

Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев-профилемеров *Argo*

© 2016 Н.В. Маркова, А.В. Багаев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: n.v.markova@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2016 г.

На основе данных о траекториях и фактической глубине профилирования автономных дрейфующих буев *Argo* за 2005 – 2015 гг. выполнен расчет векторов лагранжевых скоростей течений в Черном море на глубинах ниже основного пикноклина. Произведен анализ величин и направлений рассчитанных векторов в слоях 350 – 600, 600 – 800, 800 – 1200, 1200 – 1600 м. Проведена статистическая оценка полученных результатов. Показано, что преобладающее число (88%) модулей вычисленных векторов скоростей течений находится в диапазоне 1 – 20 см/с. Средняя за все время измерений скорость течений в слоях 350 – 600 и 600 – 800 м составила ~4 см/с, в слое 800 – 1200 м – около 6 см/с, в слое 1200 – 1600 м – 3,5 см/с. Наибольшие средние скорости течений по всей выборке отмечаются в январе – марте, а самые низкие значения приходятся на период с июня по октябрь. Установлено наличие мезомасштабных вихревых структур на фоне общей циклонической циркуляции на указанных глубинах.

Ключевые слова: Черное море, глубоководная циркуляция, скорость течения, буи *Argo*.

Введение. Работы о структуре и физических механизмах циркуляции Черного моря начали появляться еще в первой половине XX в. [1, 2]. В последние годы фундаментальные исследования [см., например, 3 – 6] дополнены множеством работ по изучению, измерению и моделированию динамики верхних слоев моря. Действительно, именно здесь происходят наиболее активные обменные процессы, движения и сосредоточены наибольшие градиенты температуры и солености.

Перечислим характерные термохалинные и динамические особенности верхних слоев Черного моря. В вертикальной структуре отметим верхний квазиоднородный слой и сезонный (весенне-летний) термоклин, связанные в основном с процессом ветрового перемешивания и годовым циклом потока тепла через поверхность моря, затем – воды холодного промежуточного слоя (ХПС) – слоя минимальных температур между сезонным и постоянным пикноклинами, ограниченного изотермой +8°C на глубинах примерно 50 – 100 м. Ниже ХПС на горизонтах до ~300 м располагаются воды главного (основного) пикноклина – слоя максимального по глубине градиента плотности. Плотность определяется преимущественно соленостью, температура остается относительно стабильной. Некоторые исследователи выделяют как отдельный (промежуточный) слой зону трансформации между ХПС и глубинными водами, включая в нее таким образом главный пикноклин и нижележащие воды до горизонтов 1000 – 1200 м [7]. В глубинном слое (горизонты более 1000 – 1200 м) значение плотности почти постоянно. Мы будем называть

процессы в слое ниже 300 м субпикноклинными, циркуляцию – глубоководной (субпикноклинной).

Основное Черноморское течение (ОЧТ) – циклоническое, шириной 40 – 80 км, распространяется со средней скоростью ~40 – 50 см/с по всей периферии бассейна в зоне континентального склона. Два крупномасштабных циклонических круговорота располагаются в восточной и западной частях моря («очки Книповича»). Квазистационарные мезомасштабные (диаметром в несколько десятков километров) антициклонические вихри, называемые по относительной близости расположения к соответствующим географическим объектам, например Севастопольский, Батумский, Синопский антициклоны и т. д., также являются одной из основных черт циркуляции верхних слоев моря. Вне зоны действия основных круговоротов скорости течений более слабые и составляют, по различным оценкам, от 5 до 20 см/с. Отмечается наличие субмезомасштабных (диаметром порядка нескольких километров) короткоживущих преимущественно антициклонических вихрей между ОЧТ и берегом.

Динамическая структура под основным пикноклином по-прежнему остается малоизученной. Черноморские воды на этих глубинах насыщены сероводородом и, вообще говоря, на современном этапе малопригодны к хозяйственной деятельности, что не стимулирует проведение новых исследований. Принято считать, что направление субпикноклинной циркуляции в основном согласуется с направлением циркуляции на более высоких горизонтах. Средние по глубине скорости течений с удалением от поверхности уменьшаются и к горизонту 500 м составляют около 5 – 10 см/с. До опубликования работ [8, 9] предполагалось, что в субпикноклине практически нет сезонных изменений гидрологических характеристик, а их пространственное распределение характеризуется значительной однородностью. В статьях [8, 9] показано, что циркуляция, сохраняя циклоническую направленность, изменяется во времени, а динамическая поверхность отражает наличие множества вихревых образований. Средние скорости оцениваются в этих работах примерно в 5 см/с. В [10] установлено, что придонные течения в некоторых районах обусловлены рельефом дна. Более детальным исследованиям физической природы таких течений препятствует недостаточная обеспеченность данными натурных экспериментов на указанных глубинах. Суммарный архив данных экспедиционных и буйковых измерений течений для всего моря и по настоящее время остается крайне небольшим, несмотря на увеличившееся число выполненных станций в отдельных районах. Кроме того, большинство и архивных и новых данных получено главным образом на горизонтах до 300 – 500 м. Результаты экспериментов на основе современных численных моделей [11 – 16] позволяют воспроизводить трехмерную по пространству структуру поля течений для всего бассейна по всей его глубине, но при этом все же требуют верификации натурными данными на соответствующих горизонтах. Одним из источников таких данных могут служить измерения, выполненные автономными всплывающими буями.

В рамках международного проекта по мониторингу Мирового океана в 1999 г. начала развиваться система автономных глубоководных дрейфующих буйев-профилемеров *Argo* [17, 18]. В океане буй дрейфует на заданной глуби-

не, периодически всплывая к поверхности для передачи собранной информации через спутник (рис. 1). С 2005 по 2015 г. в Черном море было запущено 27 таких буев [17], на сегодняшний день функционируют около 10 профиломеров. Данных их измерений, конечно, не так много, как хотелось бы для исследования, но и накопленный к настоящему времени массив не был использован в полной мере для оценки глубоководной циркуляции.

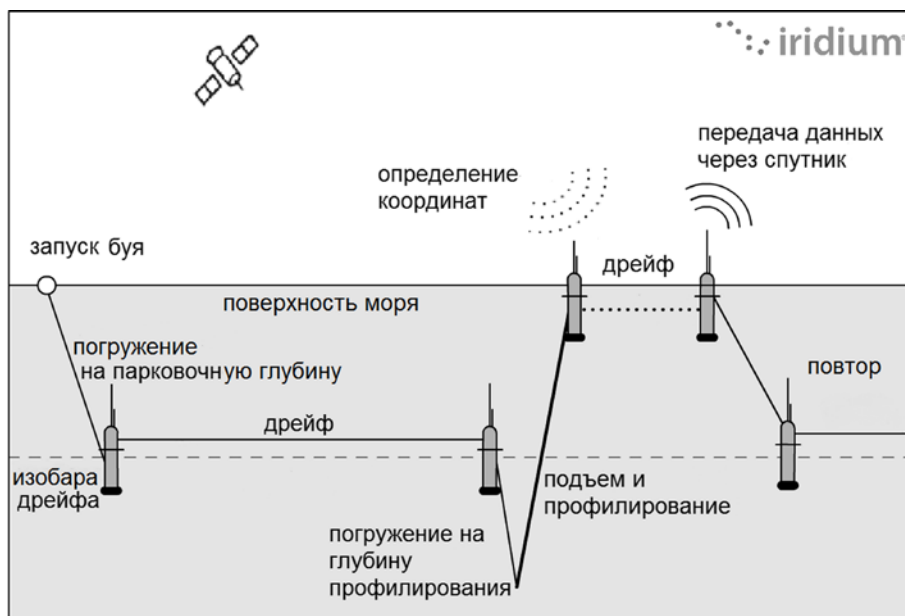


Рис. 1. Пример рабочего цикла буя-профиломера *Argo*

Буи *Argo* не измеряют течения напрямую, но они свободно дрейфуют на разных (парковочных) горизонтах, и по данным об их перемещениях можно рассчитывать средние скорости течений в глубоких слоях моря [19]. Нами был рассмотрен доступный архив данных измерений всплывающих дрейфтеров *Argo* в Черном море за последние 10 лет с 2005 г. по апрель 2015 г. [20, 21] с перспективой последующего усвоения этих данных в численных моделях. Успешный опыт ассимиляции в модели сведений о глубоководных течениях, восстановленных по траекториям профиломеров *Argo*, в мире уже существует. Так, в статье [22] показано, что перенос буев течениями в промежуточном слое в основном следует расположению изобат; приводятся средние значения скоростей порядка 5 см/с. Также указывается на относительно активную циркуляцию вод на горизонтах, соответствующих 500 – 1000 дбар (1 дбар соответствует примерно 1 м глубины).

В представленной статье, основываясь исключительно на данных о траекториях и максимумах глубин профилирования дрейфтеров *Argo*, мы приводим сведения о вычисленных лагранжевых скоростях течений в субпикноклинном слое Черного моря на горизонтах 350 – 1600 м. В качестве верхней границы выборки взята парковочная глубина буев 450 м, наиболее близкая (снизу) к расположению нижней границы главного пикноклина, а нижняя граница

выборки обусловлена предельной глубиной дрейфа профиломеров с учетом возможных отклонений. В исходную выборку, таким образом, не были включены данные измерений дрейфтеров с парковочной глубиной 200 м, переносимых более быстрыми [1 – 8] течениями в главном пикноклине. Поскольку буи зачастую дрейфовали выше своих парковочных глубин, это позволило поднять верхнюю границу рассматриваемого слоя до 350 м.

Работы подобного плана немногочисленны. Кроме упомянутых уже статей [8, 9], можно выделить исследование [23], основанное на анализе данных семи профиломеров, работавших в 2002 – 2009 гг. В нем получено, что за все время измерений средние скорости движения буев с парковочными глубинами 750 – 1550 м составляют 2,2 – 2,7 см/с, а на парковочном горизонте 500 м – 4 см/с. Подробно описаны перемещения дрейфтеров согласно их координатам на поверхности, однако не была выполнена верификация достижения буями собственно парковочных глубин. Поэтому неясно, можно ли описанную динамику отнести к горизонтам дрейфа или ее структурные элементы располагаются в разных слоях по вертикали. Эту особенность рабочего цикла буев *Argo* мы учли в нашей работе.

Исходные данные и методика обработки. Из баз данных дрейфтеров *Argo* [20, 21], находящихся в свободном доступе, нами были получены архивы по 16 буям, производившим измерения в субпикноклиновых водах Черного моря в 2005 г. – начале 2015 г. (табл. 1). На начало апреля 2015 г. такие буи выполнили суммарно более 2000 станций. В это время в Черном море дрейфовали еще 11 профиломеров, но в представленном исследовании они не учитывались, поскольку их парковочная глубина составляла всего 200 м. Данные исходных архивов были подвергнуты фильтрации: по каждому из 2057 профилей анализировалась информация об адекватности траекторий буев (т. е. об их расположении в границах Черного моря и реалистичном изменении их координат со временем), а также о достижении буюм при его погружении глубины более 300 м. По аналогии с более ранними работами [8, 23] скорость движения дрейфтера на соответствующей глубине вычислялась как отношение пройденного пути ко времени между всплытиями бую на поверхность. Использовались данные по каждому отдельно выполненному профилю. Было важно, чтобы номера выполненных дрейфтером станций располагались в архиве без пропусков: выпадение хотя бы одной (промежуточной) станции из цепочки измерений ведет к увеличению времени осреднения и понижению точности определения искомого вектора скорости, в первую очередь из-за нелинейности траектории бую. Преобладающая величина периода между профилированиями для рассмотренных буев составила 120 ч, средняя продолжительность дрейфа на поверхности – около 10 ч, 10 из 16 профиломеров позиционировались на поверхности спутниковой системой *Argos*, 6 – системой *Iridium (GPS)*. В работе [24] обсуждаются ошибки, вносимые в результат расчета скоростей за счет различных методов позиционирования буев и коммуникации со спутником, и пути их устранения.

Выбор парковочных горизонтов и программирование рабочего цикла бую осуществляются не его производителями, а самими исследователями, развертывающими буй в океане, и определяется целями, которые они перед собой ставят. Чаще всего дрейфтеры размещают на горизонтах более 500 м, чтобы в

результате подводного дрейфа они не слишком быстро удалялись от района запуска и расстояние между полученными профилями было небольшим. В некоторых случаях, напротив, необходимо, чтобы за время жизни буй прошел максимальный путь, покрывая измерениями как можно больший район моря, для чего его размещают на меньшей глубине, но это увеличивает риск выброса буя на мелководье.

Т а б л и ц а 1

Количество выполненных буями *Argo* профилей в Черном море за 2005 – 2015 гг. и рассчитанных векторов скоростей течений

Номер буя	Рассматриваемый период работы	Система позиционирования	Паспортные характеристики: парковочная глубина / максимальная глубина профилирования, дбар	Общее количество рассмотренных профилей	Количество рассчитанных векторов скорости (во всех слоях)
7900465	19.06.09-20.03.12	<i>Iridium</i>	450/500	134	131
7900466	19.06.09-10.12.12	<i>Iridium</i>	450/500	187	163
6901899	15.05.14-23.11.14	<i>Iridium</i>	500/1000	39	35
6900803	01.04.11-14.07.13	<i>Argos</i>	750/1500	142	68
6900804	01.04.11-14.07.13	<i>Argos</i>	750/1500	166	81
6900805	31.03.11-21.03.15	<i>Argos</i>	750/1500	286	155
6901895	15.08.13-16.03.15	<i>Argos</i>	750/750	117	114
7900590	11.09.13-22.03.15	<i>Argos</i>	750/2000	113	69
7900593	12.07.17-28.04.15	<i>Iridium</i>	750/2000	60	56
7900591	29.12.13-29.04.15	<i>Iridium</i>	1000/1000	88	84
7900592	28.12.13-28.10.14	<i>Iridium</i>	1000/1000	82	55
5902291	30.04.10-16.06.10	<i>Argos</i>	1300/1300	24	6
4900489	27.03.05-17.08.08	<i>Argos</i>	1500/1550	155	121
4900540	27.03.05-15.10.08	<i>Argos</i>	1500/1550	173	161
4900541	14.08.06-14.03.09	<i>Argos</i>	1500/1550	124	122
4900542	07.08.06-05.01.10	<i>Argos</i>	1500/1550	161	137

Как правило, частью задаваемой дрейферу программы является его погружение с парковочной на максимальную глубину профилирования перед всплытием на поверхность. Это делается с целью зафиксировать на пути буя к поверхности как можно более протяженный профиль измерений. В ходе анализа данных было установлено, что глубины, на которых дрейфовали отдельные профилемеры в Черном море, часто отличались от паспортных парковочных (были меньше). Это определялось по достигнутым бую максимальным глубинам при профилировании на двух последовательных станци-

ях. Заданный в паспорте профилимера горизонт дрейфа считался достигнутым, если максимальные глубины погружения были больше или равны парковочной. Если же максимальная глубина в профиле была меньше парковочной, то буй по каким-то причинам не достигал парковочного горизонта, в этом случае его дрейф под пикноклином также мог дать информацию о скорости течения, но на соответствующих глубинах. Поэтому было принято решение «привязывать» данные измерений не только к парковочным глубинам, но и к некоторым их окрестностям (слоям). Если максимальные глубины предыдущего и последующего профилей измерений были меньше парковочной, но оба значения находились в одном слое, вычисляемый вектор скорости полагался корректным и принимался к рассмотрению для данного слоя. Слои выбирались с учетом преобладающих значений парковочных глубин: 350 – 600 м (парковочные глубины 450 и 500 м), 600 – 800 м (750 м), 800 – 1200 м (1000 м), 1200 – 1600 м (1300 и 1500 м).

Результаты. Было получено четыре массива векторов скорости течений, соответствующих каждому из выбранных слоев. Построенных векторов оказалось всего 1558, еще 25% исходных данных не удовлетворили определенным выше критериям. Если провести процедуру осреднения по всем рассчитанным векторам, то с 95%-ной вероятностью средние скорости течений составят: $3,0 \pm 0,3$ см/с – в слое 350 – 600 м, $3,7 \pm 0,2$ см/с – в слое 600 – 800 м, $5,1 \pm 0,6$ см/с – в слое 800 – 1200 м и $3,2 \pm 0,2$ см/с – в слое 1200 – 1600 м. Однако построенные массивы содержали векторы скорости с малыми модулями (менее 1 см/с), погрешность вычисления которых сравнима с величиной самого вектора. Поэтому для увеличения точности оценки было принято решение об исключении таких векторов из рассмотрения и о пересчете средних скоростей течений. Количество таких малых векторов составило 193 (12% всех построенных), медиана их модулей равна 0,8 см/с, они разнонаправлены и в основном сосредоточены в западной части моря. Малые значения скорости могли быть получены, например, вследствие попадания буя в вихревую структуру, когда за период между всплытиями координаты буя менялись незначительно. Природа таких векторов требует дополнительного анализа и уточнения. Таким образом, далее будем рассматривать 88% всех вычисленных векторов и 66% всех измеренных буями профилей.

На рис. 2 приведены карты векторов скорости для слоев 350 – 800 м (рис. 2, а) и 800 – 1600 м (рис. 2, б). Наибольшее количество восстановленных векторов приходится на западную и юго-западную части моря. В общей циркуляции преобладает циклоническая направленность, в северной половине моря течения направлены главным образом на запад, а в южной – на восток. Прослеживается попадание буев в отдельные вихри, причем в вихри преимущественно синоптического масштаба – в центральной и западной частях моря, а в мезомасштабные – в юго-восточной области. Средняя скорость течения в слоях 350 – 600 м и 600 – 800 м примерно одинакова и составила ~ 4 см/с, в слое 800 – 1200 м – около 6 см/с, в слое 1200 – 1600 м – примерно 3,5 см/с (табл. 2). Годовой ход средних модулей векторов скоростей течений приведен на рис. 3. Установлено, что средние скорости течений по всей выборке в январе – марте выше на 10 – 20%, а самые низкие значения отмечаются в июне – октябре.

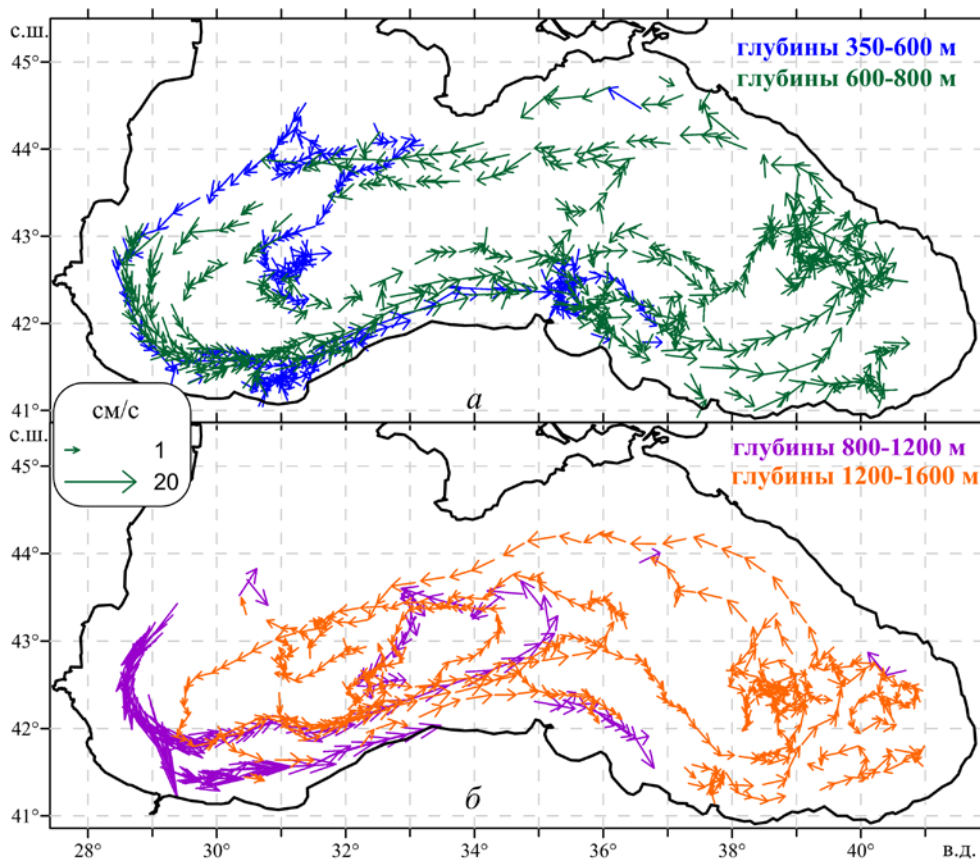


Рис. 2. Векторы скоростей течений: *a* – в слое 350 – 800 м (парковочные горизонты 450, 500, 750 м); *б* – в слое 800 – 1600 м (парковочные горизонты 1000, 1300, 1500 м)

Т а б л и ц а 2

**Количество полученных векторов скоростей течений
и значения средней скорости по слоям**

Слой, м	Количество векторов	Средняя скорость, см/с	95%-ный доверительный интервал, см/с
350 – 600	269	3,6	± 0,4
600 – 800	496	4,0	± 0,2
800 – 1200	132	5,7	± 0,6
1200 – 1600	474	3,5	± 0,2

Для дальнейшего анализа направлений течений было проведено разделение координат всех векторов по 43° с. ш. на «северную» и «южную» области моря. Построены 8 диаграмм распределения направлений векторов скоростей по слоям отдельно для каждой области. Они показали устойчивость направления переноса с запада на восток в «южной» части моря и с востока на за-

пад – в «северной». В статье [25] показано, что при полученных скоростях выше 3 см/с направления глубинных течений устойчивы, как правило, совпадают с направлением изобат и не требуют коррекции; при скоростях менее 3 см/с направления течений, напротив, существенно неустойчивы и должны быть дополнительно скорректированы. Наиболее часто повторяющиеся направления векторов скоростей течений варьируют в пределах 3 – 4 румбов (30 – 40°). Наиболее часто повторяющаяся амплитуда скорости составляет 4 – 8 см/с, возрастая до 16 см/с лишь на горизонте 1000 м. Это, возможно, связано с тем, что горизонт 1000 м оказался меньше всего обеспечен измерениями (см. табл. 2), и, кроме того, в них преобладали данные, полученные в зимний сезон с января по март. Гистограммы распределения данных по месяцам показали, что остальные рассматриваемые слои были обеспечены измерениями в течение года более равномерно.

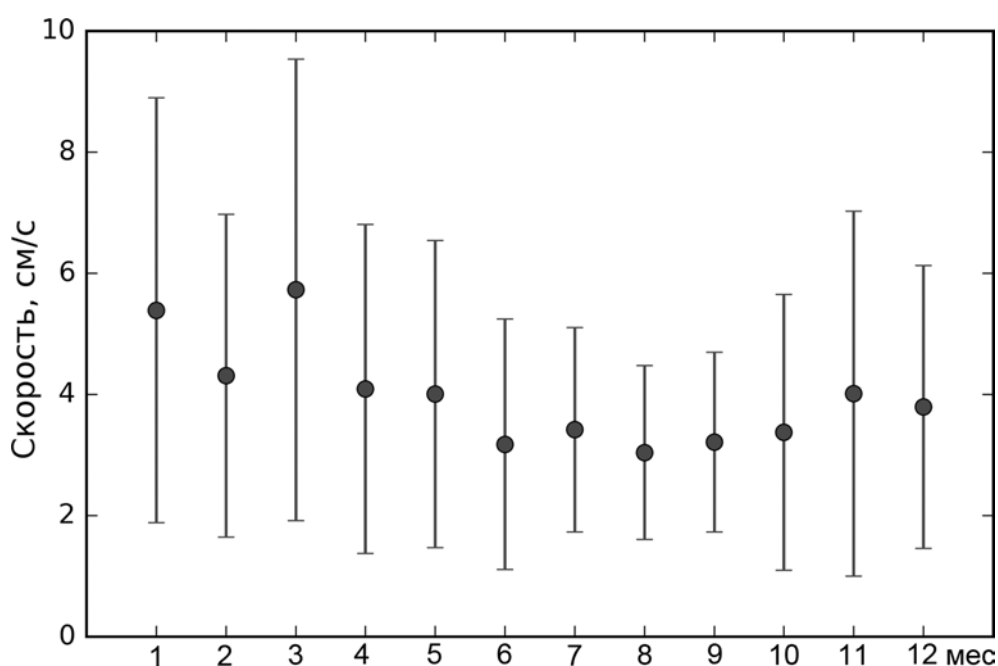


Рис. 3. Среднемесячные величины (обозначены точками) всех построенных векторов скоростей течений (вертикальные отрезки показывают величину среднеквадратического отклонения)

Для сравнения с более ранними работами [8, 23] по аналогии были построены карты траекторий буев (рис. 4) по данным о координатах выполненных станций. Полученные траектории являются некоторыми проекциями на поверхность моря трехмерного подводного дрейфа профиломеров и могут обозначить области с особенностями циркуляции, например участки с устойчивым течением и зоны вихревых образований. Направление перемещения дрейфтеров соответствует векторному полю, представленному на рис. 2. При сравнении рис. 4 (траектории буев) и рис. 2 (векторы скорости) можно не только отметить отдельные динамические особенности, но и оценить, на ка-

ких горизонтах они находятся. Так, например, в восточной части Анатолийского побережья траектории профиломеров довольно извилисты (рис. 4, *a, б*) и могут соответствовать попаданию буев в цепочку прибрежных вихрей и/или преодолению буюм орографических особенностей дна. По нашей методике векторы скоростей ни на одном из соответствующих горизонтов (рис. 2, *a, б*) в этой зоне не определились (и в осреднении соответственно не участвовали). Согласно выстроенному нами алгоритму, этому может быть две причины. Либо буи между станциями резко меняли глубину дрейфа, и потому их данные не были учтены ни в одном из слоев. Либо, что более вероятно, дрейфтеры в данном районе перемещались на более высоких горизонтах, и, следовательно, их скорости были исключены из расчетов для субпикноклина. В предыдущих исследованиях эти скорости были отнесены к расчетным горизонтам и внесли, таким образом, погрешность в приведенную оценку.

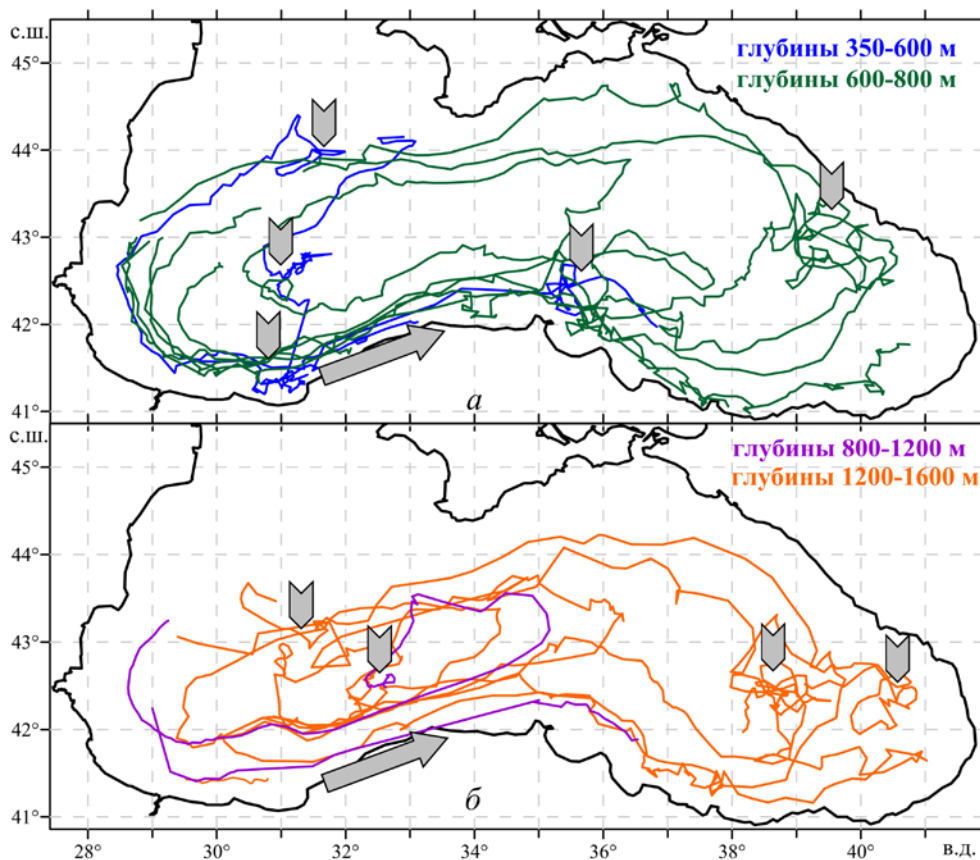


Рис. 4. Траектории буев: *a* – в слое 350 – 800 м, парковочные горизонты 450, 500, 750 м; *б* – в слое 800 – 1600 м, парковочные горизонты 1000, 1300, 1500 м (стрелками обозначена зона устойчивых глубоководных течений, маркерами – мезомасштабные вихри)

На рис. 4, *a, б* можно выделить такие особенности глубинной циркуляции. Вдоль материкового склона по периферии бассейна проходит циклоническое течение. Четко определяется зона западного циклонического кругово-

рота. Стрелками на рисунке обозначена зона устойчивых глубоководных течений в западной части анатолийского континентального склона от пролива Босфор на восток. Все буи, попадавшие в это течение, имели согласованные траектории и векторы скорости. Возмущение в поле плотности в этой области вносится только стоком р. Сакарья, что приводит к формированию мезомасштабного вихря в районе ее устья на горизонтах 350 – 600 м. Мезомасштабные вихри (обозначены на рисунке маркерами) проявляются также в районе устья р. Кызыл-Ирмак (в слое 350 – 800 м) в восточной части Анатолийского побережья. Во всех рассмотренных слоях обнаруживаются вихри, соответствующие Севастопольскому антициклону, мезомасштабному циклону в центре западной части бассейна и Батумскому антициклону в юго-восточной части моря. Вертикальная ось Батумского антициклона, по-видимому, может быть наклонена, а его структура – содержать несколько вихревых образований. Указанные особенности отмечаются и в векторном поле скоростей (рис. 2).

Обсуждение. Методологически нашу работу для Черного моря уместно сравнивать лишь с исследованиями в [8, 23]. В них так же, как и в данной работе, вычисления скоростей течений носят оценочный характер, поскольку в рассмотрение не принимались многие источники и причины погрешностей. Ниже мы перечислим такие источники и приведем возможные пути коррекции результатов для случая, когда отсутствуют прямые данные о периоде подводного дрейфа буя.

Определение точных координат буя, не оснащенного GPS-датчиком. Большинство профиломеров из нашей 10-летней выборки не были оснащены датчиками для GPS-позиционирования, их координаты определялись через спутник системы Argos. В некоторых работах указывается, что до 10% от общего количества станций, выполненных бум, могут иметь погрешности в координатах [26]. За время определения координат буй может быть снесен поверхностными течениями. В этом случае можно использовать результаты численного реанализа в совокупности с моделью лагранжева переноса для определения максимально правдоподобных траекторий как на глубине, так и на поверхности. При накоплении достаточного статистического материала по траекториям дрейфтеров, оснащенных GPS-датчиками, значимость результатов, полученных ранее с бум с использованием спутниковой системы Argos, будет уменьшаться. Данные о GPS-позиционировании профиломера на поверхности, т. е. о времени и точных координатах его погружения и всплытия, позволят также уточнить дистанцию, пройденную бум непосредственно под водой.

Вклад вертикального сдвига скорости при всплытии буя может оказаться существенным и составить до 20% от рассчитанной величины скорости, учитывая значительную разницу скоростей течений на поверхности моря и на парковочном горизонте, и даже оказаться решающим в случае слабого глубинного противотечения. Впрочем, данные инструментальных измерений в большинстве не подтверждают наличие устойчивой антициклонической циркуляции на глубинах более 300 м [7].

Информация о пути, в действительности пройденном дрейфтером на глубине, при необходимости может быть откорректирована (с учетом глубины профилирования и средней скорости подъема ~10 см/с) для каждого профиля

с использованием результатов численного моделирования и/или по данным о климатических течениях в конкретном районе моря.

Парусность и стоксов дрейф также могут вносить определенный вклад в смещение буя на поверхности за время его коммуникации со спутником. О характеристиках парусности профиломеров *Argo* известно мало, но в случае, когда над поверхностью выступает лишь небольшая антенна, этим фактором можно пренебречь. Стоксов дрейф существенно зависит от сезона и географических координат. Наиболее простой способ коррекции координат дрейфтера в таком случае – анализ синоптических карт и карт ветрового волнения в точке нахождения буя.

Инертность буя при изменении направления и скорости течения. Хотя при свободном дрейфе буй имеет нейтральную плавучесть и может рассматриваться как пассивный трассер, он также имеет инерциальную массу в 20 – 35 кг. При достаточно резком изменении в окружающем течении (например, при мезомасштабной турбулентности) дрейфтер меняет свой импульс не моментально, набирая и снижая его за некоторое время. Возможно, именно инерционным «вылетом» с траектории объясняются некоторые выходы буя из циркуляции по круговой орбите в мезомасштабных антициклонических вихрях.

Несмотря на возможные погрешности вычислений, в нашей работе для нахождения скоростей течений впервые рассмотрен массив данных глубоководных измерений буями *Argo* в Черном море за столь длительный период. Этих данных было недостаточно для разделения их по сезонам и исследования внутригодовой изменчивости, однако оказалось возможным скомпоновать их по слоям, включающим основные парковочные глубины, и показать некоторую среднюю скорость и направление переноса в субпикноклинном слое. Мы проследили траектории отдельных дрейфтеров на поверхности моря по координатам их обнаружения со спутника и описали в первом приближении их перемещения на глубине. Количество выполненных к данному моменту профилей не дает однозначной полной картины глубоководной циркуляции, однако построенные траектории позволяют говорить об общециклоническом направлении переноса и наличии вихревых структур разного знака.

Выводы. Таким образом, из исходного массива данных по траекториям всплывающих буйев и максимальной глубине профилирования с учетом введенных предположений удалось получить следующее.

1. Вычислены векторы и построены карты лагранжевых скоростей течений в четырех слоях, соответствующих значениям парковочных горизонтов буйев-профиломеров *Argo*. Средние скорости течений на горизонтах ниже основного пикноклина составляют ~ 4 см/с, усиливаясь в слое 800 – 1200 м до 6 см/с. Наибольшие средние скорости течений по всей выборке отмечаются в январе – марте, а самые низкие значения наблюдаются в июне – октябре. Направление движения дрейфтеров в общем соответствует циклоническому характеру циркуляции.

2. По картам траекторий и векторов скоростей течений можно отследить наличие ряда синоптических (диаметром примерно 100 – 105 км) и мезомасштабных (диаметром около 50 км) вихрей разного знака, в которые вовлекаются буи в рассмотренных слоях. Некоторые из таких вихрей могут быть ас-

социированы с известными особенностями поверхностной циркуляции (Батумский антициклон, восточный и западный циклонические круговороты, Севастопольский антициклон, Кызыл-ирмакский вихрь и т. п.) или особенностями рельефа дна. В отличие от работ [8, 9, 23] мы получили статистическую информацию не только о модулях векторов скорости, но и об их направлениях. Показано, что наибольшая устойчивость течений получена над свалом глубин, а в глубоководной части и в районах со сложной орографией чаще всего встречаются вихревые структуры.

3. Примерно 88% абсолютных величин вычисленных скоростей течений находятся в диапазоне 1 – 20 см/с. Остальные векторы имели модули менее 1 см/с. Такие скорости, скорее всего, отражают движение буев в субмезомасштабных вихрях, петлях и других подобных циклических структурах с периодом, примерно равным периоду подводного дрейфа буя (преобладающее значение около 5 сут), и радиусом порядка бароклинного радиуса деформации Россби (для Черного моря 15 – 20 км). Полученные максимальные значения модуля скорости (~20 см/с) выше, чем в предыдущих работах и в известных нам модельных оценках, что несколько меняет представление об интенсивности циркуляции субпикноклинного слоя Черного моря.

Авторы благодарят И.П. Чубаренко, С.П. Любарцеву и В.Н. Белокопытова за участие в обсуждении результатов работы и ценные замечания по структуре статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-05-00264 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования в Черном море // Тр. Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. – М.: ВНИИ мор. рыбного хоз-ва, 1932. – Вып. 10. – 272 с.
2. *Caspers H.* Black Sea and Sea of Azov // Treatise on Marine Ecology and Paleocology / Ed. J.W. Hedgpeth // Geolog. Soc. Amer. Memories. – 1957. – 67, № 1. – P. 803 – 890.
3. *Филиппов Д.М.* Циркуляция и структура вод Черного моря. – М.: Наука, 1968. – 319 с.
4. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 238 с.
5. *Марчук Г.И., Кордзадзе А.А., Скиба Ю.Н.* Расчет основных гидрологических полей Черного моря на основе метода расщепления // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1975. – 11, № 4. – С. 379 – 393.
6. *Кордзадзе А.А.* Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты). – М.: ОВМ АН СССР, 1989. – 218 с.
7. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 212 с.
8. *Korotaev G., Oguz T., Riser S.* Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // Deep-Sea Res. II: Topical Studies in Oceanography. – 2006. – 53, № 17 – 19. – P. 1901 – 1910.

9. *Oguz T., Latun V.S., Latif M.A. et al.* Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1993. – 40, № 8. – P. 1597 – 1612.
10. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.
11. *Stanev E.V.* Numerical modelling of the circulation and the hydrogen sulphide and oxygen distribution in the Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1989. – 36, № 7. – P. 1053 – 1065.
12. *Кубряков А.И.* Моделирование циркуляции и процессов массопереноса в Черном море в приложении к задачам оперативной океанографии // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2014. – 399 с.
13. *Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
14. *Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V. et al.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* – 2010. – 25, № 6. – P. 581 – 609.
15. *Мизюк А.И., Сендеров М.В., Коротаев Г.К., Саркисян А.С.* Особенности горизонтальной изменчивости температуры поверхности в западной части Черного моря по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2016. – 52, № 5. – С. 11 – 21.
16. *Ибраев Р.А., Ушаков К.В., Хабеев Р.Н.* Вихреразрешающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана // Там же. – 2012. – 48, № 1. – С. 45 – 55.
17. *Riser S.C., Freeland H.J., Roemmich D. et al.* Fifteen years of ocean observations with the global *ARGO* array // *Nat. Clim. Change.* – 2016. – 6, № 2. – P. 145 – 153.
18. *Grayek S., Stanev E.V.* Assessment of the Black Sea observing system. A focus on 2005 – 2012 *ARGO* campaigns // *Ocean Dyn.* – 2015. – 65, Issue 12. – P. 1665 – 1684.
19. *Rosell-Fieschi M.* Ocean Velocities as Inferred from *ARGO* Floats: Methodology and Applications // PhD Thesis. – Institut de Ciències del Mar, CSIC. – 2014. – June 24. – 121 p.
20. *ARGO Data Management* <http://www.ARGODatamgt.org/> (дата обращения 29.05.2015 г.).
21. *Global Ocean Data Assimilation Experiment / USGODAE, ARGO Page.* – <http://www.usgodae.org/ARGO/ARGO.html> (дата обращения 23.06.2015 г.).
22. *Nilsson J.A.U., Dobricic S., Pinardi N., Poulain P.-M. et al.* Variational assimilation of Lagrangian trajectories in the Mediterranean ocean Forecasting System // *Ocean Sci.* – 2012. – 8. – P. 249 – 259. – doi:10.5194/os-8-249-2012.
23. *Герасимова С.В., Лемешко Е.Е.* Оценка скоростей глубоководных течений по данным *ARGO* // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 15. – С. 187 – 196.
24. *Lebedev K.V., Yoshinari H., Maximenko N.A. et al.* YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of *ARGO* floats at parking level and at the sea surface // *Hacker IPRC Technical Note.* – 2007. – № 4 (2), June 12. – 16 p.
25. *Park J.J., Kim K.* Deep currents obtained from *ARGO* float trajectories in the Japan/East Sea // *Deep-Sea Res. II: Topical Studies in Oceanography.* – 2013. – 85, January 2013. – P. 169 – 181. – doi:10.1016/j.dsr2.2012.07.032.
26. *Kobayashi T., Nakamura T., Ogita N. et al.* Quality control of Argo surface trajectory data considering position errors fixed by Argos system // *Proc. of the OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference (Annex).* Venice, Italy, 21 – 25 September 2009 / Eds. J. Hall, D.E. Harrison and D. Stammer. – ESA Publication WPP-306. – doi:10.5270/OceanObs09.

Velocities of the Black Sea deep currents estimated from the profiling drifters *Argo* data

N.V. Markova, A.V. Bagaev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: n.v.markova@mail.ru*

The Lagrangian velocity vectors of the Black Sea currents on the depths below the main pycnocline are calculated using the data on the trajectories and actual profile depths of the *Argo* profiling drifters in 2005-2015. The values and directions of the calculated vectors in the layers 350 – 600, 600 – 800, 800 – 1200 and 1200 – 1600 m are analyzed. The obtained results are statistically evaluated. It is shown that the prevailing number (88%) of the modules of the calculated current velocity vectors is within the range 1 – 20 cm/s. The currents' velocity average for the whole period of measurements, is about 4 cm/s in the layers 350 – 600 and 600 – 800 m, approximately 6 cm/s in the 800 – 1200 m layer and 3.5 cm/s in the 1200 – 1600 m layer. The mean current velocities from the whole data access are higher in January – March, whereas the lowest ones fall on June – October. On the background of general cyclonic circulation the meso-scale eddy structures on the specified depths are revealed.

Keywords: Black Sea, deep-water circulation, current velocity, drifter *Argo*.