

УДК 551.46.08

© **В. А. Иванов**, Т. В. Пластун, Н. В. Маркова, А. В. БагаевФГБУН «ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь  
a.bagaev1984@gmail.com**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Статья поступила в редакцию 26.06.2018, после доработки 21.01.2019

В рамках исследования структуры циркуляции Черного моря на глубинах ниже главного пикноклина представлены данные о преобладающих направлениях, изменчивости и скорости течений. Данные о вертикальных профилях течений были получены контактными методами в ходе экспедиционных работ Морского гидрофизического института. Для исследования глубинных течений были выбраны 25 станций, которые содержали измерения на горизонте 500 м и более. Приводятся характеристики приборов и географическое расположение станций. Периоды зондирования на станциях варьировали в пределах от нескольких часов до двух месяцев. Обеспеченность данными как по времени, так и по пространству существенно неравномерна, однако в работе впервые описан и проанализирован полный массив измерений глубоководных течений начиная с 1960 года.

После оценки качества данных и приведения к горизонтам 500, 750 и 1000 м сформирована таблица, демонстрирующая обеспеченность, повторяемость направления и средние оценки скоростей течений.

Анализ вертикальных профилей показал, что векторы скорости течений на некоторых станциях в приповерхностном и глубинных слоях имеют близкие направления. Однако на большинстве из рассмотренных профилей направления скорости на разных горизонтах существенно отличаются. Для каждой станции и каждого горизонта были построены и проанализированы диаграммы направлений и модуля скорости течений, они использованы для иллюстрации случаев разворота течений на разных горизонтах. Абсолютная величина вектора скорости на горизонтах глубже 500 м может превышать значение в вышележащих слоях.

**Ключевые слова:** Черное море, глубинные течения, вертикальная структура, циркуляция, измерения, база данных.

**В. А. Иванов**, Т. В. Пластун, Н. В. Маркова, А. В. Багаев

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**STATISTICAL PARAMETERS OF THE BLACK SEA DEEP CURRENTS BASED ON MEASUREMENT DATA**

Received 26.06.2018, in final form 21.01.2019

The study is aimed to present data on prevailing directions, variability and magnitude of currents within the investigation of the Black Sea circulation at the depth below Statistical pycnocline. Vertical profiles of the velocity were obtained from the *in-situ* measurements during expeditions of the Marine Hydrophysical Institute. Among these data, 25 locations were selected where measurements are available from 500 m deep and below. The measurement equipment and geographical locations of the stations are provided. Periods of surveys took from hours to 2 months. Data availability both in time and space was sufficiently uneven, however present study for the first time renders full measurements array since 1960-s.

After data quality assessment and projection to 500, 750 and 1000 m horizons, a table was built, which demonstrates the data coverage, direction frequency along with the average current speed.

The analysis of vertical profiles demonstrated that current velocity vectors at some stations in the near-surface and deep layers have similar directions. However the majority of the examined profiles show velocity directions that differ significantly between the horizons. For each stations and horizons directional rose-charts for velocities and absolute values were plotted. Those were used for illustration of the cases of current velocity switch between different layers. The absolute value of a velocity vector deeper than 500 m might be greater than the value in the upper layers.

**Key words:** The Black Sea, deep-sea currents, vertical structure, database.

Ссылка для цитирования: *Иванов В.А., Пластун Т.В., Маркова Н.В., Багаев А.В.* Статистические характеристики глубинных течений в Черном море по данным инструментальных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 49–58.

For citation: *Ivanov V.A., Plastun T.V., Markova N.V., Bagaev A.V.* Statistical parameters of the Black Sea deep currents based on measurement data. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 49–58.

DOI: 10.7868/S2073667319040063

## 1. Введение

Большая часть работ по исследованию и мониторингу гидрофизических полей Черного моря посвящена изучению преимущественно поверхностного слоя. Роль глубоководной циркуляции в общей динамике моря не менее значима. Суммарный объем промежуточной и глубинной водных масс Черного моря составляет более 90% [1]. Однако динамика нижних слоев остается недостаточно освещенной и по настоящее время, в первую очередь в силу затратности проведения глубоководных натурных измерений, которые необходимы не только для непосредственного анализа полученных данных, но и для верификации результатов исследований другими методами [2–5]. К началу 1990-х гг. обобщенные представления о скорости глубинных течений были изложены в работе [6], где показано, что среднемесячные модули скорости в четырех зонах Черного моря имеют значения 5–6 см/с – на глубине 500 м и 1–2 см/с – на глубине 1000 м, а направления течений на больших глубинах в большинстве случаев совпадают с поверхностными или отличаются от них незначительно.

В 1990–2000 гг. было подтверждено, что глубинные течения, считавшиеся до некоторого времени практически отсутствовавшими, все же имеют средние скорости порядка 2–5 см/с и заметную изменчивость. Такие выводы основывались, в первую очередь, на расчетах течений динамическим методом с использованием новых измерений температуры и солёности, и подкреплялись отдельными прямыми измерениями скорости. Глубоководные измерения проводились преимущественно во время экспедиций на научно-исследовательских судах (НИС), а также автономными буйковыми станциями. Обработкой этих данных ученые активно занимались в последующие несколько лет. Несмотря на это, работ по анализу прямых измерений глубинных течений Черного моря немного, и они не носят обобщающего характера. Например, в [7] по данным 106 автономных буйковых станций, среди которых были и глубоководные, установлено, что значения осредненных скоростей по всей акватории на горизонте 500 м составили 3.36 см/с, на горизонте 750 м – 3.29 см/с, на 1000 м – 3.75 см/с, при этом модули мгновенной скорости на некоторых глубоководных станциях достигали 10–11 см/с. В работе [8] на основании обработки результатов измерения температуры и солёности в 1990–1991 гг. было показано, что под глубокими антициклоническими вихрями возможно существование ячеек обратной циркуляции, а прямые измерения скорости течений служили подтверждением этой теории. В исследовании [9] на основе данных экспедиций COMSBLACK в 1992 и 1993 гг. преимущественно в северо-западной части моря (шельф, свал глубин, глубоководная зона) авторы показали слоистость поля течений по вертикали в период наблюдений.

В то время как во второй половине XX в. сбором данных, в том числе и о глубинных течениях, в ходе судовых экспедиций по Черному морю занимались сразу несколько исследовательских центров, сейчас количество производимых экспедиционных работ по исследованию глубоководной циркуляции крайне мало. К сожалению, многие ранее полученные данные впоследствии не оцифровывались и затем были безвозвратно утрачены или доступ к ним ограничен.

Собранный за много лет в Банке океанографических данных Морского гидрофизического института (БОД МГИ) экспедиционный материал является одним из уникальных массивов. Он содержит 1033 станции измерений скорости течений. Из него нами были выбраны данные по скоростям глубинных течений, количество которых составляет более 40 тыс. мгновенных измерений на 25 станциях. Для комплексного изучения многолетних прямых измерений глубинных течений эти данные ранее не использовались. Кроме того, архивная информация БОД МГИ была дополнена новыми данными измерений, выполненными при помощи современных зондов *ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)*.

Анализ экспедиционных данных полезен для понимания фундаментальной физики процессов, происходящих ниже основного пикноклина Черного моря. Полученный массив может быть использован для верификации результатов численного моделирования (а такие работы по реконструкции циркуляции в глубинных слоях проводились, например, в [2–4]) и для сравнения с другими оценками субпикноклинной черноморской циркуляции [10, 5]). В нашей работе была выполнена оценка состояния архива измерений скорости и проведен предварительный анализ данных измерений глубинных течений БОД МГИ.

## 2. Исходные данные

Рассмотрен многолетний массив базы данных течений, входящий в БОД МГИ (<https://www.bod-mhi.ru/>). В нем содержатся данные измерений течений в 34 рейсах НИС «Академик Вернадский», в 39 рейсах НИС «Михаил Ломоносов», в 6 рейсах НИС «Трепанг», непрерывная съемка с интервалом 15 мин с платформы ЭОМГИ в течение 1980—1994 гг., данные, полученные в рейсах НИС «Устрица», «Рогбане» и «Профессор Колесников», а также данные об измерениях в Черном море, полученные доплеровскими измерителями автономных измерительных станций в 2004—2013 гг. и в 2016 г. Элементы массива состоят из двух компонентов: файла, содержащего метаданные, и файла данных течений. Файл метаданных аналогичен соответствующему файлу БОД и содержит следующие параметры: код записи, название НИС, номер рейса, год, месяц, дату, часы, минуты, координаты и глубину зондирования. Файл данных течений содержит информацию о направлении и скорости течения на указанном горизонте и температуре окружающей воды. Все параметры записей имеют фиксированные форматы, отсутствующие данные заменяются кодом (-88). Соответствие файла метаданных аналогичному файлу БОД и баз данных, входящих в Банк, позволяет устанавливать взаимосвязь между данными исследований в разных областях океанологии и получать комплексные пользовательские запросы любой степени сложности. Организация базы данных течений в виде стандартной таблицы с фиксированными форматами записей приводит к возможности использовать любую систему управления базами данных для получения пользовательских запросов. В настоящий момент времени база метаданных содержит около 3 млн записей, а база измерений течений — около 7 млн записей [11]. Число стандартных горизонтов измерений, конкретное расположение, количество станций, а также дискретность измерений определяются программой изысканий в зависимости от местных гидрологических условий и типа измерительных приборов. Сами стандартные горизонты унифицированы для возможности соотношения измерений, полученных в различные моменты исследований, а также для поддержания комплексного подхода при изучении различных параметров морской среды в одинаковых пространственных или временных интервалах.

## 3. Методика обработки данных

С целью исследования глубоководной циркуляции (под основным пикноклином) Черного моря произведена выборка из БОД МГИ измерений течений на горизонтах 500 м и ниже. Массив содержит ретроспективные данные о годе, месяце, широте, долготе, горизонте, скорости и направлении течений. Всего более 40 тыс. измерений на 25 станциях, выполненных в 1960 г. (с дискретностью 1 ч), 1975 г. (с дискретностью 15 мин), 1988 г. (с дискретностью 10 мин), 1991 и 1992 гг. (с дискретностью 10 мин) и 2016 г. (с дискретностью 3 ч). Кроме того, чтобы оценить, насколько соответствует субпикноклиновая циркуляция поверхностной, дополнительно был рассмотрен массив измерений на верхнем горизонте.

По результатам статистической обработки получен массив данных 25 глубоководных станций в акватории Черного моря, выборка включала стандартные горизонты измерений 5/10/15 м (глубина варьировала в зависимости от станции — «поверхностный» горизонт), 500, 750 и 1000 м (табл. 1). Таблица также содержит год и месяц измерений, номер рейса НИС (если измерения выполнялись с борта судна) и используемый тип прибора. Расположение станций отражено на рис. 1, измерения были выполнены преимущественно в центральной части моря к югу от Крымского п-ова. Наибольшее количество измерений (около 35 000) выполнено на горизонте 500 м, на горизонте 750 м суммарно немногим более 3000 измерений, а на горизонте 1000 м — около 5000.

Такая выборка из всего объема исходной информации была осуществлена на основе экспертной оценки и контроля качества данных, включая оценивание метаданных с учетом интервалов зондирования и моментов отказов приборов и оборудования и проверку данных о направлении и скорости течений на выбросы за пределы интервала измерений. К сожалению, не на всех станциях и из этого массива измерения были проведены на всех четырех указанных горизонтах. Также при обработке данных в некоторых случаях было невозможно выполнить их статистическую оценку в силу того, что значительное количество измеренных значений скорости оказались весьма малыми, ниже порога чувствительности прибора. Отбрасывать подобные измерения (их наличие отмечено в табл. 2) было бы некорректно, поскольку наличие очень слабых течений также является характеристикой циркуляционных процессов.

#### 4. Характеристика приборов для измерения течений

Поскольку измерения выполнялись в разное время и разными приборами, кратко приведем их основные параметры, включая погрешность изменений скорости течений.

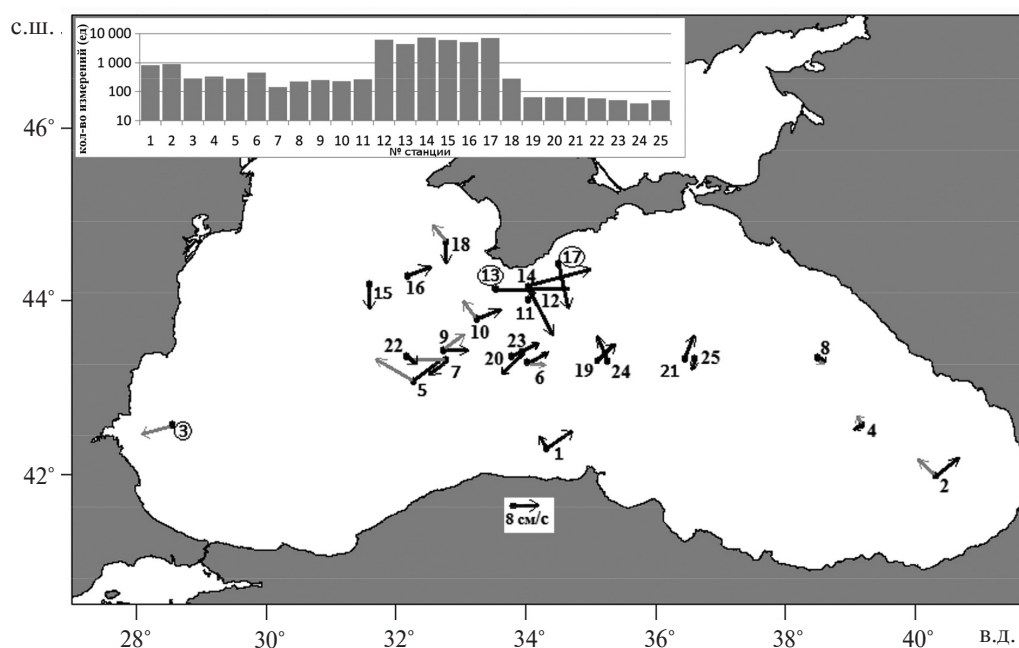
**БПВ – буквопечатающая вертушка (самописец).** Предназначена для автоматического вычисления и регистрации направления и скорости течения [12]. Диапазон измерения скорости 2–148 см/с. Погрешность измерений (1–2 см/с) наблюдается при совпадении полосы частот канала измерения с полосой частот флуктуаций вектора скорости. Средняя погрешность – 0.5 см/с.

**Долговременный измеритель течения и температуры МГИ 1301-ДИСК.** Разработка Морского гидрофизического института. Это цифровая многоканальная система с записью получаемой информации на магнитную ленту [12, 13]. Скорость течения измеряется в двух диапазонах: 2.5–175 см/с (чувствительность 0.7 см/с, время экспозиции 4 с) и 2.5–87 см/с (чувствительность 0.35 см/с, время экспозиции 8 с). Погрешность измерения направления составляет 5°, время осреднения направления 2–2.5 с.

**Акустический доплеровский измеритель течений (ADCP) WHM300.** Рабочая частота 300 кГц, производство TRDI. Диапазон измеряемых скоростей – до 2000 см/с, среднеквадратичное отклонение единичного измерения скорости 3 см/с. Погрешность измерения в результирующих осредненных профилях – в пределах 2 см/с [14].

#### 5. Анализ данных

Измерений течений на глубоководных станциях вблизи поверхности и на горизонтах 500, 750 и 1000 м показал вертикальную и горизонтальную неоднородность поля скорости. На каждой станции и на каждом из горизонтов рассчитывался третий квартиль модуля скорости, все значения выше него отбрасывались, что позволило отфильтровать наименее обеспеченные измерениями высокие значения («выбросы»). Поскольку природа временных рядов измерений скорости не позволяет предполагать нормального распределения, был выбран именно такой метод повышения достоверности средних оценок. Подобный подход применялся, например, в [15]. Для оценки параметров течений было



**Рис. 1.** Пространственное распределение станций измерений течений (черные точки). Черные стрелки – направление течений на горизонте 500 м, серые – на 1000 м. На гистограмме сверху – максимальное количество измерений на глубоководных горизонтах для каждой из станций. Кружками выделены станции, диаграммы для которых приведены на рис. 2.

**Fig. 1.** Geographical locations of the stations where the velocities were measured (black dots). Directions of current velocities at 500 m depth (black arrows) and 1000 m (grey arrows). At the diagram on top maximum number of measurements at the deep layers is shown for every station. Stations that are illustrated at fig. 2 are marked by circles.

Таблица 1

**Основные данные по станциям, отобранным для анализа измерений глубоководных течений**  
**Meta data for the stations selected for the analysis**

| № станции | Год  | Месяц | Рассматриваемые глубины измерений, м | Судно, № рейса | Вид прибора    |
|-----------|------|-------|--------------------------------------|----------------|----------------|
| 1         | 1975 | 8     | 15, 500,750,1000                     | —              | БПВ            |
| 2         | 1975 | 8     | 15, 500,750,1000                     | —              | БПВ            |
| 3         | 1975 | 8     | 15, 1000                             | —              | БПВ            |
| 4         | 1960 | 10    | 500,750,1000                         | МЛ, 49_1       | МГИ-1301, Диск |
| 5         | 1988 | 3     | 10, 500,1000                         | МЛ, 9          | БПВ            |
| 6         | 1988 | 10    | 500,1000                             | МЛ, 9          | БПВ            |
| 7         | 1988 | 3     | 10, 500,1000                         | МЛ, 9          | БПВ            |
| 8         | 1960 | 10    | 500,750,1000                         | МЛ, 49_1       | МГИ-1301, Диск |
| 9         | 1988 | 3     | 500,1000                             | МЛ, 9          | БПВ            |
| 10        | 1988 | 3     | 500,1000                             | МЛ, 9          | БПВ            |
| 11        | 1975 | 8     | 1000                                 | —              | БПВ            |
| 12        | 1991 | 9     | 10, 500                              | ТР, 3          | МГИ-1301, Диск |
| 13        | 1991 | 9     | 10, 500                              | ТР, 3          | МГИ-1301, Диск |
| 14        | 1991 | 9     | 10, 500                              | ТР, 2          | МГИ-1301, Диск |
| 15        | 1992 | 9     | 5, 500                               | ТР, 5          | МГИ-1301, Диск |
| 16        | 1992 | 9     | 5, 500                               | ТР, 5          | МГИ-1301, Диск |
| 17        | 1991 | 9     | 10, 500                              | ТР, 3          | МГИ-1301, Диск |
| 18        | 1988 | 3     | 10, 500, 1000                        | МЛ, 9          | БПВ            |
| 19        | 2016 | 10    | 500, 1000                            | ПВ, 89         | ADCP           |
| 20        | 2016 | 10    | 500, 1000                            | ПВ, 89         | ADCP           |
| 21        | 2016 | 10    | 500, 1000                            | ПВ, 89         | ADCP           |
| 22        | 2016 | 7     | 500,750                              | ПВ, 87         | ADCP           |
| 23        | 2016 | 7     | 500,750                              | ПВ, 87         | ADCP           |
| 24        | 2016 | 7     | 500,750                              | ПВ, 87         | ADCP           |
| 25        | 2016 | 7     | 500,750                              | ПВ, 87         | ADCP           |

*Примечание.* МЛ – НИС «Михаил Ломоносов», ТР – НИС «Трепанг», ПВ – НИС «Профессор Водяницкий».

проведено межгодовое осреднение натуральных данных. На каждой станции и на каждом из горизонтов рассчитывались медиана величины скорости и преобладающее направление течений. В табл. 2 приводятся расчеты для верхнего горизонта измерений (5/10/15 м) и горизонтов 500, 750 и 1000 м.

Из данной таблицы видно, что даже с учетом фильтрации 25% максимальных значений скорости (третий квартиль), абсолютные величины модуля скорости на поверхности моря достигают 63 см/с (станция №3), на глубине 500 м – 45 см/с (станция №13), на 750 м – 13 см/с (станция №21), на 1000 м – 15 см/с (станция №5). Медианные значения находились в следующих диапазонах: у поверхности – 13–52 см/с, на глубине 500 м – 2–34 см/с, на горизонте 750 м – 3–12 см/с и на 1000 м – 2–12 см/с. На отдельных станциях (№13, №17) установлено усиление скорости течений от поверхности до максимальной глубины измерения (500–1000 м). На станции №14 высокие значения скорости измерены и на поверхностном горизонте 10 м (до 42 см/с, медиана 31 см/с), и на горизонте 500 м (до 32 см/с, медиана 26 см/с).

Таблица 2

Осредненные значения параметров течений. Строки с данными на поверхностном горизонте выделены серым  
 Averaged values of the currents' parameters. Lines with the data for the surface layer are shadowed with the grey fill

| N станции | Глубина, м | Год  | Месяц | Кол-во измерений | Преобладающее направление течения, град | Повторяемость направления, % | Медиана модуля скорости, см/с | Третий квартиль модуля скорости, см/с |
|-----------|------------|------|-------|------------------|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 1         | 15         | 1975 | 8     | 621              | 194                                     | 95                           | 32                            | 42                                    |
|           | 500        | 1975 | 8     | 1308             | 240                                     | 85                           | 5                             | 8                                     |
|           | 750        | 1975 | 8     | 1287             | 243                                     | 71                           | 4                             | 4                                     |
|           | 1 000      | 1975 | 8     | 1308             | 235                                     | 24                           | 2                             | 2                                     |
| 2         | 15         | 1975 | 8     | 794              | 77                                      | 53                           | 41                            | 47                                    |
|           | 500        | 1975 | 8     | 1028             | 94                                      | 36                           | 3                             | 6                                     |
|           | 750        | 1975 | 8     | 1031             | 244                                     | 69                           | 7                             | 12                                    |
|           | 1 000      | 1975 | 8     | 1031             | 152                                     | 44                           | 4                             | 7                                     |
| 3         | 15         | 1975 | 8     | 292              | 240                                     | 65                           | 52                            | 63                                    |
|           | 1 000      | 1975 | 8     | 131              | 93                                      | 57                           | 2                             | 5                                     |
| 4         | 500        | 1960 | 10    | 439              | 93                                      | 31                           | <2*                           | 3                                     |
|           | 750        | 1960 | 10    | 442              | 166                                     | 60                           | <2*                           | 3                                     |
|           | 1000       | 1960 | 10    | 442              | 154                                     | 94                           | <2*                           | 3                                     |
| 5         | 10         | 1988 | 3     | 278              | 252                                     | 47                           | 24                            | 30                                    |
|           | 500        | 1988 | 3     | 283              | 221                                     | 49                           | 8                             | 9                                     |
|           | 1 000      | 1988 | 3     | 289              | 110                                     | 74                           | 12                            | 15                                    |
| 6         | 500        | 1960 | 10    | 552              | 240                                     | 77                           | <2*                           | 2                                     |
|           | 1 000      | 1960 | 10    | 570              | 251                                     | 83                           | <2*                           | 2                                     |
| 7         | 10         | 1988 | 3     | 139              | 272                                     | 65                           | 26                            | 31                                    |
|           | 500        | 1988 | 3     | 143              | 217                                     | 35                           | 4                             | 4                                     |
|           | 1 000      | 1988 | 3     | 143              | 95                                      | 85                           | 12                            | 14                                    |
| 8         | 500        | 1960 | 10    | 260              | 321                                     | 66                           | <2*                           | 3                                     |
|           | 750        | 1960 | 10    | 261              | 266                                     | 58                           | <2*                           | 3                                     |
|           | 1000       | 1960 | 10    | 183              | 285                                     | 45                           | <2*                           | 3                                     |
| 9         | 500        | 1988 | 3     | 250              | 239                                     | 74                           | 8                             | 9                                     |
|           | 1 000      | 1988 | 3     | 250              | 200                                     | 71                           | 8                             | 9                                     |
| 10        | 500        | 1988 | 3     | 229              | 251                                     | 76                           | 8                             | 9                                     |
|           | 1 000      | 1988 | 3     | 233              | 140                                     | 48                           | 9                             | 10                                    |
| 11        | 1 000      | 1975 | 8     | 282              | 205                                     | 49                           | 7                             | 8                                     |
| 12        | 10         | 1991 | 9     | 6208             | 292                                     | 29                           | 29                            | 37                                    |
|           | 500        | 1991 | 9     | 4827             | 255                                     | 27                           | 17                            | 27                                    |

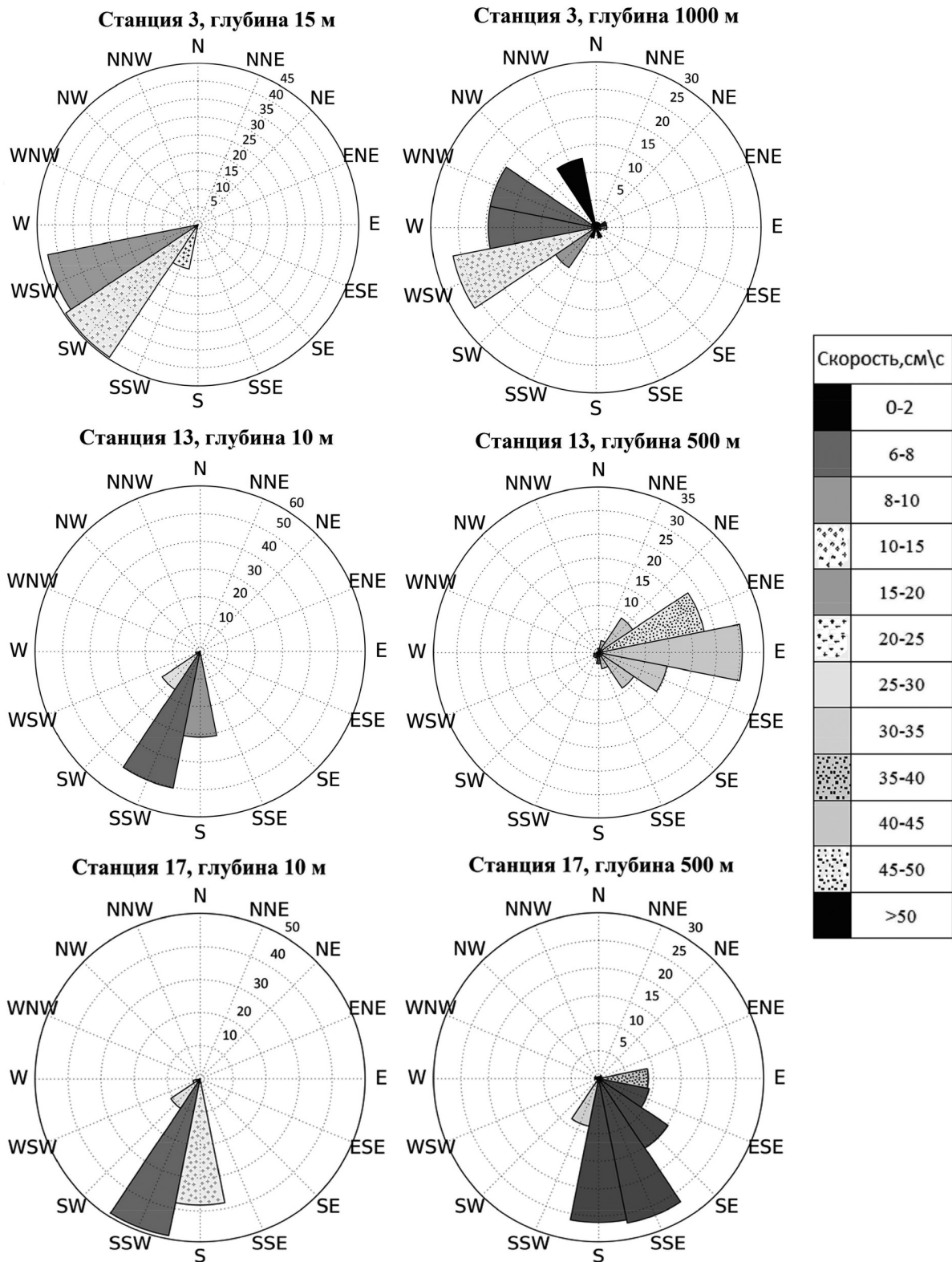


Статистические характеристики глубинных течений в Черном море по данным инструментальных измерений

Окончание таблицы 2

| № станции | Глубина, м | Год  | Месяц | Кол-во измерений | Преобладающее направление течения, град | Повторяемость направления, % | Медиана модуля скорости, см/с | Третий квартиль модуля скорости, см/с |
|-----------|------------|------|-------|------------------|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 13        | 10         | 1991 | 9     | 3665             | 89                                      | 30                           | 17                            | 30                                    |
|           | 500        | 1991 | 9     | 4839             | 260                                     | 67                           | 34                            | 45                                    |
| 14        | 10         | 1991 | 9     | 2121             | 256                                     | 71                           | 31                            | 42                                    |
|           | 500        | 1991 | 9     | 8780             | 252                                     | 64                           | 26                            | 32                                    |
| 15        | 5          | 1992 | 9     | 2758             | 299                                     | 34                           | 27                            | 37                                    |
|           | 500        | 1992 | 9     | 7016             | 278                                     | 38                           | 4                             | 8                                     |
| 16        | 5          | 1992 | 9     | 280              | 168                                     | 46                           | 13                            | 18                                    |
|           | 500        | 1992 | 9     | 7019             | 256                                     | 37                           | 3                             | 5                                     |
| 17        | 10         | 1991 | 9     | 7102             | 94                                      | 20                           | 15                            | 24                                    |
|           | 500        | 1991 | 9     | 4567             | 336                                     | 60                           | 27                            | 37                                    |
| 18        | 10         | 1988 | 3     | 277              | 268                                     | 85                           | 41                            | 56                                    |
|           | 500        | 1988 | 3     | 286              | 220                                     | 24                           | 8                             | 9                                     |
|           | 1 000      | 1988 | 3     | 286              | 181                                     | 23                           | 7                             | 10                                    |
| 19        | 500        | 2016 | 10    | 63               | 45                                      | 25                           | 3                             | 7                                     |
|           | 750        | 2016 | 10    | 11               | 45                                      | 81                           | 8                             | 9                                     |
| 20        | 500        | 2016 | 10    | 63               | 67.5                                    | 26                           | 4                             | 5                                     |
|           | 750        | 2016 | 10    | 28               | 112                                     | 75                           | 6                             | 7                                     |
| 21        | 500        | 2016 | 10    | 63               | 22.5                                    | 67                           | 3                             | 11                                    |
|           | 750        | 2016 | 10    | 29               | 22.5                                    | 82                           | 12                            | 13                                    |
| 22        | 10         | 2016 | 7     | 12               | 224                                     | 83                           | 19                            | 20                                    |
|           | 500        | 2016 | 7     | 40               | 113                                     | 18                           | 2                             | 2                                     |
|           | 750        | 2016 | 7     | 58               | 182                                     | 81                           | 3                             | 3                                     |
| 23        | 10         | 2016 | 7     | 12               | 200                                     | 50                           | 14                            | 15                                    |
|           | 500        | 2016 | 7     | 40               | 228                                     | 100                          | 8                             | 8                                     |
|           | 750        | 2016 | 7     | 50               | 222                                     | 52                           | 3                             | 4                                     |
| 24        | 10         | 2016 | 7     | 12               | 85                                      | 66                           | 19                            | 20                                    |
|           | 500        | 2016 | 7     | 40               | 336                                     | 90                           | 8                             | 9                                     |
|           | 750        | 2016 | 7     | 39               | 107                                     | 100                          | 4                             | 5                                     |
| 25        | 10         | 2016 | 7     | 11               | 207                                     | 100                          | 17                            | 21                                    |
|           | 500        | 2016 | 7     | 40               | 184                                     | 12                           | 2                             | 2                                     |
|           | 750        | 2016 | 7     | 50               | 191                                     | 100                          | 9                             | 10                                    |

Примечание. Звездочкой (\*) обозначены значения, обусловленные количеством измерений ниже порога чувствительности прибора.



**Рис. 2.** Диаграммы направлений и модуля скорости течений. На радиальной оси отложен процент повторяемости направления течений на горизонте (для третьего квартиля выборки). Заливкой обозначены диапазоны величины скорости течений. Расположение станций (на рис. 1 обведены кружками): №3 – ЮЗ часть моря, р-н болгарского побережья; №13, №17 – к югу от Крыма.

**Fig. 2.** Direction and amplitude rose-charts for the current velocities. Radial axis corresponds to the percentage of current direction frequency at certain depth (for a third quartile). Grey fills are for the ranges of current velocity. Locations of the stations are shown at the fig. 1 as the circles. #3 is at south-western part of the sea, close to Bulgarian coast; #13 and #17 south of the Crimean Peninsula.



Для каждой станции и каждого горизонта были также построены и проанализированы диаграммы направлений и модуля скорости течений. На рис. 2 показано поведение течений на трех станциях: на станции №3 происходит поворот вектора скорости с глубиной и усиление течений на горизонте 1000 м, а на станциях №13 и станции №17 направление вектора скорости с глубиной сохраняется, но происходит увеличение модуля скорости на глубине 500 м.

Установлено также, что направление циркуляции с глубиной может оставаться постоянным, изменяться на противоположное (станция №16), либо не иметь стабильной ориентации со временем (станция №8). На станции №1 зафиксировано постепенное ослабление течений с удалением от поверхности и их поворот на глубине 1000 м.

## 6. Выводы

В работе показано, что направление глубоководных течений зачастую отлично от направления поверхностной циркуляции, что подтверждает существующие теоретические представления о бароклинности циркуляции в Черном море. Величины не только мгновенных, но и осредненных скоростей – даже с учетом фильтрации экстремальных значений – оказываются весьма значительными: на 3 станциях из 25 медиана скорости превышает 25 см/с, еще на 4 – от 12 см/с до 17 см/с. На отдельных станциях установлено усиление скорости течений от поверхности до максимальной глубины измерения (500–1000 м). Направление циркуляции с глубиной на некоторых станциях изменяется на противоположное, в то же время, на других – оно постоянно по глубине. Сдвиг вектора скорости течений по вертикали от поверхности до рассматриваемых горизонтов может быть значительным.

Таким образом, статистическая обработка информации Базы течений БОД МГИ позволила включить в исследование глубоководной циркуляции Черного моря массив измерений скорости течений на 25 океанографических станциях и нескольких стандартных горизонтах. В силу того, что исходные данные относились к разным рейсам и расстояние между станциями велико, построить подробную карту глубоководных течений для всего бассейна только на их основе не представляется возможным. Однако данные о глубинных течениях БОД МГИ дают возможность оценить значения скоростей в субпикноклине и изменчивость вертикальной структуры течений.

*Авторы благодарят за содействие и полезное обсуждение материала сотрудников Морского гидрофизического института РАН Белокопытова В.Н., Морозова А.Н., Забурдаева В.И. Исследование выполнено по темам государственного задания 0827-2019-0004 (Иванов В.А., Пластун Т.В., Багаев А.В) и 0827-2019-0002 (Маркова Н.В.).*

## Литература

1. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 2011. 212 с.
2. Лукьянова А.Н., Багаев А.В., Пластун Т.В., Маркова Н.В., Залесный В.Б., Иванов В.А. Исследование глубоководной циркуляции Черного моря по результатам численного моделирования и натурным данным: Численные эксперименты на основе модели ИВМ РАН и сравнение с данными Банка данных МГИ РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь: МГИ РАН, 2016. Выпуск 3. С. 9–14.
3. Демьяшев С.Г., Дымова О.А., Маркова Н.В., Пиотух В.Б. Численные эксперименты по реконструкции глубинных течений в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 2. С. 38–52.
4. Архипкин В.С., Косарев А.Н., Гиппиус Ф.Н., Мигали Д.И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солености и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2013. № 5. С. 33–44.
5. Маркова Н.В., Багаев А.В. Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буйев-профилемеров Argo // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 26–38.
6. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия море СССР. Том IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 430 с.
7. Богуславский С.Г., Букатов А.Е., Козаков С.И. Особенности поля скорости и вертикального обмена в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2001. С. 62–71.
8. Латун В.С. Структура поля плотности и циркуляции вод в глубоком черноморском антициклоне // Гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 1992. С. 92–94.
9. Еремеев В.Н., Кушнин В.М. Слоистая структура течений и вертикальный обмен в Черном море // Океанология. 1996. Т. 36, № 1. С. 13–19.

10. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53, № 2. С. 1—10.
11. Пластун Т.В. База данных течений банка данных МГИ НАНУ // Современное состояние экосистем Черного и Азовского. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2005. С. 153—154.
12. Смирнов Г.В. Океанологическое приборостроение // *Вестник Российской академии наук*. 1997. Т. 67, № 12. С. 1124—1128.
13. Гайский В.А., Гайский П.В. Инструментальные погрешности распределенных термопрофилемеров // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ РАН, 2016. № 4 (24). С. 20—26.
14. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (АДЦП) в условиях Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 4. С. 31—48.
15. Sutherland D.A., MacCready P., Banas N.S., Smedstad L.S. A model study of the Salish Sea estuarine circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2011. V. 41. P. 1125—1143.

## References

1. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. The Black Sea oceanography. *Sevastopol, MGI NANU*, 2011. 212 p. (in Russian).
2. Lukyanova A.N., Bagaev A.V., Plastun T.V., Markova N.V., Zalesnyj V.B., Ivanov V.A. The Black Sea deep-water circulation research by results of numerical modeling and in-situ data: INMRAS model numerical experiment. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of the Sea. Sevastopol', MGI RAN*, 2016, 3, 9—14 (in Russian).
3. Demyshev S.G., Dymova O.A., Markova N.V., Piotux V.B. Numerical experiments on modeling of the Black Sea deep currents. *Physical Oceanography*. 2016, 2, 38—45. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-2-34-45
4. Arkhipkin V.S., Kosarev A.N., Gippius F.N., Migali D.I. Seasonal variations of climatic fields of temperature, salinity and water circulation in the Black and Caspian seas. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 2013. N 5, 33—44 (in Russian).
5. Markova N.V., Bagaev A.V. Velocities of the Black Sea deep currents estimated from the profiling drifters Argo data. *Physical Oceanography*. 2016, 3, 23—35. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-3-23-35
6. The project «Seas of the USSR». Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR sea. Volume IV. Black Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. *St.-Petersburg, Gidrometeoizdat*. 1991. 430 p. (in Russian).
7. Boguslavskij S.G., Bukatov A.E., Kozakov S.I. Features of the velocity field and vertical exchange in the Black Sea. *Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources. Sevastopol', MGI NANU*, 2001, 62—71 (in Russian).
8. Latun V.S. Structure of the field density and water circulation in the deep Black Sea anticyclone. *Hydrophysical and Hydrochemical Studies of the Black Sea. Sevastopol', MGI NANU*, 1992, 92—94 (in Russian).
9. Ereemeev V.N., Kushnir V.M. Layered structure of currents and vertical exchange in the Black Sea. *Oceanology*. 1996, 36, 1, 13—19 (in Russian).
10. Ostrovskij A.G., Zatsepin A.G., Soloviev V.A., Tsibulsky A.L., Shvoev D.A. Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station. *Oceanology*. 2013, 53, 2, 233—242. DOI: 10.1134/S0001437013020124
11. Plastun T.V. Database of currents from databank MHI NASU. *Current State of Black and Azov Ecosystems. Sevastopol', NPCz "E'KOSI-Gidrofizika"*, 2005, 153—154 (in Russian).
12. Smirnov G.V. Oceanographic Instrumentation. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*. 1997, 67, 12, 1124—1128 (in Russian).
13. Gajskij V.A., Gajskij P.V. Instrumental errors of distributed thermo-profilers. *Environmental Monitoring Systems*. 2016, 4 (24), 20—26 (in Russian).
14. Morozov A.N., Lemeshko E.M. Methodical aspects of the application of acoustic doppler current profilers in the Black Sea. *Physical Oceanography*. 2006, 16, 4, 216—233.
15. Sutherland D.A., MacCready P., Banas N.S., Smedstad L.S. A model study of the Salish Sea estuarine circulation. *Journal of Physical Oceanography*. 2011, 41, 1125—1143.