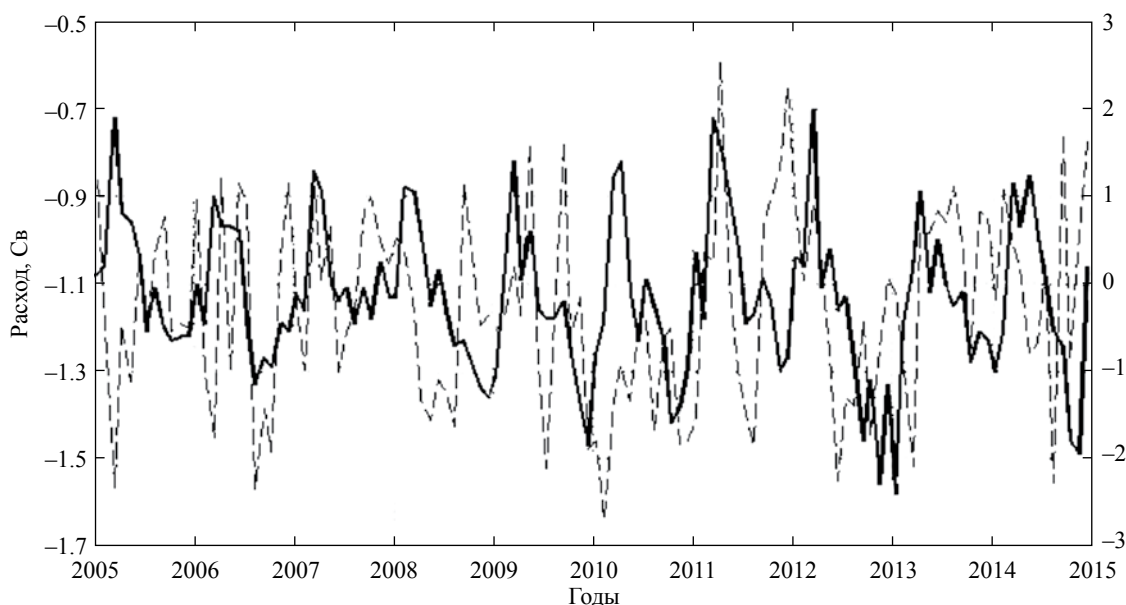


Рис. 1. Изменчивость расхода придонного течения в Гибралтарском проливе из Средиземного моря по расчетам среднемесячных полей течений Мирового океана в период с 2005 по 2014 гг. в рамках модельного эксперимента АМИГО [8] (сплошная линия) и индекса САК (пунктирная).

Характер пространственного поля промежуточных СМВ и гидрофизических параметров в северной части АО определяется, в первую очередь, изменчивостью расхода придонных вод, поступающих из Средиземного моря через Гибралтарский пролив. Многолетние колебания расхода вод за период с 1958 по 2006 гг., рассчитанные по модели 3-мерной циркуляции океана [12], изменялись в пределах от 0.63 до 1.12 Св. и оказались близки к оценкам результатов прямых наблюдений [17, 20]. На рис. 1 представлен график изменчивости расхода течения в Гибралтарском проливе, полученный в результате модельного эксперимента АМИГО по расчетам среднемесячных полей течений Мирового океана в период с 2005 по 2014 гг. с использованием данных АРГО и тангенциального напряжения трения ветра из реанализа ECMWF ERA-Interim [8]. Для корректного описания водообмена в проливе при проведении модельных расчетов была проведена корректировка рельефа дна в ряде ключевых проливов Мирового океана [8]. Благодаря такой корректировке удалось получить разумные значения расходов СМВ в Гибралтарском

проливе, близкие к модельным и наблюдаемым величинам (рис. 1) [12, 17, 20, 29].

Поскольку западная часть Средиземного моря и Северная часть АО находятся в зоне климатического воздействия Северо-Атлантического колебания (САК), то между величиной расхода придонного течения в Гибралтарском проливе и индексом САК за 49 лет была обнаружена многолетняя корреляция. Это значит, что объем языка СМВ в Атлантическом океане может в многолетнем плане согласованно изменяться с величиной индекса САК [12]. В нашем случае в рамках 10-летнего ряда наблюдений по данным измерителей АРГО хорошо прослеживается сезонная изменчивость расхода СМВ в Гибралтарском проливе и индекса САК (рис. 1), а также отмечается корреляция между этими параметрами [8].

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СМВ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ

Будем анализировать особенности распределения основных характеристик по среднегодовым

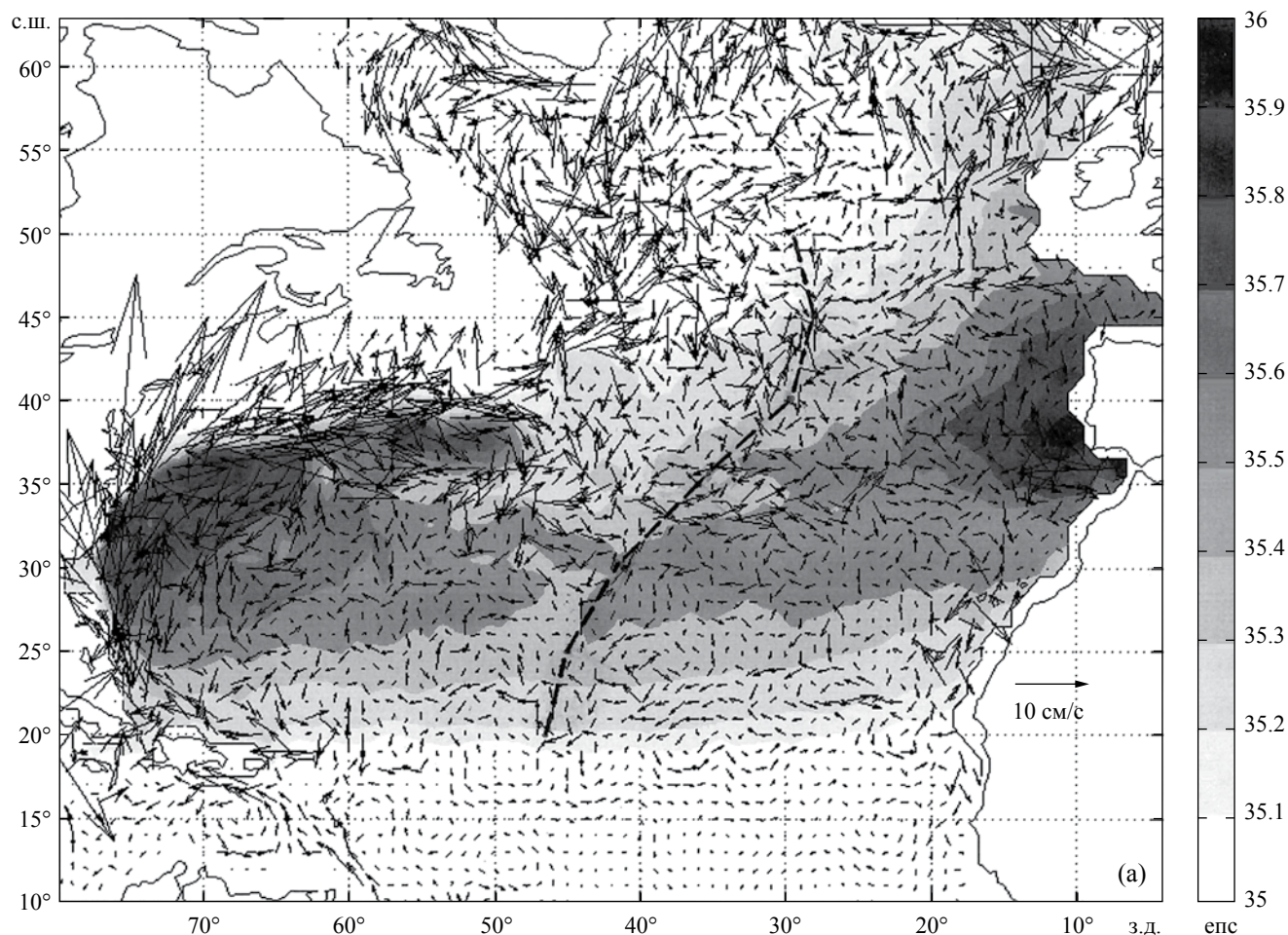


Рис. 2. (а) – Среднегодовое распределение солёности по измерениям АРГО за период с 2005 по 2014 гг. на глубине 700 м на фоне поля течений в Атлантическом океане. Пунктирной линией показано положение оси Срединно-Атлантического хребта.

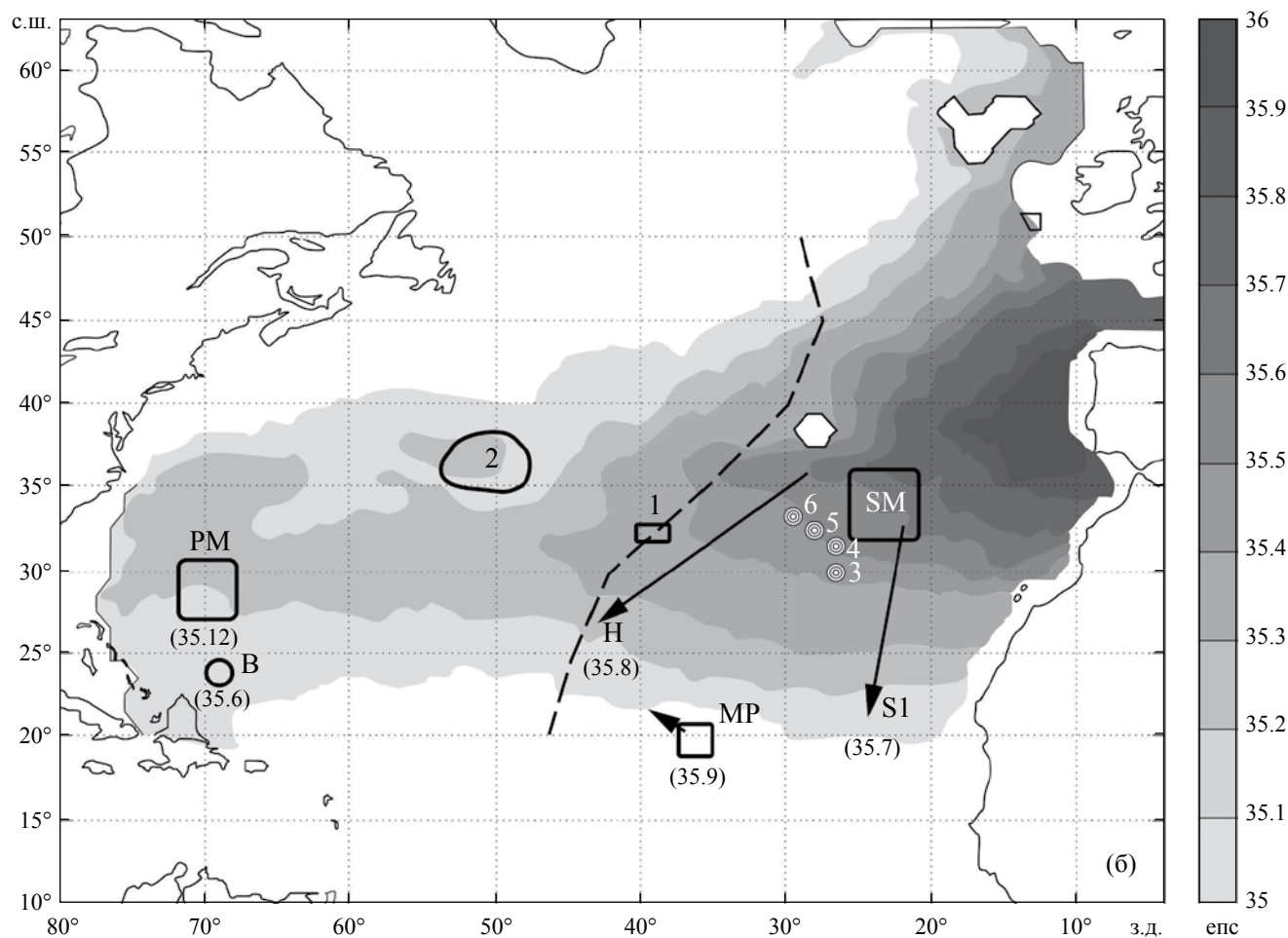


Рис. 2. (б) – Среднегодовое распределение солёности по измерениям АРГО за период с 2005 по 2014 гг. на глубине 1000 м в Атлантическом океане. Пунктирной линией показано положение оси Срединно-Атлантического хребта. РМ и SM обозначают положения полигонов ПОЛИМОДЕ[3] и СЕМАФОР[27]. В[22], Н[27], МР[6] и S[26] – районы обнаруженных изолированных внутритермоклинных линз. В круглых скобках дано значение солёности в линзах на глубине 1000 м (1–6 – см в тексте).

картам для глубин от 600 до 1200 м через каждые 100 м. Рассмотрим более подробно положение языка солёности СМВ на глубинах 700–1000 м (рис. 2а, 2б). Во-первых, совместный анализ всех карт на глубинах 600–1200 м позволяет утверждать, что язык СМВ четко локализован в пригибралтарском районе. Эти воды формируются в Кадисском заливе, когда поток придонных СМВ, распространяющийся вдоль континентального склона Пиренейского полуострова, при пересечении каньонов теряет устойчивость, и воды, сливаясь по ним на глубины 700–1300 м, формируют ВТЛ [1, 11, 16, 33] и водную массу промежуточных средиземноморских вод [2, 7]. Эти воды и линзы выносятся существующей системой течений в прилегающую область океана [32]. Именно здесь, к западу от полуострова, наблюдаются СМВ с температурой выше 12°C и солёностью выше 36.0 eps [30, 33]. Схема течений на глубине 1000 м по данным измерителей АРГО, показана на рис. 3. На этой глубине струя

СМВ солёностью более 35.4 eps достигает САХ на широте Гибралтарского пролива (36.0° с.ш.). Относительно этой широты язык СМВ в АО асимметричен: так воды солёностью около 35.5 eps в виде узкой струи двигаются на север вдоль западных берегов Европы до 48.0° с.ш. При этом воды с солёностью 35.3–35.4 eps, перемещаясь к югу, формируют широтную зону 30°–35° с.ш. от САХ до побережья Африки. На рис. 2б стрелками показано направление дрейфа двух ВТЛ – (Н) [27] и (S1) [26] и приведены значения солёности в ядрах этих линз. Дрейфуя на юг, линзы передают тепло и соль окружающим водам, изменяя при этом положения изохалин на этих направлениях. Такой механизм обмена объясняет особую роль ВТЛ в поддержании слоя СМВ на глубинах 800–1200 м в низких широтах АО.

Во-вторых, надо отметить, что на глубинах 600–1200 м СМВ являются основным

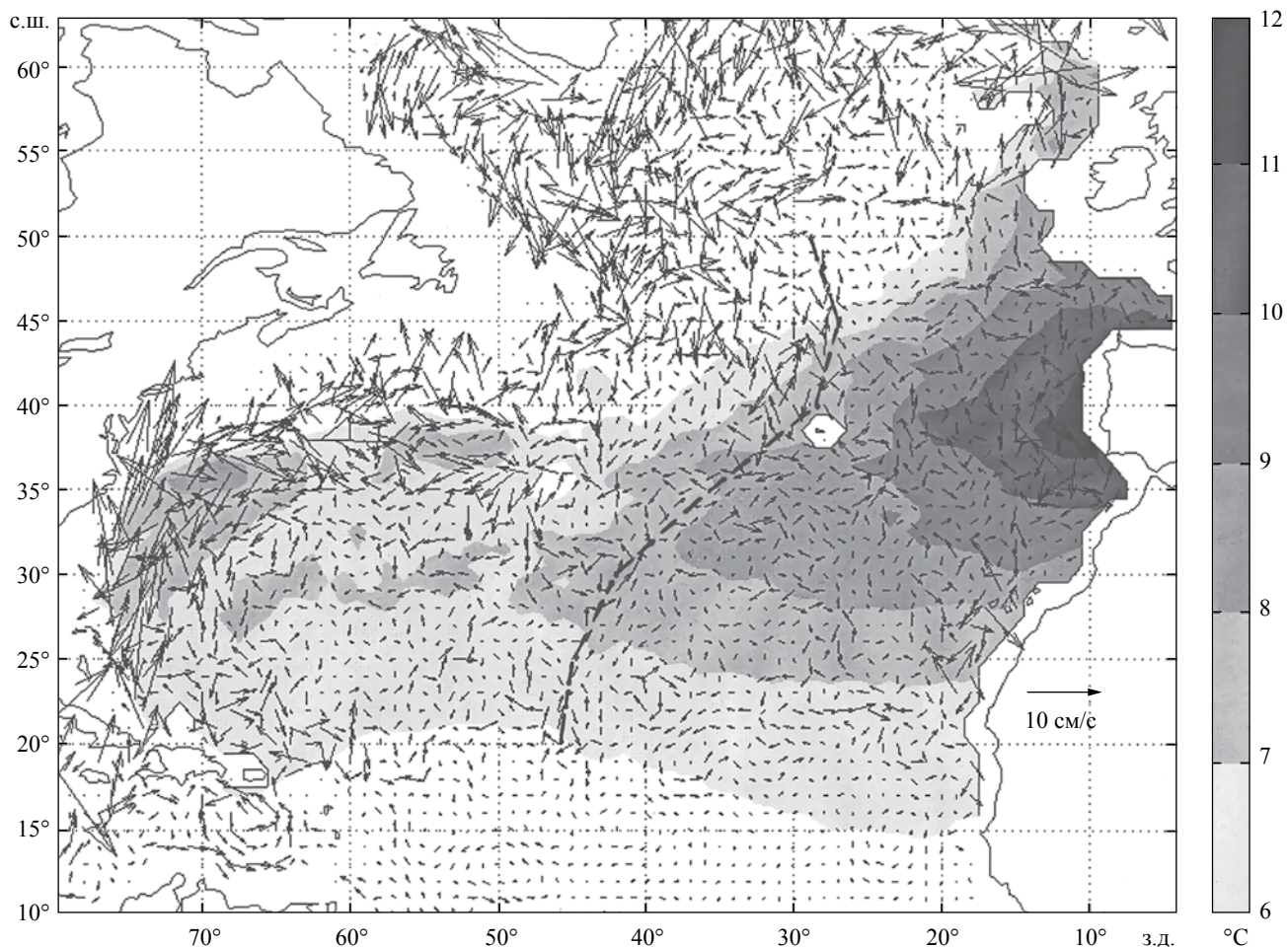


Рис. 3. Среднее распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и скорости течений (cm/s) на глубине 1000 м в Атлантическом океане.

источником поступления соли (рис. 2а, 2б) и тепла в АО (рис. 3). Если на глубинах до 800 м в западной части АО сказывается влияние теплых и соленых вод Флоридского течения и Гольфстрима, то на глубине более 800 м СМВ с соленостью больше 35.2 епс занимают все пространство АО в полосе между 27° – 35° с.ш., пересекая САХ до Саргассова моря включительно. При этом следует отметить существование обособленной области между 34° – 39° с.ш. и 48° – 59° з.д. (рис. 2б (2)) с более высокими значениями температуры и солености на глубине 700 м и по происхождению связанной с водами западных пограничных течений (рис. 2а). Но на глубинах 800–1000 м область просматривается как изолированное образование (рис. 2б (2)). Характер течений на глубинах 700 м и 1000 м (рис. 2а, 3) позволяет определить эту область как крупномасштабный антициклонический вихрь. В то же время, в работе [18] в этой области на глубинах 550–800 м отмечалось существование более 12 изолированных линз диаметром 65 км и толщиной 220 м. Рассмотренные материалы позволяют считать, что

их происхождение возможно связано с поступлением теплых и соленых вод пограничных западных течений. Однако авторы [18] связывают их появление с удаленными источниками и не исключают поступления этих вод с течениями вдоль 20° с.ш. от западной Африки.

Особенно четко прослеживается связь распространения СМВ с наблюдаемыми течениями на глубине 1000 м (рис. 3) в районе Азорской фронтальной зоны. На рис. 2б показано положение полигона эксперимента “СЕМАФОР” [27]. Именно в его северной части проходит на восток Азорское течение, которое ограничивает распространение более соленых вод и линз на юг. Севернее, на запад проходит струя Гибралтарского течения и определяет положение узкого языка СМВ, достигающего оси САХ. Можно отметить, что СМВ с соленостью > 35.4 епс не пересекают САХ на глубинах 1000 м, но воды малой солености (< 35.3 епс) проникают через САХ и, практически, занимают всю западную часть АО на широтах от 27° до 34° с.ш. При этом СМВ отчетливо просматриваются на

глубинах 1100 и 1200 м, простираясь на запад до 65° и 60° з.д., соответственно. Распределение температуры на горизонте 1000 м (рис. 3) в значительной степени совпадает с распределением солёности на этом же горизонте. Это значит, что при удалении от источника происхождения, СМВ одновременно теряют тепло и соль, но при этом сохраняется глубина ядра этих вод [26].

Используя метод фиксированных характеристик СМВ, можно определить климатические границы их распространения в Атлантическом океане. При этом использовались фиксированные значения солёности, как более устойчивые характеристики по сравнению со значениями температуры [7]. Если принять за критерий величину солёности, равную 35.1 епс, то на глубине 1000 м южная граница СМВ проходит по 28° с.ш. от 75° до 45° з.д., а на востоке от 25° до 23° с.ш. Северная граница СМВ проходит от Америки до САХ приблизительно по 34° с.ш., а на востоке, следуя в направлении САХ, СМВ достигают 60° с.ш. в районе Фареро-Шотландского пролива (рис. 26). Полученные результаты заметно отличаются от ранее построенных карт [7, 11, 23] более высокой достоверностью измерений и расчетов, а также точностью определения границ положения СМВ.

РОЛЬ ВНУТРИТЕРМОКЛИННЫХ ЛИНЗ В РАСПРОСТРАНЕНИИ СМВ

Был проведен также поиск отдельных “линзовых” профилей измерителей АРГО в зоне АО от 20° до 35° с.ш. и от 30° до 70° з.д. для обнаружения ВТЛ и их отдельных фрагментов. В результате анализа 24000 измерений с 370 поплавков АРГО было выявлено около 700 профилей с малыми аномальными отклонениями температуры и солёности на глубинах 800–1200 м. Сразу заметим, что вероятность обнаружения ВТЛ в этой области существенно меньше чем в пригибралтарском районе [1, 10, 16], где из 11200 измерений АРГО за период с 2001 по 2010 гг. было выделено 2043 профиля со значениями солёности более 36.0 епс [4]. Поэтому можно утверждать, что в эти 10 лет большие линзы в исследуемом районе отсутствовали.

На рис. 4а показан дрейф поплавков АРГО № 4900687 за период с 28 декабря 2006 г. по 26 апреля 2009 г. и № 4900729 за период с 16 апреля по 22 ноября 2007 г. Оба поплавка дрейфовали в районе САХ, и при этом они пересекли ось этого хребта (рис. 26 (1)). На рис. 4б приведены последовательные вертикальные профили солёности за все время наблюдений в слое от 500 до 1500 м для поплавка № 4900729. Аномалия солёности выражена слабо (от 0.25 до 0.35 епс), но солёность в слое 1000–1100 м колеблется около 35.37 епс, что

близко к значению солёности СМВ. Так поплавок, переходя с запада на восток (между точками 4 и 5), регистрирует сильные изменения профиля солёности в слое 700–900 м, а затем аналогичные изменения отмечаются между точками 10–12, когда поплавок вновь приближается к оси хребта с востока (рис. 4б). При этом заметно меняется скорость дрейфа поплавков: по широте между точками 1 и 2 поплавок дрейфовал со скоростью 3.5 мили/сут, пересек САХ со скоростью 3.0 мил/сут, а на подходе и после прохождения оси хребта, скорость соответственно падала до 2.0 и 1.5 мил/сут. Другой поплавок также, но уже в другое время (рис. 4а), перемещался с востока на запад. Такое хаотическое перемещение поплавков АРГО в течение года скорее всего связано со сложными движениями фрагментов разрушенных ВТЛ, прошедших через сложную систему подводных гор [31]. Эти результаты находятся в согласии с наблюдениями [21] и выводами о том, что к западу от САХ в диапазоне широт от 27° до 40° с.ш. наблюдаются только разрушенные вихри малых масштабов [28, 27].

Измерения АРГО показывают интегральную картину распределения СМВ в АО и дают возможность выделить зоны, где гидрофизические параметры СМВ в значительной степени определяются

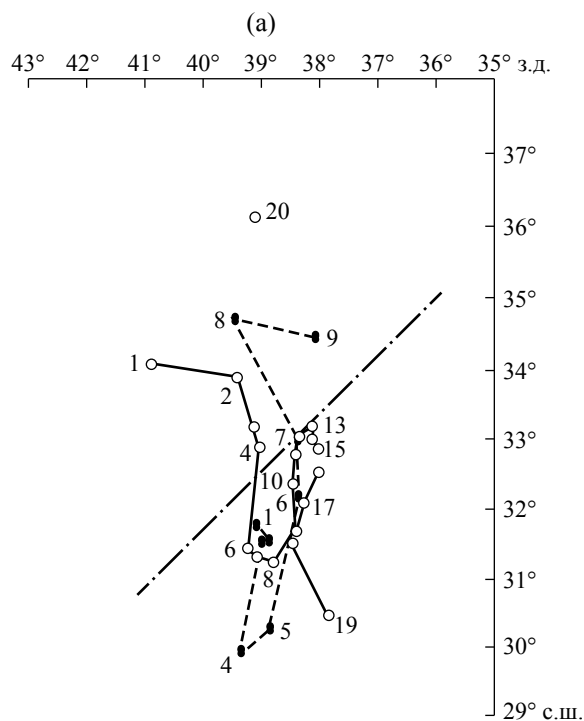


Рис. 4. (а) – Дрейф поплавков измерителей АРГО № 4900687 (пунктирная линия) за период 28.12.2006 – 26.04.2009 гг. (номера погружений 1–9) и № 4900729 (сплошная линия) за период с 16.04. по 22.11. 2007 г. (номера погружений 1–19). Штрихпунктирной линией показано положение оси Срединно-Атлантического хребта.

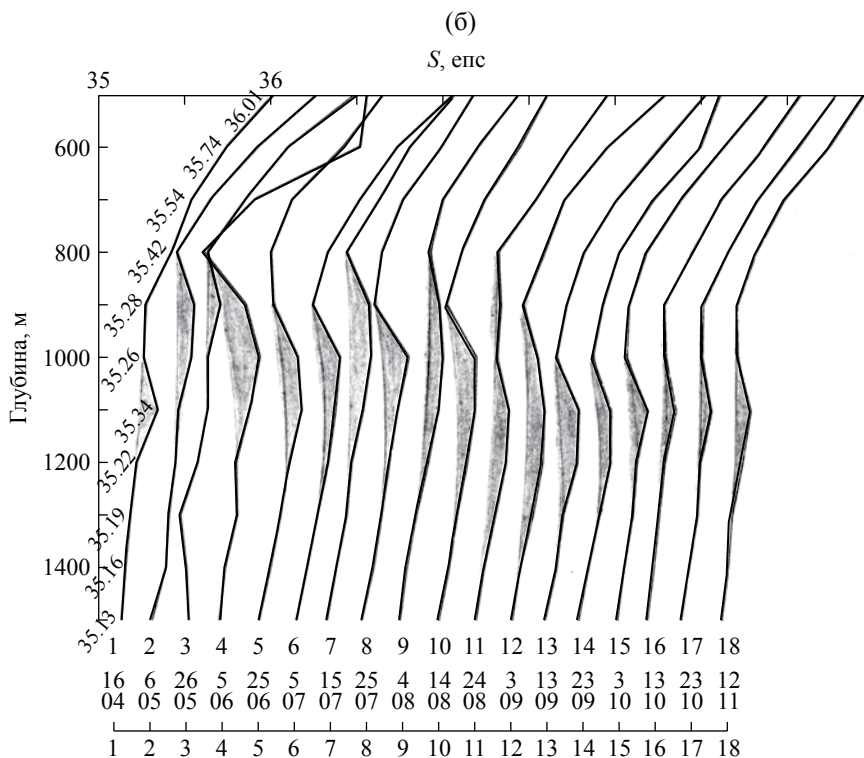


Рис. 4. (б) – Последовательные профили солености (со сдвигом на 0.2 епс) с измерителя АРГО № 4900729 (18 погружений). Между 4 и 5 погружениями АРГО пересек Срединно-Атлантический хребет с запада на восток.

механизмами разрушения ВТЛ [13]. Это в основном районы, удаленные к югу от Азорской фронтальной зоны и к западу от САХ. Используя ограниченные экспериментальные наблюдения, кратко опишем основные механизмы разрушения ВТЛ при взаимодействии с рельефом дна, сильными течениями и окружающими водами, и обсудим возможные пути проникновения СМВ в западную часть АО.

Для того чтобы понять, как формируются отдельные аномальные линзы разных масштабов, залегающие на глубинах 800–1200 м и обнаруженные в западной части океана [3, 11, 18, 24, 25, 22, 28], кратко рассмотрим примеры разрушения ВТЛ по экспериментальным наблюдениям в Канарской котловине [5, 13, 27]. Так в ноябре 1989 г. около подводных гор Эрвинг была обнаружена ВТЛ диаметром 100 км и толщиной 0.9 км. Были проведены две гидрологические съемки с интервалом 9 дней. Уже за это время при столкновении с горой линза потеряла 1/30 объема [5] (рис. 26 (5)). В январе 1990 г. эта линза была обнаружена в 50 милях к западу от горы Эрвинг (рис 26 (6)). За время между этими съемками линза прошла через узкий пролив (45 км), деформировалась, но не разрушилась [13], а уменьшила объем с 36000 до 22000 км³ и, при этом сохранила 2 фрагмента общим объемом порядка 350 км³. Линзы в своем движении на запад могут преодолеть отдельные цепочки гор на этих широтах [13]. На рис. 26 показано положение ВТЛ (5) [5] в начальный

момент встречи с горой и (6) [13] после ее прохождения через подводный пролив, а также ВТЛ (3) и (4) [27] в эксперименте “СЕМАФОР”, следы которой после контактов с горами не были обнаружены. Далее, очень крупная линза Hyperion (рис. 26 (H)) диаметром 120 км на глубинах 750–1500 м [27], которая по сложной траектории двигалась на юго-запад от полигона “СЕМАФОР” (рис. 26 (SM)), также застряла в горах САХ на 27° с.ш. Такое взаимодействие ВТЛ с рельефом дна показывает, что возможность пересечения оси САХ для них на широтах от 28° до 35° с.ш. действительно отсутствует [27]. Именно на этой широте выше проанализирован характер перемещения поплавок АРГО через САХ (рис. 26, 4а, 4б).

Очевидно, что САХ представляет собой сложную систему подводных гор и препятствует движению СМВ в западном направлении. Моделирование процессов взаимодействия вихрей разных знаков вращения между собой и системой подводных гор Подкова [31] показала сложную картину их разрушения. При разрушении линзы могут резко уменьшать объем основного тела, образуя большое число разных по объему фрагментов и тонких нитеобразных структур (filaments) [5, 13, 16, 31]. Кроме того, в зонах сильных течений ВТЛ могут разрушаться как единые вертикальные структуры, образуя отдельные ядра, разнесенные по разным глубинам [9].

Рассмотренные выше процессы представляют собой пример быстрого механизма передачи тепла и соли окружающим водам: (1) частичное разрушение ВТЛ при встрече с подводными горами [5, 27] и прохождение через “проливы” [13]; (2) взаимодействие с фронтальными зонами [27]; (3) разрушение линз на периферии сильных течений [9].

Относительно медленное разрушение линз происходит в результате: (1) турбулентного обмена на внешних границах с термохалинными интрузиями; (2) послойной дифференциально-диффузионной конвекции на верхней границе линзы; (3) конвекции, формирующей “солевые пальцы” на нижней границе линзы [10]. Мониторинг линзы Шарон в течение трех лет подтвердил, что разрушение этой линзы произошло в результате этих медленных процессов (рис. 26 (S1)). При этом тепло- и солеобмен происходил неравномерно по времени: в течение 1 года (порядка 300 дней) линза потеряла 2/3 тепла и соли, а в оставшиеся 2 года — только 1/3 [26]. В рамках этого уникального эксперимента были выполнены 4 гидрологические съемки, позволившие изучить эволюцию линзы вплоть до ее разрушения. Было установлено, что в течение всей ее жизни сохраняются глубина залегания ядра и значение плотности воды в нем. При этом соленость в линзе уменьшилась с 36.4 епс в 1984 г. до 35.7 епс в 1986 г., а ее толщина — с 500 до 90 м [26].

Измерения с помощью поплавков АРГО не позволяют прямо ответить на вопрос о переносе больших линзовых объемов СМВ в западную часть АО. На рис. 26 показано положение еще двух ВТЛ на самой удаленной периферии языка СМВ — Медди “Мезополигон” (МР) [6] и линзы около Багамских островов (В) [22]. Они находятся на одной широте, и их разделяет 32° долготы и время наблюдений. Линза МР была обнаружена на 20° с.ш. и 37° з.д. в апреле 1985 г. Она имела диаметр около 80 км на глубине 900–1300 м. Температура в ядре линзы была 9.8°C, соленость — 35.9 епс. Соответственно отклонение от окружающих вод по температуре было 3°C, а по солености — около 1.0 епс. При этом она двигалась в западном направлении, а скорость ее дрейфа менялась от 0.25 до 1.65 миля/сут. В данном случае САХ не препятствовал дрейфу линзы на запад, и при средней ее скорости 1 миля/сут через 2–3 года она могла попасть в район линзы (В).

Результаты анализа материалов линзы “Мезополигон” [6] не противоречат первым предположениям авторов [22] о том, что линза (В), обнаруженная около Багамских островов в 1976 г., была заполнена средиземноморскими водами и представляла собой антициклонический вихрь — ВТЛ. Предложенная новая гипотеза о формировании линзы (В) в высоких широтах (49.30° с.ш., 41.30° з.д.) противоречит реальности по двум причинам,

приведенным авторами в работе [25] — это низкие величины температуры и солености в ядре и его глубина залегания (400–600 м) в момент ее формирования. Остается без ответа вопрос, как за время предполагаемого 2–3-х летнего дрейфа сохраняются Т, S-характеристики ядра и возрастет глубина его залегания до соответствующей глубины ВТЛ (В).

В ноябре 1980 г. в юго-западной части Саргасова моря (25.28° с.ш. и 70.45° з.д.) была обнаружена изолированная линза на глубинах 650–730 м с высокими аномальными отклонениями всех характеристик от окружающих вод [33]. Эти наблюдения позволили утверждать, что ВТЛ сформировалась в Кадисском заливе и по оценке скорости потребления кислорода в линзе определить ее возраст в 3.4 года. С такой оценкой нельзя согласиться, поскольку возраст ВТЛ “Шарон” по прямым наблюдениям был определен в 4.3 года, а ее траектория дрейфа заметно короче. Тем не менее, линза, обнаруженная в Саргассовом море, по данным гидрологических наблюдений имеет малую толщину и состоит из нескольких образований, а по солености резко отличается от окружающих вод. Это обстоятельство косвенно подтверждает возможность вторжения ВТЛ в эту область, где происходит последующее их разрушение с формированием относительно тонких вихрей на разных глубинах и уносимых от материнской линзы сильными течениями [9].

Возможность поступления СМВ на запад в полосу 19°–22° с.ш. подтверждается рядом американских авторов [18, 22, 23, 33]. Здесь надо оговориться, что прохождение ВТЛ на такие огромные расстояния от источника их формирования (до 6000 км) безусловно очень редкое явление. У отдельных вихрей с возрастом жизни более 4–5 лет на далеких расстояниях уменьшаются отличия их характеристик от окружающих вод. Попадая в зону сильных течений, такие линзы начинают разрушаться как единое образование, и по вертикали формируются ядра отдельных линз меньших масштабов на разных глубинах [9]. Далее наступает каскадный процесс последующего уменьшения размеров вихрей [28].

В период работ на полигоне ПОЛИМОДЕ и Локальном Динамическом Эксперименте (рис. 26, РМ) были обнаружены очень устойчивые изолированные вихри разных масштабов на глубинах 800–1200 м [3, 23, 28]. Во время гидрологической съемки в марте 1978 г. на 25 станциях с интервалом между ними в 34 мили по широте и долготе (рис. 26 РМ) было обнаружено много прослоек с аномальными значениями температуры и солености, порядка 0.12°C и 0.024 епс на различных глубинах ниже главного термоклина. Но при этом наблюдалось накопление числа прослоек (до 15) на глубинах

1000–1400 м толщиной от 100 до 200 м с плотностью воды в них, соответствующей средней плотности разрушенных ядер ВТЛ ($\sigma_r = 27.6 \text{ кг/м}^3$). Зная масштабы полигона, можно оценить средние горизонтальные размеры вихрей в 20–40 км [3]. Близкие результаты по сложной вертикальной структуре вод были также получены во время Локального Динамического Эксперимента [23, 28]. Наблюдения за вихрями в нижнем термоклине показывают сильную аномалию солёности, определяемую фрагментами разрушенных на больших удалениях линз, и этот процесс играет важную роль в переносе соли. Эти вихри в районе ПОЛИМОДЕ уже имеют преобладающий западный дрейф и еще находятся в поле языка СМВ (рис. 2б, РМ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно констатировать, что наличие огромного массива наблюдений, полученных с помощью измерителей АРГО за 10 лет (более 75000 профилей), позволило дать наиболее достоверную среднюю картину распространения СМВ в АО на всех глубинах их существования и, практически, однозначно определить их границы. Были впервые построены и проанализированы детальные среднегодовые карты распространения температуры, солёности и течений по данным одноградусной сетки в диапазоне глубин от 600 до 1500 м. Выполнен анализ особенностей распределения этих характеристик и их взаимосвязи с рельефом дна и динамикой вод в рассматриваемых районах. Показана роль СМВ как основного источника тепла и соли на промежуточных глубинах АО. Описаны закономерности поступления СМВ в АО через Гибралтарский пролив и их дальнейшее распространение в западную часть океана через САХ и в широтную зону от 19° до 20° с.ш. Описаны механизмы переноса тепла и соли ВТЛ в результате как каскадного разрушения в районах САХ, так и прямого дрейфа в южных широтах в сторону Саргассова моря и последующего их разрушения в западных районах АО.

Был проведен поиск отдельных линзовых профилей измерителей АРГО для обнаружения ВТЛ. В результате анализа 24000 измерений АРГО для юго-западной зоны АО было выявлено 700 профилей с малыми аномальными отклонениями температуры и солёности на глубинах 800–1200 м. Поэтому можно утверждать, что в это 10-летие крупные линзы в исследуемом районе отсутствовали. Такой поиск в настоящее время единственно экономически доступный способ обнаружения ВТЛ на больших удалениях от источника их формирования. Это означает, что анализ измерений свободно дрейфующих поплавков АРГО позволит обнаружить ВТЛ типа Мезополигон (МР) [6].

Появление измерителей АРГО принципиально изменило наши возможности исследования географии и физических механизмов, определяющих основные процессы, происходящие в самой активной толще океана до глубин 2000 м. Использование АРГО-модели АМИГО позволило систематизировать случайные наблюдения свободно дрейфующих поплавков АРГО с помощью вариационной методики интерполяции наблюдений на регулярную одноградусную сетку. А также на этой основе произвести сложные расчеты изменчивости расходов переносов тепла и соли течениями при крупномасштабном водообмене.

Результаты проведенного анализа позволят сформулировать программу дальнейших исследований по поиску различного типа происхождения ВТЛ в различных районах Мирового океана.

Работы по исследованию пространственно-го описания промежуточных средиземноморских вод и переноса течениями тепла и соли по данным АМИГО были выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранта № 14-50-00095). Анализ роли ВТЛ при крупномасштабном обмене свойствами воды в АО выполнены при поддержке РФФИ (гранта № 16-55-150001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Бубнов В.А. Структура и динамика средиземноморских вод в Атлантическом океане // Океанологические исследования. М.: Наука, 1971. Т. 22. С. 220–278.
3. Виноградов А.С., Павельсон Ю.Х. Тонкая стратификация вод Саргассова моря под главным термоклином // Океанологические исследования. 1980. Т. 31. С. 56–63.
4. 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.
5. Дыхно Л.А., Морозов Е.Г, Никитин С.В. и др. О разрушении линзы средиземноморской воды при взаимодействии с рельефом дна // Океанология. 1991. Т. 31. № 1. С. 55–61.
6. Егорихин В.Д., Иванов Ю.А., Корп В.Г. и др. Внутритермоклинная линза средиземноморских вод в тропической части Северной Атлантики // Океанология. 1987. Т. 27. № 2. С. 165–175.
7. Кукса В.И. Промежуточные воды Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.

8. Лебедев К.В. Арго-модель исследования глобального океана (АМИГО) // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
9. Филюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Грузинов В.И. и др. Динамическое разрушение средиземноморских линз в Атлантическом океане // *Докл. РАН*. 2002. Т. 387. № 4. С. 545–548.
10. Филюшкин 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.
11. Филюшкин Б.Н., Алейник Д.Л., Демидов А.Л. и др. Особенности формирования и распространения средиземноморской водной массы на промежуточных глубинах Атлантического океана // *Водные массы океанов и морей*. М.: Макс-Пресс, 2007. С. 92–129.
12. Филюшкин Б.Н., Мошонкин С.Н., Кожелупова Н.Г. Многолетняя эволюция поступления вод Средиземного моря в Северную Атлантику // *Прикосновение к океану*. М.: Ижевск, 2013. С. 77–94.
13. Шапиро Г.И., Мещанов С.Л., Емельянов М.В. и др. Линза средиземноморских вод после столкновения с подводными горами // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 3. С. 420–427.
14. Arhan M.A., Colin de Verdiere A., Memery L. The eastern, boundary of the subtropical North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. V. 24. № 6. P. 1295–1316.
15. Armi L., Stommel H. Four views of a portion of the North Atlantic subtropical gyre // *J. Phys. Oceanogr.* 1983. V. 13. № 5. P. 828–857.
16. Bashmachnikov I., Neves F., Calheiros T., Carton X. Properties and pathways of Mediterranean water eddies in the Atlantic // *Progr. Oceanogr.* 2015. V. 137. P. 149–172.
17. Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H. Exchange through the Strait of Gibraltar // *Progr. Oceanogr.* 1994. V. 33. P. 201–248.
18. Dugun J.P., Mied R.P., Mignerey P.C., Schuetz A.F. Compact, Intrathermocline Eddies in the Sargasso Sea // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. NO C1. № 1. P. 385–393.
19. Filyushkin B.N., M.A. Sokolovskiy. Modeling the evolution of intrathermocline lenses in the Atlantic Ocean // *J. Mar. Res.* 2011. V. 69. P. 191–220.
20. Garcia-Lafuente J., Delgado J., Sanchez A. et al. Interannual variability of the Mediterranean outflow observed in Espartel sill, western Strait of Gibraltar // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № 10. C10018. doi:10.1029/2009JC005496.
21. Maze J.P., Arhan M., Mercier H. Volume budget of the eastern boundary layer off the Iberian Peninsula // *Deep-Sea Res.* 1997. I. V. 44. № 9–10. P. 1543–1574.
22. McDowell S.E., Rossby T. Mediterranean Water: An Intense Mesoscale Eddy off the Bahamas // *Science*. 1978. V. 202. P. 1085–1087.
23. McDowell S.E. On the origin of eddies discovered during the POLYMODE local dynamics experiment // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. V. 16. № 3. P. 632–652.
24. Katz E.J. Diffusion of the core Mediterranean Water above the Mid-Atlantic Ridge Crest // *Deep-Sea Res.* 1970. V. 17. P. 611–625.
25. 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. V. 29. № 8. P. 2103–2109.
26. Richardson P.L., Walsh D., Armi L. et al. Tracking three Meddies with SOFAR Floats // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. № 3. P. 371–383.
27. Richardson P.L., Tychensky A. Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment, 1993–1995 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. NO. C11. № 10. P. 25029–25045.
28. Rossby T., Riser S.C., Mariano A.J. The Western North Atlantic – A Lagrangian Viewpoint // Ed. Robinson A.R. *Eddies in Marine Science*. Springer. Verlag, Berlin: 1983. P. 66–91.
29. Sanchez-Roman A., Sannino G., Garcia-lafuente J. et al. Transport estimates at the western section of the Strait of Gibraltar: A combined experimental and numerical modeling study // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. NO C06002. № 6. doi: 10.1029/2008JC005023.
30. 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. V. 7. P. 337–348.
31. Sokolovskiy M.A., Filyushkin B.N., Carton X.J. Dynamics of intrathermocline vortices in a gyre flow over a seamount chain // *Ocean Dynamics*. 2013. V. 63. № 7. P. 741–760.
32. Sparrow M., Boebel O., Zervakis V. et al. Two Circulation regimes of Mediterranean Outflow Revealed by Lagrangian Measurements // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. № 5. P. 1322–1330.
33. Zantopp R., Leaman K. Gulf of Cadiz water observed in a thermocline eddy in the western North Atlantic // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. NO. C3. № 3. P. 1927–1934.

Detection of Intermediate Mediterranean Waters in the Atlantic Ocean by ARGO Floats Data

B. N. Filyushkin, K. V. Lebedev, N. G. Kozhelupova

On the Data Base of ARGO float measurements we investigated peculiarities of spatial distribution of intermediate Mediterranean waters (MW) which are the main source of the heat and salt at 600 – 1500 m depths in the Atlantic. We used about 75000 profiles of temperature and salinity registered by 900 ARGO float for the 2005–2014 period in the Atlantic for latitudes from 20° to 50° N. For processing these data we used ARGO Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO). This technique allowed us for the first time to obtain the full set of oceanographic characteristics up to 2000 m depth for different time intervals of averaging (month, season, years). A joint analysis of the distribution of temperature, salinity, and current velocities on the 700–1000 m depths permits us to give the new interpretation of the MW spreading and their penetration in the Western part of the ocean across Middle Atlantic Ridge (MAR). We show the MAR at depths of 700 and 1000 m is already a barrier for the advective motion of the salt waters (> 35.5 psu) to West and is transparent for fragments of destroyed intrathermocline lenses (ITL) with lower salinity (< 35.4 psu). In the Atlantic area located from 20° to 35° N and from 300 to 700 W we searched specific “lens” profiles obtained via ARGO measures with anomaly salinity distribution used for discovery of ITL and their separate fragments. We analysed about 24000 measures obtained from 370 ARGO floats and only about 3 percents of them showed weak salinity anomalies at 800 – 1200 m depths. We did not discover ITL using these data. The analysis of drift of separate measurements which registered temperature and salinity profiles with anomaly layers during rather long period allowed us to investigate nature MW travel through MAR.