

А.Н.Морозов, В.А.Иванов, С.А.Шутов, В.В.Зима,
Д.В.Дерюшкин, Е.М.Лемешко

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ У ГЕРАКЛЕЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО ДАННЫМ ADCP-НАБЛЮДЕНИЙ 2015 Г.

Обсуждаются результаты ADCP-измерений скорости течений, выполненных в прибрежных и шельфовых водах Гераклейского п-ова летом и осенью 2015 г. Полученные в районе ближнего шельфа данные выявляют относительно небольшие значения скорости средних течений, не более 5 см/с, и высокий уровень вертикальной изменчивости на масштабах более 20 м. Отношение бароклинной составляющей кинетической энергии к энергии среднего потока составляет около 1,3. Характерные признаки вертикального распределения течений сохраняются на горизонтальных масштабах около 5 км. Усредненные по ансамблю станций вертикальные сдвиги скорости течений показывают монотонное убывание с глубиной. Оценка коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, выполненная на основе параметризации G89, показывает наличие хорошо выраженного минимума в слое сезонного пикноклина, за его пределами значение параметра возрастает более чем на порядок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *пространственная структура течений, вертикальные сдвиги течений, вертикальное перемешивание, ADCP.*

Исследование динамики прибрежных вод остается актуальным вопросом на протяжении многих десятилетий [1 – 3], что вызвано возрастанием антропогенной нагрузки на морскую экосистему вследствие ведения хозяйственной деятельности у береговой черты. Течения являются основным фактором обеспечивающим способность прибрежных вод к самоочищению, и поэтому их исследование в природных условиях является необходимым звеном при решении разного рода экологических задач. Циркуляция прибрежных вод определяется ветровым воздействием на поверхность моря, рельефом дна, орографией береговой черты и влиянием процессов, происходящих в прилегающих глубоководных районах моря [2]. В прибрежной зоне моря наблюдается большое многообразие динамических процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов [4] от субмезомасштабных вихрей [5] до короткопериодных внутренних волн [6]. Использование современных средств измерения скорости течений, таких как акустические доплеровские профилометры течений (ADCP), позволяет на качественно новом уровне изучать структурные особенности пространственно-временной изменчивости поля скорости течений и закономерности мелкомасштабной динамики [7, 8].

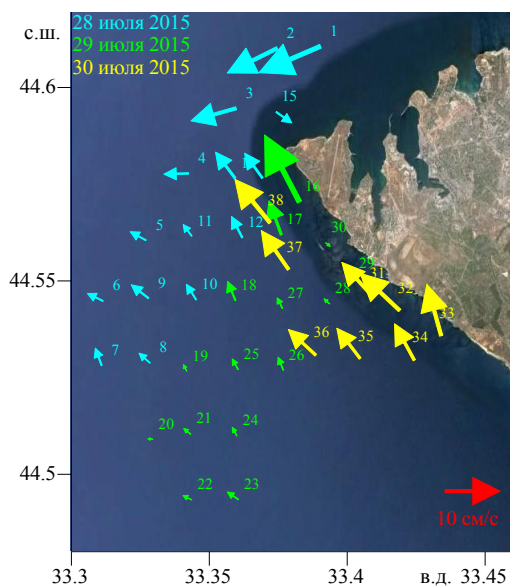
Данные. В статье обсуждаются результаты измерений, выполненных в рейсах судна «Бирюза», проходивших в июле и сентябре 2015 г., в рамках проекта «Диагностика». В соответствии с целями проекта исследования проводились в прибрежных водах и на ближнем шельфе южнее Гераклей-

© А.Н.Морозов, В.А.Иванов, С.А.Шутов, В.В.Зима,
Д.В.Дерюшкин, Е.М.Лемешко, 2016

ского п-ова, в районе основного выпуска сточных вод г.Севастополя.

Приборы. Для выполнения *CTD*-зондирований в экспедициях использовался автономный гидрологический прибор ГАП-16, разработка МГИ РАН. Для измерения течений использовался акустический доплеровский профилометр течений (*ADCP*) *WHM300* (*Work Horse Monitor*, рабочая частота 300 кГц) производства *RDI* США. Измерения выполнялись при нахождении судна в дрейфе. Прибор вывешивался на тросе с кормовой части судна, так чтобы его преобразователи находились на глубине около 0,6 м. Время проведения измерений на станции составляло 15 – 30 мин. Параметры работы *ADCP* устанавливались следующие: дискретность по глубине 4 м, по времени 1 с, включена опция *LADCP*. Верхняя граница слоя измерений составила в среднем 7 м от поверхности моря, нижняя – 8 м от дна. Обработка данных выполнялась с учетом влияния корпуса судна на показания магнитного компаса прибора, на основе сопоставления данных *GPS* и опции отслеживания дна. Коррекция показаний магнитного компаса прибора, находящегося вблизи корпуса судна, является необходимой процедурой обработки данных. В рассматриваемых экспедициях угол коррекции изменялся в диапазоне $\pm 40^\circ$.

Результаты. На рис.1 в векторном виде приведено горизонтальное распределение осредненной по глубине скорости течений, полученное на основе данных собранных 28 – 30 июля 2015 г. Числа, маркирующие стрелки, означают номера станций. Ст.1 – 15 выполнялись 28 июля, ст.16 – 30 29 июля, ст.31 – 38 30 июля. В южной части полигона на глубинах моря более 70 м средние скорости течений не превышают 5 см/с. Доминирует западная, северо-западная направленность средних потоков. В прибрежных водах средние скорости течений возрастают до 10 см/с и более, доминирует вдольбереговое направление. Приведенное горизонтальное распределение соответствует существующим представлениям о течениях в данном районе



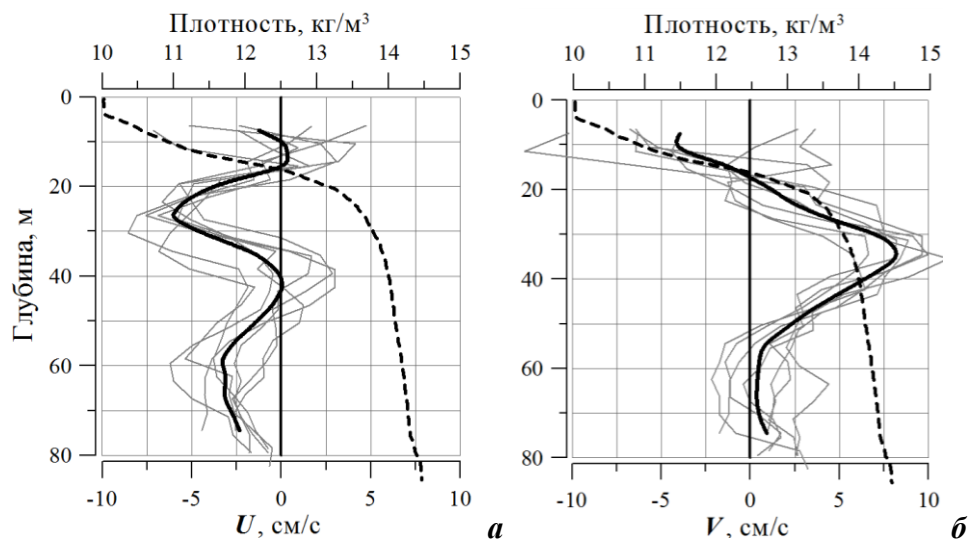
Р и с . 1 . Средние скорости течений.

[9]. Направленность течений определяется влиянием Основного Черноморского течения, проходящим вдоль свала глубин в 20 км южнее полигона. Относительное усиление течений в прибрежных районах определяется уменьшением глубины моря и действием силы Кориолиса. Отметим, что измерения выполнялись в течение трех дней, при этом полученные данные указывают на относительное постоянство распределения течений. Ветер в экспедициях не измерялся, но косвенные расчеты по скорости дрейфа судна на станциях показывают, что в первый день экспедиции ветер имел доминирующее восточное направ-

ление, во второй – юго-восточное и в третий – северо-западное. По полученным данным не обнаружено соответствия между течениями на верхнем горизонте измерений (7 м) и скоростью ветра. В прибрежных водах отсутствие устойчивой связи между течениями и ветром наблюдается достаточно часто [1] и подтверждает доминирование влияния на динамику прибрежных вод процессов, происходящих в прилегающей глубоководной части моря [2].

Обсуждение. ADCP обеспечивает измерение профилей восточной (U) и северной (V) компонент скорости, что позволяет исследовать мелкомасштабные черты вертикальной структуры течений. На рис.2, *а* приведены профили восточной компоненты скорости течений, полученные на ст.5 – 11 (светлые линии). Осредненный по ансамблю станций профиль представлен сплошной толстой черной линией. На рис.2, *б* приведены аналогичные профили северной компоненты скорости течений. Черная пунктирная линия представляет типовой профиль условной плотности.

Вертикальная изменчивость течений характеризуется масштабами более 20 м по глубине. Наблюдаемая вертикальная структура может формироваться как вследствие адаптации поля скорости течений под изменяющиеся внешние силы, так и в результате наличия внутренних волн. Данные, полученные 28 (ст.5 – 11, 10:02 – 13:25 UTC) и 29 июля (ст.19 – 21 и 24 – 26, 08:04 – 11:59 UTC) в районе ближнего шельфа, показывают, что характерные признаки вертикальной структуры поля скорости течений сохраняются на горизонтальных масштабах около 5 км. Наиболее близкими горизонтальными размерами обладают около-инерционные внутренние волны, характерная длина которых составляет $O(10 \text{ км})$ [10]. Полученные данные не позволяют сделать однозначный вывод о природе наблюдаемой вертикальной структуры течений, поскольку инерционный период в районе наблюдений составляет около 17 ч и для полной идентификации явления требуется несколько суток непрерывных измерений [11].



Р и с . 2 . Профили восточной (*а*) и северной (*б*) компонент скорости течения (светлые линии). Черная линия – типовой профиль условной плотности.

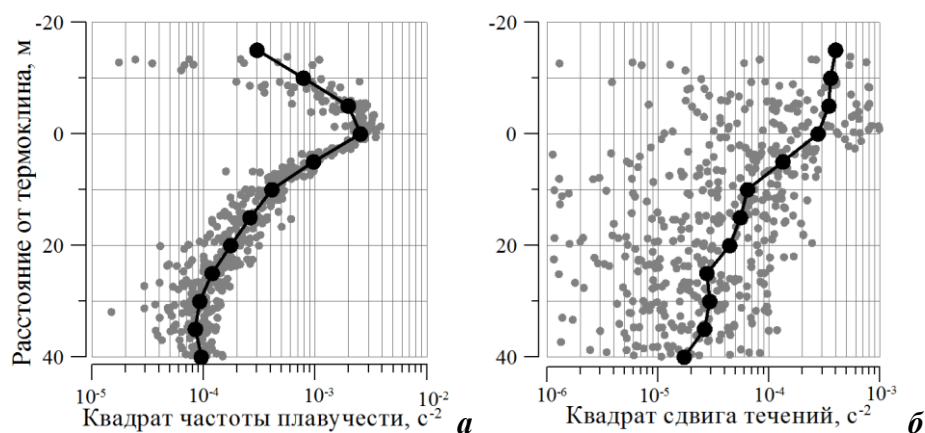
Отношение осредненной по ансамблю станций бароклинной энергии ($EK_{Baroclinic}$) к баротропной ($EK_{Barotropic}$), определенное по соотношению

$$\frac{\langle EK_{Baroclinic} \rangle}{\langle EK_{Barotropic} \rangle} = \frac{\left\langle \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} \left((U(z) - \bar{U})^2 + (V(z) - \bar{V})^2 \right) dz \right\rangle}{\langle \bar{U}^2 + \bar{V}^2 \rangle},$$

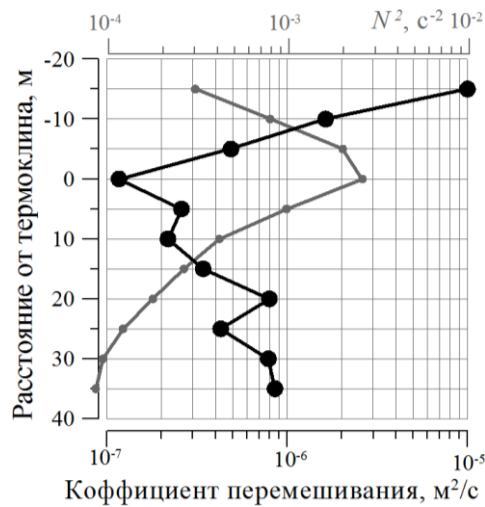
где $U(z)$, $V(z)$ – восточная и северная компоненты скорости течений, \bar{U} , \bar{V} – их средние по глубине значения, h_1 , h_2 – верхняя и нижняя граница слоя измерения соответственно, $\langle \dots \rangle$ – оператор осреднения по ансамблю станций, выполненных на глубине моря более 70 м, составляет около 1,3 ($1,7 \cdot 10^{-3}$ и $1,3 \cdot 10^{-3}$ Дж/кг соответственно). Такое соотношение энергий указывает на то, что наблюдаемая вертикальная изменчивость скорости не может быть вызвана взаимодействием среднего течения с неровностями дна. Наиболее вероятной причиной вертикальной изменчивости течений является воздействие внешних сил со стороны глубоководной части или на поверхность моря. Разложение профилей скорости течений на ортогональные моды, полученные на основе реальных профилей условной плотности, аналогично работе [11], не привело к удовлетворительным результатам.

Вертикальные сдвиги скорости течений представляются важной характеристикой динамики вод. В настоящее время известно большое количество моделей связывающих соотношение сдвигов течений и плотностной стратификации с параметрами вертикального перемешивания. На рис.3, а в полупологарифмическом масштабе приведены профили квадрата частоты плавучести ($N^2 = g/\rho \cdot \Delta\rho/\Delta h$) относительно глубины залегания сезонного термоклина (светлые кружочки – исходные данные, полученные на глубине моря более 70 м, черная толстая линия – осредненные по 5 м интервалам глубины значения). На рис.3, б приведены аналогичные профили квадрата сдвига скорости ($Sh^2 = (\Delta U/\Delta h)^2 + (\Delta V/\Delta h)^2$).

Средние сдвиги течений монотонно убывают с глубиной и не выявляют особенностей в слое сезонного пикноклина (частота плавучести около 30 цикл/ч). Физически понятно, что плотностная стратификация ограничи-



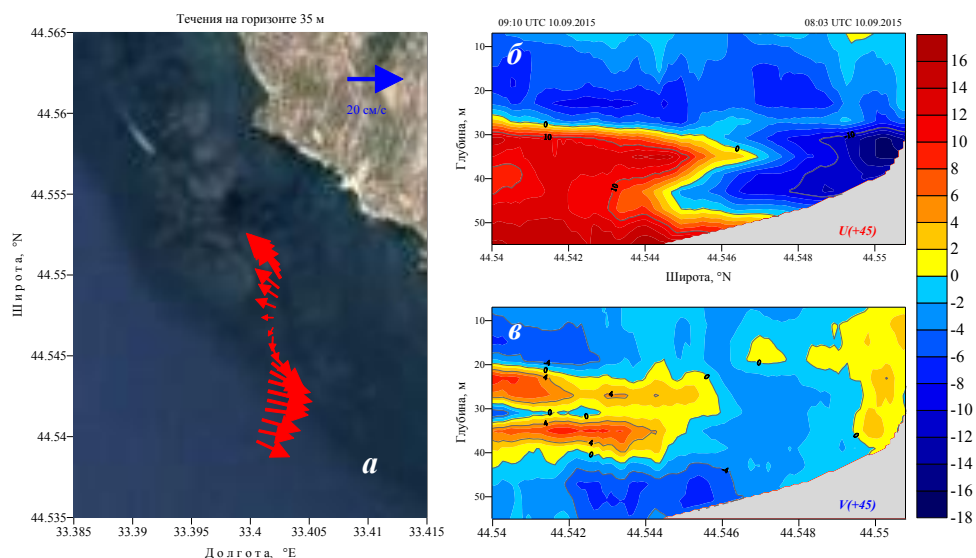
Р и с . 3 . Профили квадрата частоты плавучести (а); квадрата сдвига течений (б).



Р и с . 4 . Профили квадрата частоты плавучести (светлая линия) и коэффициента вертикального перемешивания (жирная линия).

вает вертикальный обмен через сезонный пикноклин. С целью получить количественные оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в слое сезонного пикноклина была использована параметризация $G89$ [12], в том виде как она представлена в [13] $K_v = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \langle Sh^2 \rangle / \langle N^2 \rangle$. На рис.4 приведены профили квадрата частоты плавучести (светлая серая линия) и коэффициента

вертикального турбулентного обмена (жирная линия). В центре сезонного пикноклина наблюдается хорошо выраженный минимум коэффициента вертикального перемешивания, в 15 м над пикноклином его значения на два порядка больше, в 30 м под пикноклином также наблюдается увеличение коэффициента почти на порядок. Таким образом, оценка коэффициента вертикальной диффузии, полученная на основе параметризации $G89$, подтверждает интуитивные предположения об ослаблении вертикального обмена в слое сезонного пикноклина. Отметим, что в 15 м над и под сезонным пикноклином, при одинаковых средних значениях частоты плавучести, коэффициенты вертикального обмена отличаются более чем на по-



Р и с . 5 . Дрейфовый разрез, положение разреза и течения на горизонте 35 м (а), распределение вдольбереговой (б) и нормальной берегу (в) составляющих скорости течений.

рядок, что вызвано различием природы динамических процессов, происходящих в верхнем и нижнем слоях моря.

На рис.5 приведен пример результатов *ADCP*-измерений с борта судна находящегося в дрейфе. Измерения выполнялись 10 сентября 2015 г. Судно дрейфовало в течении 1 часа в южном направлении со скоростью 30 см/с, протяженность полученного разреза около 1 км. В нижнем слое наблюдается область высоких горизонтальных градиентов вдольбереговой составляющей скорости течений на масштабах около 200 м с характерным значением числа Кибеля-Россби около 5. Такой режим измерений позволяет оценить характерные масштабы горизонтальной изменчивости поля скорости течений, знание которых необходимо для выбора шага сетки при численном моделировании и при планировании экспедиционных работ в прибрежной и шельфовой зонах моря.

Заключение. Проведенные измерения показали высокий уровень пространственной изменчивости поля скорости течений в районе исследований и позволили определить ее характерные масштабы. Оценка коэффициента вертикального перемешивания носит предварительный характер и может быть уточнена по данным микромасштабных измерений, которые также проводились в экспедициях.

Исследования проведены в МГИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зац В.И., Лукьяненко О.Я., Яцевич Г.В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма.– Л.: Гидрометеоздат, 1966.– 120 с.
2. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма).– Киев: Наукова думка, 1992.– 244 с.
3. *Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В.* Особенности динамики течений у южного берега Крыма и перспективы использования информационной технологии полигонных исследований // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– вып.28.– С.42-50.
4. *Moist J.N., Nash J.D., Klymak J.M.* Small-Scale Processes in the Coastal Ocean // *Oceanography*.– 2008.– v.21, № 4.– P.22-33.
5. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*.– 2011.– т.51, № 4.– С.592-605.
6. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Тридцать лет исследования внутренних волн с океанографической платформы морского гидрофизического института НАН Украины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.21.– С.146-156.

7. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М.* Изменчивость течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология.*– 2012.– т.52, № 5.– С.629-642.
8. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал.*– 2012.– т.58, № 5.– С.639-648.
9. *Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга Е.Е.* Влияние антропогенных загрязнителей и путей их перемещения на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 2001.– № 5.– С.41-55.
10. *Kunze E.* Near-Inertial Wave Propagation in Geostrophic Shear // *J. Phys. Oceanogr.* – 1985.– 15.– P.544-565.
11. *MacKinnon J.A., Gregg M.C.* Near-Inertial Waves on the New England Shelf: The Role of Evolving Stratification, Turbulent Dissipation, and Bottom Drag // *J. Geophys. Res.*– 2005.– 35.– P.2408-2424.
12. *Gregg M.C.* Scaling turbulent dissipation in the thermocline // *J. Geophys. Res.*– 1989.– 94.– P.9686-9698.
13. *Cisewski B., Strass V.H., Prandke H.* Upper-ocean vertical mixing in the Antarctic Polar Front Zone // *Deep-Sea Res.*– 2005.– 52, Issues 9-10.– P.1087-1108.

Материал поступил в редакцию 01.12.2015 г.

A.N.Morozov, V.A.Ivanov, S.A.Shutov,
V.V.Zima, D.V.Deryushkin, E.M.Lemeshko

SPATIAL STRUCTURE OF CURRENTS NEAR GERAKLEYSKY PENINSULA ACCORDING ADCP-OBSERVATIONS IN 2015

The results of ADCP-measurements of current velocity in coastal and shelf waters of the Gerakleysky Peninsula in summer and autumn 2015 are discussed. The data obtained near shelf are revealed the relatively small velocity values of mean currents, no more than 5 cm/c, and high level of vertical variability on scales more 20 m. Ratio of baroclinic component of the kinetic energy to the mean flux energy amounts is about 1,3. The characteristic features of vertical current distribution are saved till about 5 km scales horizontally. Vertical shears of current velocity averaged by the cast ensemble show monotonic decreasing with the depth. Vertical turbulence mixing coefficient evaluation fulfilled on the base of G89 parameterization demonstrates the presence of good evidence of minimum in the seasonal pycnocline layer; the parameter value increases more than an order of magnitude beyond of it.

KEYWORDS: spatial structure of currents, vertical shift of currents, vertical mixing, ADCP.